



Institute of Pure and Applied Sciences

International Journal of Advances
in Engineering and Pure Sciences

MARMARA JEPS



In the name of Rectorate of Marmara University, Rector

Prof. Dr. Mehmet Emin OKUR

In the name of Directory of Institute of Pure and Applied Sciences, Director

Prof. Dr. Bülent MERTOĞLU

Editor-in-Chief

Assoc. Prof. Dr. Beste TURANLI

Associate Editors

Prof. Dr. Bülent EKİCİ, Assoc. Prof. Dr. Ceyhan BEREKETOĞLU,

Assist. Prof. Dr. Merve ER

Editorial Boards

Assoc. Prof. Dr. Ali İmran AYTEN
Mechanical Engineering

Assist. Prof. Dr. Berçem KIRAN YILDIRIM,
Chemical Engineering

Prof. Dr. Bülent Oktay AKKOYUNLU
Physics

Assist. Prof. Dr. Mustafa Alparslan ZEHİR,
Electrical and Electronics Engineering

Assoc. Prof. Dr. Esra ERKEN,
Environmental Engineering

Assoc. Prof. Dr. Sefa Anıl SEZER,
Mathematics

Assist. Prof. Dr. Batuhan ÖZKAN,
Statistics

Prof. Dr. Mehmet Emin AYDIN,
Industrial Engineering

Assist. Prof. Dr. Buğrayhan BİÇKİCİ,
Civil Engineering

Prof. Dr. Mustafa Taylan ŞENGÜL,
Mathematics

Assist. Prof. Dr. Sanem ARSLAN YILMAZ,
Computer Science and Engineering

Assoc. Prof. Dr. Sümeyra GÜRKÖK,
Biology

Assoc. Prof. Dr. Ali DOĞRUL,
Fluid Dynamics

Assoc. Prof. Dr. Duygu AKYÜZ ÇUBUKÇU,
Electrochemical Technologies

Prof. Dr. Hayriye KORKMAZ
Electrical Engineering

Assoc. Prof. Dr. Hüseyin Avni ES,
Industrial Engineering

Assist. Prof. Dr. Gözde BAKİOĞLU DOĞANYILMAZ,
Architecture and Civil Engineering

Assist. Prof. Dr. Merve ER,
Industrial Engineering

Publishing Editor

Oğuz Eren SÜSLÜ

Correspondance and Communication

Beste TURANLI

Bioengineering, Faculty of Engineering,
M2-231 Maltepe /İSTANBUL

Tel: +90 216 777 0 777

beste.turanli@marmara.edu.tr

Publisher

Marmara University Press
Göztepe Kampusu 34722
Kadıkoy/İSTANBUL

Tel: +90 216 777 1408

yayinevi@marmara.edu.tr

Marmara Üniversitesi Rektörlüğü adına, Rektör
Prof. Dr. Mehmet Emin OKUR
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürlüğü adına, Müdür
Prof. Dr. Bülent MERTOĞLU

Editör

Doç. Dr. Beste TURANLI

Yardımcı Editörler

Prof. Dr. Bülent EKİCİ, Doç. Dr. Ceyhan BEREKETOĞLU

Editörler Kurulu

Doç. Dr. Ali İmran AYTEN
Makine Mühendisliği

Dr. Öğr. Üyesi Berçem KIRAN YILDIRIM,
Kimya Mühendisliği

Prof. Dr. Bülent Oktay AKKOYUNLU
Fizik

Dr. Öğr. Üyesi Mustafa Alparslan ZEHİR,
Elektrik ve Elektronik Mühendisliği

Doç. Dr. Esra ERKEN,
Çevre Mühendisliği

Doç. Dr. Sefa Anıl SEZER,
Matematik

Dr. Öğr. Üyesi Batuhan ÖZKAN,
İstatistik

Prof. Dr. Mehmet Emin AYDIN,
Endüstri Mühendisliği

Dr. Öğr. Üyesi Buğrayhan BİÇKİCİ,
İnşaat Mühendisliği

Prof. Dr. Mustafa Taylan ŞENGÜL,
Matematik

Dr. Öğr. Üyesi Sanem ARSLAN YILMAZ,
Bilgisayar Bilimleri ve Mühendisliği

Doç. Dr. Sümeyra GÜRKÖK,
Biyoloji

Doç. Dr. Ali DOĞRUL,
Akışkanlar Dinamiği

Doç. Dr. Duygu AKYÜZ ÇUBUKÇU,
Elektrokimyasal Teknolojiler

Prof. Dr. Hayriye KORKMAZ
Elektrik Mühendisliği

Doç. Dr. Hüseyin Avni ES,
Endüstri Mühendisliği

Dr. Öğr. Üyesi Gözde BAKİOĞLU DOĞANYILMAZ,
Mimarlık ve İnşaat Mühendisliği

Dr. Öğr. Üyesi Merve ER,
Endüstri Mühendisliği

Yayın Editörü
Oğuz Eren SÜSLÜ

Yazışmalar ve İletişim

Beste TURANLI
Biyomühendislik,
Mühendislik Fakültesi, M2-
231 Maltepe/İSTANBUL
Tel: +90 216 777 0 777
beste.turanli@marmara.edu.tr

Yayıncı

Marmara Üniversitesi Yayınevi
Göztepe Kampusu 34722
Kadıköy/İSTANBUL
Tel: +90 216 777 1408
yayinevi@marmara.edu.tr

İÇİNDEKİLER/ CONTENTS

1. Production of TPU-reinforced 3D printing PLA filaments: Structural, Phase Transition and Crystallinity Properties
Uğur SOYKAN
Sayfa/Page: 224 - 230
2. Doğrusal Olmayan Regresyondaki Kendinden Eşik Değerli Otoregresif Hatalar Sorununa Uyarlamalı Bir Yaklaşım
Barış AŞIKGİL
Sayfa/Page: 231 - 242
3. Investigating the Relationship Between Air Quality, Meteorological Parameters, and the Transmission Dynamics of COVID-19: A Case Study for Türkiye
Ayşenur KOCAMAZ, Yekta AKKUŞ, Şeyma BABAYİĞİT, Nur Hanife ORAK
Sayfa/Page: 243 - 251
4. Dynamic Network DEA Approach for Evaluating Hospital Performance in the Healthcare Sector
Eda KOÇAK, Fazıl GÖKGÖZ
Sayfa/Page: 252 - 262
5. Fiber Halka Döngü Sönümlleme Spektroskopisi Tekniğinin Eğitimsel Tanımı: Çalışma Prensibi ve Uygulama Alanları
Burak Malik KAYA
Sayfa/Page: 263 - 271
6. Intrusion Detection on Switchports with LSTM as a Regression Problem
İlhan Fırat KILINÇER
Sayfa/Page: 272 - 280
7. Fırçasız Doğru Akım Motorunda Mıknatıs Türü ve Oluk Sayısı Değişiminin Tork Dalgalanması Üzerindeki Etkisinin İncelenmesi
Öztürk TOSUN, Necibe Füsun OYMAN SERTELLER, Uğur DEMİR, Bekir GEÇER
Sayfa/Page: 281 - 292
8. Evaluation of biomaterial containing alginate and egg-shell membrane incorporated with β -tricalcium phosphate for treatment of bone defects
Semra UNAL
Sayfa/Page: 293 - 298
9. Bioactive Hydrofiber Dressings with Quince (Cydonia oblonga) Seed Mucilage for Cutaneous Tissue Repair
Merve ERGİNER
Sayfa/Page: 299 - 307

İÇİNDEKİLER/ CONTENTS

10. Green Supplier Selection in Food Industry: Fuzzy AHP Based Hybrid GRA and Axiomatic Design Approach
Yasin KIRELLİ, Ecmel Şeza ARDALI, Tijen Över ÖZÇELİK
Sayfa/Page: 308 - 316

11. Savunma Sektöründe Çok Kriterli Karar Verme Yöntemleri ile Tedarikçi Seçimi
İpek Damla AKPINAR, Meltem HASKALFALI, Barış KEÇECİ
Sayfa/Page: 317 – 339

12. Entropi Tabanlı Gri İlişkisel Analiz Modeliyle En Uygun İHA Modelinin Tarım Faaliyetleri İçin Değerlendirilmesi
Beyza ÇAYIR ERVURAL
Sayfa/Page: 340 – 355

13. Implementation of the System Ensuring Energy Continuity of Metro Lines in Disaster and Emergency Situations in Matlab Environment
Osman ARMAĞAN, Ercüment KARAKAŞ, Abdulhakim KARAKAYA
Sayfa/Page: 356 – 368

14. Havadan Suyu Isı Pompasının Farklı Ortam Şartlarında Enerji Verimliliği Açısından Analizi
İsmail ALTUN, Ayhan ONAT
Sayfa/Page: 369 – 377

15. A Design of Experiments-Based Investigation of Solid Lubricants in Heavy Vehicle Brake Pads
Neslihan DİKBAŞ SARIALTIN, Recep ÖNLER
Sayfa/Page: 378 – 388

16. Metanol-Dizel Çift Yakıtlı Reaktivite Kontrollü Sıkıştırma ile Ateşlemeli (RCCI) Bir Motorda Farklı Yüklerin Yanma Karakteristiklerine Etkisinin Deneysel İncelenmesi
Mustafa TEMÜR, Cenk SAYIN
Sayfa/Page: 389 – 409

17. Türkiye’deki Farklı Şehirlerde Kurulan Güneş Enerjisi Sistemlerinde Üretim Verimlerinin Analizi
Adem YURTSEVER, Sinan ATEŞ, Cemal ÖZTÜRK, Ayşe Elif ATEŞ
Sayfa/Page: 410 – 417

18. Maprotiline as a Repositioned Drug Candidate for the Treatment of Non-Functioning Pituitary Neuroendocrine Tumors: a Network-Based Omics-Oriented Approach
Büşra AYDIN
Sayfa/Page: 418 – 428

Production of TPU-reinforced 3D printing PLA filaments: Structural, Phase Transition and Crystallinity Properties

Uğur SOYKAN^{1,2} 

¹Yenicaga Yasar Celik Vocational School, Bolu Abant Izzet Baysal University, Bolu, 14300, Türkiye

²Nuclear Radiation Detectors Research and Development Center, 14280, Bolu, Türkiye

Abstract

Poly(lactic acid) (PLA) has emerged as a vital biodegradable polymer due to its significant potential to reduce environmental pollution and dependence on fossil-based plastics and PLA with improved properties were required in material science. Thus, the main purpose of this study was to examine the influence of both polyethylene-based colorant and thermoplastic polyurethane (TPU) addition on the crucial features of PLA filaments. The neat and reinforced filaments were fabricated by extrusion method with five channels. The structural characterization, thermal behavior and crystallinity properties of the produced filaments were investigated meticulously by comparing the commercial PLA (eSUN). The obtained findings showed that the percentage of the additive substantially affected the main characteristic behavior of PLA filaments, thus, the optimum production level of the additives was tried to determine for the filament samples. ATR-FTIR analysis depicted that all the filament showed characteristic absorption bands and the structural character of the filaments did not affected by the additives. Moreover, TPU and PLA exhibited good compatibility thanks to probable secondary bonds formed. Furthermore, DSC analyses revealed that, at high TPU contents, no glass transition (T_g) could be observed due to the decrease in chain mobility, and Fetaplast filaments showed lower T_g values than the commercial one (eSUN). Moreover, cold crystallization temperature (T_{cc}) value of eSUN PLA filament shifted relatively higher temperature with the addition of TPU since the addition of TPU probably augment the rigidity of PLA. Additionally, melting point (T_m) of eSUN was found as 167 °C with sharp peak, while all other filaments depicted T_m at about 151 °C with little shifts by showing broader peaks. This melting temperature decrement was attributed to disruption of TPU and PE-based color (Albosa Masterbatch) fillers to crystalline regions of PLA by hindering their ability to align. Accordingly, the results showed that all Fetaplast filaments possessed relatively lower degree of crystallinity compared to eSUN.

Keywords: Poly(lactic acid) (PLA), TPU, structural characterization, DSC, phase transition, degree of crystallinity.

1. INTRODUCTION

Biopolymers are important polymer group thanks to their peculiar characteristic features such as biodegradability, deriving from renewable sources and having lower carbon footprint. Thus, they attracted great attention and had a growing production potential in the material science. This was stemmed from several critical factors; (I) the polymer consumer has recently demanded more environmentally sustainable products, (II) there existed advancements in bio-based feedstocks, and, most notably, stricter regulations on polymers with a high carbon footprint from petrochemical sources [1, 2]. The market size of bio-based polymers was recorded as \$6395.5 million in 2017 and, it was estimated that this value reached \$9905.9 million in 2025 with the 5.3 % CARG increment. This shows that the production volume enhanced more when compared to petroleum-based polymers [3]. Carbohydrate-based biopolymers like cellulose, starch, poly(lactic acid) (PLA), poly(hydroxyalkanoates) (PHA), and bio-based drop-in poly(ethylene terephthalate) (PET) and poly(ethylene (PE)/polypropylene (PP) are common examples of well-known biopolymers [4]. Among them, recently, poly(lactic acid) (PLA, $(H-[OCHCH_3CO])_n-OH$), which is bio-based aliphatic polyester polymer with fundamental four types (poly-DL-lactic acid, poly-L-lactic acid, regular poly-L-lactic acid and poly-D-lactic acid), has been the famous one derived from renewable resources like corn starch, sugarcane, bagasse, potatoes, or cassava. Depending on that, nowadays, the overall production volume for PLA is valued as 180,000 tons [3]. Unlike traditional petroleum-based polymeric materials, PLA can decompose in nature, which makes it indispensable for reducing plastic waste and environmental damages [5]. Moreover, PLA has relatively lower greenhouse effect (~roundly half) during production when compared to other conventional plastic materials like PP, PE, PVC etc. PLA with eco-friendly property has been used many areas such as packing industry, medical and healthcare products, household appliance shells, textile and clothing, agriculture, automotive and electronics and construction etc [6]. It must be underlined here that PLA also is safe for food contact application, providing that it does not leach dangerous chemicals into the food. This make it very proper polymeric materials for dry and fresh food packing [7, 8].

Corresponding Author: UĞUR SOYKAN, Tel: 0374 341 20 76, E-mail: ugursoykan@ibu.edu.tr

Submitted: 12.04.2025, **Revised:** 29.05.2025, **Accepted:** 05.07.2025

In addition, PLA is one of the most widely used biopolymer in 3D printing technology thanks to its low melting point (~180–220 °C) and acceptable glass transition (55 °C) providing easily printing ability as well as its minimal warping and shrinkage character making it suitable for beginners and high-precision 3D prints [9]. In more details, PLA is the most preferable biopolymer for 3D printing technology thanks to that it has several peculiar properties like (I) majorly fabricated (II) widespread application; (III) favorable melt flow index; (IV) biodegradability; (V) ease of production etc [10]. Furthermore, it has strong tensile strength with substantial extensibility. With PLA, the production of smooth surfaces with fine details can be performed, which enables us to fabricate perfect prototypes, polymer based model and plastic project having different colors. During decomposition of it, only CO₂ and H₂O are formed, which makes it non toxic and environmentally friendly polymer. Unfortunately, PLA has several drawbacks, whereas specialized end-use qualities are needed for various applications. Especially, its brittleness gives rise to some limitation at its operational processes [11]. Furthermore, the effective usage of PLA is limited by its poor processability, formability and also foamability, which caused by its slow crystallization process and its low melt strength [12]. Adding micro or nano reinforcing fillers to the PLA matrix as well as blending with thermoplastics like TPU are thought to be a potent way to achieve certain end-use features and significant property improvements. There exists lot of studies focusing the combination of PLA and thermoplastic to reduce the brittleness of PLA [13-15]. Correspondingly, the microstructural and mechanical features of PLA-TPU blend were studied experimentally to obtain 3D printed PLA-TPU polymer blend [16]. They found that the addition of TPU in PLA increased ductility of the matrix. In another study, the effect of addition of TPU having different hard segment (HS) percent on crystallization, rheological and morphological properties were investigated by Nofar et al [17]. The results showed that better compatibility was obtained as TPU with higher HS content was used accompanied by the finer morphology of the TPU phase. Furthermore, Fang et al [18] prepared PLA-TPU copolymer by situ ring-opening coordination polymerization technique and this copolymer was used as compatibilizer between PLA and TPU matrices. The impact strength of the blend enhanced by 4.7 kJ/m² increment with the addition of copolymer. All things considered, the disadvantages of PLA can be eliminated by especially using TPU since TPU improves flexibility of PLA, provide better compatibility, enhances toughness, slightly increase PLA's thermal resistance by reducing warping at high temperatures.

With this perspective, the main focus of this study is to preparation of TPU-reinforced PLA and investigate the structural and thermal properties of these prepared

PLA filaments when compared to the commercial one. Moreover, the influence of PE-based color (Albosa Masterbatch) addition on the polymer compound was investigated.

II. MATERIALS AND METHODS

2.1. Materials

PLA granules were supplied from NatureWorks with the code as Ingeo™ Biopolymer 4043D. The commercial PLA (belonging to Shenzen eSUN Industrial Co; Ltd from China) and other colored PLA filament were kindly purchased from Fetaplast Filament/Ontaş Plastics in Bolu from Türkiye. The eSUN filament (F1) is known as the most consumed filament in the market. eSUN includes 92-96 % of PLA, 2-4 % of calcium carbonate and 2-5 of other additives according to its MSDS data. In order to give desired colors to PLA filament in the production, the PE-based color masterbatches were taken from Albosa Masterbatch in Istanbul from Türkiye. They were polyethylene-based concentrated pigment mixtures used to color PLA. Moreover, the main polymer, thermoplastic polyurethane (TPU), coded as Ravathane® R140A85 and Ravathane® R140A95 from the polyester-based series, was kindly purchased from Ravago Petrochemical Manufacturing Inc. (Kocaeli, Türkiye). According to company data sheet, the densities of Ravathane® R140A85 and Ravathane® R140A95 were reported as 1.16 g/cm³ and 1.21 g/cm³ and, the hardness values (Shore A/D, ISO 868) of them were 85A and 95 A, respectively.

2.2. Preparation of PLA Filament

All the PLA filaments were produced via Demir Machine Extrusion instrument having five production channels for 3D printing. The fabrication of high-quality PLA filaments were done with four main steps; (I) mixing all raw materials, PE-based Albosa Masterbatch and additives, (II) shaping of PLA as a filament, (III) cooling with water baths, and (IV) spooling. After, PLA granules and additives were loaded into a hopper, all materials were fed into a screw extruder that was preheated at 170 °C. The temperature was increased by 10 °C until the exit of the filament and the exit temperature was 220 °C. The sample composition for the filaments were depicted meticulously in Table 1. F1 was ascribed as the commercial one (eSUN) as described. By pushing the melt through a precision die, PLA filament having 1.75 mm diameter were obtained. The temperature, screw speed and pressure kept constant during fabrication to ensure uniform thickness and quality. Then, the cooling process was started in two steps. First, the hot-filament entered a first cooling water bath (60 °C) and then, the pre-cooled filament entered into second cooling bath (25 °C) to retain its smooth and solid cylindrical shape. After that, The drying process was done with hot air

in the dryer chamber to get rid of the moisture and then, the final filament was wound onto spools. The produced filaments were checked carefully whether the diameter of the filament was ± 0.05 mm tolerance. The obtained PLA filaments were shown in the Figure 1. After that, the dried PLAs directly were transferred from the hot air dehumidifier machine to the dryer without moisture. After, the test were carried out carefully.

Table 1. The composition of PLA

Filaments	PLA content (%)	Albosa Masterbatch (%)	TPU (%)
F1 (eSUN)	92-96	-	-
F2 (Fetaplast)	100.00	-	-
F3 (Fetaplast)	98.75	1.25	-
F4	91.50	1.5	7.0 (85A)
F5	91.50	1.5	7.0 (95A)
F6	90.00	2.0	8.0 (95A)



Figure 1. The production process and PLA filaments obtained.

2.3. Instruments

ATR-FTIR analysis of all the produced PLA were carried out by using a Perkin Elmer Spectrum Two with the serial number of 94955, which runs with 1 cm^{-1} resolution at room temperature. The intensity data were collected in frequency range of 600-4000 cm^{-1} frequency. DSC analyses of all the produced PLA samples were conducted with a Setaram DSC 131 Differential Scanning Calorimeter. The measurement was also carried out with a heating rate of 10°C/min under nitrogen atmosphere. 5-15 mg of sample were used for all the measurements. All the phase transitions were investigated using the obtained thermograms.

III. RESULTS AND DISCUSSION

3.1. ATR-FTIR analysis of PLA filaments

ATR-FTIR analysis for all the manufactured PLA filaments were conducted both to analyze structural changes and to provide detailed chemical information. ATR-FTIR spectra were shown in detail in Figure 2.

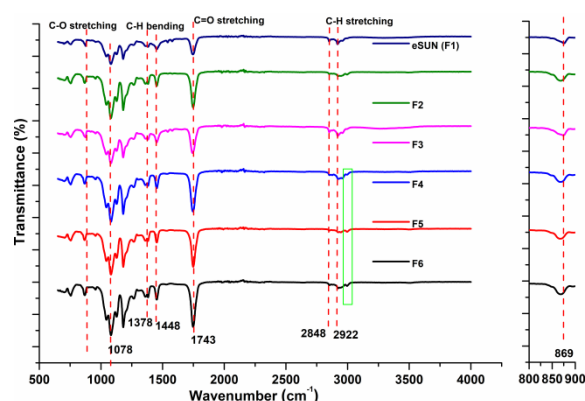


Figure 2. ATR-FTIR spectra of produced PLA filament

According to the figure, at first glance, the addition of PE-based color masterbatches and TPU (85A and 95A) did not create significant effect on the chemical characteristic of PLA. As for the unfilled PLA, it displayed characteristic absorption bands corresponding to its molecular vibrations of the functional groups. Namely, the strong carbonyl ($\text{C}=\text{O}$) stretching vibration was observed at ~ 1743 cm^{-1} , which is related a distinctive peak for the ester functional groups in PLA. The $\text{C}-\text{O}-\text{C}$ asymmetric and symmetric stretching vibrations appeared in the region of 1078 cm^{-1} , associated with the ester bonds. The CH_3 asymmetric stretching was recorded near 2922 cm^{-1} , while the CH_3 symmetric stretching appeared around 2848 cm^{-1} . Besides, the bands at about 761 cm^{-1} and 869 cm^{-1} were attributed to crystalline and the amorphous phase of PLA, which means that pristine PLA had both crystalline and amorphous phase [19]. The $\text{C}-\text{H}$ bending vibrations were detected at ~ 1448 cm^{-1} and the presence of the amorphous and crystalline phases of PLA was reflected in slight variations of these peaks. When comparing pristine PLA and PLA with PE-based Albosa Masterbatch, the intensity of the peak observed at about 720 cm^{-1} increased due to characteristic bands belonging to PE [20, 21]. This band also become more intense when the PE-based colorant reached to 2 %. In addition, the peaks regarding $\text{C}=\text{O}$, $\text{C}-\text{O}$ and The $\text{C}-\text{H}$ vibrations were more visible with the addition of TPU. Since the characteristics bands of neat TPU, as announced previously [22], presumably overlapped with PLA bands, the intensities of these bands augmented as observed from the figure. Moreover, the similar behavior was also observed at the peak detected at about 3002 cm^{-1} , which is assigned to the skeletal vibration of $\text{C}=\text{C}$ bond in the aromatic ring of TPU [23]. This results confirmed that there existed good incorporation between TPU and PLA matrices, which probably results in the occurrence of hydrogen bonding interactions between them thanks to the chemical similarity. Additionally, a broadening and little left shifting of the peak at 869 cm^{-1} depicted that the addition of TPU made PLA little, further supporting intermolecular interactions between the two polymers. All thing considered, this spectral

investigation confirmed that the introduction of TPU into the PLA matrix altered slightly the molecular interactions and structural organization and influenced the properties of the resulting PLA filaments. The observed shifts, and intensity changes provided strong evidence of the formation of the intermolecular interactions.

3.2. Thermal analysis of PLA filaments

As well known, thermal analysis of PLA filaments is crucial analysis in order to understand their thermal behavior, stability, and suitability for applications like 3D printing. Thus, DSC analyses were conducted for all the produced PLA filaments in this study, and the obtained thermograms were presented in Figure 3 and 4 in details. As observed from the figure, three major thermal transitions were detected as being the typical DSC thermogram of PLA filaments as shown from Figure 3.

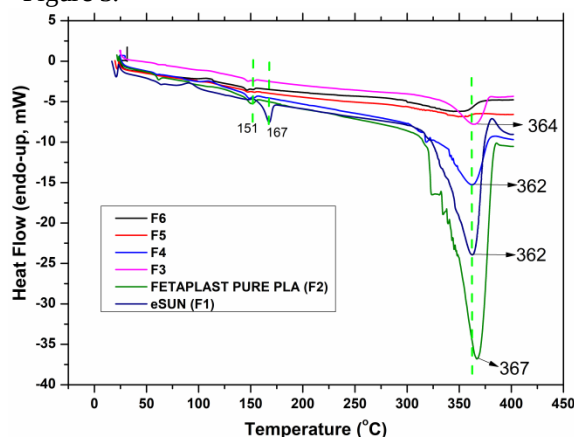


Figure 3. DSC curves of the produced PLA filaments.

These were glass transition (T_g), cold crystallization temperature (T_{cc}) and melting point (T_m). Firstly, as for T_g , it can be influenced by molecular weight of PLA and the presence of plasticizers or additives [24]. According to the findings, F1, F2, F3 and F4 PLA filaments had a T_g between 59-64 °C, indicating that the filaments transitions from a rigid to a more rubber-like state. However, F6 and F5 filaments did not exhibited glass transition peaks as observed in Figure 4. This was presumably caused from TPU added [25]. In more details, when TPU content was reached to 7 % or above, TPU probably acted as a plasticizer due to plasticizing effect from TPU, which results in lowering or missing of T_g . Accordingly, as seen, the filaments without TPU had apparent T_g peaks. Moreover, the results showed that the sample with 95A TPU did not possess any T_g peaks. That is, the addition of harder TPU (95A) having a higher hard segment content (urethane groups) when compared to TPU (85A) gave rise to restrict the chain mobility of PLA due to the probably occurrence of stronger secondary bonds between PLA and urethane groups [26]. Thus, at these samples, T_g peaks were not observed from the DSC thermograms. On the other hands, eSUN PLA filament showed T_g peak at 64 °C,

while Fetaplast pure PLA and Fetaplast PLA with 1.25 % of PE-based color had T_g endotherms at about 61 °C. Correspondingly, at Fetaplast samples without TPU (F2 and F3), T_g values shifted to lower temperature (from 64 °C to 61 °C) compared to commercial one (eSUN, F1). These results meant that the PLA chains became more mobile and flexible (soften) than commercial one (eSUN). As observed from Figure 4, this effect increased with the addition of 7 % of TPU (85A) and T_g was recorded as 59 °C. Furthermore, when comparing F1 and F2, the effect of CaCO_3 and other additives were also seen in the thermogram. Namely, it was found that F2 showed lower T_g since the presence of some additives in F1 filaments decreased plasticizer ability. In addition to T_g , almost all the filaments showed cold crystallization temperature (T_{cc}) between 90-108 °C. These observed exothermic peak typically occurred after T_g and before T_m . It implied that amorphous PLA rearranged into a crystalline structure depending on heating, in other words, amorphous region of PLA started to crystallize upon heating. As seen clearly from the Figure 4, the T_{cc} value belonging to eSUN PLA filament shifted relatively higher temperature with the addition of TPU.

Accordingly, the T_{cc} value was found to be 108 °C at F6 filament. Consistent with the T_g results, it seemed that the presence of TPU in PLA matrices brought about reduced chain mobility accompanied by rigidity increment due to the formed secondary chemical bonds between PLA and TPU [27]. Thus, PLA filaments with TPU needed more thermal energy to start organizing into crystals. Furthermore, the existence of the TPU into PLA matrix may hinder PLA chain movement, delaying the crystallization process. Moreover, one could be deduced that TPU promoted crystallization by acting as nucleating agent into PLA matrices. These exothermic transitions were also faintly at Fetaplast pure PLA (F2) and Fetaplast PLA with 1.25 PE-based color (F3). In this study, T_m values of the filaments were also discussed. As well known, semi-crystalline PLA exhibits a sharper peak, more defined T_m , while amorphous PLA showed a broader melting peak. Namely, T_m value of eSUN was found as 167 °C with sharp peak, while other filament depicted T_m at about 151 °C with little shifts with broader peaks. The melting point of PLA also is directly tied to the order and size of its crystalline regions. Therefore, the crystalline regions of the filaments excepted eSUN probably poorly packed, as a result of that, they required less energy to melt, so T_m appeared at relatively lower temperature as seen from Figure 3[28]. Moreover, PLA was blended with TPU, these may interfere with the crystalline lattice of PLA, which results in the formation of imperfect or mixed-phase crystals, thus obtained lowering T_m . As observed from Figure 3, this effect became more visible at F6 filament. T_m was found to be about 147 °C for this filament. Finally, the observed large peak

at about 360 °C was clearly degradation of PLA filament samples.

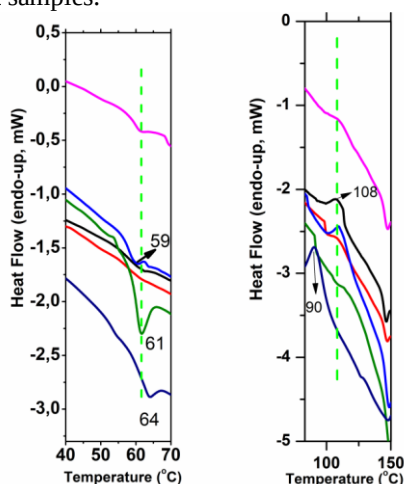


Figure 4. Magnified DSC curves of the produced PLA filaments.

In this study, the degree of crystallinity (X_c) of all the PLA filaments were also calculated from DSC data using the following equation 1:

$$X_c(\%) = \frac{\Delta H_m - \Delta H_{cc}}{\Delta H_m^0} \times 100 \quad (1)$$

ΔH_m , ΔH_{cc} and ΔH_m^0 represented melting enthalpy (J/g), cold crystallization enthalpy (J/g) and theoretical enthalpy of 100% crystalline PLA (93 J/g) [29]. The computed results were presented in Figure 5.

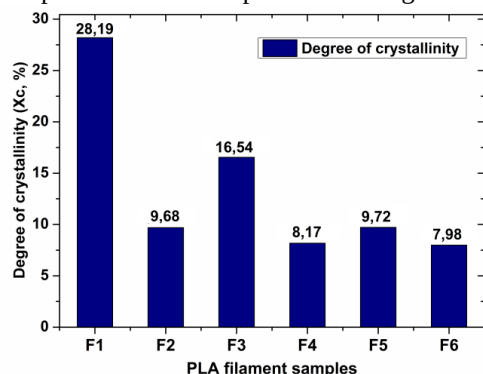


Figure 5. Calculated degree of crystallinity (X_c) of all the produced filaments.

As seen from Figure 5, the percent crystallinities of the filaments mainly decreased with the increasing of percent TPU and PE-based color (Albosa Masterbatch) in the PLA matrices. Moreover, the crystallinity of all Fetaplast filaments were lower X_c compared to eSUN (commercial one). It was observed that it decline from 28 % to lower values below 10 %. Crystallinity in PLA highly depended on how well PLA chains aligned and packed into an ordered region in the structure [30]. Thus, when PE-based color and TPU were added to PLA, they get between PLA chains, and may physically disrupted their ability to align [31]. As a result of that, fewer, smaller and imperfect crystalline regions were formed in the matrices. Additionally, the fillers presenting in F1 like

CaCO_3 seemed to be acted as nucleating agents, providing sites for crystal growth during cooling. This leads to increased crystallization rate and higher degree of crystallinity (X_c), as seen from the figure.

IV. CONCLUSIONS

This study dealt with both the production of TPU-reinforced PLA filaments to use for 3D printing and investigation of the effect of filler addition on the structural and thermal behaviors of PLA by comparing commercial PLA (eSUN). The PLA filaments were fabricated by using extruder equipped with five channel systems. When focusing structural examination, ATR-FTIR results revealed that all peculiar absorption peaks were observed and there existed better compatibility between PLA and filler without any phase separation. Thermal analysis also depicted that TPU acted as plasticizer in the matrices, resulting lower T_g value. However, the harder TPU addition into PLA matrices brought about no observation of T_g due to restricted chain mobility causing fixing of the PLA polymer chains. On the other hand, this decrement in the chain mobility limits PLA chain movement, thus delaying the crystallization process and lower T_{cc} . Tm analysis of the filaments showed that the crystalline regions of the filaments excepted eSUN probably poorly packed, thus, considerable degree of crystallinity reduction was recorded at these samples.

ACKNOWLEDGMENT

This study was supported by Bolu Abant İzzet Baysal University and Fetaplast Filament/Ontaş Plastics in Bolu from Türkiye. The author also thanks to Fevzi Taha Ünlüol for his valuable helps for production and supplying of PLA filaments. Moreover, author is especially grateful to Innovative Food Technologies Development Application and Research Center (YENIGIDAM) for valuable supports in DSC measurements and İstanbul Teknik İnşaat for supports in ATR-FTIR measurement.

REFERENCES

- [1] Getahun M.J., Kassie B.B., Alemu T.S. (2024). Recent advances in biopolymer synthesis, properties, & commercial applications: A review. *Process Biochemistry*, 145 261-287.
- [2] Fredi G., Dorigato A. (2024). Compatibilization of biopolymer blends: A review. *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*, 7(4) 373-404.
- [3] Joseph T.M., Kallingal A., Suresh A.M., Mahapatra D.K., Hasanin M.S., Haponiuk J., Thomas S. (2023). 3D printing of polylactic acid: recent advances and opportunities. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 125(3-4) 1015-1035.

- [4] Thompson R.C., Moore C.J., vom Saal F.S., Swan S.H. (2009). Plastics, the environment and human health: current consensus and future trends. *Philosophical Transaction of the Royal Society B*, 364(1526) 2153-2166.
- [5] Khouri N.G., Bahú J.O., Blanco-Llamero C., Severino P., Concha V.O.C, Souto E.B. (2024). Polylactic acid (PLA): Properties, synthesis, and biomedical applications - A review of the literature. *Journal of Molecular Structure*, 1309.
- [6] Taib N.A.A.B., Rahman M.R, Huda D., Kuok K.K., Hamdan S., Bin Bakri M.K., Bin Julaihi M.R.M., Khan A. (2023). A review on poly lactic acid (PLA) as a biodegradable polymer. *Polymer Bulletin*, 80(2) 1179-1213.
- [7] Swetha T.A., Bora A., Mohanrasu K., Balaji P., Raja R., Ponnuchamy K., Muthusamy G., Arun A. (2023). A comprehensive review on polylactic acid (PLA)-Synthesis, processing and application in food packaging. *International Journal of Biological Macromolecules*, 234.
- [8] Chomachayi M.D., Jalali-arani A., Beltrán F.R., de la Orden M.U., Urreaga J.M. (2020). Biodegradable nanocomposites developed from PLA/PCL blends and silk fibroin nanoparticles: study on the microstructure, thermal behavior, crystallinity and performance. *Journal of Polymer Environment*, 28(4) 1252-1264.
- [9] Wang X.Y., Huang L.J., Li Y.S., Wang Y.N., Lu X.Y., Wei Z.H., Mo Q., Zhang S.Y., Sheng Y., Huang C.X., Zhao H., Liu Y. (2024). Research progress in polylactic acid processing for 3D printing. *Journal of Manufacturing Processes*, 112 161-178.
- [10] Ngo T.D., Kashani A., Imbalzano G., Nguyen K.T.Q., Hui D. (2018). Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. *Composites Part B-Engineering*, 143 172-196.
- [11] Atakok G., Kam M., Koc H.B. (2022). Tensile, three-point bending and impact strength of 3D printed parts using PLA and recycled PLA filaments: A statistical investigation. *Journal of Material Research and Technology*, 18 1542-1554.
- [12] Nofar M., Salehiyan R., Ray S.S. (2019). Rheology of poly (lactic acid)-based systems. *Polymer Review*, 59(3) 465-509.
- [13] Bala A., Arfelis S., Oliver-Ortega H., Méndez J.A. (2022). Life cycle assessment of PE and PP multi film compared with PLA and PLA reinforced with nanoclays film. *Journal of Cleaner Production*, 380
- [14] Thurber C.M., Xu Y.W., Myers J.C., Lodge T.P., Macosko C.W. (2015). Accelerating reactive compatibilization of PE/PLA blends by an interfacially localized catalyst. *ACS Macro Letter Journal*, 4(1) 30-33.
- [15] Arunkumar N., Sathishkumar N., Sanmugapriya S.S., Selvam R. (2021). Study on PLA and PA thermoplastic polymers reinforced with carbon additives by 3D printing process. *Mater Today:Proceedings*, 46 8871-8879.
- [16] Rahmatabadi D., Ghasemi I., Baniassadi M., Abrinia K., Baghani M. (2022). 3D printing of PLA-TPU with different component ratios: Fracture toughness, mechanical properties, and morphology. *Journal of Material Research and Technology*, 21 3970-3981.
- [17] Nofar M., Mohammadi M., Carreau P.J. (2020) Effect of TPU hard segment content on the rheological and mechanical properties of PLA/TPU blends. *Journal of Applied Polymer Science*, 137(45).
- [18] Fang H., Zhang L.J., Chen A.L., Wu F.J. (2022) Improvement of mechanical property for PLA/TPU blend by adding PLA-TPU copolymers prepared via in situ ring-opening polymerization. *Polymers-Basel*, 14(8).
- [19] Lee H.W., Insyani R., Prasetyo D., Prajitno H., Sitompul J. (2015). Molecular weight and structural properties of biodegradable PLA synthesized with different catalysts by direct melt polycondensation. *Journal of Engineering and Technological Science*, 47(4) 364-373.
- [20] Soykan U. (2020). Role of percent grafting and chain length of fully fluorinated pendant units in the grafted acrylic compound on crucial characteristic properties of high density polyethylene. *Journal of Fluorine Chemistry*, 236.
- [21] Çetin S., Sen B.Ö., Soykan U., Firat E.E., Yildirim G. (2016). Experimental and theoretical approaches for structural and mechanical properties of novel side chain LCP-PP graft coproducts. *Turkish Journal of Chemistry*, 40(3) 467-483.
- [22] Soykan U. (2022). Development of turkey feather fiber-filled thermoplastic polyurethane composites: Thermal, mechanical, water-uptake, and morphological characterizations, *Journal of Composite Materials*, 56(2) 339-355.
- [23] Zhu X.S., Li X.J., Mi H.Y., Jing X., Dong B.B., He P., Liu C.T., Shen C.Y. (2022). Graphene oxide/thermoplastic polyurethane wrinkled foams with enhanced compression performance fabricated by dynamic supercritical CO foaming. *Journal of Applied Polymer Science*, 139(27).
- [24] Lazaridou M., Klonos P.A., Barmpa E.D., Kyritsis A., Bikiaris D.N. (2023). Thermal transitions and molecular mobility in polymeric blends based on polylactide (PLA) and poly(3,3-ethylene dithiodipropionate) (PEDPA). *Polymer*, 277.
- [25] Shin E.J., Jung Y.S., Park C.H., Lee S.H. (2023). Eco-friendly TPU/PLA blends for application as shape-memory 3D printing filaments, *Journal of Polymer Environment*, 31(7) 3182-3196.

- [26] Azadi F., Jafari S.H, Khonakdar H.A., Arjmand M., Wagenknecht U., Altstädt V. (2021). Influence of graphene oxide on thermally induced shape memory behavior of PLA/TPU blends: correlation with morphology, creep behavior, crystallinity, and dynamic mechanical properties. *Macromolecular Materials and Engineering*, 306(2).
- [27] Ladakhan S.H., Sreesha R.B., Adinarayanappa S.M. (2024). 4D printing of polylactic acid (PLA)/PLA-thermoplastic polyurethane (TPU)-based metastructure: examining the mechanical, thermal, and shape memory properties, *Smart Materials and Structures*, 33(10).
- [28] Monfared A.R., Omranpour H., Tuccitto A.V., Zaoui A., Rahman S.S., Kheradmandkeysomi M., Jalali A., Park C.B. (2024). Sustainable PLA bio-nanocomposites: integration of TPU nanofibrils and CNC for enhanced crystallization, toughness, stiffness, transparency, and oxygen barrier properties. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering Journal*, 12(34) 13017-13029.
- [29] Greco A., Ferrari F. (2021). Thermal behavior of PLA plasticized by commercial and cardanol-derived plasticizers and the effect on the mechanical properties. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 146(1) 131-141.
- [30] Beauson J., Schillani G., van der Schueren L., Goutianos S. (2022). The effect of processing conditions and polymer crystallinity on the mechanical properties of unidirectional self-reinforced PLA composites. *Composite Part A-Applied Science and Manufacturing*, 152.
- [31] Hamidi M.N., Abdullah J., Mahmud A.S., Hassan M.H., Zainoddin A.Y. (2025). Influence of thermoplastic polyurethane (TPU) and printing parameters on the thermal and mechanical performance of polylactic acid (PLA) / thermoplastic polyurethane (TPU) polymer, *Polymer Testing*, 143.

Doğrusal Olmayan Regresyondaki Kendinden Eşik Değerli Otoregresif Hatalar Sorununa Uyarlamalı Bir Yaklaşım

An Adaptive Estimation Method for Nonlinear Regression with Self-Exciting Threshold Autoregressive Errors

Bariş AŞIKGİL¹ 

¹Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi, Fen-Edebiyat Fakültesi, İstatistik Bölümü, İstanbul, Türkiye

Öz

Bu çalışma, doğrusal olmayan regresyon modellerinde kendinden eşik değerli otoregresif (KEDAR) hataların varlığında etkin parametre kestirimleri elde edebilmeyi amaçlamaktadır. Bu doğrultuda, otoregresif (AR) süreçlere karşı önerilen iki aşamalı en küçük kareler (İAEKK) yöntemi KEDAR süreçleri için ele alınacak ve etkin parametre kestirimleri elde edilebilmesi için uyarlamalı bir yaklaşım araştırılacaktır. Karesel çokterimli (polinomial) daraltma fonksiyonu kullanılarak İAEKK yöntemine bir uyarlama yapıp bu yeni yaklaşımın etkinliği farklı senaryolar altında bir benzetim çalışması ile incelenecektir.

Anahtar Kelimeler: Doğrusal Olmayan Regresyon, Otokorelasyon, Kendinden Eşik Değerli Otoregresif Süreçler, Uyarlamalı İki Aşamalı Yaklaşım

Abstract

This study aims to obtain efficient parameter estimates in the presence of self-exciting threshold autoregressive (SETAR) errors in nonlinear regression models. In this way, the two-stage least squares (TSLS) method proposed for autoregressive (AR) processes is discussed for SETAR processes and an adaptive approach is investigated to obtain efficient parameter estimates. An adaptation of TSLS method is made by using a quadratic polynomial tapering function and the efficiency of this new approach is examined with a simulation study under different scenarios.

Keywords: Nonlinear Regression, Autocorrelation, Self-Exciting Threshold Autoregressive Processes, Adaptive Two-Stage Approach

I. GİRİŞ

Doğrusal olmayan modeller, son zamanlarda birçok bilimsel alanda (fizik, kimya, eczacılık, tıp, mühendislik vb.) çalışılan değişkenler arasındaki ilişkilerin incelenmesi için sıkça başvurulan modellerdir. Bu modeller, özellikle çok uzun zaman ve maliyet gerektiren deneysel çalışmalardan elde edilen bulguların modellenmesinde yoğun olarak kullanılmaya başlanmıştır. Bu modellerde bulunan değişkenlerin istatistiksel olarak incelenmesi ve oluşturulan modeller için parametre kestirimlerinin elde edilmesinde doğrusal olmayan regresyon analizi tercih edilebilir.

n gözlemlili (x_i, y_i) çifti için bir doğrusal olmayan regresyon modeli,

$$y_i = f(x_i, \beta) + \varepsilon_i, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (1)$$

biçiminde verilebilir. Burada y_i , bağımlı değişken; x_i , bağımsız değişken; β , bilinmeyen parametreler ve ε_i , sıfır ortalamalı ve σ^2 varyanslı ilişkisiz hata terimidir. Bu doğrusal olmayan regresyon modeli, Gallant [1] tarafından $f(X, \beta) \equiv f(\beta)$ olarak tanımlandığından, matris biçimiyle aşağıdaki gibi gösterilebilir:

$$Y = f(\beta) + \varepsilon. \quad (2)$$

Burada, parametre kestirimlerini bulmanın bir yolu hata kareler toplamını en küçüklemek olup bu yaklaşım, alışılagelen en küçük kareler (EKK) olarak bilinir. EKK yöntemi, bazı özel durumlarda (değişen varyanslı hatalar, ilişkili hatalar vb.) etkin olmayan sonuçlar verir. Bu nedenle, özel durumlar için tanımlı çeşitli yöntemlere başvurmak gerekebilir [1]. Günlük hayatta sıkça karşılaşılan bir durum, bir değişkendeki (y_i) değişimin zamana (x_i) göre doğrusal olmayan biçimde modellenmesidir. Bu durum, hatalar arasında serisel bir ilişki doğurabilir. Bu nedenle, EKK yönteminin performansı bu durumdan olumsuz bir biçimde etkilenebilecektir. Literatürde, Gallant ve Goebel [2], Glasbey [3], otoregresif hataların varlığında etkin parametre kestirimleri verebilecek yöntemler üzerinde çalışmalar yapmışlardır. Bunun yanında, Glasbey [4], [5], Huang ve Huang [6], Bender ve Heinemann [7], Aşıkil ve Erar [8] tarafından yapılan çalışmalarda da otokorelasyonlu hataların varlığında yaşanacak sorunlara dikkat çekilerek etkin sonuçlar verebilecek bazı farklı yaklaşımlar üzerine yoğunlaşmıştır.

Bu çalışmada, doğrusal olmayan zaman serisi modellerinden biri olan kendinden eşik değerli otoregresif süreçle tanımlı hataların, doğrusal olmayan regresyon modelinin analizinde yaratacağı olumsuz etki incelenip, etkin parametre kestirimleri elde edilebilmesi amaçlanmaktadır. Böylece, farklı alanlarda doğrusal olmayan modellerle çalışan araştırmacılar için bu tarz bir problemin varlığında etkin parametre kestirimleri elde etmelerinin sağlanması ile birlikte tutarlı yorumlarda bulunulması en önde gelen hedefler arasındadır. Çalışmanın ikinci bölümünde, farklı bazı otokorelasyon yapıları tanıtılıp literatürde tanımlı bazı parametre kestirim yöntemleri ile birlikte uyarlamalı iki aşamalı bir yaklaşım verilmiştir. Çalışmanın üçüncü bölümünde, Monte Carlo benzetim çalışması ile sunulan yaklaşım için incelemeler yapılmıştır. Çalışmanın son bölümünde ise çeşitli değerlendirmelere yer verilmiştir.

II. MATERYAL VE YÖNTEM

Bir hata teriminin kendi gecikmeleri ile ilişkili olması durumu otokorelasyon olarak adlandırılır. Regresyon analizinde, zaman ya da uzaklık bağımsız değişken olarak kullanılıyorsa ve bu değerler birbirlerine yakınsa otokorelasyonlu hataların varlığı kaçınılmazdır. Literatürde, genellikle, hata terimleri arasındaki otokorelasyonun otoregresif modeller ile açıklandığı durumlar ele alınmıştır. Bu çalışmada ise doğrusal olmayan zaman serisi modellerinden biri olan kendinden eşik değerli otoregresif modeller ile açıklanan ilişkili hatalar ön plana çıkacaktır.

2.1. Otoregresif (AR) Model

Hata teriminin kendi gecikmeleriyle arasındaki ilişki, q 'uncu dereceden AR modeli ile,

$$\varepsilon_i = a_1 \varepsilon_{i-1} + a_2 \varepsilon_{i-2} + \dots + a_q \varepsilon_{i-q} + \varepsilon_i^*, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (3)$$

biçiminde tanımlanabilir. Burada, $a_1, a_2, \dots, a_q$, bilinmeyen parametreler ve ε_i^* , sıfır ortalama ve σ_{ε}^2 varyanslı bağımsız aynı dağılımlı hata terimidir. AR modelindeki parametrelerin kestirimi için tercih edilebilen yollardan biri Yule-Walker denklemlerini kullanmaktır. Bu denklemleri elde etmek için Eşitlik (3)'ün her iki tarafı sırasıyla ve ayrı ayrı, $\varepsilon_{i-1}, \varepsilon_{i-2}, \varepsilon_{i-3}, \dots, \varepsilon_{i-q}$ ile çarpılarak ortaya çıkan eşitliklerde her iki tarafın beklenen değerleri alınır. Elde edilen otokovaryanslar aşağıdaki gibi tanımlanabilir:

$$E(\varepsilon_{i-1}\varepsilon_{i-1}) = c_0, E(\varepsilon_i\varepsilon_{i-1}) = E(\varepsilon_{i-1}\varepsilon_{i-2}) = c_1, \dots, E(\varepsilon_{i-1}\varepsilon_{i-q}) = c_{q-1}, E(\varepsilon_{i-1}\varepsilon_i^*) = 0. \quad (4)$$

Böylece,

$$\begin{aligned} c_1 &= a_1 c_0 + a_2 c_1 + a_3 c_2 + \dots + a_q c_{q-1} \\ c_2 &= a_1 c_1 + a_2 c_0 + a_3 c_1 + \dots + a_q c_{q-2} \\ &\vdots \\ c_q &= a_1 c_{q-1} + a_2 c_{q-2} + a_3 c_{q-3} + \dots + a_q c_0 \end{aligned} \quad (5)$$

biçiminde ortaya çıkan denklem takımı yardımıyla parametre kestirimleri hesaplanabilmektedir [9].

2.2. Kendinden Eşik Değerli Otoregresif (KEDAR) Model

r -düzenli KEDAR model,

$$z_t = \phi_0^{(j)} + \sum_{\ell=1}^{q_j} \phi_\ell^{(j)} z_{t-\ell} + v_t^{(j)}, \quad \tau_{j-1} \leq z_{t-d} < \tau_j, \quad (6)$$

biçiminde tanımlanabilir. Burada, r, d ve $(q_1, q_2, \dots, q_r)$ pozitif tam sayılardır. (j) , düzeni belirtmekte olup eşik değerler, $-\infty = \tau_0 < \tau_1 < \dots < \tau_r = \infty$ 'dur. $v_t^{(j)}$, sıfır ortalama ve σ_j^2 varyanslı olup bağımsız aynı dağılımlıdır. d , gecikme parametresi olarak tanımlanıp Eşitlik (6), KEDAR($d; q_1, q_2, \dots, q_r$) biçiminde gösterilebilir [10]. Bu model, asimetrik artış ve azalış örüntüsü gibi doğrusal olmayan özellikleri açıklayabilmekte olup, uzayı r düzene bölen parçalı doğrusal AR modellerden oluşur [11]. KEDAR modellerinde, parametrelerin kestirimi kadar eşik değerlerin kestirimi de önemlidir. Chan ve Tong [12], Chan [13], Chan ve Cheung [14]'ün çalışmalarında farklı koşullar altında eşik değer ve parametre kestirimleri incelenmiştir. Bu çalışmada, serinin bir elemanı olarak düşünülen eşik değer için iki düzenli modellerdeki kestirimi için grid arama yaklaşımının kullanımı uygun görülmüştür. Bu yaklaşımda, EKK yöntemiyle her bir kestirilmiş z_t değeri bulunup, her bir düzene yeterli sayıda gözlem düşecek şekilde (serinin ortasındaki %80'inin incelenmesi) eşik değerin aranacağı bir aralık belirlenir. Bu aralık belirli bir adım büyüklüğüyle (örneğin, 0.01) parçalara ayrılır. Her bir aday eşik değer için model kurulur ve her bir kestirilmiş model için artık kareler toplamı değeri elde

edilir. Artık kareler toplamını en küçük yapan modele ait eşik değeri kullanılabilir [15].

2.3. En Küçük Kareler (EKK) Yöntemi

EKK yönteminin temeli olan hata kareler toplamı fonksiyonu Eşitlik (2) için aşağıdaki gibi verilebilir:

$$S(\beta) = [Y - f(\beta)]' [Y - f(\beta)]. \quad (7)$$

Bu fonksiyonun en küçüklenmesiyle,

$$\frac{\partial}{\partial \beta} S(\beta) \Big|_{\beta=\hat{\beta}} = -2[Y - f(\hat{\beta})]' F(\hat{\beta}) = -2F'(\hat{\beta})[Y - f(\hat{\beta})] = 0, \quad (8)$$

eşitliği için Taylor serisi açılımından yararlanılarak,

$$\beta - \beta^0 = [F'(\beta^0) F(\beta^0)]^{-1} F'(\beta^0) [Y - f(\beta^0)] = \delta^0, \quad (9)$$

ve

$$\beta^1 = \beta^0 + \delta^0 \quad (10)$$

elde edilir. Burada, $F(\beta) = \partial f(\beta) / \partial \beta_j$ ($j = 1, 2, \dots, k$) biçiminde tanımlı olup bir Jakobiye matrisidir. Bu iteratif süreç, $|\beta^{i+1} - \beta^i| < \varepsilon$ ($i = 0, 1, 2, \dots; \varepsilon = 10^{-5}$)

eşitsizliği sağlanıncaya kadar sürdürülür. Yakınsaklık sağlandığında elde edilen parametre kestirimi, Gauss-Newton iteratif yöntemiyle elde edilen EKK kestirimidir [16].

2.4. Daraltılmış İki Aşamalı En Küçük Kareler (DİAEKK) Yöntemi

Gallant ve Goebel [2] tarafından AR biçimli hataların varlığında etkin parametre kestirimleri elde edebilmek için önerilen iki aşamalı yöntem, Aşıkil ve Erar [8] tarafından bir daraltma yaklaşımı ile yeniden düzenlenmiş ve DİAEKK yöntemi elde edilmiştir. İki aşamadan oluşan bu yöntem, her iki aşamada da EKK yöntemi içerir.

İlk aşamada, öncelikle, Eşitlik (2)'ye EKK yöntemi uygulanarak artıklar (e_i) elde edilir. Artıklara bir daraltma fonksiyonu uygulanarak daraltılmış (taper) otokovaryans kestirimleri,

$$\hat{\gamma}_{taper}(h) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n-h} (s_i e_i)(s_{i+h} e_{i+h}), \quad h = 0, 1, \dots, q, \quad (11)$$

biçiminde hesaplanır. Burada q , gecikme değeri ve n , gözlem sayısı olup,

$$\sum_{i=1}^n s_i^2 = n. \quad (12)$$

s , bir daraltma fonksiyonu olup, $s: [0, 1] \rightarrow [0, \infty]$ ve $s(0) = s(1) = 0$ 'dır. s_i değerleri,

$$s_i = s\left(\left(i - \frac{1}{2}\right)/n\right) k_n^{1/2}, \quad (13)$$

biçiminde elde edilir. Burada,

$$k_n = n / \sum_{i=1}^n s\left(\left(i - \frac{1}{2}\right)/n\right)^2. \quad (14)$$

Eşitlik (11)'den elde edilen daraltılmış otokovaryans kestirimleri kullanılarak, $(q \times q)$ boyutlu varyans-kovaryans matrisi ve $(q \times 1)$ boyutlu otokovaryans vektörü aşağıdaki gibi oluşturulur:

$$\hat{I}_q = \begin{bmatrix} \hat{\gamma}(0) & \hat{\gamma}(1) & \dots & \hat{\gamma}(q-1) \\ \hat{\gamma}(1) & \hat{\gamma}(0) & \dots & \hat{\gamma}(q-2) \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \hat{\gamma}(q-1) & \hat{\gamma}(q-2) & \dots & \hat{\gamma}(0) \end{bmatrix}, \quad \hat{\gamma}_q = [\hat{\gamma}(1) \ \hat{\gamma}(2) \ \dots \ \hat{\gamma}(q)]'. \quad (15)$$

AR modelin parametre kestirimleri, Yule-Walker denklemleri yardımıyla aşağıdaki gibi bulunur:

$$\hat{a} = -\hat{I}_q^{-1} \hat{\gamma}_q, \quad \hat{\sigma}^2 = \hat{\gamma}(0) + \hat{a}' \hat{\gamma}_q. \quad (16)$$

Böylece, $(n \times n)$ boyutlu dönüşüm matrisi,

$$\hat{P} = \begin{bmatrix} \sqrt{\hat{\sigma}^2} \hat{P}_q & \mathbf{0} \\ \hat{a}_q & \hat{a}_{q-1} & \dots & \hat{a}_1 & 1 \\ \hat{a}_q & \hat{a}_{q-1} & \dots & \hat{a}_1 & 1 \\ \ddots & \ddots & & \ddots & \ddots \\ \hat{a}_q & \hat{a}_{q-1} & \dots & \hat{a}_1 & 1 \end{bmatrix}, \quad (17)$$

biçiminde tanımlanır. Burada, ilk satır q satırdan oluşur ve Cholesky yöntemi kullanılarak $\hat{I}_q^{-1} = \hat{P}_q' \hat{P}_q$ elde edilir. Dönüşüm matrisinin elde edilmesiyle yöntemin ilk aşaması sonlanmış olur.

İkinci aşamada, dönüşüm matrisi Eşitlik (2)'ye uygulanarak aşağıdaki dönüşümler elde edilir:

$$W = \hat{P}Y, \quad g(\beta) = \hat{P}f(\beta), \quad v = \hat{P}\varepsilon. \quad (18)$$

Böylece, AR biçimli otokorelasyonlu hatalar sorununun çözüldüğü yeni model aşağıda verildiği gibi tanımlanabilir:

$$W = g(\beta) + v. \quad (19)$$

Bu yeni modele EKK yöntemi uygulanarak, AR biçimli otokorelasyondan bozuluma uğramamış DİAEKK-AR parametre kestirimleri elde edilir.

2.5. Uyarlamalı İki Aşamalı Yaklaşım

Aşıkıl [17] tarafından KEDAR biçimli hataların varlığında doğrusal regresyon modellerinde etkin parametre kestirimleri elde edebilmek için incelenen yöntem, bu çalışmada karesel daraltma fonksiyonu kullanılarak doğrusal olmayan regresyon modellerinde KEDAR biçimli otokorelasyon problemini çözebilmek amacıyla uyarlanmıştır. Bu uyarlanmış yaklaşım DİAEKK yöntemini temel alır. Bu yaklaşımın işleyişi kısaca aşağıda tanımlandığı gibidir:

DİAEKK yönteminin ilk aşamasındaki EKK yönteminden elde edilen artıklar için grid arama ile eşik değerler tahminlenir ve düzenler belirlenir. r -düzenli bir sistemde her bir düzendeki gözlem sayısı aşağıda verildiği gibi birbirinden farklı olarak bulunabilir:

$$\sum_{j=1}^r n_j = n. \quad (20)$$

Her bir düzen kendi içerisinde ayrı düşünülerek her biri için dönüşüm matrisi bulunur. Dönüşüm matrisinin içerdiği elemanlardan olan, otokorelasyonlu hataların tanımlandığı modelin parametre kestirimlerini bulabilmek için, s daraltma fonksiyonu,

$$s(v) = v(1 - v), \quad (21)$$

biçiminde tanımlanarak Eşitlik (13) yardımıyla s_i değerleri bulunup, bu değerlerin kullanımı ile Eşitlik (11)'deki daraltılmış otokovaryans kestirimleri hesaplanır. Bu kestirimler kullanılarak Eşitlik (15) elde edilir.

İkinci aşamada, her bir düzen için ayrı ayrı dönüşümler uygulanır ve sıralı bir biçimde düzenler alt alta eklenerek Eşitlik (19)'da verildiği gibi KEDAR biçimli otokorelasyonlu hatalar sorununun çözüldüğü yeni bir model elde edilir. Bu yeni modele EKK yöntemi uygulanarak, KEDAR biçimli otokorelasyondan bozuluma uğramamış DİAEKK-KEDAR parametre kestirimleri elde edilir.

III. BENZETİM ÇALIŞMASI

Bu kısımda, KEDAR biçimli hataların varlığında farklı senaryolar üzerinden kapsamlı bir Monte Carlo benzetim çalışması yapılarak, EKK, DİAEKK-AR ve DİAEKK-KEDAR yaklaşımlarının performansları incelenecektir. Bu benzetim çalışmasında,

$$y_t = \beta_1 x_t^{\beta_2 x_t} + \varepsilon_t, \quad t = 1, 2, \dots, n, \quad (22)$$

şeklinde verilen geometrik model kullanılmış ve parametrelerin gerçek değerleri, $\beta = (5 \ 1)'$ olarak belirlenmiştir. Bağımsız değişken (x_t), tekdüze (uniform) dağılımdan $U(1, 4)$ biçiminde üretilmiştir. Otokorelasyonlu hatalar için,

$$\varepsilon_t = \begin{cases} 0.5\varepsilon_{t-1} + \nu_t & \text{if } \varepsilon_{t-1} \leq 0 \\ 0.8\varepsilon_{t-1} + \nu_t & \text{if } \varepsilon_{t-1} > 0 \end{cases}, \quad (23)$$

$$\varepsilon_t = \begin{cases} 0.34\varepsilon_{t-1} + 0.13\varepsilon_{t-2} + \nu_t & \text{if } \varepsilon_{t-1} \leq 1 \\ 0.55\varepsilon_{t-1} + 0.18\varepsilon_{t-2} + \nu_t & \text{if } \varepsilon_{t-1} > 1 \end{cases}, \quad (24)$$

$$\varepsilon_t = \begin{cases} 0.85\varepsilon_{t-1} + \nu_t & \text{if } \varepsilon_{t-1} \leq 0 \\ 0.52\varepsilon_{t-1} + 0.10\varepsilon_{t-2} + \nu_t & \text{if } \varepsilon_{t-1} > 0 \end{cases}, \quad (25)$$

$$\varepsilon_t = \begin{cases} 0.5\varepsilon_{t-1} + 2\nu_t & \text{if } \varepsilon_{t-1} \leq 1 \\ 0.8\varepsilon_{t-1} + \nu_t & \text{if } \varepsilon_{t-1} > 1 \end{cases}, \quad (26)$$

biçimlerinde verilen koşullu (if), durağan yapıda dört farklı KEDAR modeli ele alınmıştır. Bu modellerin ortak noktası iki düzenli olmalarıdır. ν_t terimi, bağımsız ve aynı dağılımlı olup, $N(0, \sigma^2)$ biçimindeki dağılımdan farklı standart sapmalar ($\sigma = 0.5, \sigma = 1, \sigma = 3$) ve farklı örneklem büyüklükleri ($n = 30, n = 50, n = 70, n = 100$) için üretilmiştir. Bu benzetim çalışması, her bir farklı durum altında (model, standart sapma ve örneklem büyüklüğü) 1000 kere tekrarlanmıştır.

Bu çalışma, MATLAB R2017b'de yazılan kodlama ile oluşturulan program yardımıyla yapılmıştır. Sırasıyla, Eşitlik (23) ile verilen durum için sonuçlar Tablo 1'de, Eşitlik (24) ile verilen durum için sonuçlar Tablo 2'de, Eşitlik (25) ile verilen durum için sonuçlar Tablo 3 ve Tablo 4'de, Eşitlik (26) ile verilen durum için sonuçlar Tablo 5'de verilmiştir. Bu tablolarda, EKK, DİAEKK-AR ve DİAEKK-KEDAR yaklaşımlarıyla, farklı durumlarda β_1 ve β_2 için elde edilen, ortalama (Ort), standart sapma (St.Sapma), hata kareler ortalaması (HKO) ve göreceli etkinlik ($\text{Etk} = \text{HKO}_{\text{EKK}} / \text{HKO}_{\text{Yöntem}}$) değerleri verilmiştir.

Tablo 1'deki, Eşitlik (23) ile verilen KEDAR(1; 1, 1) biçimindeki hataların varlığında yapılan benzetim çalışmasıyla elde edilen yaklaşık sonuçlar göz önünde bulundurulduğunda, her üç yöntem için de elde edilen parametre kestirim ortalamalarının parametrelerin gerçek değerlerine oldukça yakın oldukları gözlenmiştir. Her üç yöntemden de parametrelerin yansız kestirimlerine ulaşıldığı söylenebilir. Bunun

yanında, DİAEKK-KEDAR ile elde edilen parametre kestirim ortalamalarının parametrelerin gerçek değerlerine daha yakın olduğu belirtilebilir. Her üç yöntem için de parametre kestirimlerinin standart sapmaları dikkate alındığında en büyüklere sahip olan EKK yöntemiyle elde edilenlerdir. $n = 30$ ve $n = 50$ gibi daha küçük hacimli örneklerde DİAEKK-KEDAR ile elde edilen parametre kestirimlerinin standart sapmaları en küçük olmaktadır. Bu doğrultuda, görelî etkinlikler açısından küçük hacimli örnekler için DİAEKK-KEDAR yönteminin diğer yöntemlere göre daha etkin olduğu, ancak gözlem sayısı arttıkça DİAEKK-AR yöntemi etkinlik değerlerinin de artış göstererek $n = 100$ gibi büyük hacimli örneklerde en büyük olduğu göze çarpmaktadır. İncelenen üç yöntem içinde EKK etkin bir yöntem değildir. Ayrıca, gözlem sayısı arttıkça yani örneklem hacmi büyüdükçe DİAEKK ile elde edilen parametre kestirimlerinin EKK ile elde edilenlere göre etkinlikleri de gözle görülür biçimde artmaktadır.

Tablo 2'deki, Eşitlik (24) ile verilen KEDAR(1; 2, 2) biçimindeki hataların varlığında yapılan benzetim çalışmasıyla elde edilen yaklaşık sonuçlar göz önünde bulundurulduğunda, her üç yöntem için de elde edilen parametre kestirim ortalamalarının parametrelerin gerçek değerlerine oldukça yakın oldukları gözlenmiştir. Her üç yöntemden de parametrelerin yansız kestirimlerine ulaşıldığı söylenebilir. Bunun yanında, DİAEKK-KEDAR ile elde edilen parametre kestirim ortalamalarının parametrelerin gerçek değerlerine daha yakın olduğu belirtilebilir. Her üç yöntem için de parametre kestirimlerinin standart sapmaları dikkate alındığında en büyüklere sahip olan EKK yöntemiyle elde edilenlerdir. $n = 30$ gibi daha küçük hacimli örneklerde DİAEKK-KEDAR ile elde edilen parametre kestirimlerinin standart sapmaları en küçük olmaktadır. Bu doğrultuda, görelî etkinlikler açısından küçük hacimli örnekler için DİAEKK-KEDAR yönteminin diğer yöntemlere göre daha etkin olduğu, ancak gözlem sayısı arttıkça DİAEKK-AR yöntemi etkinlik değerlerinin de artış göstererek $n = 70$ ve $n = 100$ gibi büyük hacimli örneklerde en büyük olduğu göze çarpmaktadır. İncelenen üç yöntem içinde EKK etkin bir yöntem değildir. Ayrıca, gözlem sayısı arttıkça yani örneklem hacmi büyüdükçe DİAEKK ile elde edilen parametre kestirimlerinin EKK ile elde edilenlere göre etkinlikleri de gözle görülür biçimde artmaktadır.

Tablo 3'deki, Eşitlik (25) ile verilen KEDAR(1; 1, 2) biçimindeki hataların varlığında AR model derecelerinin en küçüğü (AR(1)) yaklaşımı ile yapılan benzetim çalışmasıyla elde edilen yaklaşık sonuçlar göz önünde bulundurulduğunda, her üç yöntem için de elde edilen parametre kestirim ortalamalarının parametrelerin gerçek değerlerine oldukça yakın oldukları gözlenmiştir. Her üç yöntemden de parametrelerin yansız kestirimlerine ulaşıldığı

söylenebilir. Bunun yanında, DİAEKK-KEDAR ile elde edilen parametre kestirim ortalamalarının parametrelerin gerçek değerlerine daha yakın olduğu belirtilebilir. Her üç yöntem için de parametre kestirimlerinin standart sapmaları dikkate alındığında en büyüklere sahip olan EKK yöntemiyle elde edilenlerdir. $n = 30$ ve $n = 50$ gibi daha küçük hacimli örneklerde DİAEKK-KEDAR ile elde edilen parametre kestirimlerinin standart sapmaları en küçük olmaktadır. Görelî etkinlikler ile DİAEKK-KEDAR'ın diğer yöntemlere göre daha etkin olduğu göze çarpmaktadır. İncelenen üç yöntem içinde EKK etkin bir yöntem değildir. Ayrıca, gözlem sayısı arttıkça yani örneklem hacmi büyüdükçe DİAEKK ile elde edilen parametre kestirimlerinin EKK ile elde edilenlere göre etkinlikleri de gözle görülür biçimde artmaktadır.

Tablo 4'deki, Eşitlik (25) ile verilen KEDAR(1; 1, 2) biçimindeki hataların varlığında AR model derecelerinin en büyüğü (AR(2)) yaklaşımı ile yapılan benzetim çalışmasıyla elde edilen yaklaşık sonuçlar göz önünde bulundurulduğunda, her üç yöntem için de elde edilen parametre kestirim ortalamalarının parametrelerin gerçek değerlerine oldukça yakın oldukları gözlenmiştir. Her üç yöntemden de parametrelerin yansız kestirimlerine ulaşıldığı söylenebilir. Bunun yanında, DİAEKK-KEDAR ile elde edilen parametre kestirim ortalamalarının parametrelerin gerçek değerlerine daha yakın olduğu belirtilebilir. Her üç yöntem için de parametre kestirimlerinin standart sapmaları dikkate alındığında en büyüklere sahip olan EKK yöntemiyle elde edilenler olup, DİAEKK-KEDAR ile elde edilen parametre kestirimlerinin standart sapmaları da en küçük olmaktadır. Görelî etkinlikler ile DİAEKK-KEDAR'ın diğer yöntemlere göre daha etkin olduğu göze çarpmaktadır. İncelenen üç yöntem içinde EKK etkin bir yöntem değildir. Ayrıca, gözlem sayısı arttıkça yani örneklem hacmi büyüdükçe DİAEKK ile elde edilen parametre kestirimlerinin EKK ile elde edilenlere göre etkinlikleri de gözle görülür biçimde artmaktadır.

Tablo 5'deki, Eşitlik (26) ile verilen özel durumlu (aşağı-yukarı sıçramalardaki asimetric yapı) KEDAR(1; 1, 1) biçimindeki hataların varlığında yapılan benzetim çalışmasıyla elde edilen yaklaşık sonuçlar göz önünde bulundurulduğunda, her üç yöntem için de elde edilen parametre kestirim ortalamalarının parametrelerin gerçek değerlerine oldukça yakın oldukları gözlenmiştir. Her üç yöntemden de parametrelerin yansız kestirimlerine ulaşıldığı söylenebilir. Bunun yanında, DİAEKK-KEDAR ile elde edilen parametre kestirim ortalamalarının parametrelerin gerçek değerlerine daha yakın olduğu belirtilebilir. Her üç yöntem için de parametre kestirimlerinin standart sapmaları dikkate alındığında en büyüklere sahip olan EKK yöntemiyle

Tablo 1. Eşitlik (23)'de verilen KEDAR(1; 1, 1) biçimindeki hataların varlığında elde edilen yaklaşık sonuçlar

Parametre	n	σ	EKK				DİAEKK-AR				DİAEKK-KEDAR			
			Ort	St.Sapma	HKO	Etk	Ort	St.Sapma	HKO	Etk	Ort	St.Sapma	HKO	Etk
β_1	30	0.5	5.01982	0.03495	$1.61 \cdot 10^{-3}$	1	5.00802	0.02169	$0.53 \cdot 10^{-3}$	3.02	5.00552	0.02001	$0.43 \cdot 10^{-3}$	3.75
		1	5.03734	0.06871	$6.12 \cdot 10^{-3}$	1	5.01410	0.04144	$1.92 \cdot 10^{-3}$	3.19	5.00981	0.03847	$1.58 \cdot 10^{-3}$	3.88
		3	5.10422	0.19765	$49.9 \cdot 10^{-3}$	1	5.03981	0.11785	$15.5 \cdot 10^{-3}$	3.23	5.02733	0.10674	$12.1 \cdot 10^{-3}$	4.11
	50	0.5	5.01980	0.02448	$0.99 \cdot 10^{-3}$	1	5.00577	0.01386	$0.23 \cdot 10^{-3}$	4.40	5.00324	0.01371	$0.20 \cdot 10^{-3}$	5.00
		1	5.03490	0.04882	$3.60 \cdot 10^{-3}$	1	5.00978	0.02622	$0.78 \cdot 10^{-3}$	4.60	5.00571	0.02544	$0.68 \cdot 10^{-3}$	5.30
		3	5.09706	0.14844	$31.5 \cdot 10^{-3}$	1	5.02518	0.07446	$6.18 \cdot 10^{-3}$	5.09	5.01179	0.07307	$5.48 \cdot 10^{-3}$	5.74
	70	0.5	5.01781	0.02071	$0.75 \cdot 10^{-3}$	1	5.00502	0.01077	$0.14 \cdot 10^{-3}$	5.28	5.00279	0.01105	$0.13 \cdot 10^{-3}$	5.75
		1	5.03435	0.04191	$2.94 \cdot 10^{-3}$	1	5.00826	0.02070	$0.50 \cdot 10^{-3}$	5.91	5.00371	0.02092	$0.45 \cdot 10^{-3}$	6.51
		3	5.10059	0.12815	$26.5 \cdot 10^{-3}$	1	5.02402	0.05935	$4.10 \cdot 10^{-3}$	6.47	5.01017	0.06195	$3.94 \cdot 10^{-3}$	6.73
	100	0.5	5.01676	0.01774	$0.60 \cdot 10^{-3}$	1	5.00322	0.00815	$0.08 \cdot 10^{-3}$	7.75	5.00129	0.00925	$0.09 \cdot 10^{-3}$	6.83
		1	5.03410	0.03602	$2.46 \cdot 10^{-3}$	1	5.00719	0.01580	$0.30 \cdot 10^{-3}$	8.17	5.00299	0.01737	$0.31 \cdot 10^{-3}$	7.92
		3	5.10924	0.10933	$23.9 \cdot 10^{-3}$	1	5.02289	0.04740	$2.77 \cdot 10^{-3}$	8.62	5.01010	0.05222	$2.83 \cdot 10^{-3}$	8.44
β_2	30	0.5	0.99927	0.00136	$2.38 \cdot 10^{-6}$	1	0.99971	0.00085	$0.81 \cdot 10^{-6}$	2.94	0.99980	0.00078	$0.65 \cdot 10^{-6}$	3.64
		1	0.99863	0.00265	$8.89 \cdot 10^{-6}$	1	0.99948	0.00163	$2.93 \cdot 10^{-6}$	3.03	0.99964	0.00150	$2.37 \cdot 10^{-6}$	3.75
		3	0.99632	0.00739	$68.1 \cdot 10^{-6}$	1	0.99859	0.00448	$22.1 \cdot 10^{-6}$	3.09	0.99903	0.00409	$17.6 \cdot 10^{-6}$	3.87
	50	0.5	0.99928	0.00092	$1.37 \cdot 10^{-6}$	1	0.99979	0.00053	$0.32 \cdot 10^{-6}$	4.25	0.99988	0.00052	$0.28 \cdot 10^{-6}$	4.84
		1	0.99874	0.00182	$4.91 \cdot 10^{-6}$	1	0.99965	0.00100	$1.12 \cdot 10^{-6}$	4.39	0.99980	0.00096	$0.97 \cdot 10^{-6}$	5.07
		3	0.99656	0.00551	$42.2 \cdot 10^{-6}$	1	0.99909	0.00285	$8.94 \cdot 10^{-6}$	4.71	0.99958	0.00279	$7.96 \cdot 10^{-6}$	5.30
	70	0.5	0.99936	0.00078	$1.02 \cdot 10^{-6}$	1	0.99982	0.00041	$0.20 \cdot 10^{-6}$	5.05	0.99990	0.00042	$0.19 \cdot 10^{-6}$	5.50
		1	0.99876	0.00157	$4.00 \cdot 10^{-6}$	1	0.99970	0.00079	$0.71 \cdot 10^{-6}$	5.64	0.99987	0.00079	$0.64 \cdot 10^{-6}$	6.22
		3	0.99643	0.00471	$35.0 \cdot 10^{-6}$	1	0.99914	0.00224	$5.77 \cdot 10^{-6}$	6.06	0.99965	0.00233	$5.54 \cdot 10^{-6}$	6.31
	100	0.5	0.99939	0.00066	$0.81 \cdot 10^{-6}$	1	0.99989	0.00031	$0.11 \cdot 10^{-6}$	7.43	0.99996	0.00035	$0.12 \cdot 10^{-6}$	6.59
		1	0.99877	0.00134	$3.30 \cdot 10^{-6}$	1	0.99974	0.00060	$0.43 \cdot 10^{-6}$	7.71	0.99989	0.00066	$0.44 \cdot 10^{-6}$	7.48
		3	0.99610	0.00403	$31.4 \cdot 10^{-6}$	1	0.99917	0.00181	$3.94 \cdot 10^{-6}$	7.96	0.99964	0.00197	$4.02 \cdot 10^{-6}$	7.80

Tablo 2. Eşitlik (24)'de verilen KEDAR(1; 2, 2) biçimindeki hataların varlığında elde edilen yaklaşık sonuçlar

Parametre	n	σ	EKK				DİAEKK-AR				DİAEKK-KEDAR			
			Ort	St.Sapma	HKO	Etk	Ort	St.Sapma	HKO	Etk	Ort	St.Sapma	HKO	Etk
β_1	30	0.5	5.01411	0.02834	$1.00 \cdot 10^{-3}$	1	5.00624	0.01934	$0.41 \cdot 10^{-3}$	2.43	5.00549	0.01835	$0.37 \cdot 10^{-3}$	2.73
		1	5.02547	0.05622	$3.81 \cdot 10^{-3}$	1	5.01094	0.03777	$1.55 \cdot 10^{-3}$	2.46	5.00873	0.03529	$1.32 \cdot 10^{-3}$	2.88
		3	5.07257	0.16838	$33.6 \cdot 10^{-3}$	1	5.03098	0.10580	$12.2 \cdot 10^{-3}$	2.77	5.02616	0.10402	$11.5 \cdot 10^{-3}$	2.92
	50	0.5	5.01139	0.02082	$0.56 \cdot 10^{-3}$	1	5.00336	0.01260	$0.17 \cdot 10^{-3}$	3.31	5.00258	0.01265	$0.16 \cdot 10^{-3}$	3.38
		1	5.02266	0.04049	$2.15 \cdot 10^{-3}$	1	5.00649	0.02392	$0.61 \cdot 10^{-3}$	3.50	5.00459	0.02383	$0.59 \cdot 10^{-3}$	3.65
		3	5.06365	0.12776	$20.4 \cdot 10^{-3}$	1	5.01819	0.07439	$5.87 \cdot 10^{-3}$	3.47	5.01211	0.07306	$5.49 \cdot 10^{-3}$	3.71
	70	0.5	5.01223	0.01686	$0.43 \cdot 10^{-3}$	1	5.00288	0.00968	$0.10 \cdot 10^{-3}$	4.26	5.00218	0.01004	$0.11 \cdot 10^{-3}$	4.11
		1	5.02242	0.03290	$1.59 \cdot 10^{-3}$	1	5.00526	0.01833	$0.36 \cdot 10^{-3}$	4.36	5.00383	0.01922	$0.38 \cdot 10^{-3}$	4.13
		3	5.06772	0.11025	$16.7 \cdot 10^{-3}$	1	5.01843	0.05755	$3.65 \cdot 10^{-3}$	4.58	5.01284	0.06190	$4.00 \cdot 10^{-3}$	4.19
	100	0.5	5.01127	0.01478	$0.35 \cdot 10^{-3}$	1	5.00271	0.00819	$0.07 \cdot 10^{-3}$	4.64	5.00208	0.00882	$0.08 \cdot 10^{-3}$	4.21
		1	5.02232	0.02860	$1.32 \cdot 10^{-3}$	1	5.00557	0.01508	$0.26 \cdot 10^{-3}$	5.10	5.00378	0.01704	$0.30 \cdot 10^{-3}$	4.32
		3	5.06414	0.09003	$12.2 \cdot 10^{-3}$	1	5.01375	0.04581	$2.29 \cdot 10^{-3}$	5.34	5.00852	0.05110	$2.68 \cdot 10^{-3}$	4.55
β_2	30	0.5	0.99948	0.00111	$1.49 \cdot 10^{-6}$	1	0.99977	0.00077	$0.64 \cdot 10^{-6}$	2.34	0.99980	0.00072	$0.57 \cdot 10^{-6}$	2.64
		1	0.99907	0.00218	$5.63 \cdot 10^{-6}$	1	0.99960	0.00149	$2.37 \cdot 10^{-6}$	2.38	0.99968	0.00138	$2.01 \cdot 10^{-6}$	2.80
		3	0.99741	0.00649	$48.9 \cdot 10^{-6}$	1	0.99888	0.00417	$18.7 \cdot 10^{-6}$	2.62	0.99905	0.00409	$17.6 \cdot 10^{-6}$	2.77
	50	0.5	0.99958	0.00080	$0.82 \cdot 10^{-6}$	1	0.99987	0.00049	$0.26 \cdot 10^{-6}$	3.18	0.99990	0.00049	$0.25 \cdot 10^{-6}$	3.30
		1	0.99918	0.00153	$3.02 \cdot 10^{-6}$	1	0.99976	0.00092	$0.90 \cdot 10^{-6}$	3.35	0.99984	0.00091	$0.86 \cdot 10^{-6}$	3.52
		3	0.99774	0.00481	$28.2 \cdot 10^{-6}$	1	0.99936	0.00283	$8.43 \cdot 10^{-6}$	3.34	0.99958	0.00279	$7.96 \cdot 10^{-6}$	3.54
	70	0.5	0.99955	0.00064	$0.60 \cdot 10^{-6}$	1	0.99990	0.00037	$0.15 \cdot 10^{-6}$	4.01	0.99992	0.00038	$0.16 \cdot 10^{-6}$	3.93
		1	0.99919	0.00123	$2.18 \cdot 10^{-6}$	1	0.99981	0.00069	$0.52 \cdot 10^{-6}$	4.19	0.99986	0.00073	$0.55 \cdot 10^{-6}$	3.99
		3	0.99759	0.00411	$22.7 \cdot 10^{-6}$	1	0.99934	0.00219	$5.24 \cdot 10^{-6}$	4.34	0.99954	0.00234	$5.69 \cdot 10^{-6}$	4.00
	100	0.5	0.99959	0.00056	$0.48 \cdot 10^{-6}$	1	0.99990	0.00031	$0.11 \cdot 10^{-6}$	4.47	0.99993	0.00033	$0.12 \cdot 10^{-6}$	4.10
		1	0.99919	0.00108	$1.81 \cdot 10^{-6}$	1	0.99980	0.00057	$0.37 \cdot 10^{-6}$	4.87	0.99986	0.00064	$0.43 \cdot 10^{-6}$	4.18
		3	0.99771	0.00332	$16.3 \cdot 10^{-6}$	1	0.99951	0.00174	$3.27 \cdot 10^{-6}$	4.97	0.99970	0.00193	$3.81 \cdot 10^{-6}$	4.27

Tablo 3. Eşitlik (25)'de verilen KEDAR(1; 1, 2) biçimindeki hataların varlığında AR(1) yaklaşımıyla elde edilen yaklaşık sonuçlar

Parametre	n	σ	EKK				DİAEKK-AR				DİAEKK-KEDAR			
			Ort	St.Sapma	HKO	Etk	Ort	St.Sapma	HKO	Etk	Ort	St.Sapma	HKO	Etk
β_1	30	0.5	4.98671	0.03781	1.61*10 ⁻³	1	4.99583	0.02348	0.57*10 ⁻³	2.82	4.99805	0.02193	0.48*10 ⁻³	3.31
		1	4.97119	0.07498	6.45*10 ⁻³	1	4.99163	0.04604	2.19*10 ⁻³	2.95	4.99590	0.04241	1.82*10 ⁻³	3.55
		3	4.88526	0.23240	67.2*10 ⁻³	1	4.95867	0.13982	21.3*10 ⁻³	3.16	4.97277	0.12903	17.4*10 ⁻³	3.86
	50	0.5	4.98240	0.02918	1.16*10 ⁻³	1	4.99584	0.01487	0.24*10 ⁻³	4.87	4.99822	0.01399	0.20*10 ⁻³	5.84
		1	4.96122	0.06269	5.43*10 ⁻³	1	4.99056	0.03016	1.00*10 ⁻³	5.44	4.99540	0.02917	0.87*10 ⁻³	6.23
		3	4.88370	0.18471	47.6*10 ⁻³	1	4.97108	0.08725	8.45*10 ⁻³	5.64	4.98355	0.08434	7.38*10 ⁻³	6.45
	70	0.5	4.98199	0.02620	1.01*10 ⁻³	1	4.99630	0.01156	0.15*10 ⁻³	6.87	4.99829	0.01172	0.14*10 ⁻³	7.21
		1	4.96046	0.05112	4.18*10 ⁻³	1	4.99216	0.02266	0.58*10 ⁻³	7.26	4.99694	0.02277	0.53*10 ⁻³	7.91
		3	4.87363	0.16195	42.2*10 ⁻³	1	4.97645	0.06593	4.90*10 ⁻³	8.61	4.98863	0.06681	4.59*10 ⁻³	9.19
	100	0.5	4.98004	0.02240	0.90*10 ⁻³	1	4.99680	0.00901	0.09*10 ⁻³	9.85	4.99892	0.00903	0.08*10 ⁻³	10.90
		1	4.95998	0.04399	3.54*10 ⁻³	1	4.99415	0.01740	0.34*10 ⁻³	10.49	4.99816	0.01752	0.31*10 ⁻³	11.40
		3	4.87371	0.12898	32.6*10 ⁻³	1	4.98172	0.05151	2.99*10 ⁻³	10.91	4.99093	0.05238	2.83*10 ⁻³	11.53
β_2	30	0.5	1.00050	0.00146	2.38*10 ⁻⁶	1	1.00016	0.00091	0.86*10 ⁻⁶	2.76	1.00007	0.00085	0.73*10 ⁻⁶	3.25
		1	1.00109	0.00291	9.65*10 ⁻⁶	1	1.00032	0.00180	3.33*10 ⁻⁶	2.90	1.00016	0.00165	2.76*10 ⁻⁶	3.50
		3	1.00456	0.00944	109.9*10 ⁻⁶	1	1.00162	0.00554	33.2*10 ⁻⁶	3.30	1.00109	0.00506	26.7*10 ⁻⁶	4.11
	50	0.5	1.00065	0.00111	1.65*10 ⁻⁶	1	1.00015	0.00057	0.35*10 ⁻⁶	4.77	1.00006	0.00053	0.29*10 ⁻⁶	5.74
		1	1.00144	0.00239	7.78*10 ⁻⁶	1	1.00035	0.00115	1.44*10 ⁻⁶	5.41	1.00017	0.00111	1.26*10 ⁻⁶	6.16
		3	1.00447	0.00721	72.0*10 ⁻⁶	1	1.00110	0.00336	12.5*10 ⁻⁶	5.75	1.00064	0.00323	10.8*10 ⁻⁶	6.63
	70	0.5	1.00066	0.00098	1.40*10 ⁻⁶	1	1.00014	0.00044	0.21*10 ⁻⁶	6.65	1.00006	0.00044	0.20*10 ⁻⁶	6.99
		1	1.00146	0.00193	5.87*10 ⁻⁶	1	1.00029	0.00086	0.82*10 ⁻⁶	7.12	1.00011	0.00086	0.75*10 ⁻⁶	7.79
		3	1.00477	0.00623	61.6*10 ⁻⁶	1	1.00088	0.00251	7.08*10 ⁻⁶	8.70	1.00043	0.00253	6.59*10 ⁻⁶	9.35
	100	0.5	1.00073	0.00084	1.24*10 ⁻⁶	1	1.00012	0.00034	0.13*10 ⁻⁶	9.51	1.00004	0.00034	0.12*10 ⁻⁶	10.49
		1	1.00147	0.00166	4.90*10 ⁻⁶	1	1.00022	0.00066	0.48*10 ⁻⁶	10.17	1.00007	0.00066	0.44*10 ⁻⁶	11.10
		3	1.00471	0.00496	46.8*10 ⁻⁶	1	1.00067	0.00197	4.32*10 ⁻⁶	10.83	1.00034	0.00199	4.09*10 ⁻⁶	11.45

Tablo 4. Eşitlik (25)'de verilen KEDAR(1; 1, 2) biçimindeki hataların varlığında AR(2) yaklaşımıyla elde edilen yaklaşık sonuçlar

Parametre	n	σ	EKK				DİAEKK-AR				DİAEKK-KEDAR			
			Ort	St.Sapma	HKO	Etk	Ort	St.Sapma	HKO	Etk	Ort	St.Sapma	HKO	Etk
β_1	30	0.5	4.98650	0.03931	$1.73 \cdot 10^{-3}$	1	4.99504	0.02461	$0.63 \cdot 10^{-3}$	2.74	4.99702	0.02176	$0.48 \cdot 10^{-3}$	3.58
		1	4.96698	0.07685	$7.00 \cdot 10^{-3}$	1	4.98820	0.04461	$2.13 \cdot 10^{-3}$	3.29	4.99179	0.04153	$1.79 \cdot 10^{-3}$	3.90
		3	4.89928	0.24152	$68.5 \cdot 10^{-3}$	1	4.96874	0.12967	$17.8 \cdot 10^{-3}$	3.85	4.97333	0.12262	$15.7 \cdot 10^{-3}$	4.35
	50	0.5	4.98405	0.02960	$1.13 \cdot 10^{-3}$	1	4.99643	0.01439	$0.22 \cdot 10^{-3}$	5.14	4.99753	0.01366	$0.19 \cdot 10^{-3}$	5.87
		1	4.96196	0.05937	$4.97 \cdot 10^{-3}$	1	4.99127	0.02825	$0.87 \cdot 10^{-3}$	5.69	4.99427	0.02698	$0.76 \cdot 10^{-3}$	6.54
		3	4.88711	0.17195	$42.3 \cdot 10^{-3}$	1	4.97658	0.07992	$6.94 \cdot 10^{-3}$	6.10	4.98065	0.07560	$6.09 \cdot 10^{-3}$	6.95
	70	0.5	4.98010	0.02527	$1.03 \cdot 10^{-3}$	1	4.99664	0.01126	$0.14 \cdot 10^{-3}$	7.49	4.99790	0.01099	$0.13 \cdot 10^{-3}$	8.26
		1	4.96017	0.05094	$4.18 \cdot 10^{-3}$	1	4.99276	0.02165	$0.52 \cdot 10^{-3}$	8.02	4.99533	0.02122	$0.47 \cdot 10^{-3}$	8.86
		3	4.87545	0.15855	$40.7 \cdot 10^{-3}$	1	4.97774	0.06456	$4.66 \cdot 10^{-3}$	8.72	4.98402	0.06399	$4.35 \cdot 10^{-3}$	9.34
	100	0.5	4.98025	0.02214	$0.88 \cdot 10^{-3}$	1	4.99681	0.00908	$0.09 \cdot 10^{-3}$	9.51	4.99804	0.00885	$0.08 \cdot 10^{-3}$	10.72
		1	4.95911	0.04429	$3.63 \cdot 10^{-3}$	1	4.99448	0.01722	$0.33 \cdot 10^{-3}$	11.12	4.99655	0.01715	$0.31 \cdot 10^{-3}$	11.87
		3	4.88086	0.13230	$31.7 \cdot 10^{-3}$	1	4.98317	0.05065	$2.85 \cdot 10^{-3}$	11.13	4.98872	0.05027	$2.65 \cdot 10^{-3}$	11.94
β_2	30	0.5	1.00051	0.00155	$2.65 \cdot 10^{-6}$	1	1.00019	0.00099	$1.01 \cdot 10^{-6}$	2.62	1.00011	0.00086	$0.76 \cdot 10^{-6}$	3.50
		1	1.00126	0.00300	$10.6 \cdot 10^{-6}$	1	1.00045	0.00175	$3.28 \cdot 10^{-6}$	3.22	1.00031	0.00162	$2.72 \cdot 10^{-6}$	3.88
		3	1.00399	0.00960	$108.2 \cdot 10^{-6}$	1	1.00123	0.00508	$27.4 \cdot 10^{-6}$	3.95	1.00106	0.00476	$23.8 \cdot 10^{-6}$	4.54
	50	0.5	1.00058	0.00112	$1.59 \cdot 10^{-6}$	1	1.00013	0.00055	$0.32 \cdot 10^{-6}$	4.95	1.00009	0.00052	$0.28 \cdot 10^{-6}$	5.69
		1	1.00141	0.00226	$7.09 \cdot 10^{-6}$	1	1.00032	0.00107	$1.26 \cdot 10^{-6}$	5.64	1.00021	0.00103	$1.10 \cdot 10^{-6}$	6.43
		3	1.00432	0.00663	$62.6 \cdot 10^{-6}$	1	1.00089	0.00307	$10.2 \cdot 10^{-6}$	6.13	1.00074	0.00288	$8.85 \cdot 10^{-6}$	7.07
	70	0.5	1.00072	0.00095	$1.42 \cdot 10^{-6}$	1	1.00012	0.00043	$0.20 \cdot 10^{-6}$	7.20	1.00007	0.00042	$0.18 \cdot 10^{-6}$	7.94
		1	1.00147	0.00192	$5.82 \cdot 10^{-6}$	1	1.00026	0.00082	$0.74 \cdot 10^{-6}$	7.82	1.00017	0.00080	$0.68 \cdot 10^{-6}$	8.61
		3	1.00471	0.00612	$59.6 \cdot 10^{-6}$	1	1.00084	0.00247	$6.78 \cdot 10^{-6}$	8.80	1.00061	0.00243	$6.28 \cdot 10^{-6}$	9.49
	100	0.5	1.00072	0.00083	$1.21 \cdot 10^{-6}$	1	1.00011	0.00034	$0.13 \cdot 10^{-6}$	9.20	1.00007	0.00033	$0.12 \cdot 10^{-6}$	10.34
		1	1.00150	0.00167	$5.04 \cdot 10^{-6}$	1	1.00020	0.00066	$0.47 \cdot 10^{-6}$	10.70	1.00013	0.00065	$0.44 \cdot 10^{-6}$	11.37
		3	1.00444	0.00505	$45.2 \cdot 10^{-6}$	1	1.00062	0.00193	$4.10 \cdot 10^{-6}$	11.02	1.00042	0.00191	$3.82 \cdot 10^{-6}$	11.84

Tablo 5. Eşitlik (26)'da verilen özel durumlu KEDAR(1; 1, 1) biçimindeki hataların varlığında elde edilen yaklaşık sonuçlar

Parametre	n	σ	EKK				DİAEKK-AR				DİAEKK-KEDAR			
			Ort	St.Sapma	HKO	Etk	Ort	St.Sapma	HKO	Etk	Ort	St.Sapma	HKO	Etk
β_1	30	0.5	5.02839	0.04707	$3.02 \cdot 10^{-3}$	1	5.01211	0.03028	$1.06 \cdot 10^{-3}$	2.84	5.00992	0.02962	$0.98 \cdot 10^{-3}$	3.10
		1	5.05535	0.08828	$10.9 \cdot 10^{-3}$	1	5.02113	0.05694	$3.69 \cdot 10^{-3}$	2.94	5.01688	0.05599	$3.42 \cdot 10^{-3}$	3.17
		3	5.13514	0.27915	$96.2 \cdot 10^{-3}$	1	5.04953	0.17103	$31.7 \cdot 10^{-3}$	3.03	5.03223	0.16135	$27.1 \cdot 10^{-3}$	3.55
	50	0.5	5.02778	0.03452	$1.96 \cdot 10^{-3}$	1	5.00866	0.01892	$0.43 \cdot 10^{-3}$	4.53	5.00632	0.01884	$0.40 \cdot 10^{-3}$	4.97
		1	5.05050	0.07029	$7.49 \cdot 10^{-3}$	1	5.01412	0.03672	$1.55 \cdot 10^{-3}$	4.84	5.01029	0.03687	$1.47 \cdot 10^{-3}$	5.11
		3	5.16770	0.21052	$72.4 \cdot 10^{-3}$	1	5.04575	0.11351	$15.0 \cdot 10^{-3}$	4.83	5.02434	0.11343	$13.5 \cdot 10^{-3}$	5.38
	70	0.5	5.02666	0.02949	$1.58 \cdot 10^{-3}$	1	5.00682	0.01576	$0.29 \cdot 10^{-3}$	5.36	5.00519	0.01689	$0.31 \cdot 10^{-3}$	5.06
		1	5.05205	0.05755	$6.02 \cdot 10^{-3}$	1	5.01200	0.02965	$1.02 \cdot 10^{-3}$	5.88	5.00827	0.03286	$1.15 \cdot 10^{-3}$	5.24
		3	5.16834	0.18297	$61.8 \cdot 10^{-3}$	1	5.04429	0.09178	$10.4 \cdot 10^{-3}$	5.95	5.02918	0.09846	$10.5 \cdot 10^{-3}$	5.86
	100	0.5	5.02568	0.02425	$1.25 \cdot 10^{-3}$	1	5.00509	0.01210	$0.17 \cdot 10^{-3}$	7.24	5.00364	0.01339	$0.19 \cdot 10^{-3}$	6.48
		1	5.05323	0.04828	$5.16 \cdot 10^{-3}$	1	5.01063	0.02334	$0.66 \cdot 10^{-3}$	7.85	5.00539	0.02643	$0.73 \cdot 10^{-3}$	7.10
		3	5.16606	0.14676	$49.1 \cdot 10^{-3}$	1	5.03482	0.06954	$6.05 \cdot 10^{-3}$	8.12	5.02337	0.07809	$6.64 \cdot 10^{-3}$	7.39
β_2	30	0.5	0.99895	0.00184	$4.48 \cdot 10^{-6}$	1	0.99955	0.00119	$1.63 \cdot 10^{-6}$	2.76	0.99963	0.00116	$1.48 \cdot 10^{-6}$	3.02
		1	0.99799	0.00338	$15.4 \cdot 10^{-6}$	1	0.99924	0.00219	$5.39 \cdot 10^{-6}$	2.86	0.99939	0.00216	$5.04 \cdot 10^{-6}$	3.06
		3	0.99534	0.01076	$137.6 \cdot 10^{-6}$	1	0.99830	0.00679	$49.0 \cdot 10^{-6}$	2.81	0.99892	0.00636	$41.6 \cdot 10^{-6}$	3.31
	50	0.5	0.99899	0.00130	$2.72 \cdot 10^{-6}$	1	0.99968	0.00073	$0.63 \cdot 10^{-6}$	4.33	0.99977	0.00072	$0.57 \cdot 10^{-6}$	4.74
		1	0.99817	0.00265	$10.3 \cdot 10^{-6}$	1	0.99949	0.00140	$2.23 \cdot 10^{-6}$	4.64	0.99962	0.00140	$2.10 \cdot 10^{-6}$	4.93
		3	0.99411	0.00780	$95.5 \cdot 10^{-6}$	1	0.99840	0.00430	$21.0 \cdot 10^{-6}$	4.54	0.99917	0.00431	$19.3 \cdot 10^{-6}$	4.95
	70	0.5	0.99903	0.00111	$2.17 \cdot 10^{-6}$	1	0.99975	0.00060	$0.42 \cdot 10^{-6}$	5.17	0.99981	0.00064	$0.44 \cdot 10^{-6}$	4.94
		1	0.99813	0.00216	$8.16 \cdot 10^{-6}$	1	0.99957	0.00113	$1.46 \cdot 10^{-6}$	5.60	0.99970	0.00124	$1.62 \cdot 10^{-6}$	5.03
		3	0.99405	0.00668	$80.0 \cdot 10^{-6}$	1	0.99840	0.00345	$14.5 \cdot 10^{-6}$	5.53	0.99895	0.00368	$14.7 \cdot 10^{-6}$	5.46
	100	0.5	0.99907	0.00090	$1.68 \cdot 10^{-6}$	1	0.99981	0.00046	$0.25 \cdot 10^{-6}$	6.84	0.99987	0.00051	$0.27 \cdot 10^{-6}$	6.17
		1	0.99808	0.00181	$6.96 \cdot 10^{-6}$	1	0.99961	0.00089	$0.94 \cdot 10^{-6}$	7.43	0.99980	0.00099	$1.03 \cdot 10^{-6}$	6.78
		3	0.99413	0.00536	$63.3 \cdot 10^{-6}$	1	0.99876	0.00263	$8.43 \cdot 10^{-6}$	7.50	0.99918	0.00292	$9.21 \cdot 10^{-6}$	6.87

elde edilenlerdir. Özellikle, $n = 30$ gibi daha küçük hacimli örneklemelerde DİAEKK-KEDAR yöntemiyle elde edilen parametre kestirimlerinin standart sapmaları en küçük olmaktadır. Bu doğrultuda, göreceli etkinlikler açısından küçük hacimli örneklem için DİAEKK-KEDAR yönteminin diğer yöntemlere göre daha etkin olduğu, ancak gözlem sayısı arttıkça DİAEKK-AR yöntemi etkinlik değerlerinin de artış göstererek $n = 70$ ve $n = 100$ gibi büyük hacimli örneklemelerde en büyük olduğu göze çarpmaktadır. İncelenen üç yöntem içinde EKK etkin bir yöntem değildir. Ayrıca, gözlem sayısı arttıkça yani örneklem hacmi büyüdükçe DİAEKK ile elde edilen parametre kestirimlerinin EKK ile elde edilenlere göre etkinlikleri de gözle görülür biçimde artmaktadır.

IV. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışma, doğrusal olmayan regresyon modellerinde otokorelasyonlu hatalar sorunu temelinde oluşturulmuştur. Bir regresyon varsayım bozulumu olarak bilinen otokorelasyonlu hataların ortaya çıkmasında, farklı bir durum olarak verilen KEDAR modellerin kullanımı ile ortaya çıkan sorunun üstesinden gelebilecek bir yaklaşım araştırılmıştır. Bir başka deyişle, böyle bir sorunun varlığında etkin parametre kestirimleri elde edebilecek uyarlamalı bir yöntem oluşturulmaya çalışılmıştır. Bu amaçla, literatürde tanımlı iki aşamalı yöntem üzerinde yoğunlaşmıştır. Her iki aşamada da EKK uygulanan bu yöntemdeki farklılık, ikinci aşamadan önce bir dönüşüm matrisi oluşturularak modelin dönüştürülmesi ve otokorelasyon probleminin ortadan kaldırılmasıdır. Bu bağlamda, dönüşüm matrisinin oluşturulması aşamasında karesel çokterimli bir daraltma fonksiyonu kullanımı düşünülmüş ve böylece DİAEKK yöntemi tasarlanmıştır. Bu yöntem, hem literatürde sıklıkla verilen AR modeli hem de KEDAR modeli üzerinden uyarlanmış ve DİAEKK-AR ile DİAEKK-KEDAR yaklaşımları verilmiştir. Bu yaklaşımların ve klasik EKK yönteminin, KEDAR biçimli hataların varlığında nasıl sonuçlar vereceği merak konusu olduğundan kapsamlı bir Monte Carlo benzetim çalışması planlanmıştır. Bir önceki kısımda koşulları ve sonuçları birlikte verilen bu kapsamlı çalışma ile oluşturulan yaklaşımların parametre kestirim etkinlikleri karşılaştırılmıştır.

Benzetim çalışması ile varılan sonuçlardan biri, kullanılan her üç yöntemin de yansız parametre kestirimleri ürettiğidir. Bunun yanında, küçük hacimli örneklemelerde parametre kestirim etkinliği açısından DİAEKK-KEDAR yaklaşımı ön plana çıkmaktadır. Gözlem sayısı arttıkça, yani büyük hacimli örneklemelerde DİAEKK-AR yaklaşımının etkinliği en fazla olabilmektedir. Bu durum, büyük hacimli örneklemelerde KEDAR biçimli hataların AR biçimli hatalara benzediği biçiminde yorumlanabilir. Bir başka deyişle, gözlem sayısının çok büyük olduğu durumlarda otokorelasyon için tanımlanan KEDAR etkisi ortadan kalkabilmektedir. Ancak, her ne olursa

olsun iki yaklaşım da literatürde otokorelasyonlu hataların varlığında etkin olmayan parametre kestirimleri verdiği bilinen EKK yöntemine göre oldukça başarılı sonuçlar vermektedir. Hatta, benzetim çalışması için tanımlanan bütün durumlarda gözlem sayısı arttıkça yaklaşımlara ait etkinlik değerleri gözle görülür biçimde artmaktadır. Bununla birlikte, otokorelasyonlu hataların varlığında tanımlanan Monte Carlo deneyleri veya çalışılan gerçek veri kümeleri değişikçe EKK yönteminin dışındaki diğer yaklaşımların etkinlik sıralarının ve bundan kaynaklı ortaya çıkan sonuçların değişiklik gösterebileceği unutulmamalıdır.

Sonuç olarak, KEDAR biçimli hataların varlığındaki doğrusal olmayan regresyon analizinde etkin parametre kestirimleri elde etmek için özellikle küçük hacimli örneklemelerde DİAEKK-KEDAR yaklaşımının kullanımı tercih edilebilir. Bu çalışmada, otokorelasyon olarak incelenen yapı iki düzenli KEDAR modelleri üzerine kuruludur. İleriki çalışmalarda, ikiden çok düzenli yapılarla oluşturulan otokorelasyon durumundaki parametre kestirim etkinlikleri konusuna odaklanılabilir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma, Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi tarafından desteklenen 2019-29 numaralı bilimsel araştırma projesinden üretilmiştir.

KAYNAKLAR

- [1] Gallant, A.R. (1987). *Nonlinear Statistical Models*. John Wiley and Sons, New York.
- [2] Gallant, A.R. ve Goebel, J.J. (1976). Nonlinear regression with autocorrelated errors. *Journal of the American Statistical Association*, 71(356), 961-967.
- [3] Glasbey, C.A. (1980). Nonlinear regression with autoregressive time series errors. *Biometrics*, 36(1), 135-139.
- [4] Glasbey, C.A. (1979). Correlated Residuals in Nonlinear Regression Applied to Growth Data. *Applied Statistics*, 28(3), 251-259.
- [5] Glasbey, C.A. (1988). Examples of Regression with Serially Correlated Errors. *The Statistician*, 37(3), 277-291.
- [6] Huang, M.N.L. ve Huang, M.K. (1991). A Parameter-Elimination Method for Nonlinear Regression with Linear Parameters and Autocorrelated Errors. *Biometrical Journal*, 33(8), 937-950.
- [7] Bender, R. ve Heinemann, L. (1995). Fitting Nonlinear Regression Models with Correlated Errors to Individual Pharmacodynamic Data Using SAS Software. *Journal of Pharmacokinetics and Biopharmaceutics*, 23(1), 87-100.
- [8] Aşıkil, B. ve Erar, A. (2013). Polynomial tapered two-stage least squares method in nonlinear regression. *Applied Mathematics and Computation*, 219(18), 9743-9754.

-
- [9] Enders, W. (1995). *Applied Econometric Time Series*. John Wiley and Sons, New York.
- [10] Tong, H. (1983). *Threshold Models in Nonlinear Time Series Analysis*. Lecture Notes in Statistics, Springer-Verlag, New York.
- [11] Tsay, R.S. (1989). Testing and modeling threshold autoregressive processes. *Journal of the American Statistical Association*, 84(405), 231-240.
- [12] Chan, K.S. ve Tong, H. (1986). On estimating thresholds in autoregressive models. *Journal of Time Series Analysis*, 7(3), 179-190.
- [13] Chan, K.S. (1993). Consistency and limiting distribution of the least squares estimator of a threshold autoregressive model. *The Annals of Statistics*, 21(1), 520-533.
- [14] Chan, W.S. ve Cheung, S.H. (1994). On robust estimation of threshold autoregressions. *Journal of Forecasting*, 13(1), 37-49.
- [15] Jaras, J. ve Gishani, A.M. (2010). *Threshold Detection in Autoregressive Nonlinear Models*. MSc. Thesis, Lund University, Sweden.
- [16] Seber, G.A.F. ve Wild, C.J. (1989). *Nonlinear Regression*. John Wiley and Sons, New York.
- [17] Aşıkıl, B. (2018). An Adapted Approach for Self-Exciting Threshold Autoregressive Disturbances in Multiple Linear Regression. *Gazi University Journal of Science*, 31(4), 1268-1282.

Investigating the Relationship Between Air Quality, Meteorological Parameters, and the Transmission Dynamics of COVID-19: A Case Study for Türkiye

Ayşenur KOCAMAZ ¹, Yekta AKKUŞ ¹, Şeyma BABAYİĞİT ¹, Nur H. ORAK ¹

¹Department of Environmental Engineering, Marmara University, Istanbul, Türkiye

Abstract

Understanding the influence of air quality parameters and meteorological factors on SARS-CoV-2 transmission remains a critical concern in the science world. This study investigates the effects of air quality and meteorological parameters on the occurrence of SARS-CoV-2 cases in the cities of Türkiye. Air quality data including PM_{2.5}, PM₁₀, O₃, SO₂, CO, along with meteorological data such as temperature and humidity, were analyzed across 41 cities in Türkiye using Geographic Information Systems and spatial regression models. This regional case study contributes to existing research by emphasizing the importance of localized investigations, acknowledging that the unique characteristics of cities in Türkiye demand a region-specific approach. Differences in climate, air quality, and urbanization patterns across regions can significantly influence disease transmission, making localized studies essential for a comprehensive understanding of virus spread. Ordinary Least Squares (OLS) and Geographically Weighted Regression (GWR) methods were employed to assess both global and localized associations. While the OLS analysis did not reveal statistically significant relationships at the national scale, the GWR approach uncovered notable spatial variability in the strength of associations, particularly for PM_{2.5} and PM₁₀. Certain cities, such as Aksaray and Konya, exhibited stronger correlations between particulate matter concentrations and COVID-19 incidence, suggesting the influence of localized environmental and urban characteristics. The findings of this study aim to enhance global efforts to improve resilience against emerging infectious diseases and promote sustainable, healthier urban environments through tailored regional strategies. Additionally, the results provide valuable insights to local policymakers, aiding in the implementation of strategies to improve air quality in high-risk regions and mitigate the adverse effects of future pandemics on public health and the economy.

Keywords: air quality, SARS-CoV-2, meteorological factors, COVID-19

1. INTRODUCTION

Since the World Health Organization officially declared the COVID-19 pandemic in March 2020 [1], environmental factors, particularly air quality, have emerged as significant components in understanding the dynamics of SARS-CoV-2 transmission. The virus spreads primarily through human-to-human contact, especially via respiratory droplets that are expelled when an infected individual coughs, sneezes, or exhales near others [2]. Urban centers such as New York City in the United States, Madrid, Barcelona, and Milan in Italy have experienced particularly severe effects of the pandemic due to their high population densities and urban pollution levels [3]. Many studies have examined the variations in COVID-19 prevalence and fatality rates in these areas, establishing connections between air pollutants such as particulate matter (PM), nitrogen dioxide (NO₂), and ozone (O₃). Initial research indicates that exposure to particulate matter (PM) could play a key role in the transmission of the virus, with inhalation of these particles serving as a potential vector for SARS-CoV-2 [4].

Additional studies have presented conflicting evidence on the impact of environmental factors like temperature and particulate matter levels. For instance, while some research suggests that lower temperatures and increased PM₁₀ levels may reduce COVID-19 incidence, other studies highlight the greater risk posed by PM_{2.5} and high humidity levels [5]. As the pandemic progressed, researchers worldwide began investigating the spatial relationships between air pollution, meteorological conditions, and COVID-19 transmission. In Bangladesh, for example, Hassan et al. [6] found a significant correlation between infection rates and PM_{2.5}, carbon monoxide (CO), and ozone (O₃) levels. Similarly, in Canada, a study by Stieb et al. [7] explored the relationship between long-term PM_{2.5} exposure, temperature, and public health, revealing a positive, but statistically insignificant, link between COVID-19 cases and air pollution. The study shows the importance of regions with severe health impacts and minimal variations in pollutant exposure, which likely influenced these findings.

Corresponding Author: NUR HANİFE ORAK, Tel: 0216 777 0 777-3619, E-mail: nur.orak@marmara.edu.tr

Submitted: 21.02.2025, **Revised:** 07.07.2025, **Accepted:** 21.07.2025

Research in Chile further emphasized the role of air pollution and meteorological factors in shaping COVID-19 mortality rates. Dales et al. [8] observed a strong correlation between elevated levels of CO, NO₂, PM_{2.5}, and increased COVID-19 deaths, with fluctuations in temperature and humidity playing a significant role in these outcomes. In metropolitan centers where ozone (O₃) and PM₁₀ frequently exceeded safety limits, researchers suggested that SARS-CoV-2 could potentially attach to PM₁₀ particles, prolonging its persistence in the atmosphere, particularly in stable atmospheric conditions with high concentrations of particulate matter.

This trend was also observed in Spain, another country severely affected by the pandemic. Researchers there focused on measuring PM₁₀, NO₂, O₃, and CO levels, uncovering positive associations between these pollutants and COVID-19 transmission [3]. In addition, studies from the Middle East, characterized by warmer climates, revealed significant environmental changes that could influence viral transmission. For instance, Meo et al. [9] highlighted the role of sandstorms in dispersing PM_{2.5}, CO, and O₃, which increased the risk of COVID-19 transmission. Sulfur dioxide (SO₂), however, was found to decrease the incidence of confirmed cases in Iran, suggesting a complex interaction between various pollutants and viral transmission [10]. Further research examined the daily exposure to PM_{2.5}, PM₁₀, and ozone, finding strong correlations between short-term exposure and increased COVID-19 incidence, particularly in warmer regions.

The earlier studies in Türkiye analyzed the temporal relationship between parameters and COVID-19 cases [11]. The later studies investigated the spatial analysis in different regions of the country [12]. Building upon this global body of research, the present study investigates the relationship between air quality, meteorological factors, and COVID-19 transmission in Türkiye. Using geographic analysis tools within ArcMap [13], the study employs both Geographically Weighted Regression (GWR) and Ordinary Least Squares (OLS) analyses to explore these relationships. While OLS regression identifies the best-fitting line by minimizing the difference between observed and predicted values, GWR accounts for geographic variability in the correlation between independent and dependent variables. GWR provided more insightful results by capturing regional variations and underlying mechanisms. Although its predictive power remains subject to debate, GWR offers a better understanding of non-linear relationships between air pollution, meteorological conditions, and COVID-19 transmission. This comprehensive analysis shows the importance of regional variability and environmental factors in understanding the dynamics of the pandemic in Türkiye.

II. MATERIALS and METHODS

Data Collection

The COVID-19 infection case numbers were obtained from the Ministry of Health's official website, covering eight weeks from February 14, 2021, to April 2, 2021 [14]. This data encompassed 41 cities in Türkiye, specifically selected due to the limited availability of information on PM₁₀, PM_{2.5}, SO₂, O₃, and CO concentrations in other cities. The air quality parameters were obtained from the Ministry of Environment, Urbanization, and Climate Change [15], while meteorological data was provided by the General Directorate of Meteorology within the Ministry [16].

Study Area

The study area covers 41 cities across Türkiye, selected based on the availability of consistent and comprehensive data on air quality parameters and meteorological conditions. The selected cities are Adana, Aksaray, Amasya, Antalya, Artvin, Balıkesir, Çanakkale, Iğdır, Karabük, Kayseri, Kırklareli, Kırşehir, Konya, Kütahya, Malatya, Manisa, Mersin, Muş, Nevşehir, Niğde, Ordu, Rize, Sakarya, Samsun, Sivas, Tekirdağ, Tokat, Trabzon, Tunceli, Uşak, Van, Yalova, Yozgat, Zonguldak, Elazığ, Erzurum, Erzincan, Afyonkarahisar, Aydın, Bolu, and Denizli. Türkiye's geographical diversity, covers various climate zones and urbanization patterns, provides a valuable context for exploring environmental influences on public health. The cities included in the analysis represent a range of geographic regions, including coastal, inland, urban, and semi-rural areas, ensuring that the study captures spatial variation in environmental and atmospheric conditions. This regional distribution supports a robust spatial analysis framework to investigate the relationships between environmental factors and COVID-19 transmission using GIS-based statistical modeling techniques.

Statistical Methods

A range of data visualization techniques and regression models were employed to explore the influence of air quality and meteorological factors on the transmission of SARS-CoV-2 in Türkiye. The methodology was designed to account for both linear and non-linear relationships between variables. To analyze linear associations, the OLS regression model was used. For geospatial analysis, the GWR technique was implemented, utilizing ArcMap software [12]. Within ArcMap, data layers were used to create heat maps, and the software generated raster surfaces that displayed the concentration of point data in specific regions.

OLS regression was applied to model the relationships between the independent variables (PM₁₀, PM_{2.5}, SO₂, O₃, NO₂, temperature, wind direction, and wind speed) and the dependent variable (number of COVID-19 cases). ArcMap's spatial statistics tools were utilized to

perform the OLS regression and analyze spatial relationships within the dataset.

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 X_{1i} + \beta_2 X_{2i} + \dots + \beta_k X_{ki} + \varepsilon_i \quad (1)$$

Where:

- y_i is the dependent variable (COVID-19 cases in city i),

- $X_{1i}, X_{2i}, \dots, X_{ki}$ are the independent variables (e.g., PM_{10} , $PM_{2.5}$, SO_2 , etc.),

- β_0 is the intercept,

- $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k$ are the coefficients to be estimated,

- ε_i is the error term. [12]

To further investigate potential non-linear associations, GWR analysis was conducted using ArcMap's Toolbox. GWR, as a local regression method, accounts for spatial heterogeneity, making it distinct from OLS, which assumes uniformity across the study area.

$$y_i = \beta_0(u_i, v_i) + \sum [\beta_k(u_i, v_i) * X_{ki}] + \varepsilon_i \quad (2)$$

Where:

- (u_i, v_i) are the coordinates of location i ,

- $\beta_k(u_i, v_i)$ represents the location-specific coefficient for variable k ,

- Other terms are as defined in the OLS equation. [12]

The dependent variable in the GWR analysis was the number of COVID-19 cases, and the independent variables included PM_{10} , $PM_{2.5}$, SO_2 , O_3 , NO_2 , temperature, wind direction, and wind speed. Several key parameters were considered during the GWR

analysis, including bandwidth, residual sum of squares, effective number of parameters, sigma, Akaike Information Criterion corrected for small sample size (AICc) [17], and R-squared. Detailed explanations of these parameters are provided in the results and discussion sections of this paper.

III. RESULTS and DISCUSSION

Exploratory Data Analysis

The heat maps show the visualization of the dispersion of average COVID-19 cases per 100,000 people over an eight-week period across various cities. As shown in Figure 1, the color white signifies the absence of officially shared data, thereby leading to the exclusion of cities falling under this category from our study. Conversely, cities denoted by a distinctive orange, such as Samsun, Ordu, and Trabzon cities are indicative of a notable prevalence of COVID-19 cases. Upon initial inspection, it becomes apparent that larger urban centers and those with a substantial presence in the tourism sector exhibit a higher incidence of cases, while smaller cities exhibit a comparatively lower density of such occurrences. A comprehensive statistical summary encompassing all the parameters referenced within the specified time interval can be found in Table 1.

Temperature constituted one of the meteorological parameters subjected to our analysis. In Figure 2, the depiction of elevated temperatures is denoted by a deeper shade of green. Notably, cities such as Antalya, Adana, and Trabzon emerged as possessing higher temperature levels when compared to the remaining cities showcased in the illustration. The distribution of humidity follows a pattern similar to temperature in some cities, whereas in others, it differs significantly.

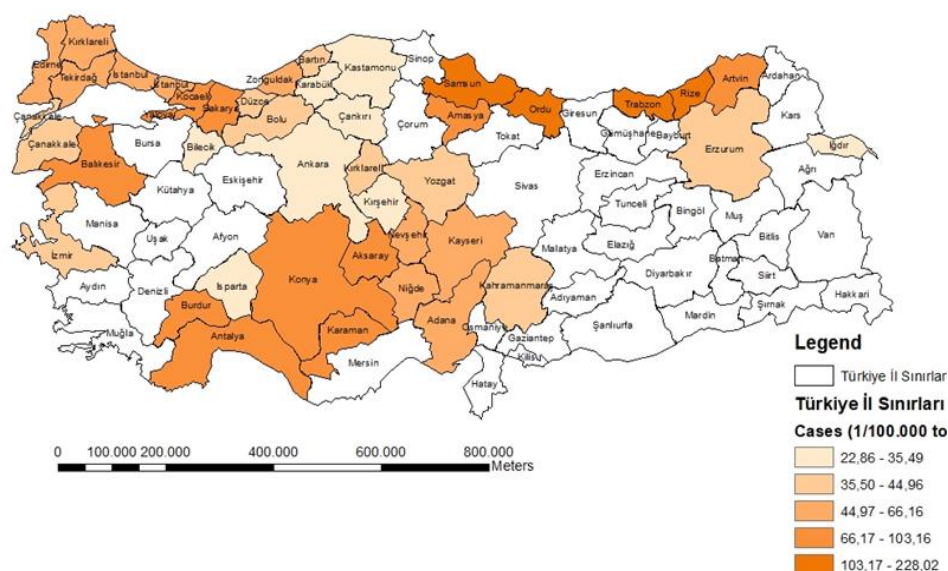


Figure 1. Heat map illustrating the variation in COVID-19 cases across different cities of Türkiye.

Table 1. Statistical summary table, concentrations of the parameters ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

City	No	Avg. PM ₁₀	Avg. SO ₂	Avg. NO ₂	Avg. O ₃	Avg. PM _{2.5}
Adana	8	16.75	4.39	13.36	51.64	6.67
Aksaray	8	41.62	18.57	21.73	45.02	20.38
Amasya	8	56.07	0.00	27.70	38.07	30.92
Ankara	8	55.68	3.07	44.75	23.32	18.82
Antalya	8	39.19	4.78	34.28	50.11	18.25
Artvin	8	21.5	8.97	18.23	57.44	0.00
Balıkesir	8	72.32	27.07	32.40	39.48	26.02
Bartın	8	58.21	12.54	31.74	45.40	24.98
Bilecik	8	43.48	11.89	21.55	78.68	19.30
Bolu	8	45.34	20.81	30.77	32.05	19.18
Burdur	8	42.38	16.91	25.99	49.92	27.30
Çanakkale	8	34.36	13.72	20.51	50.06	15.86
Çankırı	8	31.98	22.38	31.87	44.17	9.65
Düzce	8	43.54	10.22	15.62	11.26	29.27
Edirne	8	70.21	68.70	11.24	35.51	33.34
Erzurum	8	61.4	0.00	54.82	0.00	36.97
İğdır	8	67.38	5.09	14.49	67.64	34.55
Isparta	8	39.95	20.25	29.12	51.54	25.12
İstanbul	8	41.40	18.48	56.07	64.81	22.42
İzmir	8	36.60	8.85	0.00	0.00	21.58
Kahramanmaraş	8	87.30	21.89	34.34	8.35	24.51
Karabük	8	71.33	3.38	28.09	0.00	25.21
Karaman	8	26.74	5.77	21.16	55.68	16.42
Kastamonu	8	30.28	17.8	27.43	24.34	9.26
Kayseri	8	50.89	7.96	54.85	0.00	41.64
Kırıkkale	8	0.00	17.85	23.83	3.44	14.09
Kırklareli	8	50.37	22.10	17.37	55.17	17.66
Kırşehir	8	23.23	13.26	68.63	55.94	8.59
Kocaeli	8	31.48	12.46	16.71	54.68	18.78
Konya	8	57.11	8.98	47.23	25.78	32.60
Nevşehir	8	34.16	10.98	24.25	48.56	12.13
Niğde	8	34.78	5.82	26.12	57.00	18.34
Ordu	8	34.29	15.75	62.26	0.00	17.72
Rize	8	27.76	4.98	6.52	76.37	12.35
Sakarya	8	39.16	29.83	25.70	35.16	32.17
Samsun	8	33.15	10.25	66.43	7.64	9.53
Tekirdağ	8	44.65	28.63	28.02	39.79	23.64
Trabzon	8	61.74	8	41.65	0.00	23.88
Yalova	8	46.99	57.59	44.16	49.24	20.38
Yozgat	8	41.80	38.52	27.38	5.54	10.53
Zonguldak	8	61.42	24.01	21.20	35.99	33.96

The proximity of cities to bodies of water plays a crucial role in influencing local humidity levels. However, for a more in-depth understanding, comprehensive meteorological analyses would be necessary.

PM_{2.5} has emerged as a key parameter in this study, given its considerable impact on the results. As demonstrated in Figure 3, cities such as Konya, Amasya, Kayseri, Trabzon, and Iğdır are marked by the darkest shades of pink, indicating high concentrations of PM_{2.5}. Konya's economy is largely based on agriculture and livestock farming. Although specific emission data for Konya is limited, studies from other regions have shown that such activities contribute substantially to particulate matter concentrations [18,19]. The elevated PM_{2.5} levels in Konya can thus be attributed to these practices. Similarly, Amasya, Kayseri, Trabzon, and Iğdır exhibit high PM_{2.5} concentrations, which can be explained by comparable economic activities.

In contrast, cities like Kırklareli, Çanakkale, Balıkesir, and Rize are represented by lighter shades of pink, signifying lower PM_{2.5} concentrations. The sources of particulate matter in these urban centers are more diverse, stemming from a broader range of activities. It is essential to recognize that the origins of particulate matter in these regions are highly complex, influenced not only by industrial or agricultural practices but also by factors such as daily human behaviors and local pollution control measures. These diverse factors

contribute to the varying levels of particulate matter observed across different regions. The highest concentrations of PM_{10} were observed in four cities: Karabük, Trabzon, Kahramanmaraş, and Iğdır. Identifying the exact sources of PM_{10} in these regions is challenging due to the nature of particulate emissions. However, one contributing factor in these cities is the use of wood burning for heating during the winter months, which significantly adds to particulate matter levels. On the other hand, cities such as Kırşehir

and others have lower PM_{10} levels, which could arise from a variety of sources. These cities do not share a common primary cause for PM_{10} generation. Geographically, they are not close enough to exhibit similar weather-related patterns, making it difficult to draw direct correlations between PM_{10} concentrations and meteorological parameters like temperature or conditions related to SARS-CoV-2. As such, understanding the interplay of these factors requires a more nuanced approach.

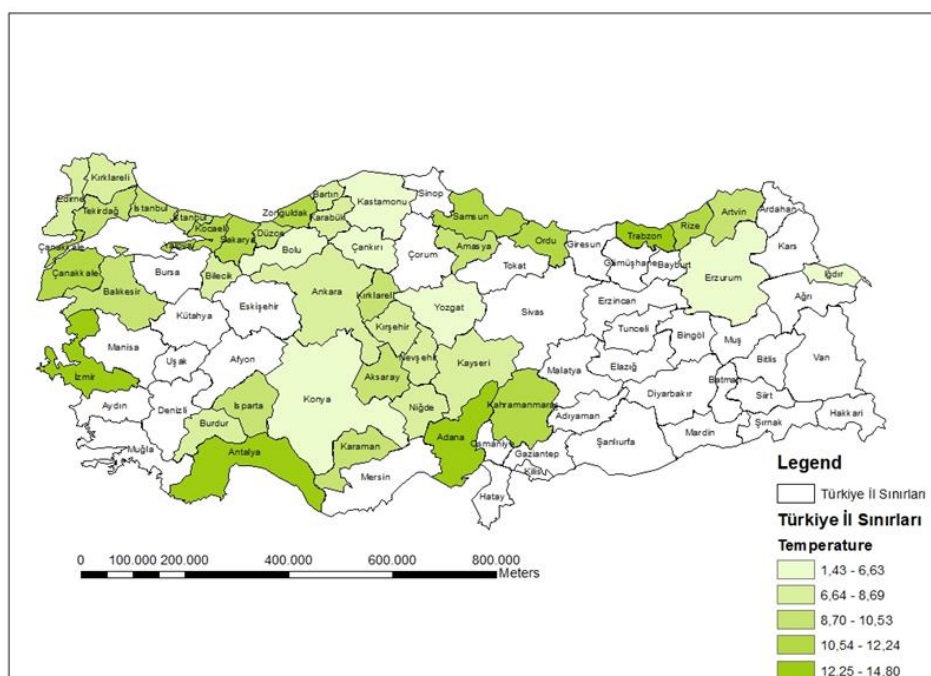


Figure 2. Heat map illustrating the variation in temperature across different cities of Türkiye.

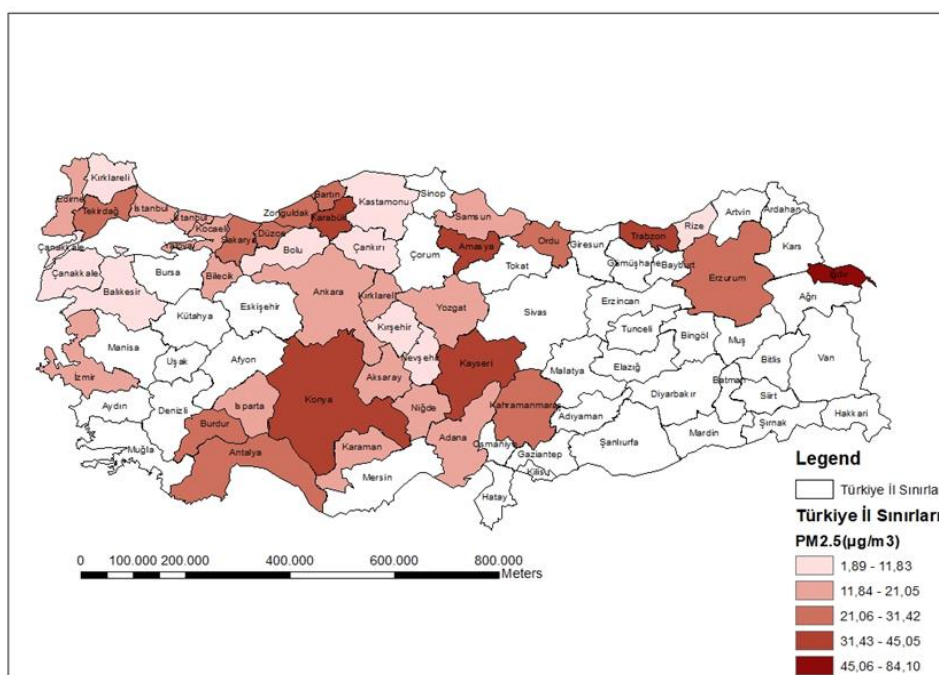


Figure 3. Heat map illustrating the variation in $PM_{2.5}$ concentrations across different cities of Türkiye.

The Ordinary Least Squares Analysis

The spatial dataset was analyzed using OLS regression, a commonly used method due to its simplicity and effectiveness in providing a global perspective on variable relationships. OLS was selected to serve as a baseline model, offering insights into potential explanatory factors and laying the groundwork for comparisons with more advanced spatial regression techniques. The results of the OLS analysis are displayed in Table 2.

Table 2. Summary of OLS Results - Model Variables

Variable	Intercept	PM ₁₀	SO ₂	NO ₂	PM _{2.5}
Coefficient [a]	73.85	-0.44	0.19	0.18	0.52
StdError	22.25	0.51	0.66	0.40	0.88
t-Statistic	3.32	-0.87	0.29	0.44	0.59
Probability [b]	0.002071*	0.39	0.78	0.66	0.56
Robust_SE	13.87	0.34	0.58	0.36	0.64
Robust_t	5.33	-1.30	0.33	0.49	0.81
Robust_Pr [b]	0.000005*	0.20	0.75	0.63	0.42
VIF [c]	-----	2.61	1.04	1.05	2.64

The OLS model did not provide sufficient evidence to conclusively link the independent variables to COVID-19 case numbers. The analysis was unable to determine whether air pollution directly contributes to an increase in COVID-19 cases or merely exacerbates the impact of the virus on the population. However, the analysis suggests that certain pollutants' intensity may be correlated with case levels, as shown in the heat maps. The OLS model does not robustly support a direct association between the independent variables and COVID-19 cases. This is evident because the probability values for each independent variable are higher than 0.001, and even when using Robust Probability to test for significance, no meaningful results were obtained. While some positive coefficients were observed, they lacked statistical significance. This indicates that the relationship between air pollutants and COVID-19 cases might be more complex than what a linear regression model can capture, or that other variables may play a stronger role in driving COVID-19 case numbers. In this context, more flexible models, such as nonlinear regression, machine learning algorithms (e.g., random forest or gradient boosting), or spatial-temporal models, may offer better performance by capturing potential interactions, nonlinear effects, or spatial dependencies that a simple linear model cannot account for.

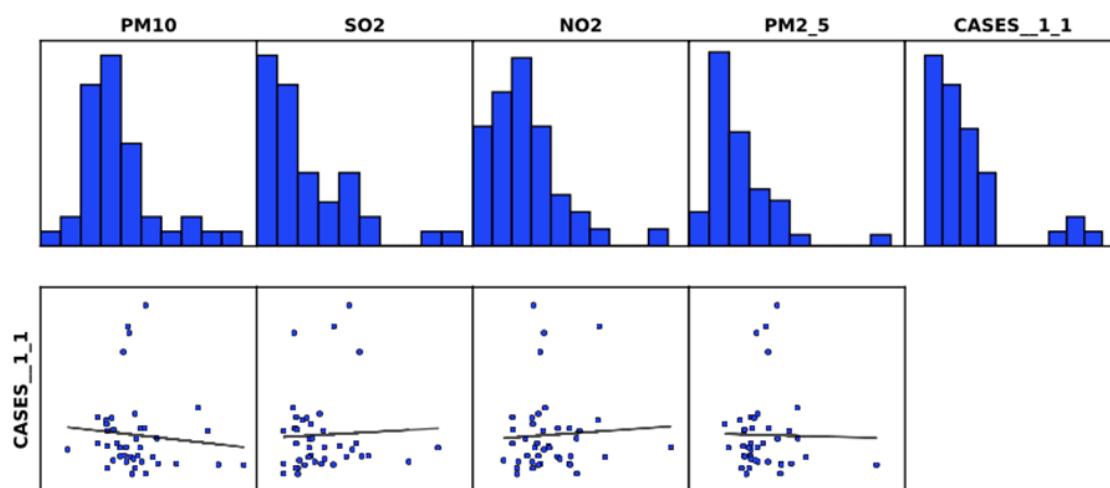


Figure 4. Variable distributions and relationships.

Figure 4 presents the relationships between the dependent and explanatory variables. The histograms display the distribution of each variable, providing a visual overview of their patterns and central tendencies. Meanwhile, the scatterplots illustrate the relationship between each explanatory variable and the dependent variable, offering a clear representation of their associations. These graphical representations collectively provide valuable insights into the distribution of the variables and the nature of their interconnections, enhancing our understanding of their underlying relationships.

It is important to recognize the limitations of OLS, particularly its assumption of constant relationships

across the dataset and its inability to account for spatial dependencies. These limitations can result in an incomplete analysis, especially when dealing with spatially distributed data. To address these shortcomings and better capture the complexities inherent in spatial data, GWR offers a more nuanced approach by considering spatial variations and localized relationships.

The Geographically Weighted Regression Analysis

The GWR technique was employed in this study to account for the spatial heterogeneity present within the dataset. While the initial analysis using OLS regression provided useful insights into the overall relationships between variables, it failed to capture the potential

spatial variations and non-stationarity inherent in the data. GWR was used to investigate and better understand the localized relationships between the dependent and explanatory variables. This method enables the estimation of spatially varying coefficients, revealing how these relationships differ across various cities.

Through the application of GWR, a more detailed understanding of the spatial patterns emerged, addressing the spatial non-stationarity within the study area. The results obtained from GWR provide a clearer picture of the spatially varying associations, offering

valuable insights into the localized dynamics of the variables under investigation. In this study, both single-variable and multivariable GWR analyses were conducted. The single-variable analysis aimed to explore the spatial variations and localized impacts of specific independent variables on COVID-19 cases. For example, as shown in Figure 3, PM_{2.5} concentrations were analyzed using GWR, revealing notable localized impacts. The province of Aksaray, in particular, was highlighted as having the highest concentrations of PM_{2.5}, demonstrating the power of GWR in pinpointing regional variations.

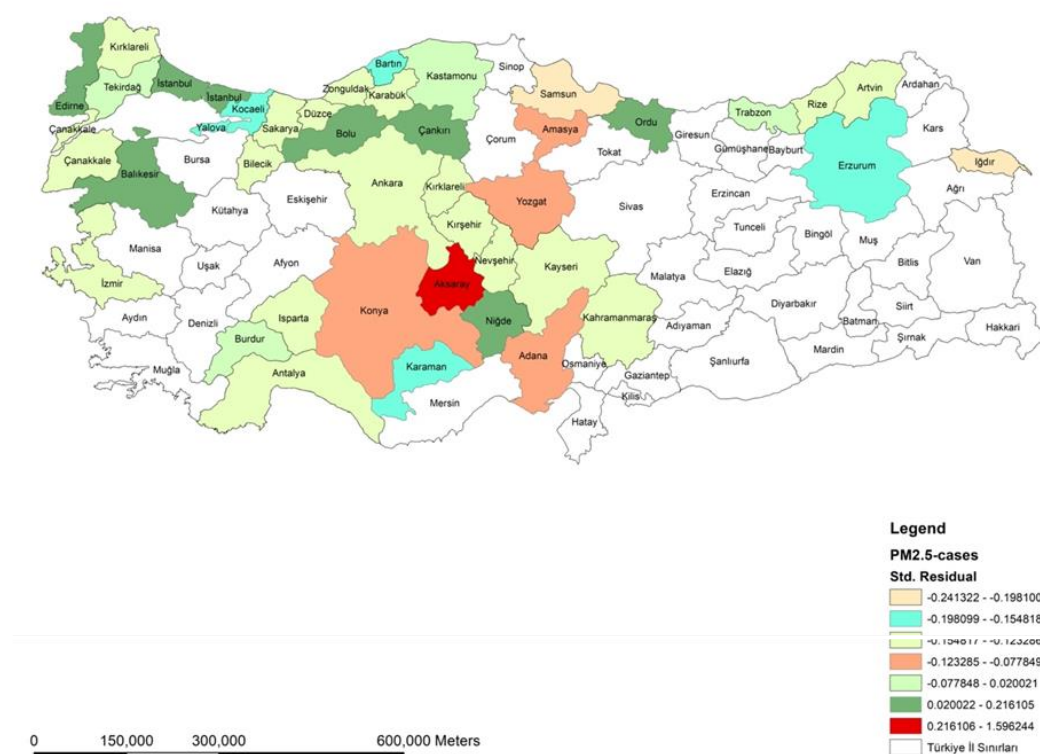


Figure 5. Single variable Geographically Weighted Regression heat map depicting the spatial distribution of PM_{2.5} concentrations.

Figure 5 presents the spatial relationships between multiple air quality parameters and COVID-19 cases. This multivariable approach allows for a more comprehensive assessment of the spatially varying effects of several predictors simultaneously. By accounting for multiple variables, the analysis provides deeper insights into the factors contributing to the observed patterns or variations in the dependent variable across different locations. The multivariable GWR analysis helps to identify how the interaction between various air quality indicators influences the spread of COVID-19, offering a more detailed understanding of the drivers behind these spatial patterns.

The GWR results for the model variables suggests that the model does not provide strong evidence linking the independent variables to COVID-19 cases. It remains

unclear whether air pollution directly contributes to the increase in COVID-19 infections or simply exacerbates the virus's impact on more vulnerable populations. Nonetheless, the analysis indicates a potential correlation between the intensity of certain pollutants and the severity of COVID-19 cases, as demonstrated in Figure 6. The heat map generated from the GWR analysis reveals the standard deviations for PM_{2.5}, PM₁₀, SO₂, and NO₂, shedding light on the spatial distribution of these air pollution parameters.

The further details of the GWR results, offering key insights into the relationships between variables. The R-squared value indicates that approximately 69% of the variability in COVID-19 cases can be explained by the independent variables included in the GWR model. The AICc measures model fit while balancing complexity and accuracy. A lower AICc value

represents a better trade-off, and in this case, the AICc value is 5297.5, suggesting a reasonable fit of the GWR model. The bandwidth parameter in GWR defines the spatial extent over which relationships between variables are estimated, with neighboring data points considered within this distance. In this model, the bandwidth value is 34,256, which indicates the spatial range taken into account for each location. The residual sum of squares represents the goodness of fit of the model, where a lower value suggests a better alignment of the model with the data. Finally, the sigma value, representing the standard deviation of the residuals, is 4187, indicating the typical deviation between observed and predicted values in the model.

IV. CONCLUSION

This study investigated the association between SARS-CoV-2 and various meteorological and air pollution factors. The research employed ArcMap for conducting

Ordinary Least Squares and Geographically Weighted Regression analyses. These two approaches yielded distinct results, with GWR proving effective with geographic variations and localized influences, while OLS was more suitable for situations where interactions remained consistent across different cities. GWR, being more intricate, provided a comprehensive examination by identifying spatial variations. Nonetheless, it is important noting that GWR can be computationally intensive and necessitates careful consideration of geographic scales, making local model interpretation more challenging. In the OLS analysis, the data characteristics did not reveal a significant link between COVID-19 cases and meteorological and air pollution factors. This suggests that the relationship may be more complex than what can be captured by a linear model. Additionally, it hints at the possibility of other independent variables that should be considered to obtain more accurate results.

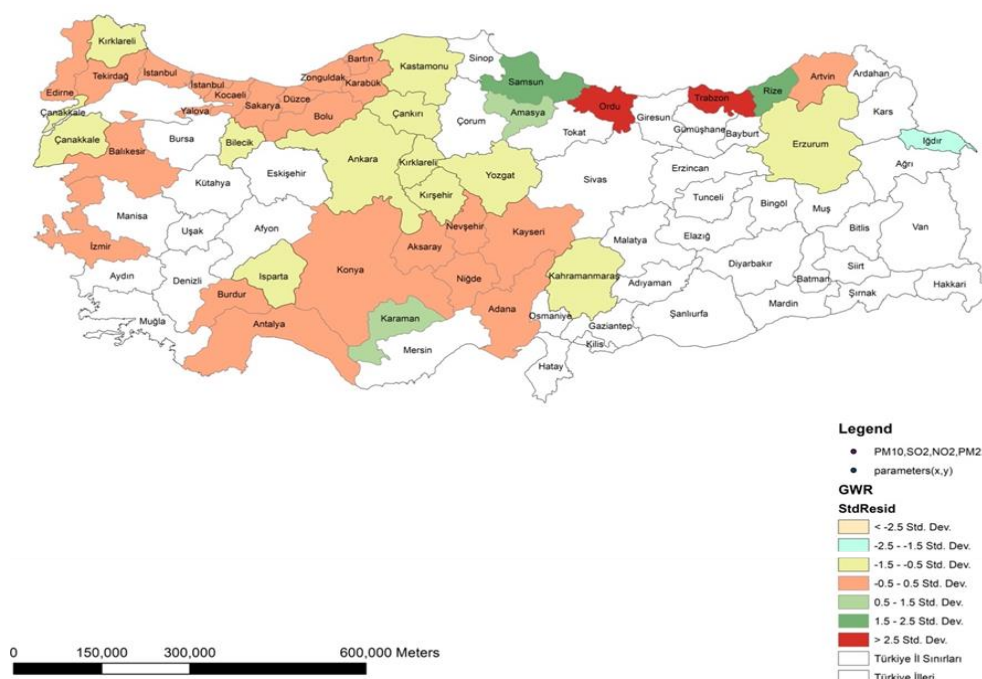


Figure 6. Multivariable Geographically Weighted Regression heat map depicting the spatial distribution of air quality parameters.

Conversely, in the GWR analysis, the dataset displayed a non-linear relationship between COVID-19 cases and meteorological and air pollution parameters. Notably, certain cities, such as Samsun, Rize, and Artvin, exhibited contrasting results in both methods, as indicated by different standard deviations. On the other hand, Trabzon and Ordu demonstrated a greater degree of consistency in terms of data variability. To arrive at a more precise interpretation, it is essential to delve deeper into the specifics of the GWR study, including the variables utilized and the source of these results. Furthermore, to strike a better balance between model accuracy and complexity, it may be beneficial to reduce the number of parameters in the dataset.

Several limitations of the current study should be acknowledged. First, the analysis was limited by the spatial resolution and temporal granularity of the COVID-19 case data and air quality data. Daily or weekly case counts, if available, would allow for more dynamic temporal modeling. Second, the set of environmental predictors was limited; additional variables such as population mobility, socioeconomic indicators, healthcare access, or vaccination rates might improve explanatory power. Third, the GWR model, although effective in capturing spatial variations, is computationally intensive and may be sensitive to the choice of kernel and bandwidth, which could affect result interpretation.

To enhance the robustness of future studies, more comprehensive datasets with higher spatial and temporal resolution should be used. Including a broader array of predictor variables and employing ensemble or hybrid modeling approaches could also improve predictive accuracy. Finally, cross-validation or out-of-sample testing should be applied to compare model performance objectively and ensure generalizability.

In conclusion, while GWR demonstrated its strength in capturing spatial heterogeneity, the study underlines the need for more flexible and data-rich modeling strategies to fully understand the environmental determinants of COVID-19 spread.

ACKNOWLEDGEMENTS

We thank the TÜBİTAK 2209-A Research Project Support Program for University Undergraduate Students for funding this study.

REFERENCES

- [1] WHO. (2020). World Health Organization. <https://covid19.who.int>
- [2] Huang, C., Wang, Y., Li, X., Ren, L., Zhao, J., Hu, Y., ... Cao, B. (2020). Clinical features of patients infected with 2019 novel coronavirus in Wuhan, China. *The Lancet*, 395(10223), 497–506. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(20\)30183-5](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(20)30183-5)
- [3] Marquès, M., Rovira, J., Nadal, M., & Domingo, J. L. (2021). Effects of air pollution on the potential transmission and mortality of COVID-19: A preliminary case study in Tarragona Province (Catalonia, Spain). *Environmental Research*, 192, 110315.
- [4] Setti, L., Passarini, F., De Gennaro, G., Barbieri, P., Licen, S., Perrone, M. G., ... Miani, A. (2020). Potential role of particulate matter in the spreading of COVID-19 in Northern Italy: First observational study based on initial epidemic diffusion. *BMJ Open*, 10(9), e039338.
- [5] Lin, S., Wei, D., Sun, Y., Chen, K., Yang, L., Liu, B., ... Wu, S. (2020). Region-specific air pollutants and meteorological parameters influence COVID-19: A study from mainland China. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 204, 111035.
- [6] Hassan, M. S., Bhuiyan, M. A. H., Tareq, F., Bodrud-Doza, M., Tanu, S. M., & Rabbani, K. A. (2021). Relationship between COVID-19 infection rates and air pollution, geo-meteorological, and social parameters. *Environmental Monitoring and Assessment*, 193(1), 29. <https://doi.org/10.1007/s10661-020-08810-4>
- [7] Stieb, D. M., Evans, G. J., To, T. M., Brook, J. R., & Burnett, R. T. (2020). An ecological analysis of long-term exposure to PM_{2.5} and incidence of COVID-19 in Canadian health regions. *Environmental Research*, 191, 110052. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.110052>
- [8] Dales, R., Blanco-Vidal, C., Romero-Meza, R., Schoen, S., Lukina, A., & Cakmak, S. (2021). The association between air pollution and COVID-19 related mortality in Santiago, Chile: A daily time series analysis. *Environmental Research*, 198, 111284. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.111284>
- [9] Meo, S. A., Almutairi, F. J., Abukhalaf, A. A., Alessa, O. M., Al-Khlaiwi, T., & Meo, A. S. (2021). Sandstorm and its effect on particulate matter PM_{2.5}, carbon monoxide, nitrogen dioxide, ozone pollutants and SARS-CoV-2 cases and deaths. *Science of The Total Environment*, 795, 148764. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148764>
- [10] Khorsandi, B., Farzad, K., Tahriri, H., & Maknoon, R. (2021). Association between short-term exposure to air pollution and COVID-19 hospital admission/mortality during warm seasons. *Environmental Monitoring and Assessment*, 193(7), 426. <https://doi.org/10.1007/s10661-021-09210-y>
- [11] Orak, N.H. (2022). Effect of ambient air pollution and meteorological factors on the potential transmission of COVID-19 in Turkey, *Environmental Research*, Volume 212, Part E, 113646, ISSN 0013-9351, <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.113646>.
- [12] Ulutaş, K., Abujayyab, S.K., Abu Amr, S.S. (2023). The effect of air quality parameters on new COVID-19 cases between two different climatic and geographical regions in Turkey. *Theoretical and Applied Climatology*, 152, 801–812. <https://doi.org/10.1007/s00704-023-04420-5>
- [13] ESRI. (2023). ArcGIS for Personal Use. <https://www.esri.com.tr/tr-tr/urunler/arcgis-for-personal-use>
- [14] T.C. Sağlık Bakanlığı. (2021). COVID-19 Bilgilendirme Platformu. <https://covid19.saglik.gov.tr/>
- [15] T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. (2023). Ulusal Hava Kalitesi İzleme Ağı. <https://sim.csb.gov.tr/>
- [16] T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı Meteoroloji Genel Müdürlüğü. (2023). Meteorolojik Veri Bilgi Satış ve Sunum Websitesi.
- [17] Hurvich, C. M., & Tsai, C.-L. (1989). Regression and time series model selection in small samples. *Biometrika*, 76(2), 297–307. <https://doi.org/10.1093/biomet/76.2.297>
- [18] Tayanç, M., Sezen, İ., Ünal, A. et al. (2022). A holistic approach to the air quality of Konya City, Turkey. *Air Qual Atmos Health* 15, 951–965. <https://doi.org/10.1007/s11869-022-01200-4>
- [19] Cambra-López, M., Aarnink, A.J.A., Zhao, Y., Calvet, S. Torres, A.G. (2010). Airborne particulate matter from livestock production systems: A review of an air pollution problem, *Environmental Pollution*, Volume 158, Issue 1, 2010, Pages 1-17, ISSN 0269-7491, <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2009.07.011>.

Dynamic Network DEA Approach for Evaluating Hospital Performance in the Healthcare Sector

Eda KOÇAK¹, Fazıl GÖKGÖZ²

¹Erzincan Binali Yıldırım University, Department of Management, 24002, Erzincan, Türkiye

²Ankara University, Department of Management, 06590, Ankara, Türkiye

Abstract

This study simultaneously evaluates the performance of Training and Research Hospitals in Turkey for 2018 and 2019 at both the overall and sub-unit levels. Traditional Data Envelopment Analysis (DEA) models treat decision-making units as a single process, often neglecting internal structures. To overcome this limitation, the study employs the Dynamic Network Data Envelopment Analysis (DN-DEA) approach, which incorporates two interrelated sub-units: administrative services and medical care services. This enables independent evaluation of sub-units, without disregarding their mutual connections. The results show that hospitals efficient in both sub-units are classified as fully efficient. However, some hospitals not on the overall efficiency frontier demonstrated full efficiency in specific sub-units. For instance, H12 and H33 were efficient in administrative services, while hospitals such as H14, H17, H21, and H23 attained efficiency only in medical services. In 2018, the budget account balance was identified as the most critical input requiring reduction (72.7%) for inefficient hospitals, followed by the number of resident physicians (50.7%). In 2019, the budget balance remained the top priority for reduction (62.1%), while the insufficient reduction in resident physicians caused the required adjustment to rise to 52.3%. In light of these findings, it is recommended that hospital performance management consider not only overall efficiency scores but also sub-unit-level analyses. Furthermore, the study emphasizes that improvements in budget management and human resource planning may play a critical role in enhancing hospital efficiency.

Keywords: Hospital efficiency, Network DEA, Dynamic and Network DEA, Slack-based measure

I. INTRODUCTION

A decrease in hospital efficiency is observed worldwide [1,2,3]. Correct and efficient uses of resources that will be used in health services play a critical role in determining the limit of health policies of states. The third strategic planning of the Republic of Turkey Ministry of Health, covering the period of 2019-2023, drew attention to this situation and stated that the objectives of the ministry are the provision of accessible, effective, efficient and high quality health services [29]. The share of education and research hospitals, which are tertiary care providers, in current has increased health expenditures significantly over the years [28]. In this context, examining the effectiveness of training and research hospitals is important for decision makers and health care policies. Evaluating hospital efficiency is a process that optimizes resource use and allocation [3]. Hospitals are organizations that have their own unique inputs, outputs and are made up of sub-units that are interconnected. To be able to continue their activities requires their sub-units to be organized with networks that enable them to connect with each other. This organization creates a network/network structure. Traditional data development analysis (DEA) methods, which see the hospital as a structure consisting of a single process that collects all inputs and transforms them into outputs, have been widely applied in the efficiency measurements of such structures [26].

The DEA approach is advantageous since this technique does not require any functional relationship between inputs and outputs [4]. On the other hand, traditional DEA models see the organization as a black box and neglect its internal structure. Not neglecting the internal dynamics of the organization allows us to get more accurate results [27].

In this study, it was considered that the two sub-units of the hospitals, which are the decision-making unit (DMU), perform service production with their activities. These subunits are; management unit and medical care unit. The output element of one of the units continues its activities in connection with each other as the input of the other. This structure creates a network system. In line with this information, the purpose of this paper is to simultaneously

Corresponding Author: EDA KOÇAK, Tel: 0446 225 20 92-41022, E-mail: eda.kocak@erzincan.edu.tr

Submitted: 12.11.2024, **Revised:** 03.06.2025, **Accepted:** 21.07.2025

measure the total activity levels and period-sub-unit activities of Turkey training and research hospitals for the years 2018 and 2019, and to determine the efficiency change between years. In this context, Network DEA, which is suitable for the efficiency measurement of network systems, was used. In addition, the Dynamic Network DEA (DN-DEA) model was preferred to include the elements transferred from one period to the other in the analysis and to investigate the time-dependent efficiency change.

There are various international studies that have applied the DN-DEA model in the field of healthcare services. Kawaguchi et al. [6] examined the impact of healthcare reforms in municipal hospitals in Japan, focusing on treatment and administrative units. Lobo et al. [15] evaluated the efficiency of federal university hospitals in Brazil in terms of healthcare services, education, and research. Khushalani and Özcan [25] analyzed adult general hospitals in the United States based on medical and quality-related outputs. Considering the existing literature, this study appears to be among the first to apply the DN-DEA model to evaluate the efficiency of healthcare services in Turkey.

According to the results of the DN-DEA model analysis, not only are fully efficient and relatively inefficient hospitals identified, but the sources of inefficiency within specific service sub-units are also revealed. The remainder of the paper is organized as follows; section two mentions dynamic and network examples from studies using the DEA model are presented and the conceptual structure of the model is explained, and sample selection and data used for hospital efficiency measurement are presented. Section three results and finally, section four provides concluding remarks.

II. METHOD AND DATA

2.1. Concept Dynamic and Network DEA Model

Farrell conducted one of the pioneering studies focus on measuring the efficiency of homogeneous entities known as Decision Making Units (DMUs) [5]. DEA is characterized as a data-oriented, non-parametric methodology grounded in linear programming, and has been extensively utilized to evaluate the technical efficiency of relatively homogeneous groups of DMUs. DMUs refer to comparable units that utilize identical resources (inputs) to generate similar products (outputs). A DMU is regarded as efficient if it generates a higher level of output with a constant amount of input (output-oriented) or achieves a given output using fewer inputs (input-oriented). Efficient DMUs define the best practice frontier that encompasses all units under comparison. A DMU is considered efficient if it reaches the Pareto-Koopmans optimum, where no output can be increased (or input reduced) without worsening another output or input [6].

The first DEA models were the CCR Model, proposed by Charnes, Cooper and Rhodes (1978). The CCR model is based on a production possibility frontier and assumes constant returns to scales, which implies a proportional relationship between the increases in inputs and the resulting increases outputs [7]. Alternatively, BCC (Banker, Charnes & Cooper) model was developed to analyze pure technical and scale efficiencies of DMUs by considering variable returns to scale. This assumption allows for non-proportional changes between inputs and outputs, which is especially useful when comparing units that differ significantly in size or output scale [4].

Any distance from the boundary (score less than “1” or 100%) is due to ineffectiveness, that is, the difference between current values and predicted values. By developing traditional DEA models, it can be used for network structures consisting of many subsystems and revealing intermediate products that can be used as inputs in a new process.

Network DEA consists of a family of DEA models that establish linear constraints on the size of each sub-activity of the system under study. In this way, it is possible to take into account the input and output elements of more than one dimension, the connection variables, and to measure the effectiveness separately for each dimension. Fare and Grosskopf [8], provided the theoretical groundwork for N-DEA models. Then, measurement methods suitable for the network structure of the system of interest were developed Löthgren and Tambour [9], Golany, Hackman, and Passy [10], Yu and Lee [11] Fukuyama and Weber [12], Kao and Hwang [13], Yu and Fan [14].

The models applied in the literature for network systems have generally not dealt with projections in the non-Pareto efficient regions of the frontier and estimates involving Pareto-efficiency target related slackness lead to efficiency prediction errors. Non-radial models determine efficiency based on Pareto-optimal targets, and among these, the SBM approach is particularly noteworthy [15]. The SBM approach was adopted by Tone and Tsutsi for efficiency measurement of network systems [27]. In addition, some studies have performed efficiency measurements for both the current and successive periods, taking into account the shift in the production frontier. These studies have also incorporated time-dependent variations into DEA models, thereby contributing to the development of dynamic efficiency analysis frameworks [16,12,17,18].

While the same outputs are produced by using the same inputs in each period in DMUs, some of the outputs in different systems can be processed as inputs in the following period. These variables that provide the inter-period connection are called carry over variables and

can be used in fixed, desired, undesired, free options [15].

In this study, Dynamic Network Slack Based Measure (DN-SBM) model, which was proposed by Tone and Tsutsi (2014), to analyze dynamic efficiency in systems with a network structure [18]. While the model deals with the interconnection variables of each DMU and the individual activities of its connected sub-DMUs, it connects the successive periods of DMUs through transferring variables and allows us to see the time-dependent change dynamically on the horizontal. We can measure the total activities of the DMUs for the relevant period and the their sub-activities, which are sub-DMUs. We can also see the changes in total activities and sub-DMU activities during the studied period. Based on the model's findings, in the case of a DMU to be efficient, the efficiency score of all its sub-DMUs must be 1.0. If at least one sub-DMU has a value of less than 1.0, the efficiency of DMU decreases. In addition, the slack based model gives the projection values of the inefficient DMU and sub-DMUs that can be made on the inputs/outputs to reach the effective limit.

In the study, DN-SBM was preferred as input-oriented. Public hospitals serve with the aim of using the resources in the most effective and optimum way by considering the public interest. For this reason, a model was used to prevent waste of resources and reduce inputs. Since the resources and workforce sizes of the hospitals also vary, the variable return to scale model was preferred. Modelling was done using Python 3.8 programming for efficiency measurement with DN-DEA.

2.2. Data

In our study, the effectiveness of Turkey's training and research hospitals for the years 2018-2019 was examined. The data used for analysis were obtained through official procedures relevant from units within the Republic of Turkey Ministry of Health. Specifically, information regarding the number of on personnel was accessed from Ministry's General Directorate of Administrative Services, while financial data were accessed from the department of Financial Affairs. For DN-DEA, the hospitals within the scope of the study as DMU are 91 training and research hospitals. 59 of these hospitals are general hospitals and 32 of them are special branch training and research

hospitals. In the DN-DEA application, the decision-making unit should be chosen in a homogeneous structure to avoid incomplete and misleading comments. Special branch training and research (cardiovascular hospitals, eye hospitals, gynecology hospitals, etc.) were excluded from the analysis, since the machinery, equipment and health personnel used by them are specific to the hospital in the relevant branch, so comparing them with general hospitals in efficiency measurement will not yield reliable results. The sample was taken from 59 training and research hospitals.

The Dynamic Network model structure of the hospital organization is shown in Figure 1. In our model, hospitals represented as DMU are designed as an organization consisting of two sub-segments; the medical care division and the administration division. The administration division provides funds to the medical care unit to provide treatment services and is responsible for all necessary resources (beds, health personnel, non-health personnel, medical equipment, etc.). The medical care division is also responsible for all medical services. It also generates revenue for the administration division.

The inputs of the administrative division consist of the number of "Number of non-health personnel" and "total expenditures". Number of non-health personnel is composed of the number of administrative personnel and maintenance personnel. Administrative personnel represent management activities, while maintenance personnel are responsible for maintaining the hospital infrastructure [22,23].

The input "total expenditures" refers to non-labor operating expenses. These expenses include medical supplies, medications, energy (electricity, water, heating), cleaning, maintenance and repair, and other administrative costs. Such expenditures are essential for the sustainability of hospital operations and play a direct role in the healthcare service production process [19,26,24].

The output of the administrative division is the hospital's "total income". This includes payments received from the Social Security Institution and income generated from the hospital's own investments. The reason total income is used as an output is that it is evaluated against expenses to represent financial efficiency [23].

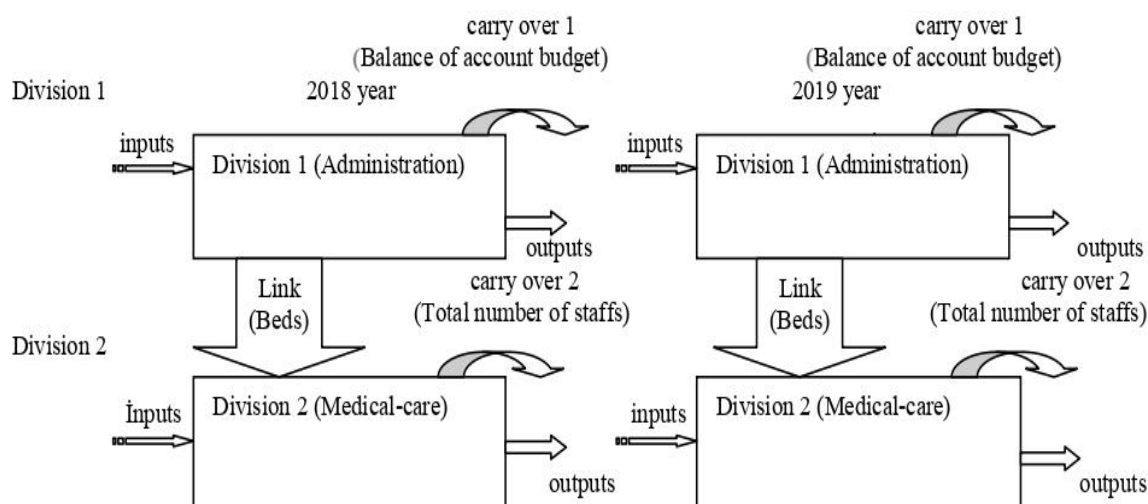


Figure 1. Structure of the Dynamic and network DEA model for hospital efficiency measurement

The number of beds was designated as a link variable from Division 1 to Division 2 (see Table 1). The management unit responsible for the financing and service continuity of hospital beds. The management unit supplies beds to the medical service unit, and the medical unit is responsible for providing medical services.

We defined the number of beds as a non-optional “fixed” connection state. The reason for this is that changes in the number of beds are rarely initiated by the medical unit in coordination with management; therefore, this was treated as a fixed connection situation [6].

The inputs of the medical care division include the number of doctors, medical residents (assistant physicians), general practitioners, nurses, and other healthcare staff. These inputs are considered important

indicator of a hospital's capacity for patient admission and overall service delivery.

These staffing levels are typically measured in full-time equivalents, providing a comparable metric across different hospitals [22,30,31,32].

The outputs of the medical division are the total number of inpatients, outpatients, and intensive care beds. The number of inpatients is used to assess internal service production and resource utilization.

Outpatient visit indicate the extent and accessibility of ambulatory care services. In addition, the number of intensive care beds reflects the hospital's capacity to manage emergency cases [19,20,21,22].

The inputs, outputs, link variables, and carry-over variables used in the DN-DEA model for the management and medical care divisions of hospitals are presented in Table 1.

Table 1. Description of variables of DN-DEA model to hospitals Turkey, 2018-2019

Division		Variable	Observation	Units
Administration(Division 1)	Input	Number of non-health personnel	Total number of administrative officers, maintenance officers, workers	Person
	Input	Total expenditures	Personnel expenditures are not included in the total expenses.	Million TL
	Output	Total income	All incomes that the hospital receives from Social Security Enstitution and arise from its investments	Milion TL
Link(Div1→Div2)		Number of beds	Total number of used active beds annually (including intensive care beds)	Unite
Carry over 1		Balance of account budget	It is the output of management division transferred from one year to the next.	Million TL
Medical care(Division 2)	Input	Number of doctors	It is the number of specialist doctors working full-time in the hospital.	Person
	Input	Number of medical residents (assistant physician)	Number of doctors settled in hospitals to receive training after medical specialty exam, While medical residents continue their education, they also provide healthcare in the hospital.	Person
	Input	Number of general practitioners	Total number of newly graduated students who have not been trained in any specialty.	Person
	Input	Number of nurses	Considering the total workforce this variable has quantitatively important place in the care workforce.	Person
	Input	Number of other healthcare staff	These variable, in addition to doctors and nurses, it represents other health workers such as dentists, pharmacists and midwives in hospitals.	Person
	Output	Total number of inpatients	Annual total number of inpatients, reflects the intensity of medical care services.	Person
	Output	Number of outpatients	Total number of annual outpatient polyclinic visits	Person
	Output	Number of intensive care beds	It is the variable that indicates the hospital's capacity to provide care for emergency patients.	Unite
		Total number of staff	This variable transferred from the medical services division from one year to the next.	Person

Two carry-over variables were defined that act as a connection from period 1 to period 2. The first is the Balance of account budget, which connects the inter-period activities of the management unit. Since the main task of the management is to ensure the income-expenditure balance, we have adopted this carry-over variable as an undesirable carry-over. Period 1 to period 2 is considered as input, and its redundancy is considered inefficiency [6].

The other transferred variable is the total number of personnel transferred from the medical services unit between periods. We defined this variable as the desired transfer. The number of personnel is determined as a result of the work of the management and is a resource that cannot be easily changed. It is treated as an output from one period to the next, and its insufficiency leads to inefficiency [18].

III. RESULTS

Table 2 shows descriptive statistics of input, output, connection and carry-over variables in the DN DEA model for 2018 and 2019 training and research hospitals in Turkey. The results of the model regarding the measurement of total efficiency, period efficiency and division efficiency of hospitals (Table 3, Figure 2) and possible projections for inefficient hospitals to reach the effective limit are given in the following sections (Figure 3).

As seen in Table 2 regarding the labor force inputs of training and research hospitals, an increase is observed in the number of doctors, nurses and other health personnel from 2018 to 2019.

When we look at the average annual income and expenditure balance of hospitals, 2019 showed an increase in expenses (238.70-285.23) compared to the previous year, while the average annual income increased from year to year (230.08-282.70). While the budget balance variable resulted in an average of 11.80 million TL in 2018 due to the change in expenditure and income, an average of 16.37 million TL deviation was observed in the budget balance in 2019.

On the other hand, the average number of inpatients, which is one of the output elements of hospitals, declines slightly from year to year. On the other hand, an increase was observed in the average number of outpatients from 2018 to 2019. This situation can be interpreted that the increase in the number of personnel, which is the input source of the hospital administrations, has a positive effect on the outpatients. The output of the number of intensive care beds is also used to measure the capacity of hospitals to respond to their emergency patients, and from Table 2 it is seen that hospitals preferred to increase the number of intensive care beds from 2018 to 2019 (95.12-100.53)

Table 3 presents the DMU total efficiency and division efficiency scores of Turkey's training and research hospitals for the years 2018 and 2019, as calculated by the DN model. Based on the analysis results derived from the DN model, it is observed that the average total efficiency scores of the hospitals increased in 2019 (0.8545-0.9412) compared to the previous year. The efficiency of the administration division (0.8505-0.9514) and the efficiency of the medical care division (0.8585-0.9311) also increased in 2019 compared to the previous year. The increase in the average efficiency score in 2019 in the administration division is remarkable (0.8505-0.9514).

Figure 2 shows the total effectiveness, administration division and medical care division efficiency results of 59 training and research hospitals according to the DN model analysis results.

In the efficiency analysis, hospitals of different sizes were evaluated by comparing them with the best ones in service production. Large-scale and complex hospitals, consisting of hospitals with one thousand beds or more, yield efficiency with maximum output production. On the other hand, small hospitals with a small number of beds are efficient because their input

resource consumption is low. These differences are important for the selection of benchmarks for ineffective hospitals and the identification of their counterparts [26].

In Figure 2, 10 hospitals are at the effective margin (100%). Five of these hospitals have a bed capacity of less than one thousand (H5, H6, H42, H53, H57). Among the efficient hospitals, the remaining five operate with a bed capacity exceeding one thousand (H13, H15, H18, H44, H59).

In addition, H12 and H33 hospitals, whose total effectiveness scores are not "1" (They are not included in the 100% efficiency frontier shown in figure 2.) are fully efficient only in the administration division. On the other hand, hospitals such as H14, H17, H21, H23, H24, H25, H29, H31, H32, H35, H37, H38, H40, H45, H50, H52, H54 and H55 (although their total effectiveness scores are not "1") are only in the efficiency frontier in the medical care division. In figure 3, the average values of the possible improvements in the input elements are given for the ineffective hospitals to reach the effective limit.

Table 2. Description variables of the dynamic network DEA model applied to hospitals Turkey, 2018-2019

Year	Measure	Administration Division			A/C Link	Care Division									Carry over C
		Non-health personnel (I)	Total expense	Total income	Number of beds	Balance of account budget (million TL)	Doctors (I)	Assistant physicians (I)	General practitioners (I)	Nurses (I)	Other health care staff (I)	Total number of inpts	Total number of outpts	Intensive care beds (O)	Total number of staff
			(I)	(O)								(O)	(O)		
			(million TL)	(million TL)								(per 1000)	(per 1000)		
2018	Mean	931.86	238,70	230,08	721.27	11,80	286.36	136.36	32.92	609.08	456.10	40,42	1784,67	95.12	2442.31
	Maximum	1843.00	440,84	410,36	1660.00	59,49	556.00	467.00	161.00	1205.00	1096.00	83,75	3319,89	253.00	4082.00
	Minimum	344.00	88,49	88,59	260.00	0,10	73.00	0.00	1.00	209.00	173.00	16,44	349,17	27.00	1047.00
	Sd.	377.00	97,23	92,33	327.93	10,32	119.57	133.34	24.49	234.72	195.96	16,10	695,96	45.56	888.15
2019	Mean	970.90	285,23	282,70	730.63	16,37	290.39	150.90	37.61	617.20	467.03	40,27	1818,32	100.53	2526.03
	Maximum	2658.00	562,88	555,67	1660.00	138,66	573.00	532.00	200.00	1372.00	1132.00	89,87	3197,09	263.00	4373.00
	Minimum	332.00	52,05	106,19	260.00	1,30	73.00	0.00	1.00	216.00	177.00	1,68	33,70	27.00	1034.00
	Sd.	461.87	126,67	119,88	332.01	21,86	122.28	145.96	33.94	246.38	214.27	18,68	793,46	48.67	963.65

Source: Descriptive statistics of the data obtained from the Ministry of Health of the Republic of Turkey are calculated and presented.

I: input variable; O: output variable; inpts: inpatients; outpts: outpatients; A/C Link: the output of the administration division is the input for the care division; TL: Turkish Lira.

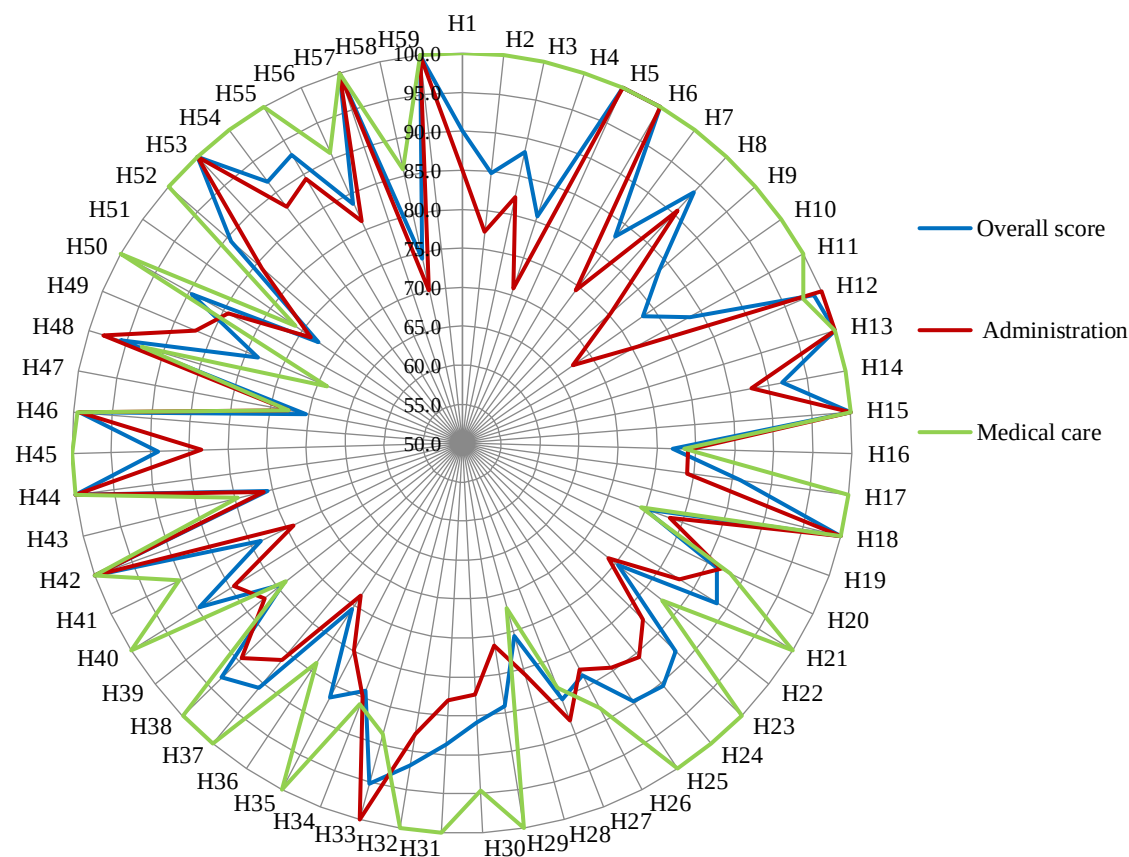


Figure 2. Efficiency scores of teaching-research hospitals dynamic network DEA, Turkey. 2018-2019

In 2018, the most striking input that ineffective hospitals should reduce in order to reach the effective limit is the budget account balance (72.7%). In addition, it was observed that the number of assistant physicians should be reduced (50.7%). Similar results were seen in 2019. The budget account balance should have been reduced (62.1%). Compared to 2018, a more negative picture is observed in the number of assistant physicians in 2019. This ratio increased even more (52.3%) by not making the necessary reduction. The average improvement rates that can be made in other inputs of the hospitals to reach the effective limit are also seen in Figure 3 and interpreted in the same way.

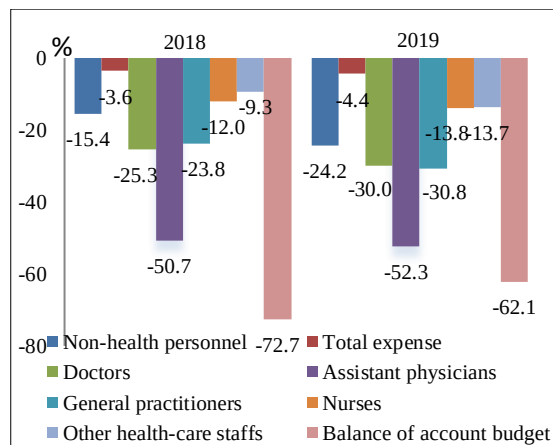


Figure 3. Variation need of input (I) and carry-over variable to reach best practice frontier. Turkey, 2018-2019

Table 3.Efficiency scores of hospitals Turkey, 2018-2019

Dynamic-Network DEA model			
DMU		2018	2019
Overall efficiency score	Average	0,8545	0,9412
	Sd.	0,0956	0,0922
	Minimum	0,6743	0,6880
	Maximum	1	1
Division 1 (Administration)	Average	0,8505	0,9514
	Sd.	0,1184	0,1028
	Minimum	0,6623	0,5734
	Maximum	1	1
Division 2 (Medical care)	Average	0,8585	0,9311
	Sd.	0,1204	0,1086
	Minimum	0,6248	0,7140
	Maximum	1	1

IV. CONCLUSION

In this study, we present the application of a novel method for evaluating hospital efficiency using Data Envelopment Analysis (DEA). Our study is the first study in which the Dynamic Network DEA approach has been applied for efficiency studies of hospitals serving in Turkey. Previous studies have been applied to hospitals in Japan, America, and Brazil [6],[15],[25]. In our study, hospitals were conceived as organizations consisting of two sub-units as management and medical care units. . The findings indicated an improvement in the overall average efficiency of the hospitals significantly in 2019 compared to 2018. The most noticeable improvement from year to year was seen in the average efficiency increase of the management unit.

The DN-DEA model applied in this study not only identifies the overall efficiency levels of hospitals but also reveals which specific sub-units are the sources of inefficiency. The results indicate that hospitals achieving efficiency across all sub-units are considered fully efficient; however, some hospitals that are not deemed efficient overall can still demonstrate full efficiency in certain sub-units. This highlights a key contribution of the model, as it allows hospital managers to focus not only on overall performance but also on unit-level improvements.

The findings of the study indicate that all input resources increased over the years and that the gap between actual and projected values slightly widened from 2018 to 2019. Although this may initially suggest a negative outlook, the observed improvement in average efficiency in 2019 is attributed to a shift in the production frontier.

The DN-DEA model applied in the study not only assesses hospitals' overall efficiency but also provides a detailed evaluation of performance at the sub-unit level. A key contribution of the model is that a hospital

is not considered fully efficient unless all of its sub-units operate efficiently. This enables hospital managers to identify the specific service areas responsible for inefficiency and to set more targeted improvement priorities. Moreover, the model generates projections for input, link, and intermediate variables, offering decision support particularly for resource-constrained hospitals by indicating which parameters need improvement and to what extent. The DN-DEA approach accounts not only for current efficiency levels but also for the resources used, scale structures, and time-dependent changes among peer hospitals, thus providing more tailored and actionable planning insights. In this respect, the model offers healthcare managers and policymakers the opportunity to go beyond aggregate performance metrics and to focus on specific sub-units in developing evidence-based strategies.

Thanks to the methodological scope and multi-layered analytical capacity of the DN-DEA model, it becomes possible to evaluate both overall hospital efficiency and sub-unit performance simultaneously. However, future research can expand the scope of the model to generate additional insights. For instance, in the case of training and research hospitals — which are the focus of this study — a network-based model that incorporates the education and research dimensions could be constructed, allowing for the separate assessment of their impact on overall and sub-unit efficiency. In studies focusing on general public hospitals, sub-unit analysis can be further detailed by disaggregating medical services into surgical units (e.g., general surgery, orthopedics) and clinical departments (e.g., cardiology, dermatology), enabling a more granular measurement of efficiency.

Moreover, rather than focusing solely on internal hospital operations, future studies could explore broader system-level efficiency by constructing

network structures that include interactions between hospitals, the Social Security Institution, pharmacies, and other healthcare providers. Additionally, since the DN-DEA model incorporates both the temporal dimension and inter-unit linkages within its structure, it internally accounts for inter-period changes, eliminating the need for separate calculation of the Malmquist index. Nevertheless, comparative studies between the results of the DN-DEA model and Malmquist-based efficiency analyses in future research may offer valuable methodological insights.

ACKNOWLEDGMENT

This study is an expanded version of the paper presented actively at the “V. International Applied Statistics Congress (UYIK-2024)” held in Istanbul /Türkiye on May 21-23, 2024.

REFERENCES

- [1] Aletras V., Kontodimopoulos N., Athanasios Z., Dimitris N. (2007). The short-term effect on technical and scale efficiency of establishing regional health systems and general management in Greek NHS hospitals, *Health Policy*, Volume 83, Issues 2–3, 236-245.
- [2] Chen, S.N. (2006). Productivity changes in Taiwanese hospitals and the national health insurance. *The Service Industries Journal*, 26(4), 459-477.
- [3] Ravaghi, H., Afshari, M., Isfahani, P., & Bélorgeot, V.D. (2019). A systematic review on hospital inefficiency in the Eastern Mediterranean Region: Sources and solutions. *BMC Health Services Research*, 19(1), 830.
- [4] Banker, R.D., Charnes, A., & Cooper, W.W. (1984). Some models for estimating technical and scale inefficiencies in data envelopment analysis. *Management Science*, 30(9), 1078-1092.
- [5] Farrell, M.J. (1957). The measurement of productive efficiency, *Journal of the Royal Statistical Series A (General)*, 120(3), 253-290.
- [6] Kawaguchi, H., Tone, K., & Tsutsui, M. (2014). Estimation of the efficiency of Japanese hospitals using a dynamic and network data envelopment analysis model. *Health Care Management science* 17(2), 101–112.
- [7] Charnes A., Cooper W.W., & Rhodes E. (1978) Measuring the efficiency of decision-making units, *European Journal of Operational Research*, 2(6), 429–444.
- [8] Färe, R. and Grosskopf, S. (2000). Network DEA. *Socio-Economic Planning Sciences*, 34, 35–49.
- [9] Löthgren, M., Tambour, M., (1999) Productivity and customer satisfaction in Swedish pharmacies: a DEA network model. *European Journal of Operations Research*, 115, 449–458.
- [10] Golany, B., Hackman, S. T., & Passy, U. (2006). An efficiency measurement framework for multi-stage production systems. *Annals of Operations Research*, 145, 51–68.
- [11] Yu, M. M., & Lee, B. C.Y. (2009). Efficiency and effectiveness of service business: Evidence from international tourist hotels in Taiwan. *Tourism Management*, 30, 571–580.
- [12] Fukuyama H., Weber, W.L. (2010) A slacks-based inefficiency measure for a two-stage system with bad outputs. *Omega* 38(5), 239–410
- [13] Kao, C., & Hwang, S.N. (2008). Efficiency decomposition in two-stage data envelopment analysis: An application to non-life insurance companies in Taiwan. *European Journal of Operational Research*, 185, 418–429.
- [14] Yu, M. M., & Fan, C. K. (2009). Measuring the performance of multimode bus transit: A mixed structure network DEA model. *Transportation Research Part E-Logistics and Transportation Review*, Elsevier, 45(3), 501–515.
- [15] Lobo, M.S.C., Rodrigues, H.C., André, E.C.G., Azeredo, J.A., & Lins, M.P.E. (2016). Dynamic network data envelopment analysis for university hospital evaluation. *Rev Saude Publica*, 50:22.
- [16] Färe, R., & Grosskopf, S. (1996). Intertemporal production frontiers: with dynamic DEA. *Journal of the Operational Research Society*, 48(6), 656–659.
- [17] Emrouznejad, A. veThanassoulis, E., (2005) A mathematical model for dynamic efficiency using data envelopment analysis. *Applied Mathematics and Computation* 160(2), 363–378.
- [18] Tone, K., & Tsutsui, M. (2014). Dynamic DEA with network structure: A slacks- based measure approach. *Omega*, 42, 124–131.
- [19] Sherman, H.D. (1984). Hospital efficiency measurement and evaluation, *Medical Care Research and Review*, 22(10), 922-939.
- [20] Sikka, V., Luke, R.D. & Ozcan, Y.A., (2009). The efficiency of hospital-based clusters: evaluating system performance using data envelopment analysis, *Health Care Management Review*, 34(3), 251-261.
- [21] Spinks, J., & Hollingsworth, B. (2009). Cross-country comparisons of technical efficiency of health production: A demonstration of pitfalls, *Applied Economics*, 41, 417–427.
- [22] Du, J., Wang, J., Chen, Y., Chou, S.Y., & Zhu, J. (2014). Incorporating health outcomes in Pennsylvania hospital efficiency: an additive super-efficiency DEA approach, *Annual Operation Research*, 221, 161–172.
- [23] Harrison, J. P., Coppola, M. N., & Wakefield, M. (2004). Efficiency of federal hospitals in the United States. *Journal of Medical Systems*, 28(5), 411–422.
- [24] Tsai, P.F., & Mar Molinero C. (2002). A variable returns to scale data envelopment analysis model for the joint determination of efficiencies with an example of the UK health service. *European Journal of Operational Research*, 141, 21–38.

-
- [25] Khushalani, Y., & Ozcan Y.A. (2017). Are hospitals producing quality care efficiently? An analysis using dynamic network data envelopment analysis (DEA), *Socio-Economic Planning Sciences*, 60, 5-23.
- [26] O'Neil, L., Marion, R., Heidenberger, K., & Kraus, M. (2008). A cross-national comparison and taxonomy of DEA-based hospital efficiency studies, *Socio-Economic Planning Sciences*, 42, 158–189.

Fiber Halka Döngü Sönümlleme Spektroskopisi Tekniğinin Eğitimsel Tanımı: Çalışma Prensibi ve Uygulama Alanları

Educational Description of the Fiber Loop Ringdown Spectroscopy Technique: Working Principle and Application Areas

Burak Malik KAYA ¹ 

¹Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Sağlık Hizmetleri MYO, 26480, Eskişehir, Türkiye

Öz

Fiber Halka Döngü Sönümlleme Spektroskopisi (Fiber Loop Ringdown Spectroscopy (FLRDS)) (FHDSS) tekniği, bir fiber halkayı optik boşluk olarak kullanarak bir sistem içindeki soğurma ve saçılma kayıplarını ölçen ileri düzeyde hassas bir optik algılama tekniğidir. Bu teknik, fiber tabanlı konfigürasyonlara uyarlanmış Kavite Döngü Sönümlleme Spektroskopisi (Cavity Ringdown Spectroscopy (CRDS)) (KDSS) tekniğinden türetilmiştir ve kompakt boyut, mekanik dayanıklılık ve maliyet etkinliği gibi birçok avantaj sunmaktadır. FHDSS'nin temel çalışma prensibi, tek bir ışık sinyalinin fiber halka içerisine hapsedilmesi ve bu sinyalin fiber optik içerisinde tam iç yansıma yaparak fiber halka içinde birden fazla tur yapmasından dolayı ölçümlenecek numune ile birden çok kez etkileşimi sayesinde yüksek hassasiyetli ve hızlı ölçüm timeline'ine dayanır. Işık sinyalinin yoğunluğunun üstel olarak azalması analiz edilerek içsel optik kayıplar yüksek hassasiyetle belirlenebilir. FHDSS, optik ve fotonik alanlarında önemli bir eğitim değeri taşımaktadır. Tam iç yansıma, optik boşluk rezonansı ve üstel sönüm dinamikleri gibi temel optik fenomenlerin pratik olarak gösterilmesini sağlar. Ayrıca, öğrencilere ve araştırmacılara ileri düzeyde optik ölçüm teknikleri konusunda uygulamalı deneyim kazandırarak fiber tabanlı algılama sistemlerini daha iyi anlamalarına yardımcı olur. Eğitimsel öneminin ötesinde, FHDSS birçok farklı alanda geniş uygulama imkanına sahiptir. Çevresel algılama alanında, gaz izi takibi ve kirlenme izleme için yüksek hassasiyeti sayesinde çok düşük konsantrasyon değişimlerini bile belirleyebilir. Biyomedikal araştırmalarda, biyomoleküler etkileşimleri ve doku soğurma özelliklerini tespit ederek invaziv olmayan tanı süreçlerine katkı sağlar. Ayrıca, endüstriyel kalite kontrol alanında, optik bileşenlerin bütünlüğünü izlemek ve sıvı ile gazlardaki kirlenmeleri tespit etmek için de kullanılır.

Anahtar Kelimeler: Fiber Halka Döngü Sönümlleme Spektroskopisi, FHDSS, Optik algılama, Fiber optik sensörler

Abstract

Fiber Loop Ringdown Spectroscopy (FLRDS) is a highly sensitive optical sensing technique that measures absorption and scattering losses within a system by employing an optical fiber loop as the cavity. Derived from Cavity Ringdown Spectroscopy (CRDS)—a well-established method in optical detection—FLRDS adapts the principles of CRDS into a fiber-based configuration, offering numerous advantages such as compactness, mechanical robustness, and cost-effectiveness. The core operating principle of FLRDS is based on trapping a single optical pulse within a fiber loop, allowing the light to undergo multiple internal reflections due to total internal reflection. As the light pulse circulates within the loop, it interacts repeatedly with the sample under investigation, thereby enhancing measurement sensitivity and temporal resolution. By analyzing the exponential decay of the light intensity, intrinsic optical losses can be determined with high precision. FLRDS holds significant pedagogical value in the fields of optics and photonics. It provides a practical platform for demonstrating fundamental optical phenomena such as total internal reflection, optical cavity resonance, and exponential decay dynamics. Furthermore, it equips students and researchers with hands-on experience in advanced optical measurement techniques, thereby fostering a deeper understanding of fiber-based sensing systems. Beyond its educational significance, FLRDS offers a wide range of applications across multiple disciplines. In environmental sensing, it enables the detection of trace gases and monitoring of pollutants with high sensitivity, even at very low concentration levels. In biomedical research, it facilitates non-invasive diagnostics by detecting biomolecular interactions and tissue absorption characteristics. Additionally, in industrial quality control, it is employed for monitoring the integrity of optical components and detecting contaminants in liquids and gases.

Keywords: Fiber Loop Ringdown Spectroscopy, FLRDS, Optical sensing, Fiber optic sensors

I. GİRİŞ

Optik algılama teknikleri çeşitli bilimsel ve endüstriyel uygulamalarda son derece önemli olup fiziksel, kimyasal ve biyolojik parametrelerin hassas bir şekilde tespit edilmesini ve analiz edilmesini sağlar. Bu teknikler arasında Fiber Halka Döngü Sönümleme Spektroskopisi (FHDSS), optik sistemlerdeki absorpsiyon ve saçılma kayıplarını ölçmek için son derece hassas ve verimli bir yöntem olarak ortaya çıkmıştır. FHDSS tekniği geleneksel olarak serbest uzay optik boşluklarında kullanılan Kavite Döngü Sönümleme Spektroskopisi (KDSS) tekniğinden [1-3] türetilmiş ve fiber tabanlı konfigürasyonlara uyarlanmıştır. Bu adaptasyon, kompaktlık, taşınabilirlik, mekanik dayanıklılık ve maliyet etkinliği gibi çeşitli avantajlar sunarak FHDSS tekniğini geleneksel optik algılama yöntemlerine cazip bir alternatif haline getirmektedir.

FHDSS tekniğinin temel prensibi, bir ışık darbesinin bir fiber halka içerisine enjekte edilmesi ve tam iç yansıma nedeniyle halka içerisinde birçok tur yaparak yayılması, bu nedenle ölçülmesi istenen parametreyi içeren numune ile birden fazla etkileşimi sonucu yüksek doğruluk ve hızlı ölçüm ile analizinin gerçekleşmesi temeline dayanır. Işık sinyali fiber halkada ilerledikçe, soğurma, saçılma ve birleştirici (kuplör) kayıpları gibi iç optik kayıplar nedeniyle yoğunluğu üstel olarak azalır. Bu azalma oranı analiz edilerek fiber halkadaki ortamın optik özellikleri yüksek hassasiyetle belirlenebilir. FHDSS tekniğinin bu çok geçişli yapısı, Foruer Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi (Foruer Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)) veya Ultraviyole ve Görünür Işık Spektroskopisi (Ultraviolet and visible light spectroscopy (UV-VIS)) [4-7] gibi tek geçişli analiz tekniklerine kıyasla ölçüm doğruluğunu ve hassasiyetini artırmaktadır.

Teknik avantajlarının ötesinde, FHDSS tekniği optik ve fotonik alanında önemli bir eğitim aracı olarak da görülmektedir. Bu teknik, optik boşluk rezonansı, tam iç yansıma ve üstel sönüm dinamikleri gibi temel optik prensipleri pratik olarak göstermek için kullanılır. İleri düzeyde optik ölçüm deneyimi sağlayarak fiber tabanlı algılama sistemlerine dair anlayışı geliştirir [8-12].

Ayrıca, FHDSS tekniği geniş bir bilimsel ve endüstriyel uygulama yelpazesinde çok yönlülüğünü kanıtlamıştır. Çevresel izleme alanında, yapısal sağlık izleme için çatlak, basınç ve sıcaklık algılama [13-16], gaz izi tespiti ve kirlenici analizinde [17-21] FHDSS tekniğinin yüksek hassasiyetinden faydalanılarak küçük konsantrasyon değişikliklerini tespit etmek için kullanılmaktadır. Biyomedikal araştırmalar alanında,

FHDSS biyomoleküler etkileşimleri, türleri, miktarları ve doku soğurma özelliklerini ölçerek invaziv olmayan tanımlara olanak sağlar [22-25]. Örneğin, FHDSS tekniğinin kullanıldığı bir fiber optik sensör, beton küp içerisine gömülerek beton blok içerisindeki su sızıntısının takibi için kullanılmış ve 0.12 ml system algılama hassasiyeti elde edilmiştir [26]. Başka bir FHDSS sensörü, laboratuvar ortamında üretilen beton çubuklar içerisine gömülmüş ve bu çubuklar üzerinde kontrollü çatlaklar oluşturularak, teorik yüzey çatlak genişliği 0.5 mm olan beton çubuklarda çatlak sensörü olarak kullanılmıştır [27]. Başka bir çalışmada, azot gazı referans olarak kullanılmış ve 0.1% tespit limiti ile asetilen ölçümü için hassas bir FHDSS sensörü dizayn edilmiştir [28]. Biyosensör uygulamaları olarak yukarıda verilen referanslar analiz edildiğinde; çalışmalardan birinde [22] üç farklı DNA türü ve bir bakteri için kütle kırılma indisi bazlı ve DNA için yüzey kırılma indisi bazlı tespit yapan bir FHDSS biyosensörü kullanılmıştır. Diğer bir çalışmada [23], glikoz oksidazın aşındırılmış fiber üzerine immobilizasyonu ile evanescent alan-FHDSS sensörü kullanarak 10 mg/dl olarak tahmin edilen teorik tespit limitiyle glikoz tespitine odaklanmıştır. Başka bir FHDSS sensörü çalışmasında [25], Alzheimer tespiti için beta-amiloid izlenmesine yönelik bir uygulama olmuştur. Farklı bir çalışmada ise, tüberküloz biyobelirteci olan lipoarabinomannanın tespiti için bir fiber rezonans halkası biyosensörü kullanılmış ve 10 pg/mL tespit limiti elde edilmiştir [29]. Ayrıca, bu teknik optik bileşenlerin bütünlüğünü izleme ve sıvılar ile gazlardaki kirlenici tespiti etme amacıyla endüstriyel kalite kontrol süreçlerinde de önemli bir rol oynamaktadır. FHDSS tekniğinin uyarlanabilirliği, optik fiberlerin ve konnektörlerin mutlak kayıplarını ölçme ile makrobükülme ve fiber yanlış hizalamalarından kaynaklanan kayıpları tespit etme uygulamalarıyla daha da pekiştirilmektedir. FHDSS tekniği ve uygulamaları hakkında daha detaylı bilgi edinmek isteyenler yukarıda verilen referanslardan yararlanabilirler [2,8,20].

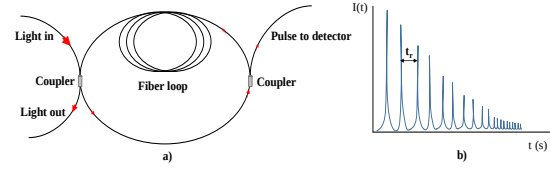
FHDSS tekniği gelişmeye devam ettikçe, optik algılama teknolojilerini ilerletme potansiyeli giderek daha önemli hale gelmektedir. Teknoloji olgunlaştıkça, sensör tasarımı, sistem entegrasyonu ve veri analizindeki ilerlemeler, uygulama alanlarını genişleterek optik algılama cihazlarının hem hassasiyetini hem de çok yönlülüğünü artıracaktır. Bu makale, FHDSS'nin çalışma prensibini, optik eğitim üzerindeki etkisini ve çeşitli uygulama alanlarını inceleyerek, bu tekniğin modern bilimsel araştırmalar ve endüstriyel uygulamalardaki artan önemini vurgulamaktadır.

II. ÇALIŞMA PRENSİBİ

FHDSS tekniği, KDSS tekniğinden türetilmiş, özellikle fiber tabanlı konfigürasyonlara uyarlanmış, gelişmiş bir optik algılama tekniğidir. Bu yöntem, optik soğurma ve saçılma kayıplarını yüksek hassasiyetle ölçmek için rezonans boşluğu olarak bir optik fiber halkası kullanır [30]. Teknik, ışık zayıflaması ve üstel bozunum ilkelerinden yararlanarak incelenen numune hakkında kritik bilgileri çıkarır.

FHDSS tekniği, bir optik fiber halkası içindeki ışığın bozunum süresini ölçerek bir ortamın absorpsiyon ve saçılma özelliklerini nicelleştiren bir optik algılama tekniğidir. FHDSS'nin temel prensibi, fiber optik halkaya enjekte edilen ışığın, fiber boyunca yayılırken zamanla nasıl bozulduğunu ölçen "ringdown" süresine dayanır. Işık fiber halkasına girdiğinde, fiber içinde dolaşır ve fiberin içindeki ya da çevresindeki ortamla etkileşime girerek birçok tur atar. Ortam içinde meydana gelen herhangi bir absorpsiyon veya saçılma olayı, ışık şiddetinin zamanla azalmasına neden olur. Bu bozunum oranı (ringdown süresi) hassas bir şekilde ölçülerek, FHDSS çok küçük konsantrasyonlardaki absorplayıcı veya saçıcı türleri yüksek hassasiyetle tespit edebilir. Bu teknik, ışık şiddetindeki küçük değişimlere karşı olağanüstü hassasiyeti nedeniyle iz miktardaki gazları, sıvıları veya biyomolekülleri tespit etmek için son derece etkilidir. FHDSS tekniği, çevresel izleme, kimyasal analiz ve biyomedikal uygulamalar gibi hassas ve non-invaziv ölçümlerin kritik olduğu alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır.

FHDSS tekniğinde, bir lazer kaynağından gelen ışık sinyali bir fiber halkasına bağlanır. Işık kaynağı hızlıca kapatıldığında, halka içerisine hapsedilen ışık sinyali halkada birçok tur yaparak ilerler (Şekil 1.a). Her bir turda, fotodetektör fiber kuplör (coupler) aracılığıyla ışığın küçük bir kısmını alır ve zayıflayan ışık sinyali fiberde iç iletim kayıplarına uğrayarak halkada ilerlemeye devam eder. Dedektörde gözlemlenen sinyal, zamanla üstel olarak azalan bir dizi darbe şeklindedir. Azalma sabiti, ringdown süresi olarak adlandırılır ve bu süre FHDSS tekniğinin algılama parametresidir. Bir zaman-döngü algılama tekniği olarak FHDSS, herhangi bir parametreyi veya miktarı algılamak için ringdown sürelerini ölçer. Şekil 1.b ise bu dönüşten elde edilmiş bir sönümlenme grafiğidir. Her bir darbe arası ringdown süresine (t_r) eşittir.

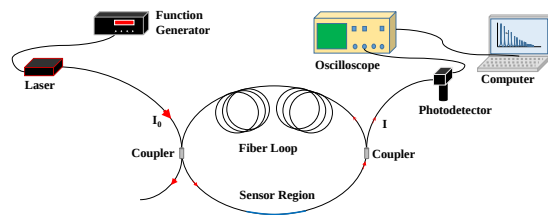


Şekil 1. a) Fiber halkasının şematik gösterimi ve b) bir fiber halkasından elde edilen ringdown verisi

2.1. Temel Mekanizma

Bir FHDSS sistemi, bir ışık kaynağı, bir fonksiyon jeneratörü, aynı kuplörlerle sahip bir fiber halkası, bir fotodetektör, bir osiloskop ve FHDSS yazılımına sahip bir bilgisayardan oluşur. Bir FHDSS sisteminin şematik gösterimi Şekil 2.'de verilmiştir. Fiber tipi, ışık kaynağına göre uygun şekilde seçilmelidir. Kuplörler, çalışma alanına göre 50:50, 90:10 veya 99.9:0.1 gibi farklı oranlarda seçilebilir. Fiber halkası uzunluğunu seçerken önemli nokta, minimum halkası uzunluğunun bağlı ışık darbesinin halkada bir tur atma süresinden uzun olması gerektiğidir.

FHDSS tekniğinde, kısa bir lazer ışık sinyali kapalı bir fiber halkasına (yüksek hassasiyet ve duyarlılık için genellikle tek modlu optik fiberden yapılmış ve kuplör oranı düşük olan fiber halkalar tercih edilir) içine verilir. Işık, toplam iç yansıma nedeniyle halkada ilerler ve birden fazla tur yapar. Her bir turda, ışığın bir kısmı dışarıya kuplör aracılığıyla çıkarılır ve bir fotodetektör tarafından tespit edilir. Halkadaki dolaşan darbenin şiddeti, optik kayıplar nedeniyle üstel olarak azalır; bu kayıplar arasında iç fiber zayıflaması, saçılma ve sisteme tanıtılan örnek nedeniyle meydana gelen absorpsiyon yer alır.



Şekil 2. Bir FHDSS sisteminin şematik gösterimi.

Şekil 2'deki görselde, fiber halkasına hapsedilen ışık darbesi (I_0) halka içerisinde birçok tur attığı için, fotodetektör tarafından toplanan çıkış sinyali (I) bir azalma gösterir. Bu davranış şu şekilde yazılabilir:

$$\frac{dI}{dt} = -\frac{IAc}{nL} \quad (1)$$

Işığın yoğunluğunun I , zaman t 'ye bağlı olarak azalması üstel bir ilişkiyi takip eder. Denklem 1'in çözümü, ışık yoğunluğunun davranışını şöyle verir:

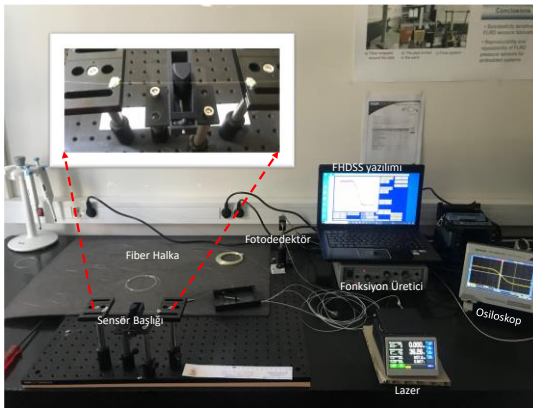
$$I = I_0 e^{\left(-\frac{c}{nL}At\right)} \quad (2)$$

Burada I_0 başlangıç ışık şiddetini, c m/s cinsinden vakum altındaki ışık hızını, n fiberin kırılma indisini, L fiber halkasının metre cinsinden uzunluğunu ve A her bir turda ışığın fiberdeki toplam iletim kaybını temsil eder. Bu denklemdeki ışık şiddeti genellikle dedetörde ölçülen optik güç olup birimi watt (W) veya miliwatt (mW) olarak verilir. Denklem (2), FHDSS tekniğindeki ışık yoğunluğunun azalma hızını ölçtüğünü, mutlak yoğunluk değişikliği ΔI 'yi ölçmediğini gösterir. Bu nedenle, A 'nın ölçümü, yani gelen ışık (I_0) yoğunluğundaki dalgalanmalara duyarlı olduğunu söyler. Toplam iletim kaybı, fiberin soğurma kaybı, fiber birleştiricilerinin yerleştirme kayıpları ve fiber saçılma kaybindan oluşur ve şu şekilde verilir:

$$A = \alpha L + E + \gamma \quad (3)$$

Burada α fiber çekirdek malzemesinin cm^{-1} biriminden dalgaboyuna bağlı soğurma katsayısı, E fiber birleştiricilerin toplam iletim kaybı ve γ toplam fiber saçılma kaybıdır. Bu parametrelerin tümü optik kayıp ile ilişkili olduğu için decibel (dB) cinsinden alınır ve toplam iletim kaybı A dB birimi olarak düşünülür. Eşitliklerin birbirleri ile nasıl ilişkilendirildiği ve FHDSS sistemi için nasıl kullanılabileceği üzerine detaylar Ref. (20)'de sunulmuştur. Işık şiddetinin (I) başlangıç ışık şiddeti (I_0) değerinin $1/e$ 'sine düşmesi için fotodedektörde gözlenen gerekli zaman sönümlenme zamanı (τ_0) olarak isimlendirilir. Birimi sistem hassasiyetin bağlı olarak ms, μ s veya ns olarak alınır ve şu şekilde verilir:

$$\tau_0 = \frac{nL}{cA} \quad (4)$$



Şekil 3. Laboratuvar ortamında dizayn edilmiş bir FHDSS sistemi görseli. (ESOGÜ Sağlık Hizmetleri MYO, Optik & Fotonik Laboratuvarı)

Şekil 3'te Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Sağlık Hizmetleri Meslek Yüksekokulu Optik ve Fotonik Laboratuvarında dizayn edilmiş bir FHDSS sistemi gösterilmektedir. Bu sistem gerilme ölçümlerini dizayn etmek için özellikle tasarlanmıştır. 120 m uzunluğunda bir fiber halka, 1.5 m uzunlukta fiber halkaya giren ve fiber halkadan çıkan iki adet fiber kol, bu kolların fiber halkaya bağlanmasını sağlayan 99.9:0.1 birleştirici oranlarına sahip, özdeş iki kuplör, 1550 nm sürekli dalga lazer ışık kaynağı ve ışık kaynağını stabilize eden ve çalışmasını sağlayan sürücüsü, fiber bağlantılı 5 GHz InGaAs fotodedektör, fonksiyon üretici ve verilerin daha hızlı toplanıp işlenebilmesi için özel dizayn edilmiş FHDSS yazılımını içeren bilgisayardan oluşmuştur. Bu çalışmada uzunluğu yaklaşık 15 cm sensör bölgesi gerdirilerek sistemdeki sönümlenme süreleri ölçülerek optik kayıplar hesaplandı. Böylece köprü, baraj, bina gibi gerçek yaşam alanlarında kullanılacak fiber optik sensörlerin erken teşhis ile önlem alınabilmesi amaçlandı. Bu çalışma Ref. (16)'da verilmiştir.

2.2. Matematiksel Gösterim

Belirli bir FHDSS sensörü (basınç, sıcaklık veya gerilim vb.) için toplam iletim kaybı, A , sensörün fiziksel parametreleriyle belirlenen sabit bir değerdir. Bu parametreler arasında fiber soğurma kaybı, kuplörlerin yerleştirme kayıpları, kırılma indisi ve fiber uzunluğu bulunur. Açıkça görülmektedir ki, fiberdeki ışık kayıpları ne kadar düşük olursa, sönümlenme zaman sabitleri (τ_0) o kadar uzun olur. Fiber halkasının bir bölümünde (sensör başlığı) absorpsiyon gibi harici bir etki ya da basınç, sıcaklık veya gerilme gibi herhangi bir ölçüm büyüklüğünde bir değişim meydana geldiğinde, bu durum fiber halkasında ışık darbesine ek bir optik kayıp, B , olarak yansır ve bu da ringdown (sönümlenme) süresinde, τ , bir değişime yol açar. Bu değişim Denklem (5) ile verilmektedir.

$$\tau = \frac{nL}{c(A + B)} \quad (5)$$

Burada n fiberin kırılma indisi, L fiber halkanın uzunluğu, c vakum ortamında ışık hızı, A ışığın fiber halka içerisindeki toplam iletim kaybı ve B sensör bölgesinde oluşturulan ekstra kayıp olarak verilir. Bu ek kayıptan dolayı, sistemin referans ringdown süresi (τ_0) olarak alınan süre (Denklem 4) değişir ve Denklem 5'teki yeni ringdown süresi ortaya çıkar. Bu ringdown süreleri osiloskopta okunabilir. Denklem 4 ve 5 kullanılarak sensör bölgesine uygulanan dış etkenden dolayı fiber halkada oluşturulan ek optik kayıp B , şu şekilde elde edilir.

$$B = \frac{nL}{c} \left(\frac{1}{\tau} - \frac{1}{\tau_0} \right) \quad (6)$$

Burada B FHDSS sisteminde, ölçümlemeden dolayı oluşan ek optik kaybı verir. n , L ve c daha önce tanımlanan niceliklerdir. τ_0 sensör bölgesinde hiç bir dış etken (basınç, gerilme, sıcaklık değişimi, vs) yokken sistemin sönümlenme süresini verirken, τ sensör bölgesinde ekstra bir değişim olduğu zamanki sönümlenme süresini verir. Denklem (6), yani FHDSS ilkesine göre, belirli bir fiber ringdown sensörü için bir algılama aktivitesindeki değişim (örneğin gaz emilimi, fiberin mekanik deformasyonu, termal genleşme vb.), τ_0 algılama aktivitesi olmadan ölçülen ringdown süresi ve τ aktivite sırasında ölçülen ringdown süresi ölçülerek belirlenir. Ayrıca, $(1/\tau - 1/\tau_0)$ terimi ile aktivite kaynaklı optik kayıp B arasında doğrusal bir ilişki vardır.

Algılama hassasiyeti genellikle minimum algılanabilir optik kayıp ile tanımlanır. Denklem (6), şu şekilde değiştirilerek ifade edilebilir:

$$B = \frac{t_r \Delta\tau}{\tau_0 \tau} = \frac{1}{m} \frac{\Delta\tau}{\tau} \quad (7)$$

Burada $\Delta\tau = \tau_0 - \tau$, t_r ışık sinyalinin fiber halkadaki bir tur dönmesi için geçen süre ve m dönme sayısıdır. Bu yüzden, $1-\sigma$ ölçüm limiti olarak tanımlanan minimum ölçülebilir optik kayıp (B_{min}) şu şekilde verilir:

$$B_{min} = \frac{1}{m} \frac{\Delta\sigma_\tau}{\tau} \quad (8)$$

Burada $\Delta\sigma_\tau$ sönümlenme zamanının $1-\sigma$ standart sapmasıdır. $\Delta\sigma_\tau/\tau$ deneysel olarak $\sim 10^{-3}$ mertebesinde elde edilebilir.

2.3. FHDSS Tekniğinin Avantajları, Dezavantajları ve Uygulamaları

FHDSS, çevresel izleme, kimyasal algılama ve temel fizik gibi çeşitli alanlarda yüksek hassasiyetli ölçümler için güçlü bir araç haline getiren birçok avantaja sahiptir. Bu teknik, fiber halkası içindeki uzun etkileşim yolu sayesinde son derece yüksek hassasiyet sunabilir. Bu da düşük konsantrasyondaki iz miktarlardaki analizleri tespit etmeyi mümkün kılar. Ayrıca sistem kompakt yapıda olup uzaktan ya da taşınabilir kurulumlara kolayca entegre edilebilir, bu da gerçek zamanlı saha ölçümleri için uygunluk sağlar. Optik fiberlerin kullanılması, tekniğin yüksek esneklik ve uyarlanabilirlik göstermesini sağlar; farklı dalga boyları ve ortamlar üzerinde ölçüm yapmaya olanak tanır. FHDSS aynı zamanda yüksek spektral çözünürlük ve hızlı yanıt süresi sunar; bu özellikler, hassas zamansal ve mekânsal analiz gerektiren uygulamalarda kritiktir. Ayrıca, düşük enerji tüketimi ile çalışması, özellikle batarya ile çalışan sistemlerde ya

da kesintisiz çalışması gereken sistemlerde büyük avantaj sağlar.

FHDSS ve KDSS tekniklerinin hassasiyet, sinyal-gürültü oranı, algılama limiti gibi önemli parametreleri kullanılarak karşılaştırılması Tablo 1’de sunulmuştur.

Tablo 1. FHDSS ve KDSS sistemlerinin karşılaştırılması.

Parametre	KRDS TEKNİĞİ	FHDSS TEKNİĞİ
Optik yol	Yüksek yansıtıcılı ($R > \%99.99$) ayna içeren boşluk (cavity)	Optik fiber döngüsü (loop); ayna gerekmez
Sinyal sönümlenme süresi (τ)	$\sim 1-10 \mu s$ (tipik)	$\sim 10-100 \mu s$ (fiber boyuna bağlı olarak)
Algılama limiti (LoD)	$\sim ppb$ seviyelerinde (gaz tespiti)	nW/mV/mm seviyelerinde (kayıp tespiti, çevresel değişkenler için)
Hassasiyet	Yüksek; ancak aynaların kalite ve hizalanmasına bağlı	Yüksek; sistem kararlılığı ve fiber kalitesine bağlı
Sinyal-Gürültü Oranı (SNR)	Yüksek; spektral saflığı yüksek lazerlerle daha iyi	Orta-Yüksek; optik fiber kaynaklı saçılmalar SNR’yi etkileyebilir
Mekanik stabilite	Hassas hizalama gerektirir, çevresel titreşimlere duyarlı	Daha kompakt ve sağlam; taşınabilir sistemlerde avantajlı
Spektral esneklik	Lazer dalga boyuna ve ayna kaplamalarına bağlı	Geniş dalga boyu aralıklarında uygulanabilir (farklı fiber türleriyle)
Kurulum maliyeti	Yüksek; özel ayna ve hizalama düzeneği gerektirir	Düşük; ticari fiber ve komponentlerle kurulabilir
Gerçek zamanlı ölçüm	Karmaşık; hızlı veri işleme sistemleri gerekebilir	Görece basit; hızlı elektronik devrelerle entegre edilebilir
Optik yol	Yüksek yansıtıcılı ($R > \%99.99$) ayna içeren boşluk (cavity)	Optik fiber döngüsü (loop); ayna gerekmez

Avantajlarına rağmen, FHDSS performansını ve uygulanabilirliğini etkileyebilecek bazı sınırlamalara da sahiptir. En büyük dezavantajlardan biri, fiber halkası ve dedektör sistemi için gereken nispeten karmaşık kurulum ve hizalamadır. Bu yapı, sıcaklık dalgalanmaları ve mekanik titreşimler gibi çevresel faktörlere karşı hassas olabilir. Bu hassasiyet, bazı uygulamalarda ölçüm hatalarına veya kararlılıkta azalmaya yol açabilir. Ayrıca, FHDSS’nin hassasiyeti,

fiber kalitesi ve kayıplar gibi faktörlerden etkilenebilir; bu durum özellikle uzun fiber halkalarında sinyal-gürültü oranını ve doğruluğu olumsuz etkileyebilir. Teknik, arka plan gürültüsü ve diğer ışık kaynaklarından gelebilecek girişimlere karşı dikkatli kalibrasyon gerektirir; bu da bazı kurulumlar için zaman alıcı ve kaynak açısından yoğun olabilir. Optik fiber kullanımı, sınırlı dalga boyu aralığı ve fiberde oluşabilecek doğrusal olmayan etkiler gibi zorlukları da beraberinde getirebilir; bu durum, geniş bir madde yelpazesi veya ölçüm koşullarının incelenmesini sınırlandırabilir. Son olarak, FHDSS genellikle yüksek hassasiyetli dedektör ekipmanları gerektirir; bu da sistemin maliyetini ve karmaşıklığını artırabilir.

Yüksek hassasiyet gerektiren uygulamalarda karşılaşılan sistematik hata kaynaklarına, çevresel etmenlere bağlı sapmalara ve sistem kararlılığına ilişkin birkaç dezavantajı göz önünde bulundurmak gerekir. Öncelikle, FHDSS sistemlerinde kullanılan optik fiberlerin zamanla yaşlanması (fiber aging) sonucu ortaya çıkan sinyal zayıflaması, saçılma katsayısında değişim ve termomekanik özelliklerdeki bozulmalar, uzun vadeli ölçümlerde önemli sapmalara yol açabilmektedir. Bu durum özellikle kalibrasyon doğruluğunu ve sistemin uzun dönemli güvenilirliğini olumsuz etkiler. İkinci olarak, sistemde kullanılan lazer kaynaklarının dalga boyu ve güç kararlılığı, ölçüm hassasiyetini doğrudan etkileyen unsurlar arasındadır. Lazerin kısa süreli kararsızlıkları (intensity noise, frequency jitter) veya uzun vadede yaşanan spektral kaymalar, yankı sinyalinin genliğinde ve zamanlamasında değişikliklere neden olabilir. Bu da özellikle zaman tabanlı ölçüm tekniklerinde sistematik hata kaynaklarından biridir. Ayrıca, sistem mimarisine bağlı olarak parazitik yansımalar, konektör ve splice noktalarındaki mikroskopik kusurlar, girişim sinyalleri ve polarizasyonla ilgili kararsızlıklar, ölçüm doğruluğunu düşürebilir. Bu tip optik pasif bileşenlerden kaynaklanan hataların modellenmesi ve giderilmesi kritik öneme sahiptir. Gerçek zamanlı uygulamalarda ise, veri işleme hızının sınırlı olması, dijital sinyal işleyicilerinin (DSP) tepki süreleri, algoritma optimizasyon gereklilikleri gibi faktörler sistemin pratik uygulanabilirliğini sınırlandırmaktadır. Ayrıca, sahada değişken çevresel koşullar altında (sıcaklık, nem, titreşim) sistemin tepkisel performansı genellikle ideal laboratuvar koşullarındaki performansla örtüşmemektedir. Sonuç olarak, FHDSS'nin potansiyelinin gerçekçi bir şekilde değerlendirilebilmesi için yukarıda belirtilen teknik zorlukların detaylı şekilde ele alınması gereklidir. Bu durum, sistemin güvenilirliği, sürdürülebilirliği ve endüstriyel uygulanabilirliği açısından kritik bir değerlendirme eksenidir.

FHDSS tekniğinin performansını ve etkinliğini etkileyen birkaç temel faktör aşağıda belirtilmiştir.

- ❖ **Fiber Kalitesi ve Uzunluğu:** FHDSS'de kullanılan optik fiberin kalitesi, sinyal gücü ve sönümleme (ringdown) süresini belirlemede kritik rol oynar. Düşük kayıplı ve kusursuz yüksek kaliteli fiberler, daha iyi hassasiyet ve daha uzun bozulma süreleri sağlar, bu da daha doğru ölçümlere yol açar. Fiber uzunluğu da etkileşim yolunu etkiler; genellikle daha uzun fiberler daha yüksek hassasiyet sunar.
- ❖ **Lazer Kaynağı:** Işık kaynağının dalga boyu, gücü ve kararlılığı önemli faktörlerdir. Düşük koherens uzunluğuna sahip, kararlı ve ayarlanabilir bir lazer tercih edilir, çünkü bu, söndürme olayları sırasında hassas ve tutarlı ölçümler sağlar.
- ❖ **Dedektör Hassasiyeti:** Dedektörün hassasiyeti ve gürültü özellikleri, ışığın sönümünü doğru bir şekilde ölçmede önemlidir. Yüksek hassasiyetli bir dedektör, ışık yoğunluğundaki küçük değişimleri algılamayı mümkün kılar; bu, iz miktardaki maddelerin analizinde kritik öneme sahiptir.
- ❖ **Fiber Döngü (Loop) Yapılandırması:** Fiber döngüsünün kurulumu – geometri, hizalama ve kuplör veya ayna gibi optik bileşenler – ringdown sinyalinin kalitesini etkiler. Doğru hizalama, kayıpları minimize eder ve fiber etkileşim yolunu maksimize eder.
- ❖ **Çevresel Stabilité:** Sıcaklık, nem ve mekanik titreşim gibi dış etkenler FHDSS sisteminin performansını etkileyebilir. Bu faktörler fiber özelliklerinde dalgalanmalara ya da hizalama bozulmalarına yol açarak ölçüm hatalarına neden olabilir.
- ❖ **Ringdown Süresi:** Işık yoğunluğunun sönmesi için geçen süre olan ringdown süresi, fiberin uzunluğu, malzemesi ve ölçülen maddeye bağlıdır. Daha uzun ringdown süreleri genellikle daha yüksek hassasiyetle ilişkilidir; ancak bu durum gürültü ve ölçüm hızı açısından zorluklar yaratabilir.
- ❖ **Örnek Özellikleri:** Analiz edilen örneğin absorpsiyon ve saçılma özellikleri, ışığın sönme oranını etkiler. Analit konsantrasyonu ve türü, ringdown süresini etkileyerek maddenin yoğunluğu veya diğer özelliklerinin belirlenmesinde kullanılır.

- ❖ **Sinyal İşleme ve Kalibrasyon:** Doğru veri analizi, sistemin kalibrasyonu ve arka plan gürültüsünün düzeltilmesi güvenilir sonuçlar elde etmek için gereklidir. Sinyal işleme teknikleri, ringdown süresinin çıkarılması ve analiz konsantrasyonunun doğru şekilde nicelendirilmesinde kullanılır.

Bu faktörler, fiber loop ringdown spektroskopisinin çeşitli uygulamalarda hassasiyet, doğruluk ve güvenilirliğini belirlemede birlikte rol oynar.

FHDSS yüksek hassasiyet ve doğruluğu sayesinde birçok bilimsel ve endüstriyel alanda geniş uygulama alanı bulmuştur. Çevresel izleme alanında, karbon dioksit, metan ve kirleticiler gibi iz gazların tespiti için kullanılır ve numune hazırlığı gerektirmeden, gerçek zamanlı ve yerinde ölçümler sağlar. Kimyasal algılamada, belirli moleküllerin ya da kimyasal reaksiyonların tespiti mümkün olduğundan, endüstriyel süreçlerde, kalite kontrolünde ve güvenlik izleme alanlarında değerlidir. FHDSS aynı zamanda biyomedikal araştırmalarda, özellikle sıvıların biyobelirteçlerin tespiti için yaygın olarak kullanılır; bu teknik, non-invaziv (girişimsel olmayan) ve yüksek hassasiyetli ölçümler yapmayı mümkün kılar. Temel fizikte ise, moleküler ve atomik özelliklerin keşfedilmesine yardımcı olarak ayrıntılı spektroskopik veriler sağlar. Ayrıca, atmosfer biliminde aerosol ve diğer partiküllerin incelenmesinde, yüksek zamansal ve mekânsal çözünürlüğü sayesinde aerosol yoğunlukları ve boyutlarının hassas ölçümünü mümkün kılar. FHDSS'nin taşınabilir ve fiber tabanlı kurulumlarla kullanılabilmesi, uzaktan algılama uygulamaları için de uygun olmasını sağlar; bu, uzay keşfi ya da erişimi zor kara bölgelerinde geleneksel ölçüm yöntemlerinin zor olduğu durumlar için idealdir.

2.4. FHDSS Tekniğinin Eğitimsel Önemi

FHDSS çeşitli bilimsel disiplinlerde önemli bir eğitsel değere sahiptir ve hem öğrenciler hem de araştırmacılar için uygulamalı bir öğrenme deneyimi sunar. Bu yöntem, özellikle yüksek hassasiyetli ölçüm teknikleri bağlamında, optik, spektroskopi ve fotonun temel ilkelerini öğretmek için mükemmel bir platform sağlar. FHDSS aracılığıyla öğrenciler, ışık-madde etkileşimleri, optik boşluk kavramı ve fiber halkada ışık yoğunluğunun sönümlenmesinin malzeme özellikleriyle nasıl ilişkili olduğu konusunda pratik bilgiler edinebilirler. Bu teknik aynı zamanda sinyal işleme ve bilimsel ölçümlerde gürültü azaltımının önemi konusunda daha derin bir anlayış geliştirir. Ayrıca, FHDSS öğrencileri çevre bilimi, kimya ve biyoloji gibi ileri düzey uygulamalarla tanıştırmak için kullanılabilir ve sofistike cihazların kirletici tespiti

veya kimyasal algılama gibi gerçek dünya problemlerinde nasıl uygulandığını gösterir. Bunun yanı sıra, FHDSS'nin kompakt ve çok yönlü doğası, onu eğitim ortamlarında deneysel gösterimler ve projeler için ideal bir araç haline getirir; bu sayede öğrenciler kendi deneylerini tasarlayabilir ve çeşitli faktörlerin ölçüm doğruluğu ve hassasiyeti üzerindeki etkilerini keşfedebilirler. Sonuç olarak, FHDSS öğrencilerin modern araştırma metodolojileriyle etkileşim kurma yeteneklerini artırır ve onları ileri bilimsel alanlardaki kariyerlere hazırlar.

FHDSS öğrencilere ve araştırmacılara yüksek hassasiyetli optik ölçüm tekniklerine yönelik uygulamalı bir yaklaşım sunarak çeşitli bilimsel disiplinlerde önemli bir eğitsel değer sağlar. Bu yöntem, optik, spektroskopi ve fotonun temel ilkelerini, özellikle optik boşluklar içinde ışık ve madde arasındaki etkileşimlere odaklanarak öğretmek için mükemmel bir platformdur. Örneğin, FHDSS bir fiber halkadaki ışık yoğunluğunun üstel sönümlenmesini incelemek için kullanılabilir; bu da öğrencilere absorpsiyon ve saçılma gibi farklı malzeme özelliklerinin ışık-madde etkileşimlerini nasıl etkilediğini anlamada yardımcı olur. Buna bir örnek olarak, çevresel izleme kapsamında metan veya karbondioksit gibi iz gazların tespiti verilebilir. Bu gazlara karşı ringdown süresini gözlemleyerek, öğrenciler bu tekniğin iz konsantrasyonları gerçek zamanlı olarak nasıl ölçtüğüne dair pratik bilgiler edinebilirler.

FHDSS ayrıca, özellikle zaman alanındaki ölçümler ve gürültü azaltımı bağlamında, öğrencilerin sinyal işlemlerini derinlemesine anlamaları için değerli bir araçtır. Örneğin, biyomedikal araştırmalarda FHDSS, moleküler etkileşimleri incelemek veya biyolojik örneklerde belirli biyobelirteçleri tespit etmek için kullanılabilir. Bu tekniğin ışık yoğunluğundaki küçük değişimlere olan hassasiyeti, kan veya idrar gibi karmaşık biyolojik sıvılarda düşük konsantrasyonlardaki biyobelirteçlerin tespit edilmesini mümkün kılar; bu durum erken hastalık teşhisi için kritik olabilir. Bu, sofistike cihazların kirletici tespiti veya kimyasal algılama gibi gerçek dünya zorluklarında nasıl uygulandığını göstermektedir.

Ayrıca FHDSS, yüksek mekânsal ve zamansal çözünürlük gerektiren uygulamalarda özellikle faydalıdır. Örneğin, malzeme biliminde FHDSS, bu malzemelerin absorpsiyon spektrumlarını analiz ederek ince filmlerin veya nanomalzemelerin karakterizasyonunda kullanılabilir. Optik özelliklerdeki çok küçük değişimleri çözümleme

yeteneği, FHDSS'yi yarı iletken üretimi ve fotonik gibi alanlarda kritik olan nanoyapıların incelenmesi için ideal bir araç haline getirir.

FHDSS'nin kompakt ve uyarlanabilir yapısı, onu laboratuvar çalışmaları ve deneysel gösterimlere entegre edilebilir kılar; burada öğrenciler kendi deneylerini tasarlayıp uygulayabilirler. Örneğin, öğrenciler fiber kalitesi, ışık kaynağının kararlılığı veya dedektör duyarlılığı gibi faktörlerin ringdown sürelerini nasıl etkilediğini araştırarak deney tasarımı ve sorun giderme konularında deneyim kazanabilirler. Bu uygulamalı çalışmalar, ayrıca, sıcaklık ve titreşim gibi çevresel faktörlerin ölçüm doğruluğu üzerindeki etkilerini keşfetmelerini sağlar; bu durum, gerçek dünya uygulamalarındaki zorlukların anlaşılması açısından önemlidir.

FHDSS ile çalışarak öğrenciler, güncel araştırma metodolojileriyle tanışır ve ileri düzey bilimsel alanlarda kariyer yapmaya hazırlanırlar. Örneğin, nanoteknoloji veya çevre bilimi alanındaki araştırmacılar, FHDSS'yi kentsel ortamlarda hava kalitesini izleyen sensörlerin geliştirilmesi ya da uzay araştırmalarında kimyasal reaksiyonların incelenmesi için kullanabilirler. Ayrıca, FHDSS, astrofizik, çevresel izleme ve kimya gibi alanlarda yaygın olarak uygulanan lazer spektroskopisi tekniklerinin anlaşılması ve geliştirilmesinde değerli bir araçtır. Sonuç olarak FHDSS, öğrencilerin optik fiziği anlayışlarını derinleştirmekle kalmaz; aynı zamanda onları bilimsel keşifler ve teknolojik yeniliklerde katkı sağlayabilecek becerilerle donatır.

FHDSS, optik mühendisliği ve fotonik laboratuvarlarında önemli bir eğitsel araçtır. Öğrencilere şunları sağlar:

- Fiberlerdeki optik kayıp mekanizmalarını anlama.
- Üstel sönümlemeyi ve bunun spektroskopi ile ilişkisini öğrenme.
- Optik bileşenler ve sinyal işleme konularında uygulamalı deneyim kazanma.
- Spektroskopinin çevresel ve biyomedikal algılama gibi gerçek dünya uygulamalarını keşfetme.

III. SONUÇ

Fiber Loop Ringdown Spektroskopisi (FHDSS), birçok bilimsel ve endüstriyel alanda önemli potansiyele sahip, son derece çok yönlü ve hassas bir optik algılama

teknikini temsil etmektedir. Optik fiber halkalar içinde üstel sönümleme ilkelerinden yararlanan FHDSS, absorpsiyon ve saçılma kayıplarının hassas şekilde ölçülmesine olanak tanır; bu da onu çevresel izleme, kimyasal algılama ve biyomedikal tanı gibi alanlarda vazgeçilmez bir araç haline getirir. İz miktarlardaki maddeleri yüksek hassasiyetle tespit etme yeteneği, kompakt, taşınabilir ve maliyet etkin yapısıyla birleştiğinde, FHDSS'yi geleneksel optik algılama yöntemlerine üstün bir alternatif konumuna getirir. Ayrıca, FHDSS'nin eğitsel önemi de göz ardı edilemez; bu yöntem, temel optik ilkelerin öğretilmesi ve ileri düzey ölçüm teknolojileriyle uygulamalı deneyim kazandırılması açısından etkili bir platform sağlar. FHDSS aracılığıyla öğrenciler, ışık-madde etkileşimleri, sinyal işleme ve kirlenme tespiti veya kimyasal algılama gibi gerçek dünya problemlerinde sofistike cihazların kullanımı hakkında pratik bilgiler edinirler. Ancak, fiber kalitesi, çevresel istikrar ve sistem hizalaması gibi faktörler tekniğin performansını etkileyebileceğinden, dikkatli kalibrasyon ve sistem optimizasyonunun önemi büyüktür. Bu zorluklara rağmen FHDSS, gelişimini sürdürmekte ve uygulama alanını genişletmektedir; bu durum, optik algılama teknolojilerinin ilerletilmesi ve çeşitli alanlarda bilimsel araştırmaların zenginleştirilmesi açısından büyük bir vaat taşımaktadır. Teknolojinin olgunlaşmasıyla birlikte, hem akademik hem de endüstriyel uygulamalara entegrasyonunun devam etmesi, hassas ölçüm ve çevresel izleme alanlarında yeni yenilikleri kaçınılmaz olarak beraberinde getirecektir.

KAYNAKLAR

- [1] Ai, Y., Li, J., Li, Q., Sun, M., Li, Y., & Wang, C. (2020). Cavity ringdown spectroscopy of nitric oxide in the ultraviolet region for human breath test. *Journal of Breath Research*, 14(3), 037101.
- [2] Gagliardi, G., & Loock, H.-P. (Eds.). (2014). *Cavity-enhanced spectroscopy and sensing* (Springer Series in Optical Sciences). Springer.
- [3] Maity, A., Maithani, S., & Pradhan, M. (2020). Cavity ring-down spectroscopy: Recent technological advancements, techniques, and applications. *Analytical Chemistry*, 93(1), 388–416.
- [4] Ferraro, J. R., & Nakamoto, K. (1994). *Introductory Raman spectroscopy*. Academic Press.
- [5] Stuart, B. (2004). *Infrared spectroscopy: Fundamentals and applications*. John Wiley & Sons.
- [6] Skoog, D. A., Holler, F. J., & Crouch, S. R. (2017). *Principles of instrumental analysis* (7th ed.). Cengage Learning.

- [7] Pavia, D. L., Lampman, G. M., & Kriz, G. S. (2014). *Introduction to spectroscopy* (5th ed.). Cengage Learning.
- [8] Wang, C. (2009). Fiber loop ringdown—a time-domain sensing technique for multi-function fiber optic sensor platforms: Current status and design perspectives. *Sensors*, 9(10), 7595–7621.
- [9] Kaya, B. M., Esenturk, O., Asici, C., Sarac, U., Dindis, G., & Baykul, M. C. (2024). Coating effects of a strain sensor on durability and sensitivity using the fiber loop ringdown spectroscopy technique *Phys. Scr.* 99, 055511.
- [10] Loock, H.-P., & Waechtler, T. (2003). Fiber-loop ring-down spectroscopy: A sensitive absorption technique for small liquid samples. *Review of Scientific Instruments*, 74(11), 4818–4826.
- [11] Wang, Y., Ma, G. M., Zheng, D., Jiang, J., & Yan, C. (2021). Gas concentration sensing based on fiber loop ring-down spectroscopy: a review. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 70, 1-16.
- [12] Yan, W., Han, Q., Chen, Y., Song, H., Tang, X., & Liu, T. (2018). Fiber-loop ring-down interrogated refractive index sensor based on an SNS fiber structure. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 255.
- [13] Wang, C., & Scherrer, S. T. (2004). Fiber loop ringdown for physical sensor development: pressure sensor. *Applied Optics*, 43(35), 6458-6464.
- [14] Kaya, M., & Esenturk, O. (2020). Highly sensitive fiber optic pressure sensors for wind turbine applications. *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, 28(5), 2789–2796.
- [15] Kaya, B. M. (2024). A novel single mode fiber optic temperature sensor combined with the FLRDS technique. *Phys. Scr.* 99(9), 095405.
- [16] Kaya, M., & Esenturk, O. (2020). Study of strain measurement by fiber optic sensors with a sensitive fiber loop ringdown spectrometer. *Optical Fiber Technology*, 54, 102070.
- [17] Tong, Z., Jakubinek, M., Wright, A., Gillies, A., & Loock, H. P. (2003). Fiber-loop ring-down spectroscopy: a sensitive absorption technique for small liquid samples. *Review of scientific instruments*, 74(11), 4818–4826.
- [18] Qian, X., Zhao, Y., Zhang, Y. N., & Wang, Q. (2016). Theoretical research of gas sensing method based on photonic crystal cavity and fiber loop ring-down technique. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 228, 665-672.
- [19] Kaya, M., & Wang, C. (2017). Detection of trace elements in DI water and comparison of several water solutions by using EF-FLRD chemical sensors. *AIP Conference Proceedings*, 1809(1), 020017.
- [20] Waechter, H., Litman, J., Cheung, A. H., Barnes, J. A., & Loock, H.-P. (2010). Chemical sensing using fiber cavity ring-down spectroscopy. *Sensors*, 10(3), 1716–1742.
- [21] Cengiz, B. (2013). *Fiber loop ring-down spectroscopy for trace chemical detection* (Master's thesis). Middle East Technical University, Turkey.
- [22] Herath, C., Wang, C., Kaya, M., & Chevalier, D. (2011). Fiber loop ringdown DNA and bacteria sensors. *Journal of Biomedical Optics*, 16(5), 050501.
- [23] Wang, C., Kaya, M., & Wang, C. (2012). Evanescent field-fiber loop ringdown glucose sensor. *Journal of Biomedical Optics*, 17(3), 037004.
- [24] Kaya, M., & Wang, C. (2014). Fiber loop ringdown glucose sensors: Initial tests in human diabetic urines. *Fiber Optic Sensors and Applications XI*, 9098, 120–123.
- [25] Kaya, B. M., Oz, S., & Esenturk, O. (2024). Application of fiber loop ringdown spectroscopy technique for a new approach to beta-amyloid monitoring for Alzheimer's disease's early detection. *Biomedical Physics & Engineering Express*, 10(3), 035037.
- [26] Kaya, M., Sahay, P., & Wang, C. (2013). Reproducibly reversible fiber loop ringdown water sensor embedded in concrete and grout for water monitoring. *Sensors and Actuators B: Chem.* 176, 803–810.
- [27] Sahay, P., Kaya, M., & Wang, C. (2012). Fiber loop ringdown sensor for potential real-time monitoring of cracks in concrete structures: An exploratory study. *Sensors*, 13(1), 39–57.
- [28] Yolalmaz, A., Sadroui, F. H., Danişman, M. F., & Esenturk, O. (2017). Intracavity gas detection with fiber loop ring down spectroscopy. *Optics Communications*, 396, 141–145.
- [29] Loock, H.-P., & Wentzell, P. D. (2012). Detection limits of chemical sensors: Applications and misapplications. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 173, 157–163.
- [30] Brown, R. S., Tong, Z., Oleschuk, R. D., & Loock, H.-P. (2002). Fiber-loop ring-down spectroscopy. *The Journal of Chemical Physics*, 117(23), 10444–10447.

Intrusion Detection on Switchports with LSTM as a Regression Problem

İlhan Fırat KILINÇER ¹ 

¹Fırat University, Faculty of Technology, Digital Forensics Engineering, Elazığ, Turkey

Öz

Bilgi teknolojileri ve akıllı cihazların hızlı gelişimi ile birlikte dijital verilerin korunması önemli bir konu haline gelmiştir. Saldırı tespit sistemleri (IDS), dijital verilerin korunması, kurum ve kuruluşların servis sürekliliğini sağlayabilmeleri için günümüzün vazgeçilmez güvenlik önlemlerinden biri haline gelmiştir. Bu çalışmada çevrimiçi lokal ağlarda kullanılan switch'lerin portlarında meydana gelebilecek saldırıların engellenmesine yönelik bir yöntem sunulmuştur. Önerilen yöntemde kullanılan SPA_IDS veri seti bir regresyon problem olarak ele alınmış ve Long Short-Term Memory (LSTM) derin öğrenme yöntemi ile veri setinin saldırı tespit performansı ölçülmüştür. Çalışmada kullanılan veri setinin farklı time step değerlerindeki performans değerleri test edilmiş ve time step değerinin 10 olduğu durumda en yüksek tahmin değerlerine ulaşılmıştır. Çalışmada performans metrikleri olarak Root-Mean-Square Error (RMSE) ve R^2 skor değerleri hesaplanmış ve sırasıyla 0,0551 ve 0.9953 değerlerine ulaşılmıştır. Çalışmada kullanılan veri setindeki her bir veri bir saniye aralıklar ile alınmıştır. Dolayısıyla time step 10 değeri, 10 saniyede alınan verileri göstermektedir. Her 10 saniyede bir alınan verilere göre hızlı ve yüksek başarımla saldırı tespitinin yapılıyor son derece pozitif bir çıktıdır.

Anahtar Kelimeler: STS, LSTM, Regresyon, Switchport

Abstract

With the rapid development of information technologies and smart devices, the protection of digital data has become an important issue. Intrusion detection systems (IDS) have become one of the indispensable security measures of today for the protection of digital data and for institutions and organizations to ensure service continuity. In this study, a method is presented to prevent attacks that may occur on the ports of switches used in online local networks. The Switchport Anomaly based Intrusion Detection System (SPA-IDS) dataset used in the proposed method is considered as a regression problem and the intrusion detection performance of the dataset is measured with the Long Short-Term Memory (LSTM). The performance values of the dataset used in the study were tested at different time step values and the highest estimated values were reached when the time step value was 10. Root-Mean-Square Error (RMSE) and R^2 score values were calculated as performance metrics in the study and the values of 0.0551 and 0.9953 were reached, respectively. Each data in the dataset used in the study was taken at one-second intervals. Therefore, the time step value of 10 indicates the data taken in 10 seconds. Attack detection is done quickly and with a high success rate based on data received every 10 seconds, which is an extremely positive outcome.

Keywords: IDS, LSTM, Regression, Switchport

I. INTRODUCTION

The widespread use of the Internet in almost every area of life brings with it many security risks. Attackers cause many data breaches and disruptions in network infrastructures with the malicious software or methods they prepare. This situation forces institutions and organizations to use various security mechanisms and tools in every segment of their network infrastructure. Although threats from many technological methods such as security patches, authentication, encryption mechanisms, firewalls are mitigated, attackers are constantly developing new methods to overcome the security measures taken. Intrusion detection systems (IDS) are one of the most effective methods used to protect from malicious software that attackers constantly develop[1,2]. IDS systems are software-based security mechanisms that deeply monitor events occurring in networks and systems, detect malicious events and generate alarms.

IDS systems are generally divided into host-based IDS (HIDS) and network-based IDS (NIDS). HIDS systems are used to analyze the behavior of users on the host or server while NIDS systems are used to analyze networks between hosts or servers [3]. IDS systems, which work as signature-based or anomaly-based attack detection method, have become a necessity due to the recent increase in the number and severity of network attacks. In signature-based IDS systems, the signatures of incoming events match the signature patterns of the attacks in their database, and if they match, an alarm is generated. This type of IDS systems are effective in detecting known attacks, but they are not effective enough in detecting new attacks. Anomaly-based IDS systems first create profiles of normal network behavior. Intrusion is detected and an alarm is generated when deviations from the specified normal network profiles occur. Thanks to these features, anomaly-based IDS systems are very effective in detecting newly derived attack types such as zero-day attacks. However, modeling normal network behaviors and adding new behaviors to this model is a costly and difficult process. In order to prevent this situation, anomaly-based IDS systems benefit from artificial intelligence methods [4–6].

Today, artificial intelligence methods and data mining techniques are frequently used to automate attack detection. Many IDS systems using these techniques cannot be used in a real network environment as they have not been tested in practice [3,7]. In addition, old datasets are used in most of the studies on intrusion detection systems. This leaves systems vulnerable to updated attack scenarios. In this study, a new dataset and a new regression-based method are proposed in order to eliminate the deficiencies in IDS systems. The contributions of the proposed method are indicated as follows.

- The SPA_IDS dataset used in the study is an original dataset obtained for detecting Layer 2 – Layer 7 attacks in an online network. The dataset has brought a new perspective to the literature in detecting common attacks today. The dataset used was shared on github in order to contribute to the literature studies and the IDS industry¹.
- With the proposed method, it enables to detect attacks made from the switchport in an online network in a very short time (10 seconds) with high performance. This both minimizes network interruptions and alleviates the workload of network administrators.
- The proposed method was considered as a regression problem and high RMSE and R^2 Score values were obtained with LSTM.

The remaining parts of the paper are structured as follows. In Section 2, literature studies on IDS systems are discussed. Background, Proposed Method, Results and Discussion, Conclusion and Future Works sections are discussed in In Section 3, Section 4, Section 5 and Section 6, respectively.

II. RELATED WORKS

Recently, studies on the development of IDS systems and increasing their intrusion detection performance have become a popular topic for both the literature and the cyber security industry. IDS systems; critical networks have become mandatory to detect attacks such as DDoS, Brute force. Kannari et al.[1], proposed a method to reduce the resource requirements and computational complexity of the intrusion detection process. In their proposed method, the best 21 features of the NSL-KDD dataset were selected with the Recursive Feature Elimination (RFE) algorithm and then the features selected with the Random forest (RF) algorithm were classified.

Qiu et al.[8], combined packet-based and stream-based intrusion detection technologies with Dempster-Shafer Theory (DST). In their proposed method, flow-based IDS is used to predict traffic flows, while packet-based IDS is used to detect attacks in network packets. Merve et al.[9], systematically discussed IDS technologies and methodologies in their study. In addition, new attack types, protection mechanisms and the latest scientific studies in this field are examined in detail. Dwivedi et al. [9,10], classified the ISCX-2012 dataset with their proposed Ensemble of Feature Selection and Addaptive Grasshopper Optimization Algorithm (EFSAGOA) algorithm and obtained accuracy values reaching 99.23%.

Larijani et al.[9,11], proposed a Random Neural Network-based IDS system (RNN-IDS) for intrusion detection. The NSL-KDD dataset was classified with the suggested methodology and 94.50% an accuracy value of was obtained. Devan et al. [9,12], proposed the XGBoost-DNN model. In their work, the best features in the NSL-KDD dataset were selected with the XGBoost algorithm. At the last stage, the selected features were classified with the Deep Neural Network (DNN) and 97% accuracy rates were obtained. Ragab et al.[13], proposed the outlier detection with optimal deep learning enabled IDS (ODODL-IDS) model for smart environments. In their proposed method, they used convolutional neural network with attention long short term memory (CNN-ALSTM) algorithm for classification and poor and rich optimization algorithm (PROA) algorithm for hyper parameter optimization. With the developed method, NSL-KDD, KDDCup99, UNSW-NB15 and CICIDS 2017 datasets, which are frequently used in the literature, were classified. Yao et al.[14], proposed an AutoEncoder(AE)-LightGBM

based intrusion detection method for the Software Define Network (SDN). In the proposed system, Borderline-SMOTE algorithm was used to optimize the data distribution and Auto Encoder (AE) algorithm was used to extract the main features. In the last step, LightGBM was used to classify the NSL-KDD and KDDCup99 datasets using the obtained features.

Pampapathi et al.[15], presented the Filtered Deep Learning Model for intrusion detection. With the proposed method consisting of five stages, it is aimed to process heterogeneous data sources and to detect zero day attacks in IoT networks. The proposed model ToN_IoT dataset was classified and 96.12% accuracy rates were achieved. Abdallah et al.[16], proposed supervised machine learning methods for intrusion detection. In their work, a detailed discussion of IDS systems and supervised machine learning algorithms is presented. Alazab et al.[17], proposed a method consisting of feature selection and classification steps for IDS systems. In their proposed method, they used Moth-Flame Optimization (MFO) algorithm for feature selection and Decision Tree (DT) algorithm for classification. The performance of the proposed method has been tested with NSL-KDD, KDDCup99 and UNSW-NB15 datasets, which are frequently used in the literature. Balla et al.[18], examined the deep learning-based methods in the literature for the security of SCADA systems in detail. In the study, previous studies for each deep learning algorithm used in the literature were examined and compared according to their performance values. Although there are many studies in the literature on intrusion detection, studies that approach the intrusion detection problem as a time series are very rare. In this study, the anomaly detection problem is considered as a regression problem. The main theoretical justification for this is the assumption that the normal behavior of the system can be represented by a certain time series model. In this approach, the LSTM model is trained to predict the future normal behavior of switchport data (e.g. continuous values such as packet count, bandwidth usage, etc.). The detected anomaly is triggered when the difference between the real-time observed value and the prediction made by the model (error) exceeds a certain threshold value. In other words, the model learns the normal behavior through ‘regression’ and defines deviations from the normal as ‘anomalies’. This approach offers the potential to detect “zero-day” attacks in particular. Traditional classification-based IDSs usually learn known attack patterns and classify data that fits these patterns. However, regression-based anomaly detection can mark any deviation from the normal behavior (even if the attack type is unknown) as anomalies. This provides flexibility, especially for network traffic data that is constantly flowing and dynamic. The RMSE and R^2 metrics used in the study were determined as standard and appropriate metrics to evaluate the regression performance of the model. A low RMSE value indicates that the model’s prediction

errors are small, while a high R^2 value indicates that the model can explain a large portion of the variance in the dependent variable. Since anomaly detection is essentially reduced to a prediction error problem, these metrics are important in order to measure how well the model can predict deviations from “normal” behavior.

III. BACKGROUND

3.1. Long Short Term Memory (LSTM)

Today, in addition to traditional machine learning and artificial intelligence methods, deep learning (DL) methods are frequently used for intrusion detection. Recursive neural networks (RNN) are one of the DL methods. RNNs try to predict the next step by establishing relationships between inputs. RNNs have memories that remember the recent past. LSTM, which is the customized version of RNN, has a longer memory than RNN[19,20].

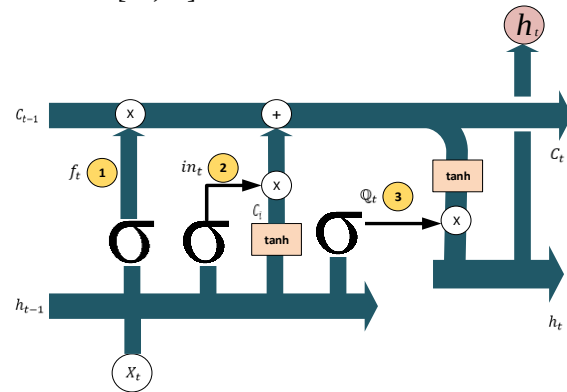


Figure 1. LSTM Architecture

Each LSTM cell has input, output and forget gates that perform different operations. Door number 1 in Figure 1 represents the forget gate, gate number 2 represents the entrance gate, and gate number 3 represents the exit gate. Gate number 1, 2 and 3 in Figure 1 represents f_t , in_t and Q_t functions respectively. f_t function decides whether the incoming information is forgotten or not. f_t function is given in Equation 1 [19,20].

$$f_t = \sigma \left(W_f(h_{t-1}, X_t) \right) + b_f \quad (1)$$

The forget gate, the f_t function, takes the cell input function X_t from the current step and the hidden state function h_{t-1} of the previous step as input and puts them into the sigmoid function. The terms W_f and b_f in the equation represent the weight and additional input values, respectively. The sigmoid function, which calculates the result of the operation, produces values in the range of 0 to 1. If the result of the function is close to 1, the incoming information is kept, the information that comes close to 0 is forgotten. The input gate (in_t) decides which information is stored in memory or not. The in_t function is given in Equation 2.

$$in_t = \sigma \left(W_{in}(h_{t-1}, X_t) \right) + b_{in} \quad (2)$$

W_{in} and b_{in} terms in Equation 2 represent weight and additional input values, respectively. The output gate decides what information should be output or not. The output of the normal LSTM unit is the purple colored h_t function. The other h_t function at the output is the output to enter the next LSTM unit. h_t and c_t functions are given in Equation 3 and Equation 4 [19].

$$h_t = \sigma_t \cdot \tanh(c_t) \quad (3)$$

$$c_t = f_t \cdot C_{t-1} + i_t * C_t \quad (4)$$

Despite the long training times, LSTM has an advanced architecture thanks to the functions that decide whether the incoming data will be forgotten or not. LSTM is used in many fields such as sliding window methods, time series, classification regression. In this study, the sliding windows method was used for the estimation of the obtained data. In the sliding windows method, the values at the previous time (t) are examined in order to predict the values at the next time (t+1)[17]. The data obtained in this study were divided into timesteps and then predictions were made according to these timesteps. In this study, LSTM is modeled as a regression problem for anomaly detection. The reason for this is to learn how the normal behavior of the system changes over time. Traditional classification-based intrusion detection systems are usually trained to recognize known attack patterns or labeled anomalies. However, the performance of these systems may degrade when new or unknown (zero-day) attacks occur. In the regression approach, the LSTM model focuses on predicting future normal values by learning the past normal behavior of the switchport data. When an anomaly (attack) occurs, a significant difference (error) occurs between the actually observed value and the normal value predicted by the model. When this error exceeds a certain threshold value, the system detects an anomaly. This approach offers the ability to detect deviations from normal behavior even if the type or signature of the attack is unknown. This provides flexibility, especially in dynamic and constantly changing network environments.

3.1. Dataset

IDS systems are one of the technologies frequently used to ensure the security of network structures and information systems. In this study, a new Switchport Anomaly based Intrusion Detection System (SPA-IDS) dataset is used for IDS systems. The dataset used in the study was created by taking the number of anomaly packets that occur in the ports of the switching devices in the normal state and attack state. While creating the dataset, Brute Force FTP, Brute Force RDP, Brute Force SSH, DHCP starvation, DoS ICMP Flood, DoS Syn Flood, TCP Scan, UDP Scan and Mac Flood attacks were used. These attack scenarios and the anomaly packets left by the normal network traffic on the switchport were received and recorded on the log server. The amount of data received for each scenario is given in Table 1. A connection was made to the

switchgear via SSH to receive the data, and the command indicating the anomaly change was automatically executed once per second [21].

Table 1. SPA-IDS dataset summary

Attack types	Tools	Target	Data quantity	Time (minute)
Brute Force FTP	Hydra	Windows Server 2012	53030	883
Brute Force RDP	Hydra	Windows Server 2012	56008	933
Brute Force SSH	Hydra	Windows 10 PC	52993	883
DHCP Starvation	Yersinia	Metasploit	49112	818
DoS ICMP Flood	Hping3	Windows 7 PC	52449	874
DoS SYN Flood	Hping3	Windows 10 PC	50439	840
TCP Scan	Nmap	All PCs on Network	52130	868
UDP Scan	Nmap	All PCs on Network	52905	881
Mac Flood	Macof	Extreme x450 switch	56212	861
Normal	-	Web browsing, youtube, social media etc..	60255	1004
Total	-	-	535.503	8845

IV. PROPOSED METHOD

As attackers update their attack scenarios, efforts to develop intrusion detection systems are also increasing. In this study, the dataset created by considering the change of anomaly packets on the switch ports is considered as a regression problem and an original intrusion detection system is proposed. The flow chart of the proposed method is given in Figure 2.

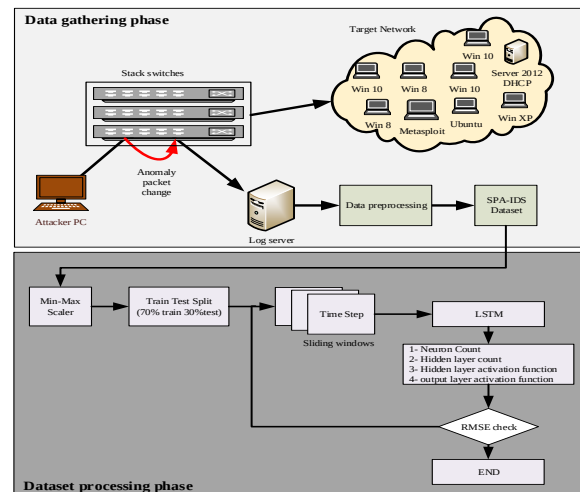


Figure 2. Proposed method architecture

In Figure 2, the step of obtaining the dataset and the proposed method are summarized together. Accordingly, the following steps were applied in the proposed method. In the step of obtaining data, attack scenarios determined from the attacker's computer with Kali Linux to the target network were applied. During each attack, anomaly packets on the switch port are recorded as text on a log server. In the data preprocessing step, the anomaly packet numbers received as text on the log server were first imported into excel and sorted. For each scenario, the difference in the number of packets between two consecutive seconds in the excel environment and the effect of each attack scenario applied on the switchport has been observed.

Approximately 50,000 pieces of data were obtained for each scenario. This means approximately 50,000

seconds (14 hours) of time for each scenario. The datasets obtained for all attack scenarios were combined in a single excel environment and the SPA-IDS dataset was obtained. There are 10 classes in the dataset, namely Brute Force FTP, Brute Force RDP, Brute Force SSH, DHCP starvation, DoS ICMP Flood, DoS Syn Flood, TCP Scan, UDP Scan, Mac Flood and normal. The amount of data obtained for each class is shown in Figure 3.

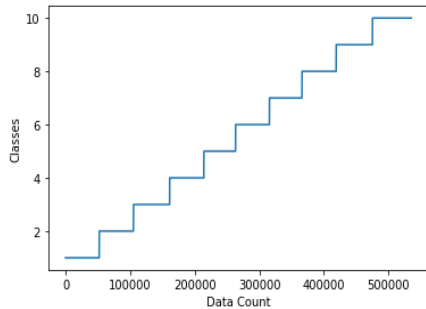


Figure 3. SPA-IDS data by classes

In order to faster and more successful results, the dataset first subjected to the Scaling process and then separated into 70% train and 30% test. The optimum window shift value was determined by using different timesteps during the training and testing phases of the dataset. In the study, the optimum window shift value is determined using different time step values. The selection of these values is intended to mirror the dynamic nature of network traffic and the evolution of attack scenarios over time. In particular, the testing of different time scales, such as [10, 20, 50, 100], covers a wide range from short-term anomalies to longer-term attack patterns. The primary rationale behind the selection of these values pertains to the capture of anomalies in network traffic, encompassing diverse speeds and durations, which may arise in practical scenarios. This approach is adopted to ensure the model's capacity to adapt to these variations. The following discussion aims to provide a more thorough explanation of the impact of the selection of these values on the generalizability and accuracy of the model. This will be achieved by means of a detailed analysis of how the model performs at different time steps. After the dataset was separated according to timestep values, the data obtained were subjected to a regression with LSTM. At this stage, the parameters of the LSTM algorithm are tuned to give high performance to the regression process. LSTM parameters used as a result of parameter optimization are given in Table 2.

Table 2. LSTM tuned parameters

LSTM Parameters	Value
Neuron Count	10
Hidden Layer Count	1
Hidden Layer Activation Function	ReLU
Optimizer	adam
Epochs	50
Batch_size	10
Loss	mean_squared_error

The proposed LSTM model is adopted as a lightweight model. In this way, it is important to process a featured SPA-IDS dataset much faster. With the parameters tested in Table 2, the difference between the predicted values and the actual values is minimized every 10 second. In addition, since the SPA-IDS dataset consists of 1 feature, a regression model was adopted. Root Mean Squared Error (RMSE) and R^2 score values were measured at the output of the LSTM block and a decision threshold was created according to these values.

V. RESULTS AND DISCUSSION

In regression problems, independent Y variables are estimated by taking the dependent X variables and the main purpose is to find the distance between the actual values and the predicted values. The square root of Mean Squared Error (RMSE) and coefficient of determination (R^2 score) values were calculated to evaluate the performance of the proposed regression model. The RMSE value is used more often because the MSE value is too large to compare in some problems. The RMSE is the ratio of the squared deviation between the predicted value and the true value. The RMSE is one of the performance metrics often used to calculate forecast accuracy. Mathematical equations of MSE and RMSE values are given in Equation 5 and Equation 6 [22,23].

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (X_{s,j} - X_{k,j})^2 \quad (5)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n X_{s,j} - X_{k,j}} \quad (6)$$

The $X_{s,j}$ expression in the equations represents the estimated values, $X_{k,j}$ represents the actual values, and the n value represents the number of observations. Since MSE and RMSE are error measures, low results are measures that show high performance. For example, it performs well if the RMSE is equal to zero. Another important success criterion in regression problems is the R^2 value. This value is a measure of how well the experimental data fit a linear curve. A value of 1 indicates that the experimental data provides a perfect linear curve. Mathematical value of measure R^2 is given in Equation 7 [24,25].

$$R^2 = 1 - \frac{x_{res}}{x_{tot}} \quad (7)$$

In Equation 7, X_{res} is the sum of the squares of the remaining errors, and X_{tot} is the sum of all the errors. In the proposed method, RMSE and R^2 score values were calculated for different timesteps and are given in Table 3. The results of the study were obtained by using scikit_learn, matplotlib, tensorflow libraries in Python 3.7 environment.

Table 3. Proposed method performance results

Time step	Train RMSE	Test RMSE	Train R^2	Test R^2
10	0.0072	0.0551	1.00	0.9953
20	0.0107	0.0673	1.00	0.9929
50	0.0117	0.1645	1.00	0.9577
100	0.0132	0.2805	1.00	0.8777

As can be seen from the table, as the time step value decreases, the RMSE value approaches 0 and the R^2 value approaches 1. The closer the RMSE value to 0 and the c value to 1, the lower the difference between the actual value and the predicted value. In the proposed method, it has been observed that the difference between the estimated values and the actual values decreases as the time step value decreases. The difference between the estimated values and the actual values for different time steps is visualized in Figure 4.

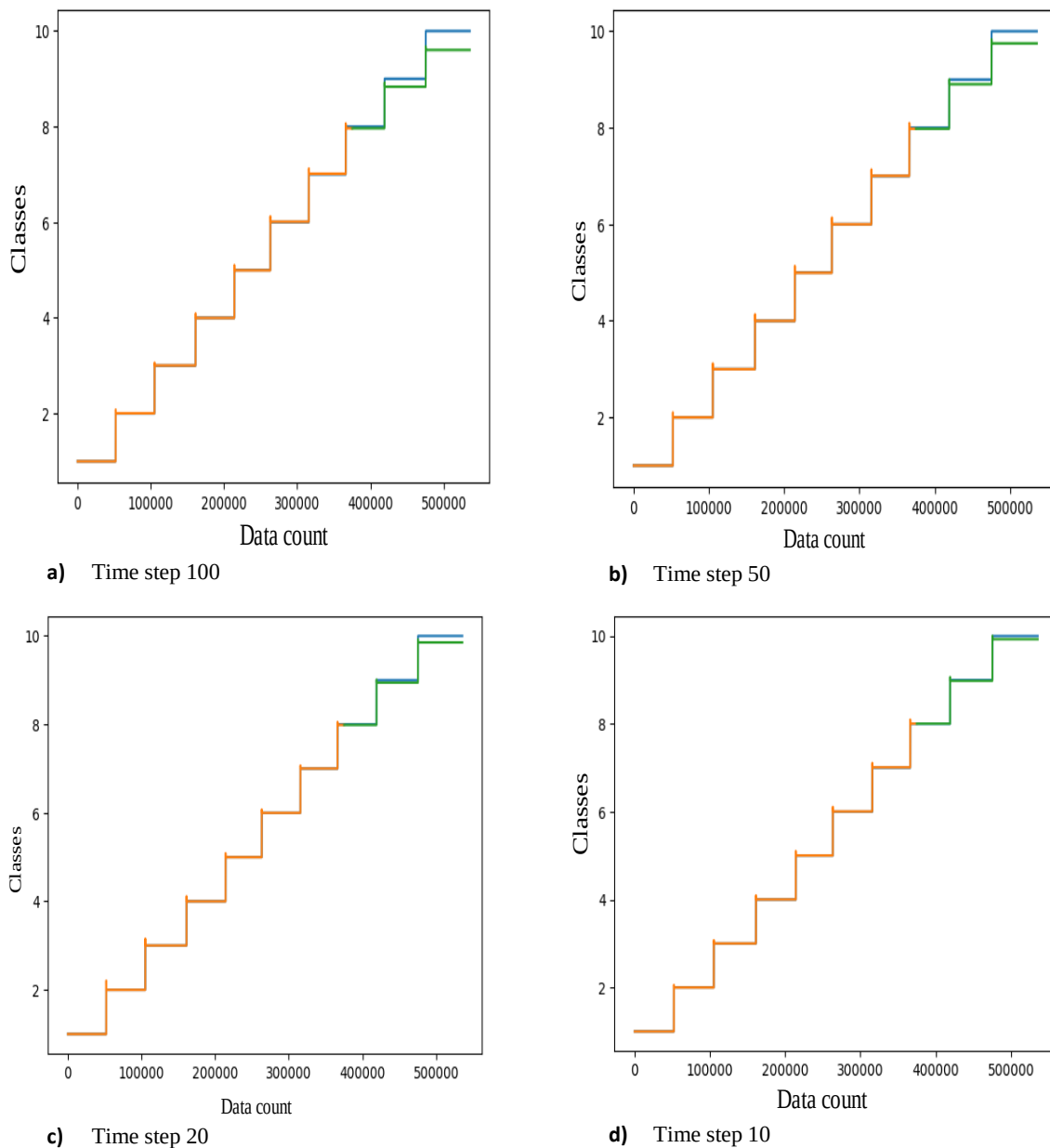


Figure 4. Graphical representation of actual and predicted values

As can be seen in Figure 4, as the time step value gets smaller, the difference between the actual value and the predicted value decreases, and in Figure 4d, this difference is almost zero. As demonstrated in Figure 4a, the performance of the model is depicted as a function of the time step, which is set at 100 in this instance. The orange ladder graph represents the true values. The blue and green lines represent the model's predictions. For the majority of the graph, the blue and green prediction lines are in close proximity to the orange true value line. However, as the number of data points increases and the "class" value rises, the prediction lines deviate slightly above the true value line. This finding indicates that the model exhibits a tendency to overestimate the probability of high class values when the time step is set at 100. As demonstrated in Figure 4b, the performance for time step 50 is illustrated. As demonstrated in Figure 1, the prediction lines (blue and green) exhibit a high degree of proximity to the true value line (orange). As with the "Time step 100" graph, a slight upward deviation is observable at high "class" values, yet the overall fit remains satisfactory. As illustrated in Figure 4c, the model for time step 20 is presented. This plot suggests that the agreement between the actual and predicted values has improved further in comparison to the previous two plots. The blue and green prediction lines exhibit a high degree of overlap with the orange true value line, suggesting that the model demonstrates a high degree of accuracy in its predictions. As demonstrated in Figure 4d, the plot demonstrates the highest degree of agreement between the actual and predicted values. The blue and green prediction lines exhibit a high degree of overlap with the orange true value line across all designated "class" levels. This finding lends further support to the hypothesis that step 10 represents the optimal value for the model, enabling it to generate the most precise predictions.

In the figures, since the difference between the actual value and the estimated values in classes up to the 7th grade is very small, the graph of the actual value and the predicted values overlap and are shown in orange. There was a difference between the actual value and the predicted values in the 8th, 9th and 10th classes. As the time step value decreased, the difference between the lines decreased and the lines overlapped in Figure 4d. It is observed that the proposed method is quite successful in detecting anomalies in switchports. The data in the SPA-IDS used were taken at one second intervals. Achieving high performance in small timesteps is a very important output. Thus, in an online network, switch ports can be controlled for 10-second periods, and if there is an attack on switchports, attacks can be detected very quickly.

In the study, it is emphasized how critical it is to achieve high performance in anomaly detection at switchports with small time steps. However, there are practical limitations in terms of data collection and real-time operation of the system. The data in the SPA-IDS dataset we used was collected at 1-second intervals. This represents the finest granularity of our current dataset. As can be seen in the results obtained with the smallest time step used in the tests, which is 10 seconds (Test RMSE: 0.0551, Test R^2 : 0.9953), it is seen that anomalies at switchports can be detected with a sensitivity close to real time and quite successfully. Considering that our system can be controlled in 10-second periods, this time step is small enough for practical applications and offers the opportunity for rapid intervention when anomalies are detected. Smaller time steps can increase the computational load on the system and sensitivity to noise, which can negatively affect performance or increase false positive rates. Therefore, in the current study, a time step of 10 seconds was decided to be an optimal choice considering the nature of our dataset, the operational requirements of the system and the high performance achieved.

VI. CONCLUSION and FUTURE WORKS

Due to the increasing complexity and volume of network attacks, IDS as an essential component of network infrastructures is constantly evolving to address emerging threats. In this study, the SPA-IDS dataset is utilised to address the problem of detecting attacks in local networks as a regression problem. The approach utilised in this study employs LSTM networks to formulate predictions based on varied time step configurations. The performance of the prediction model is rigorously evaluated using the RMSE and R^2 parameters. Our findings clearly show that reducing the time step value significantly improves the prediction performance and also reduces the difference between the predicted values and the actual values. In particular, a time step of 10 provided remarkable performance metrics: RMSE of 0.0551 and R^2 score of 0.9953. These results are particularly effective in demonstrating the potential to detect switchport attacks in a very short time of approximately 10 seconds. Such rapid detection capabilities are vital for minimizing service disruptions and improving overall network visibility.

The present work is distinguished by its approach to attack detection as a regression problem, a methodology that has received comparatively less attention in the extant literature than traditional classification methods. Whilst conventional

classification algorithms are wont to categorise network traffic as either malicious or benign, the regression-based LSTM model under consideration can furnish a more detailed understanding of attack severity or progression by virtue of the fact that it provides a continuous estimate of anomaly levels. A high R^2 score indicates a strong correlation between predicted and actual attack parameters, thus demonstrating the model's capacity to capture key attack patterns with a high degree of fidelity.

Despite the strengths of the proposed model, it has some limitations. The effectiveness of the model has currently been demonstrated on the SPA-IDS dataset. Although this dataset includes many attack scenarios, it does not fully capture the numerous attack vectors present in real-world network environments. Future work will prioritize evaluating this model on larger datasets that include a wider range of contemporary attacks and network configurations. Furthermore, although the model shows promising performance, the computational burden on extremely large-scale, high-traffic networks requires further investigation. For real-world network environments, the rapid detection time of 10 seconds offers a significant advantage, which can enable automated mitigation responses before extensive damage occurs. The regression output can be integrated into Security Information and Event Management (SIEM) systems to provide continuous risk assessments. In addition, IoT devices will be placed on the planned network to detect attacks against IoT devices in local networks. Attacks against IoT devices will also be simulated over this network.

REFERENCES

- [1] Reddy, P., & Shariff, N. (2022). An anomaly-based intrusion detection system using recursive feature elimination technique for improved attack detection. *Theoretical Computer Science*, 1, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.tcs.2022.07.030>.
- [2] Zhong, M., Lin, M., Zhang, C., & Xu, Z. (2024). A survey on graph neural networks for intrusion detection systems: Methods, trends and challenges. *Computers & Security*, 141, 103821. <https://doi.org/10.1016/j.cose.2024.103821>.
- [3] Noorbehbahani, F., Fanian, A., Mousavi, R., & Hasannejad, H. (2017). An incremental intrusion detection system using a new semi-supervised stream classification method. *International Journal of Communication Systems*. <https://doi.org/10.1002/dac.3002>.
- [4] Bace, R., & Mell, P. (2001). NIST special publication on intrusion detection systems.
- [5] Mahdavi, E., Fanian, A., Mirzaei, A., & Taghiyarrenani, Z. (2022). Knowledge-Based Systems ITL-IDS: Incremental Transfer Learning for Intrusion Detection Systems. *Knowledge-Based Systems*, 253, 109542. <https://doi.org/10.1016/j.knosys.2022.109542>.
- [6] Muneer, S., Farooq, U., Athar, A., Raza, M.A., Ghazal, T.M., & Sakib, S. (2024). A Critical Review of Artificial Intelligence Based Approaches in Intrusion Detection: A Comprehensive Analysis. *Journal of Engineering (United Kingdom)*, 2024. <https://doi.org/10.1155/2024/3909173>.
- [7] Catania, C.A., & Garino, C.G. (2012). Automatic network intrusion detection: Current techniques and open issues. *Computers and Electrical Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2012.05.013>.
- [8] Qiu, W., Ma, Y., Chen, X., Yu, H., & Chen, L. (2022). Hybrid intrusion detection system based on Dempster-Shafer evidence theory. *Computers & Security*, 117, 102709. <https://doi.org/10.1016/j.cose.2022.102709>.
- [9] Ozkan-Okay, M., Samet, R., Aslan, O., & Gupta, D. (2021). A Comprehensive Systematic Literature Review on Intrusion Detection Systems. *IEEE Access*. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3129336>.
- [10] Dwivedi, S., Vardhan, M., Tripathi, S., & Shukla, A.K. (2020). Implementation of adaptive scheme in evolutionary technique for anomaly-based intrusion detection. *Evolutionary Intelligence*, 13, 103–117. <https://doi.org/10.1007/s12065-019-00293-8>.
- [11] Qureshi, A.U.H., Larijani, H., Ahmad, J., & Mtetwa, N. (2019). A Novel Random Neural Network Based Approach for Intrusion Detection Systems. In: 2018 10th Computer Science and Electronic Engineering Conference (CEECE) - Proceedings. <https://doi.org/10.1109/CEECE.2018.8674228>.
- [12] Devan, P., & Khare, N. (2020). An efficient XGBoost–DNN-based classification model for network intrusion detection system. *Neural Computing and Applications*. <https://doi.org/10.1007/s00521-020-04708-x>.
- [13] Ragab, M., & Farouk, S. Sabir. (2022). Outlier detection with optimal hybrid deep learning enabled intrusion detection system for ubiquitous and smart environment. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 52, 102311. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102311>.
- [14] Yao, R., Wang, N., Liu, Z., Chen, P., Ma, D., & Sheng, X. (2021). Intrusion detection system in the Smart Distribution Network: A feature engineering based AE-LightGBM approach. *Energy Reports*. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2021.10.024>.

-
- [15] B M, P., M, N.G., & Hema, M.S. (2022). Towards an effective deep learning-based intrusion detection system in the internet of things. *Telematics and Informatics Reports*, 7, 100009. <https://doi.org/10.1016/j.teler.2022.100009>.
- [16] Abdallah, E.E., Eleisah, W., & Otoom, A.F. (2022). Intrusion Detection Systems using Supervised Machine Learning Techniques: A survey. *Procedia Computer Science*, 201, 205–212. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2022.03.029>.
- [17] Alazab, M., Abu Khurma, R., Awajana, A., & Camacho, D. (2022). A New Intrusion Detection System Based on Moth-Flame Optimizer Algorithm. *SSRN Electronic Journal*, 210. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4087656>.
- [18] Balla, A., Habaebi, M.H., Islam, R., & Mubarak, S. (2022). Applications of deep learning algorithms for Supervisory Control and Data Acquisition intrusion detection system. *Clean Engineering and Technology*, 9, 100532. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2022.100532>.
- [19] Aydın, H., Orman, Z., & Aydın, M.A. (2022). A long short-term memory (LSTM)-based distributed denial of service (DDoS) detection and defense system design in public cloud network environment. *Computers & Security*, 118. <https://doi.org/10.1016/j.cose.2022.102725>.
- [20] Gupta, N., Jindal, V., & Bedi, P. (2021). LIO-IDS: Handling class imbalance using LSTM and improved one-vs-one technique in intrusion detection system. *Computer Networks*, 192. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2021.108076>.
- [21] Firat, I., Tuncer, T., Ertam, F., & Sengur, A. (2023). Microprocessors and Microsystems SPA-IDS: An intelligent intrusion detection system based on vertical mode decomposition and iterative feature selection in computer networks. *Microprocessors and Microsystems*, 96, 104752. <https://doi.org/10.1016/j.micpro.2022.104752>.
- [22] Yasasin, E., Prester, J., Wagner, G., & Schryen, G. (2020). Forecasting IT security vulnerabilities – An empirical analysis. *Computers & Security*. <https://doi.org/10.1016/j.cose.2019.101610>.
- [23] Li, X.K., Chen, W., Zhang, Q., & Wu, L. (2020). Building Auto-Encoder Intrusion Detection System based on random forest feature selection. *Computers & Security*, 95. <https://doi.org/10.1016/j.cose.2020.101851>.
- [24] r2_score. (n.d.). https://scikit-learn.org/stable/modules/generated/sklearn.metrics.r2_score.html.
- [25] Coefficient of Determination-R2 score. (n.d.). <https://www.geeksforgeeks.org/python-coefficient-of-determination-r2-score/>.

Fırçasız Doğru Akım Motorunda Mıknatıs Türü ve Oluk Sayısı Değişiminin Tork Dalgalanması Üzerindeki Etkisinin İncelenmesi

Investigation of the Effect of Changing Magnet Type and Slot Number on Torque Ripple in Brushless DC Motor

Öztürk TOSUN¹, Necibe Füsün OYMAN SERTELLER¹, Uğur DEMİR¹, Bekir GEÇER²

¹Marmara Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği, İstanbul, Türkiye

²Ataşehir Adıgüzel Meslek Yüksek Okulu, Mekatronik, Elektrik-Elektronik Mühendisliği, İstanbul, Türkiye

Öz

Bu çalışma, fırçasız doğru akım (BLDC) motorlarının elektromanyetik tork karakteristikleri üzerinde mıknatıs tipi ve stator oluk sayısının etkilerini kapsamlı bir şekilde analiz etmekte ve özellikle performans ve kararlılığı artırmaya yönelik tasarım optimizasyonuna odaklanmaktadır. Literatürde genellikle bu parametreler ayrı ayrı ele alınırken, bu çalışmada her iki parametrenin birlikte etkisi ANSYS Maxwell ortamında gerçekleştirilen ayrıntılı 2D elektromanyetik simülasyonlarla sistematik olarak incelenmiştir. NdFeB, SmCo ve literatürde görece daha az incelenmiş olan XG196/96 gibi üç farklı mıknatıs malzemesi kullanılarak, manyetik doyma, manyetik akı dağılımı ve tork salınımı üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Ayrıca, stator oluk sayısının ortalama tork ve tork kararlılığı üzerindeki etkisi analiz edilerek elektromanyetik gürültü azaltımı ve motorun düzgün çalışması açısından önemli bulgular elde edilmiştir. Özellikle XG196/96, daha düşük maliyetli olmasına rağmen NdFe35'e kıyasla %36,3 daha düşük tork üretmiş ve performans-ticari denge gözetilen uygulamalar için potansiyel bir alternatif olarak öne çıkmıştır. Bunun yanında, stator oluk sayısındaki artışın tork salınımını önemli ölçüde azalttığı ve daha kararlı bir motor çalışması sağladığı gözlemlenmiştir. Bu çalışmanın özgün yönü, mıknatıs malzeme özellikleri ile yapısal tasarımı birlikte optimize eden çok parametrelili bir yaklaşım sunmasıdır. Elde edilen sonuçlar, daha verimli ve uygulamaya özel BLDC motor tasarımlarının geliştirilmesine katkı sağlamaktadır.

Anahtar Kelimeler: FSDAM, ANSYS/Maxwell, Tork, Verim, Akı Yoğunluğu

Abstract

This study presents a comprehensive parametric analysis of how magnet type and stator slot number influence the electromagnetic torque characteristics of brushless direct current (BLDC) motors, with a particular focus on optimizing design for enhanced performance and stability. Unlike previous studies that treat these parameters in isolation, this work systematically investigates their combined impact using detailed 2D transient electromagnetic simulations performed in ANSYS Maxwell. Three different magnet materials NdFeB, SmCo, and the relatively underexplored XG196/96 were evaluated to assess their influence on magnetic saturation, flux distribution, and torque ripple. Additionally, the effect of stator slot number on torque stability and average output torque was quantified, revealing critical insights into electromagnetic noise mitigation and motor smoothness. Notably, XG196/96, despite its lower cost, exhibited a 36.3% torque reduction compared to NdFe35, positioning it as a potential candidate for cost-sensitive applications where performance trade-offs are acceptable. Furthermore, the results indicate that increasing the stator slot number significantly suppresses torque ripple, promoting a more stable operation. The originality of this work lies in its multi-parameter design perspective, offering a novel optimization approach that couples material properties with structural design to enhance BLDC motor efficiency. The findings contribute to the development of more robust and application-specific BLDC motor designs.

Keywords: BLDC motor, ANSYS/Maxwell, Torque, Efficiency, Flux density

1. GİRİŞ

Günümüzde elektrikli araçlardan endüstriyel otomasyon sistemlerine kadar geniş bir uygulama yelpazesinde kullanılan fırçasız doğru akım motorları (BLDC), yüksek verimlilikleri, düşük bakım ihtiyaçları ve kompakt

yapıları nedeniyle tercih edilmektedir [1–3]. BLDC motorların performansını etkileyen temel parametreler arasında mıknatıs tipi, stator yapısı, slot sayısı ve kullanılan malzemelerin manyetik özellikleri öne çıkmaktadır [4–6].

BLDC motorlarda kullanılan sabit mıknatıslar, motorun manyetik devresini doğrudan etkileyerek tork üretimini, doygunluk davranışını ve genel verimliliği belirler [7–9]. Özellikle NdFeB, SmCo gibi nadir toprak elementi içeren mıknatıslar, yüksek enerji yoğunlukları sayesinde kompakt motor tasarımlarında avantaj sunmaktadır [10,11]. Bununla birlikte, ferrit bazlı mıknatıslar gibi alternatif malzemeler, maliyet-etkinlik açısından tercih edilse de düşük manyetik özellikleri nedeniyle performansta azalmaya neden olabilmektedir [12].

Stator slot sayısı da BLDC motor performansında kritik rol oynamaktadır. Slot sayısı, stator sargılarının dağılımını ve dolayısıyla üretilen elektromanyetik torkun düzgünlüğünü belirler [13,14]. Uygun slot sayısı seçimi ile tork dalgalanmaları azaltılabilir, gürültü ve titreşim seviyesi düşürülebilir ve motorun çalışma kararlılığı artırılabilir [15–17].

Yapılan çalışmalar, mıknatıs malzemesi ve stator slot sayısının birlikte optimize edilmesinin, özellikle yüksek performans gerektiren uygulamalarda motor tasarımına önemli katkılar sağladığını ortaya koymaktadır [18–20],[23].

Bu çalışma, fırçasız doğru akım motorlarının tasarım sürecinde mıknatıs malzemesi seçimi ve stator oluk sayısının motor performansı üzerindeki etkilerini inceleyerek literatüre önemli katkılar sunmaktadır. Öncelikle, XG196/96, NdFeB ve SmCo gibi farklı mıknatıs malzemelerinin manyetik doyma eğilimleri ve tork dalgalanmaları üzerindeki etkileri detaylı olarak analiz edilmiştir. Bu bağlamda, mıknatıs malzemesinin seçiminde manyetik doyma özelliklerinin motor verimi açısından kritik olduğu gösterilmiştir. Ayrıca, stator oluk sayısının ortalama tork üretimi ve tork dalgalanmaları üzerindeki etkileri değerlendirilerek, motorun çalışma stabilitesine olan katkısı vurgulanmıştır. FSDAM için belirlenen her senaryoda motor dış çapı, motor iç çapı, mıknatıs kalınlığı ve tel çapı sabit tutulmuştur. Oluk başına iletken sayısı, oluk yüksekliği ve oluk genişliği her durum için tekrar hesaplanmıştır. Farklı oluk sayıları için farklı mıknatıs türlerinin stator boyunduruk akı yoğunluğu, stator dış akı yoğunluğu, rotor boyunduruk akı yoğunluğu, ortalama tork, tork dalgalanması ve verim parametrelerine etkisi detaylı olarak incelenmiştir. Farklı senaryolar için yapılan elektromanyetik analizler, stator oluk sayısının tork dalgalanmalarını azaltarak motorun daha kararlı çalışmasını sağladığını ortaya koymaktadır. Bu çalışma, FSDAM'ların tasarım

optimizasyonuna yönelik kapsamlı bir değerlendirme sunarak, daha yüksek verimli ve kararlı çalışan motorların geliştirilmesine rehberlik etmektedir. Aynı zamanda, mıknatıs seçimi ve stator oluk sayısının optimizasyonunun, motor performansına doğrudan etkilerini ortaya koyarak, gelecekteki araştırmalara temel oluşturacak önemli bulgular sağlamaktadır.

II. MATERYAL VE METOD

2.1. Manyetik Devre Denklemleri

Denklem (1)'den (4)'e kadar statik manyetik alanlar için Maxwell analiz denklemleri verilmiştir[21,22].

$$\nabla \times \frac{B}{\mu} = J \quad (1)$$

B (Wb/m²) ve J (A/m²) sırasıyla; manyetik akı yoğunluğu ve akım yoğunluğudur. μ (H/m) malzeme manyetik geçirgenliğidir.

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times A \right) = J, \nabla \times A = B \quad (2)$$

A (Wb/m) vektör potansiyeldir. Denklemler düzenlendiğinde sonlu elemanlar yöntemi (SEY) ile sistemi çözecek denklem (3) elde edilerek manyetik ve elektrik devresi analizleri yapılır.

$$-\frac{1}{\mu} \nabla^2 A = J \quad (3)$$

2.2. Tasarımda Kullanılan Temel Denklemler

Elektrik motorunun elektrik ve mekanik çıkış değerleri ve ana boyutları ile ilgili olan denklemleri tasarımda yol gösterir. Tasarım için FSDAM özel çıkarımları denklem (4) ve (7) arasında verilmiştir. Motorun ürettiği çıkış gücü Po(W) rotorda endüklenen zıt emk E(V) ve faz akımı I(A) cinsinden denklem (5) ile verilir[21,22,24].

$$P_o = EI \quad (4)$$

B (Wb/m²) hava aralığı manyetik akı yoğunluğu, D (m) rotor çapı, L (m) motor eksenel uzunluğu, P toplam kutup sayısı ve ϕ akı (Wb) denklem ile (5) verilmiştir.

$$B_g = \frac{P\phi}{\pi DL} \quad (5)$$

Motorun zıt-emk faz gerilimi E denklem (6) ile bulunur.

$$E = 2NDL\omega_m B_g \quad (6)$$

Elektromanyetik tork denklem (7) ile bulunur.

$$T = 4NDL I B_g \quad (7)$$

Burada; N:faz başına sarım sayısını ifade etmektedir. Sargılardan geçen akımın ısı etkisi ile bakır kayıpları oluşur.

$$P_{cu} = 3I_{rms}^2 R_{ph} \quad (8)$$

Irms: faz başına RMS akımı, Rph: faz başına direnci temsil etmektedir.

Çekirdek kayıpları genellikle histerezis ve fuko (eddy current) kayıplarının toplamıdır:

$$P_{core} = k_h f B_{max}^n V + k_e (f B_{max})^2 V \quad (9)$$

kh: histerezis kaybı katsayısı, ke: eddy akım kaybı katsayısı, f: frekans, Bmax: maksimum manyetik akı yoğunluğu, V: manyetik malzemenin hacmi, n: 1.6-2 arası olan malzemeye bağlı olan sayıdır.

İnvertör kayıpları, iletim ve anahtarlama kayıplarının toplamıdır.

$$P_{cond} = 6I_{rms}^2 R_{on} \quad (10)$$

Ron: yarı iletken direncidir.

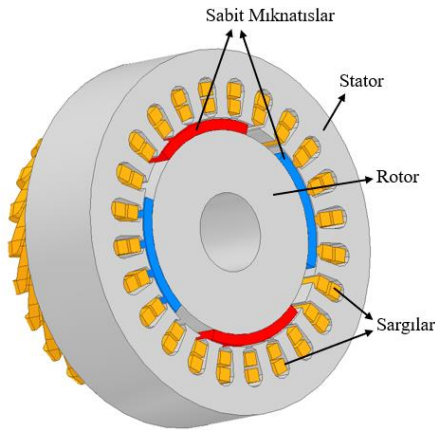
$$P_{sw} = 6f_s (E_{on} + E_{off}) \quad (11)$$

Fs: anahtarlama frekansı, Eon ve Eoff yarıiletken başına anahtarlama enerjileridir.

Çıkış gücü ve kayıplar bilindiğine göre FSDAM verim denklemi elde edilebilir:

$$\% \eta = \frac{P_o}{P_o + P_{cu} + P_{core} + P_{cond} + P_{sw}} 100 \quad (12)$$

Şekil 1’de FSDAM yapısı gösterilmiştir.



Şekil 1. FSDAM yapısı

2.3. Motor Tasarımı

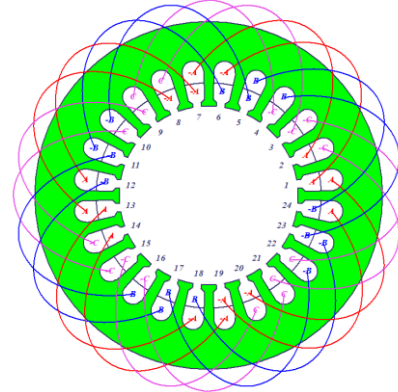
FSDAM’da stator, motorun döner manyetik alanın meydana geldiği duran kısımdır. Çalışmada tasarlanan iç rotorlu motorda stator sargıları dış yüzeyde olduğundan, dış rotorlu yapıya göre statorun soğuması daha kolaydır. Ancak statorun seri üretimde sarılması ve işlenmesi oldukça zordur, aynı zamanda maliyeti ve işçiliği de çok fazladır[25-27].

Statorda her oluğunda alt ve üst olmak üzere iki bobin kenarı bulunan sargılar çift katmanlı, tek kat bobin

kenarı bulunan sargılar ise tek katmanlıdır. Çift katmanlı sargı tipinde katmanlar arasında yalıtım malzemesi konulacağı için tek katmanlı sargı tipine göre oluk doldurma oranı daha düşüktür ve fazlar arası elektriksel risk daha yüksektir. Ancak daha yüksek güç uygulamalarında çift katmanlı sargı tipi kullanılmaktadır [27].

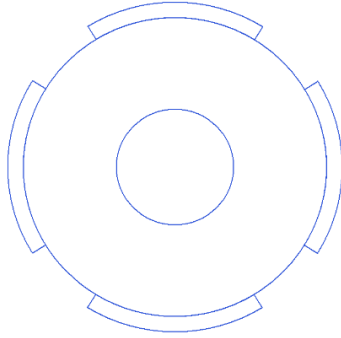
Motorun her bir fazı başına kutup çifti başına sadece bir bobin karşılık gelecek şekilde ortaya çıkacak bağlantı tipini yarım kalıp, birden fazla bobin gelecek şekilde yapılan bağlantı ise tam kalıp sarımdır [28].

Şekil 2’de Tam kalıp iki tabaka konsantre sarım tipi gösterilmiştir.



Şekil 2. FSDAM’da tam kalıp sarım

BLDC motorların rotoru, motorun dönmesini sağlayan ve sabit mıknatıslardan oluşan bileşendir. Rotorda kullanılan mıknatısların düzeni, manyetik akı yoğunluğu, verimlilik, tork dalgalanması ve genel motor performansı üzerinde büyük bir etkiye sahiptir. BLDC motorlarda rotor tasarımı dış rotorlu ve iç rotorlu iki ana gruba ayrılır. Dış rotorlu tasarımda, mıknatıslar dış çerçevede yer alır ve rotor dışarıda döner. Daha fazla atalet sağladığı için bazı uygulamalarda daha stabil hız kontrolü sağlar. Genellikle fanlar, dron motorları gibi düşük hız ve yüksek tork gerektiren uygulamalarda kullanılır. İç rotorlu tasarımda ise, mıknatıslar rotorun merkezinde bulunur ve stator etrafında sabittir. Daha hızlı tepki süresi ve yüksek hız gerektiren uygulamalar için uygundur. Elektrikli araçlar, CNC motorları, servo motorlar gibi uygulamalarda kullanılır [29]. Bu çalışmada iç rotorlu yüzey montajlı FSDAM incelenmiştir. Şekil 3’te iç rotorlu yüzey montajlı FSDAM tipi gösterilmiştir.



Şekil 3. FSDAM'da yüzey montajlı rotor

Rotordaki demagnetizasyon adı verilen sürekli mıknatısların sağladığı akının stator sargılarından akan akının oluşturduğu manyetik alanın etkisiyle azalması durumu mıknatıs seçimini önemli ölçüde etkiler[30]. Mıknatısın yüksek demagnetizasyon değerinin yanısıra yüksek akı yoğunluğuna sahip olması, kolay bulanabilir olması ve maliyetinin düşük olması istenir[31]. Bu değerler göz önünde bulundurularak analizler gerçekleştirilirken sıklıkla kullanılan XG196/96, SmCo, NdFeB mıknatıs türlerine yer verilmiştir.

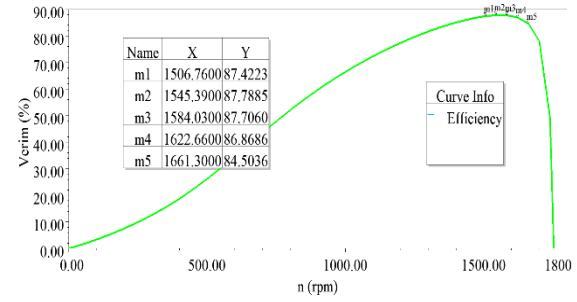
III. ELEKTROMANYETİK ANALİZ

FSDAM'ların elektromanyetik analizi, motorun manyetik alan dağılımını, moment üretimini, verimliliğini ve ısı performansını değerlendirmek için yapılır. Bu analiz genellikle sonlu elemanlar yöntemi (FEM) kullanılarak gerçekleştirilir[32,33]. Bu bölümde 24 oluk 4 kutuplu, 18 oluk 4 kutuplu, 12 oluk 4 kutuplu FSDAM için sırasıyla XG196/96, NdFeB ve SmCo mıknatıslarının etkisi incelenmiştir. x64 tabanlı işlemci, 4 GB RAM özelliklerine sahip bilgisayarda ANSYS Electronics Desktop 2021 R1 versiyonu paket programı ile simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Transient analizi için 40 ms durma zamanı, 0,2 ms adım zamanı belirlenmiştir. FSDAM 4 kutuplu ve hızı 1500 rpm olduğu için bir elektrik periyodu 20 ms olarak hesaplanmıştır. Simülasyon durma zamanı belirlenirken kararlı duruma ulaştığının gözlemlenebilmesi için iki elektrik periyodu boyunca analiz sürdürülmüştür. Her analizin sonuçlanma süresi yaklaşık 30 dakikadır. FSDAM özellikleri Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. FSDAM Özellikleri

Özellik	Oluk/Kutup sayısı (24/4)	Oluk/Kutup sayısı (18/4)	Oluk/Kutup sayısı (12/4)
Güç	550 W	550 W	550 W
Hız	1500 rpm	1500 rpm	1500 rpm
Dış çap	120 mm	120 mm	120 mm
İç çap	75 mm	75 mm	75 mm
Mıknatıs kalınlığı	3.5 mm	3.5 mm	3.5 mm
İletken sayısı	50	66	106
Tel çapı	0.91 mm	0.91 mm	0.91 mm
Oluk yüksekliği	8.2 mm	7.49 mm	13.87 mm
Oluk tepe genişliği	7.6 mm	9.65 mm	6.13 mm

Şekil 4, 24 oluk 4 kutuplu FSDAM için (XG196/96) verim-hız eğrisini göstermektedir.



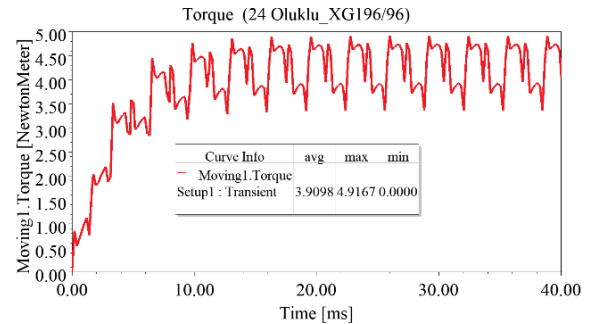
Şekil 4. Verim-hız eğrisi (24 Oluklu_XG196/96)

Motorun farklı hız aralıklarındaki verimlilik durumu incelendiğinde, aşağıdaki eğilimler gözlemlenmiştir: Düşük hızlar (0–500 rpm): Bu hız aralığında motor verimliliği oldukça düşüktür. Düşük hızlarda çalışan motor, daha yüksek oranda kayıplara maruz kalmakta ve bu durum toplam verimi olumsuz etkilemektedir. Orta hızlar (500–1500 rpm): Bu bölgede verimlilik hızla artmakta ve motorun en verimli çalıştığı aralık olarak öne çıkmaktadır. Verim, bu hız aralığında maksimum seviyeye yaklaşmaktadır. Tepe noktası (~1500–1600 rpm): Motor verimliliği bu bölgede maksimum değere ulaşarak yaklaşık %87,8 seviyesinde zirve yapmaktadır. Bu nokta, motorun optimal çalışma noktası olarak değerlendirilebilir. Yüksek hızlar (>1600 rpm): Bu hız seviyesinden itibaren verimlilik düşüşe geçmektedir. Özellikle 1800 rpm civarında ani ve belirgin bir verim kaybı gözlemlenmiştir.

Her oluk/kutup sayısı ve mıknatıs türü için tork dalgalanması denklem (13) yardımı ile incelenmiştir[21]. Tork-zaman grafiğinde maksimum tork ve minimum tork farkı, ortalama tork değerine bölünerek tork dalgalanması hesaplanabilir.

$$\%T_{Dalgalanması} = \frac{T_{max} - T_{min}}{T_{ort}} 100 \quad (13)$$

Şekil 5'te 24 oluk 4 kutuplu FSDAM'da (XG196/96) tork-zaman eğrisi gösterilmiştir.

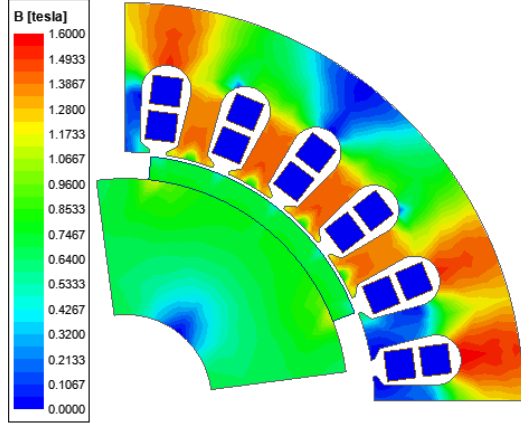


Şekil 5. Tork-zaman eğrisi (24 Oluklu_XG196/96)

0-5 ms zaman aralığında, motor çalışmaya başladığında tork hızla yükseliyor. İlk anlarda dalgalanmalar var, bu geçici rejimde motorun stabil hale gelmeye çalıştığını gösterir. 5-40 ms zaman aralığında kararlı duruma

ulaştığı gözlemlenmiştir. Tork, sürekli dalgalı bir yapıya sahiptir. Maksimum tork 4.91 Nm, ortalama tork 3.9 Nm civarındadır.

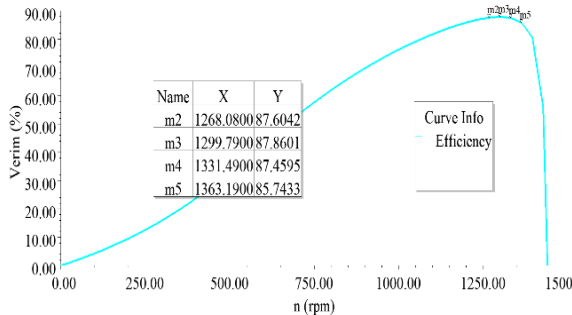
Şekil 6’da 24 oluk 4 kutuplu FSDAM’da XG196/96 mıknatısı ile gerçekleştirilen manyetik analiz sonucunda, stator, rotor, hava aralığı ve mıknatıs bölgelerinde oluşan manyetik akı yoğunluğu gösterilmiştir.



Şekil 6. Akı yoğunluğu (24 Oluklu_XG196/96)

Stator oluklarının uçlarında yüksek manyetik akı yoğunluğu (yaklaşık 1.5 Tesla) gözleniyor. Rotor mıknatıslarının etrafında manyetik akı çizgileri yoğunlaşmış, bu da mıknatısların manyetik devrede etkin olduğunu gösteriyor.

Şekil 7’de 24 oluk 4 kutuplu FSDAM (NdFeB35) verim-hız eğrisi verilmiştir.



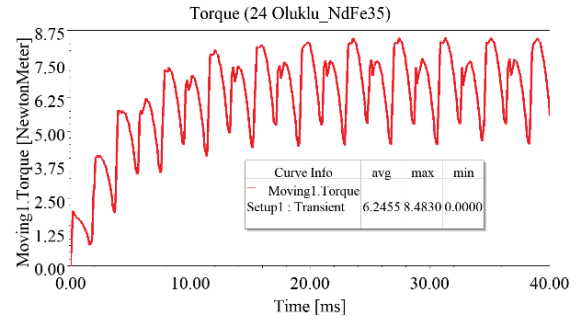
Şekil 7. Verim-hız eğrisi (24 Oluklu_NdFe35)

Motorun farklı devir sayılarındaki verimlilik performansı aşağıdaki şekilde özetlenebilir:

0–500 rpm: Bu bölgede motor verimliliği oldukça sınırlıdır. Düşük hızlarda artan demanyetizasyon riski, sürtünme ve diğer kayıplar nedeniyle toplam verim önemli ölçüde düşmektedir. 500–1300 rpm: Hız arttıkça verimlilikte belirgin bir iyileşme gözlemlenmektedir. Bu aralık, motorun en verimli çalıştığı bölgeyi oluşturmaktadır. 1300–1350 rpm: Bu aralıkta motor, yaklaşık %87,9'luk maksimum verimliliğe ulaşmaktadır. Optimum performans bu hız bandında elde edilmektedir. >1400 rpm: Bu eşğin

üzerinde verimlilikte düşüş başlamaktadır. Özellikle 1500 rpm civarında ani bir verim kaybı meydana gelmiştir. Bu durum, yüksek hızlarda artan kayıpların sistem performansını olumsuz etkilediğini göstermektedir.

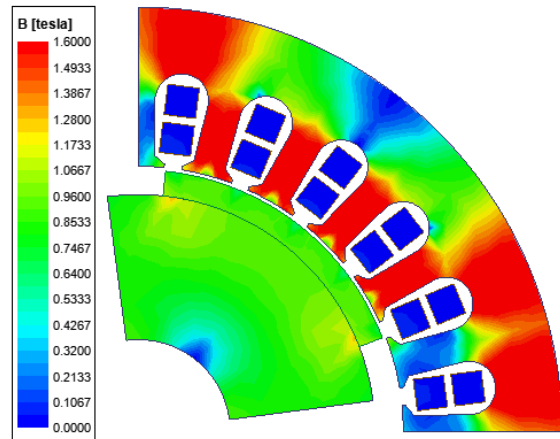
Şekil 8’ 24 oluk 4 kutuplu FSDAM’da (NdFe35) elde edilen tork-zaman eğrisi göstermektedir.



Şekil 8. Tork-zaman eğrisi (24 Oluklu_NdFe35)

Motorun çalışmaya başladığı 0–10 ms aralığında tork hızla yükselmiştir. 10–40 ms aralığında ise tork kararlı duruma ulaşmıştır. Maksimum tork 8.48 Nm, ortalama tork 6.24 Nm olup, bu da motorun verimli çalıştığını göstermektedir.

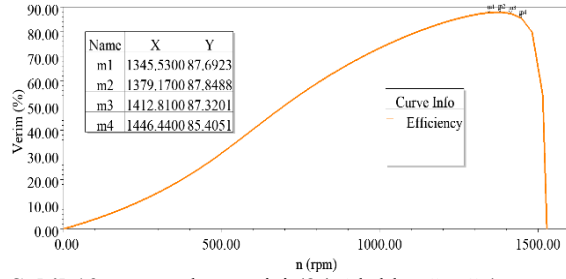
Şekil 9’da 24 oluk 4 kutuplu FSDAM’da (NdFe35) manyetik akı yoğunluğu dağılımı gösterilmiştir.



Şekil 9. Akı yoğunluğu (24 Oluklu_NdFe35)

Stator oluklarının uçlarında ve stator dişlerinde yüksek manyetik akı yoğunluğu (yaklaşık 1.6 Tesla) gözleniyor.

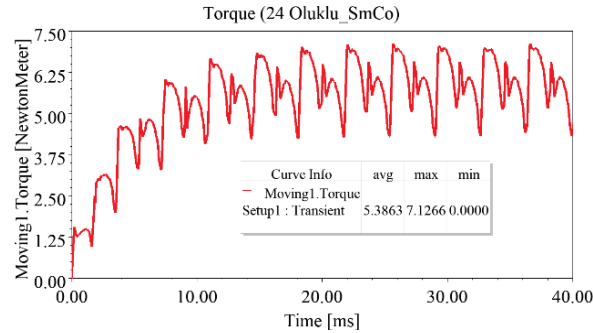
Şekil 10’da 24 oluk 4 kutuplu FSDAM’da (SmCo) verim-hız grafiği gösterilmiştir.



Şekil 10. Verim-hız eğrisi (24 Oluklu_SmCo)

0-500 rpm arası hızlarda verim oldukça düşüktür. 500-1350 rpm hız aralığında, verim hızla artarak en yüksek seviyeye ulaşıyor. Motorun en verimli çalıştığı bölge burasıdır. 1350-1400 rpm hız aralığında, maksimum verimlilik (%87.85) seviyesine ulaşıyor. 1450 rpm'den verim düşmeye başlıyor. 1500 rpm civarında ani verim düşüşü gerçekleşmiştir.

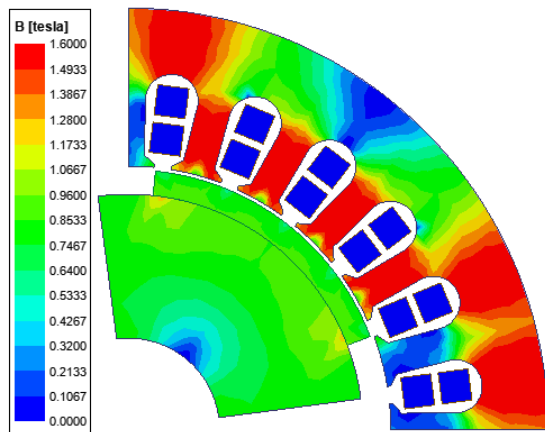
Şekil 11'de 24 oluk 4 kutuplu FSDAM'da SmCo mıknatısına ait tork-zaman eğrisi gösterilmiştir.



Şekil 11. Tork-zaman eğrisi (24 Oluklu_SmCo)

0-5 ms zaman aralığında, motor çalışmaya başladığında tork hızla yükseliyor. 5-40 ms zaman aralığında kararlı durumdadır. Maksimum tork 7.12 Nm, ortalama tork 5.38 Nm civarındadır.

Şekil 12'de 24 oluk 4 kutuplu FSDAM'da SmCo mıknatısına ait manyetik akı yoğunluğu dağılımı gösterilmiştir.



Şekil 12. Akı yoğunluğu (24 Oluklu_SmCo)

Stator oluklarının uçlarında ve stator dişlerinde yüksek manyetik akı yoğunluğu (yaklaşık 1.6 Tesla) oluşmuştur.

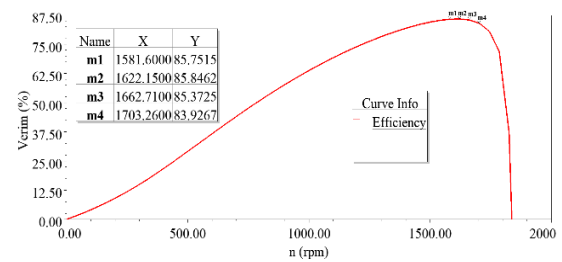
Tablo 2'de 24 oluklu tasarıma göre XG196/96, NdFe35 ve SmCo mıknatılarının simülasyon sonuçları verilmiştir.

Tablo 2. 24 oluklu simülasyon sonuçları

Özellik	XG196/96	NdFe35	SmCo
Verim	%87.78	%87.86	%87.84
Tork	3.90 Nm	6.24 Nm	5.38 Nm
Tork Dalgalanması	%125.89	%135.89	%132.34
Anma Hız	1545 rpm	1299 rpm	1379 rpm

Üç farklı mıknatıs türü için verim değerleri oldukça yakındır (%87.78 - %87.86 - %87.84). NdFe35 mıknatısı en yüksek verimi sağlamış (%87.86), ancak fark çok küçük olduğu için tüm mıknatısların benzer verim sunduğu söylenebilir. NdFe35 mıknatısı en yüksek torku üretmiştir (6.24 Nm). SmCo, 5.38 Nm ile ikinci sırada, XG196/96 ise en düşük torku üretmiştir (3.90 Nm). Bu sonuç, NdFe35'in daha yüksek manyetik özelliklere sahip olduğunu ve motorun daha güçlü çalışmasını sağladığını gösteriyor. NdFe35 mıknatısı %135.89 ile en yüksek tork dalgalanmasına sahiptir. XG196/96 %125.89 ve SmCo %132.34 ile daha düşük dalgalanma değerleri sunuyor. Tork dalgalanması ne kadar düşükse, motorun titreşimi ve gürültüsü o kadar az olur. Bu yüzden SmCo ve XG196/96 mıknatıları, titreşim açısından daha iyi bir performans gösteriyor. XG196/96 mıknatısı ile en yüksek anma hızı elde edilmiş (1545 rpm). NdFe35, 1299 rpm ile en düşük hızı sağlamıştır. SmCo, 1379 rpm ile orta seviyede kalıyor.

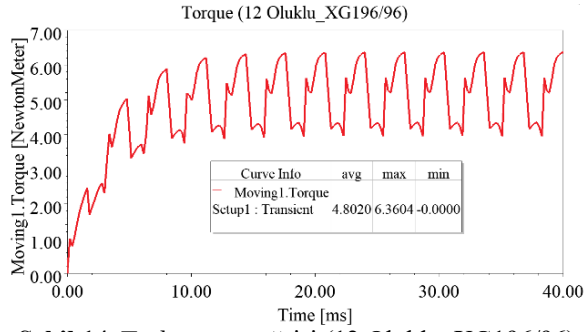
Şekil 13, 12 oluk 4 kutuplu FSDAM'da (XG196/96) verimin hıza göre değişimi gösterilmiştir.



Şekil 13. Verim-hız eğrisi (12 Oluklu_XG196/96)

0-500 rpm aralığında verim çok düşüktür. 500-1550 rpm aralığında verim hızla artar ve 1600 rpm civarında %85.6 ile zirveye ulaşır. >1650 rpm hızlarda verim azalmaya başlar, 1800 rpm'de ise ani bir düşüş gözlemlenmiştir.

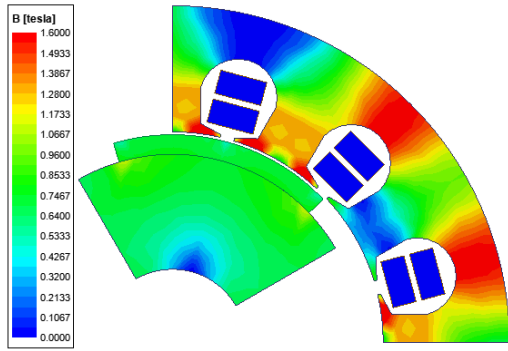
Şekil 14'te 12 oluk 4 kutuplu FSDAM'da XG196/96 mıknatısına ait tork-zaman eğrisi gösterilmiştir.



Şekil 14. Tork-zaman eğrisi (12 Oluklu_XG196/96)

Motorun çalışmaya başladığı 0–10 ms aralığında tork hızla artmıştır. 10–40 ms arasında ise sistem kararlı duruma geçmiştir. Maksimum tork 6.36 Nm, ortalama tork 4.80 Nm olarak ölçülmüştür.

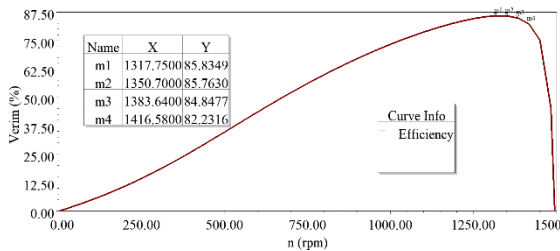
Şekil 15'te 12 oluk 4 kutuplu FSDAM (XG196/96) manyetik akı yoğunluğu dağılımı gösterilmiştir.



Şekil 15. Akı yoğunluğu (12 Oluklu_XG196/96)

Stator oluklarının uçlarında ve stator dış uçlarında yüksek manyetik akı yoğunluğu (yaklaşık 1.6 Tesla) olduğu görülmektedir.

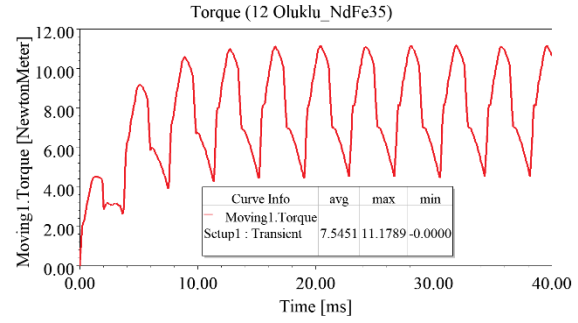
Şekil 16'da 12 oluk 4 kutuplu FSDAM'da NdFe35 mıknatısının kullanılmasıyla verimin hıza göre değişimi gösterilmiştir.



Şekil 16. Verim-hız eğrisi (12 Oluklu_NdFe35)

0–500 rpm aralığında verim düşüktür. 500–1300 rpm arasında hızla artarak %85.7 ile 1250–1300 rpm civarında maksimum seviyeye ulaşır. 1350 rpm'den yüksek hızlarda verim azalmaya başlar; 1500 rpm'de ise ani bir düşüş görülmüştür.

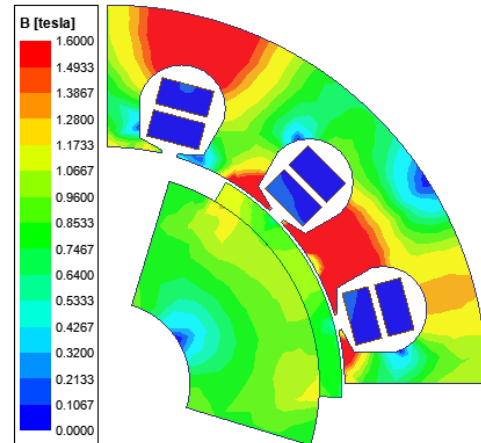
Şekil 17'de 12 oluk 4 kutuplu FSDAM'da NdFe35 mıknatısı için zamana göre göre tork grafiği gösterilmiştir.



Şekil 17. Tork-zaman eğrisi (12 Oluklu_NdFe35)

0-10 ms zaman aralığında, tork hızla yükseliyor. 10-40 ms zaman aralığında kararlı duruma ulaşmaktadır. Maksimum tork 11.17 Nm, ortalama tork 7.54 Nm civarındadır.

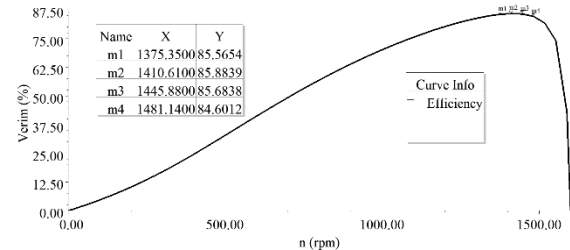
Şekil 18'de 12 oluk 4 kutuplu FSDAM'da (NdFe35) manyetik akı yoğunluğu dağılımı gösterilmiştir.



Şekil 18. Akı yoğunluğu (12 Oluklu_NdFe35)

Stator dişlerinde ve stator diş uçlarında yüksek manyetik akı yoğunluğu (yaklaşık 1.6 Tesla) görülmektedir.

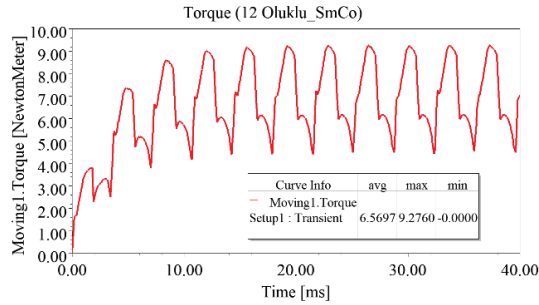
Şekil 19'da 12 oluk 4 kutuplu FSDAM'da SmCo mıknatısının kullanılmasıyla elde edilen verim-hız eğrisi gösterilmiştir.



Şekil 19. Verim-hız eğrisi (12 Oluklu_SmCo)

0-500 rpm hız aralığında verim çok düşüktür. 500-1410 rpm hız aralığında ise, verim hızla artarak en yüksek seviyeye ulaşıyor. Motorun en verimli çalıştığı bölge burasıdır. Tepe noktasında (1400-1420 rpm civarı) %85.9 seviyesine ulaşıyor. Daha yüksek hızlarda (>1445 rpm), verim düşmeye başlıyor. 1600 rpm civarında ani verim düşüşü gerçekleşmiştir.

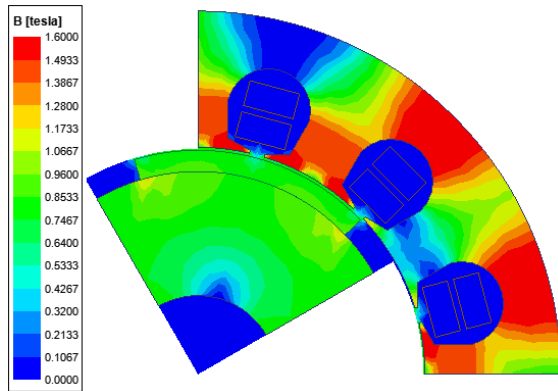
Şekil 20’de 12 oluk 4 kutuplu FSDAM’da SmCo mıknatısına ait tork-zaman eğrisi gösterilmiştir.



Şekil 20. Tork-zaman eğrisi (12 Oluklu_SmCo)

0-5 ms zaman aralığında, tork hızla yükseldikten sonra 5. ms'den itibaren kararlı duruma ulaşmaktadır. Maksimum tork 9.27 Nm, ortalama tork 6.56 Nm'dir.

Şekil 21’de 12 oluk 4 kutuplu FSDAM’da (SmCo) manyetik akı yoğunluğu dağılımı verilmiştir.



Şekil 21. Akı yoğunluğu (12 Oluklu_SmCo)

Stator boyunduruğunda ve stator dış uçlarında yüksek manyetik akı yoğunluğu (yaklaşık 1.6 Tesla) oluşmuştur.

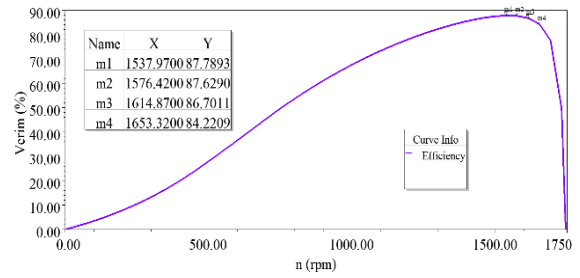
Tablo 3’te 12 oluklu tasarıma göre XG196/96, NdFe35 ve SmCo mıknatılarının simülasyon sonuçları verilmiştir.

Tablo 3. 12 oluklu simülasyon sonuçları

Özellik	XG196/96	NdFe35	SmCo
Verim	%85.84	%85.83	%85.88
Tork	4.80 Nm	7.54 Nm	6.56 Nm
Tork Dalganması	%132.50	%148.14	%141.31
Anma Hız	1622 rpm	1317 rpm	1410 rpm

Tüm mıknatıs türleri için verim değerleri birbirine çok yakındır (%85.83 - %85.88). SmCo en yüksek verimi sağlarken (%85.88), NdFe35 en düşük verime sahip (%85.83), ancak fark çok küçük olduğu için pratikte önemli bir avantaj veya dezavantaj oluşturmaz. NdFe35 en yüksek torku üretmiştir (7.54 Nm). SmCo, 6.56 Nm ile ikinci sırada yer alıyor. XG196/96 en düşük torku sağlıyor (4.80 Nm). NdFe35’in yüksek manyetik özellikleri, en yüksek torku üretmesini sağlamıştır. NdFe35, %148.14 ile en yüksek tork dalgalanmasına sahip. XG196/96 en düşük tork dalgalanmasını sağlamıştır (%132.50). SmCo %141.31 ile orta seviyede yer alıyor. Yüksek tork dalgalanması, motorun titreşim ve gürültü seviyesini artırabilir. Bu nedenle, XG196/96 titreşim açısından en stabil motor performansını sunuyor. XG196/96 en yüksek anma hızını sunuyor (1622 rpm). NdFe35 en düşük anma hızına sahiptir (1317 rpm). SmCo, 1410 rpm ile orta seviyede bulunuyor. NdFe35 yüksek tork ürettiği için daha düşük anma hızı sağlamaktadır.

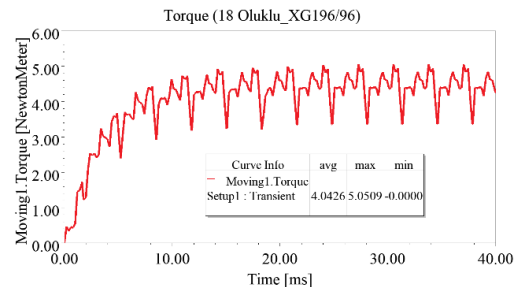
Şekil 22’de 18 oluk 4 kutuplu FSDAM’da XG196/96 mıknatısının kullanılmasıyla elde edilen verim-hız grafiği verilmiştir.



Şekil 22. Verim-hız eğrisi (18 Oluklu_XG196/96)

Düşük hızlarda (0-500 rpm), verim oldukça düşüktür. Orta hızlarda (500-1535 rpm), verim hızla artarak en yüksek seviyeye ulaşıyor. 1520-1540 rpm hız aralığında, %87.78 seviyesine ulaşıyor. 1570 rpm’den yüksek hızlarda verim düşmeye başlıyor. 1650 rpm civarında ani verim düşüşü gözlemlenmiştir.

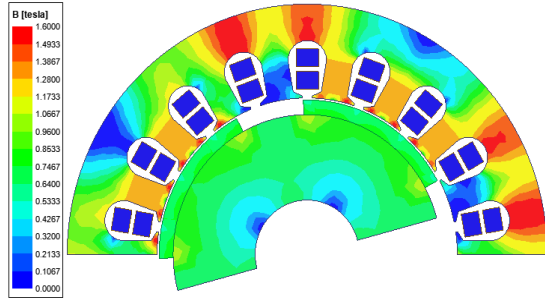
Şekil 23’te 12 oluk 4 kutuplu FSDAM’da XG196/96 mıknatısına ait tork-zaman değişimi gösterilmiştir.



Şekil 23. Tork-zaman eğrisi (18 Oluklu_XG196/96)

Tork-zaman grafiği incelendiğinde, 0-5 ms zaman aralığında, tork artışı görülmektedir. 5-40 ms zaman aralığında kararlı duruma ulaştığı durumda maksimum tork 5.05 Nm, ortalama tork 4.04 Nm seviyesindedir.

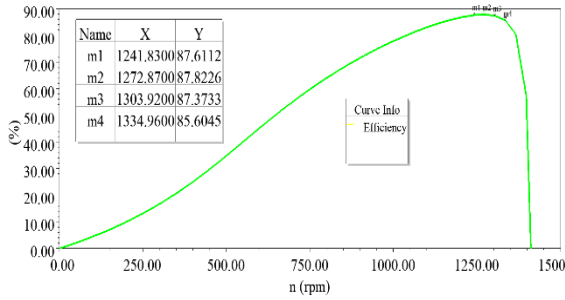
Şekil 24'te 18 oluk 4 kutuplu FSDAM'da XG196/96 mıknatısına ait manyetik akı yoğunluğu dağılımı gösterilmiştir.



Şekil 24. Akı yoğunluğu (18 Oluklu_XG196/96)

Stator dış uçlarında yüksek manyetik akı yoğunluğu (yaklaşık 1.6 Tesla) oluşmuştur.

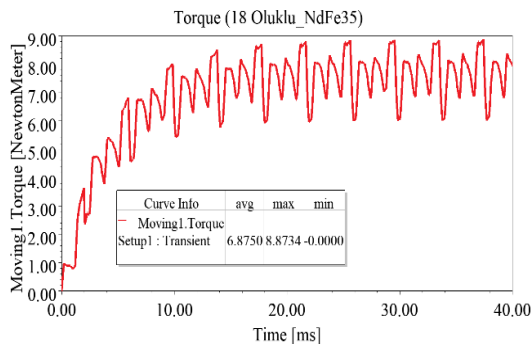
Şekil 25'te 18 oluk 4 kutuplu FSDAM'da (NdFe35) verim-hız eğrisi gösterilmiştir.



Şekil 25. Verim-hız eğrisi (18 Oluklu_NdFe35)

Maksimum verime (%87.82) 1240-1280 rpm seviyesinde ulaşılmaktadır. 1300 rpm'den yüksek hızlarda verim düşmeye başlıyor. 1350 rpm civarında ani verim düşüşü gerçekleşmiştir.

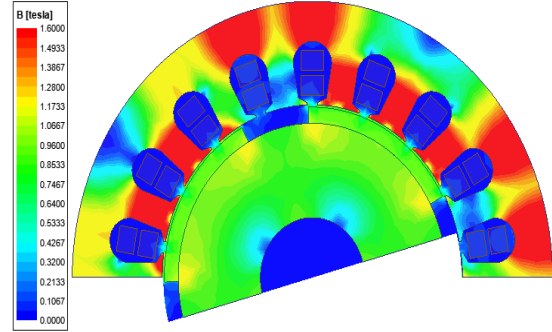
Şekil 26'da 18 oluk 4 kutuplu FSDAM'da NdFe35 mıknatısı için zamana göre tork değişimi gösterilmiştir.



Şekil 26. Tork-zaman eğrisi (18 Oluklu_NdFe35)

0-5 ms zaman aralığındaki tork artışından sonra kararlı çalışma durumuna ulaştığı görülmektedir. Maksimum tork 8.87 Nm, ortalama tork 6.87 Nm civarındadır.

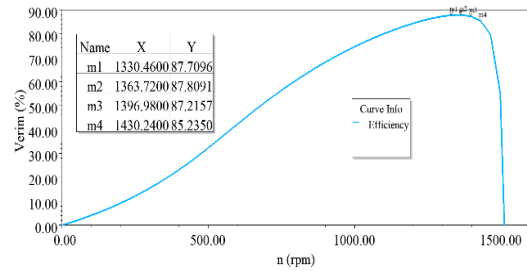
Şekil 27'de 18 oluk 4 kutuplu FSDAM'da NdFe35 mıknatısına ait manyetik akı yoğunluğu dağılımı gösterilmiştir.



Şekil 27. Akı yoğunluğu (18 Oluklu_NdFe35)

Stator dişlerinde, stator boyunduruğunda ve stator dış uçlarında yüksek manyetik akı yoğunluğu (yaklaşık 1.6 Tesla) oluşmuştur.

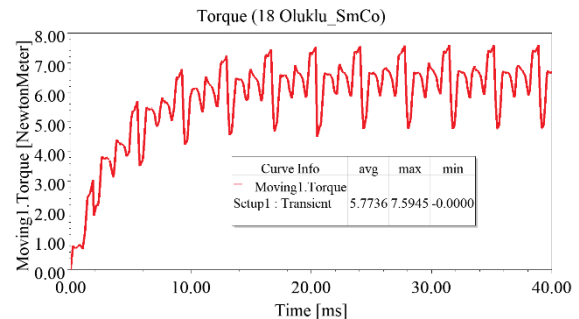
Şekil 28'de 18 oluk 4 kutuplu FSDAM'da (SmCo) verimin hıza göre durumu gösterilmiştir.



Şekil 28. Verim-hız eğrisi (18 Oluklu_SmCo)

Motor 500-1330 rpm aralığında verim hızla artarak en verimli çalıştığı bölgeye ulaşıyor. 1340-1360 rpm hız aralığında %87.80 seviyesine ulaşıyor. 1390 rpm'de verim düşmeye başlıyor. 1400 rpm civarında verim hızla düşmektedir.

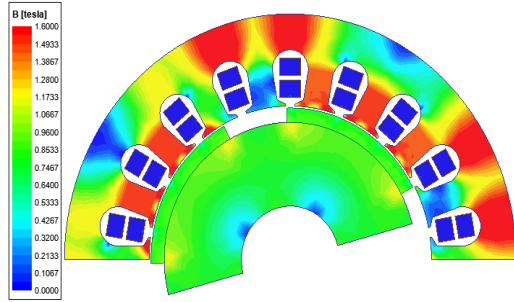
Şekil 29'da 18 oluk 4 kutuplu FSDAM'da SmCo mıknatısına ait tork-zaman grafiği gösterilmiştir.



Şekil 29. Tork-zaman eğrisi (18 Oluklu_SmCo)

Motor çalışmaya başladığında tork hızla yükseliyor. 5-40 ms zaman aralığında kararlı duruma ulaştığı gözlemlenmiştir. Maksimum tork 7.59 Nm, ortalama tork 5.77 Nm civarındadır.

Şekil 30'da 18 oluk 4 kutuplu FSDAM'da SmCo mıknatısı için manyetik akı yoğunluğu dağılımı gösterilmiştir.



Şekil 30. Akı yoğunluğu (18 Oluklu_SmCo)

Stator boyunduruğunda ve stator dış uçlarında yüksek manyetik akı yoğunluğu (yaklaşık 1.6 Tesla) oluşmuştur.

Tablo 4'te 18 oluklu tasarıma göre XG196/96, NdFe35 ve SmCo mıknatılarının simülasyon sonuçları verilmiştir.

Tablo 4. 18 oluklu simülasyon sonuçları

Özellik	XG196/96	NdFe35	SmCo
Verim	%87.78	%87.82	%87.80
Tork	4.04 Nm	6.87 Nm	5.77 Nm
Tork Dalgalanması	%125	%129.11	%131.54
Anma Hız	1517 rpm	1272 rpm	1363 rpm

Verim değerleri birbirine çok yakındır (%87.78 - %87.82 - %87.80). NdFe35 en yüksek verimi sağlıyor (%87.82), ancak fark çok küçük olduğu için üç mıknatıs arasında belirgin bir avantaj oluşturmaz. NdFe35 en yüksek torku üretiyor (6.87 Nm). SmCo 5.77 Nm ile ikinci sırada yer alıyor. XG196/96 en düşük torku üretiyor (4.04 Nm). NdFe35'in yüksek manyetik akı yoğunluğu sayesinde en yüksek tork sağlandığı görülüyor. NdFe35 %129.11 ile en yüksek tork dalgalanmasına sahiptir. SmCo %131.54 ile ikinci sırada yer alıyor. XG196/96 en düşük tork dalgalanmasını sağlıyor (%125). Düşük tork dalgalanması, motorun titreşimini ve gürültüsünü azaltacağı için XG196/96 bu açıdan avantajlıdır. XG196/96 en yüksek anma hızına sahiptir (1517 rpm). NdFe35 en düşük hızda çalışıyor (1272 rpm). SmCo, 1363 rpm ile orta seviyede bulunuyor. Yüksek tork üreten NdFe35'in, motor hızını düşürdüğü gözlemleniyor.

IV. TARTIŞMA

Bu çalışmada, FSDAM tasarımında mıknatıs malzemesi ve stator oluk sayısının motor performansı üzerindeki etkileri ayrıntılı şekilde değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular, hem malzeme seçiminin hem de

geometrik parametrelerin motor performansı üzerinde belirleyici roller üstlendiğini göstermektedir.

Mıknatıs malzemeleri karşılaştırıldığında, NdFeB en yüksek tork değerlerini sunmasına rağmen, tork dalgalanmalarının da en yüksek seviyede olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum, yüksek güç gerektiren uygulamalarda NdFeB'nin tercih edilebileceğini, ancak motor kontrol stratejilerinde gelişmiş algoritmaların gerekebileceğini ortaya koymaktadır. SmCo, dengeli bir tork üretimi ile birlikte orta seviyede dalgalanma ve hız sunarak, çok yönlü bir performans sergilemiştir. Bu da SmCo'yu hem tork hem de dinamik tepki açısından denge arayan uygulamalar (İnsansız hava araçları, Radar tahrik sistemleri) için uygun hale getirmektedir. XG196/96 ise en düşük tork üretimi ile birlikte en düşük tork dalgalanması ve en yüksek hızı sağlayarak, yüksek hız ve düşük titreşim gerektiren senaryolarda öne çıkmaktadır. Bu bulgular, uygulama bazlı malzeme seçiminde performans kriterlerinin dikkatle değerlendirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.

Stator oluk sayısının etkilerine bakıldığında, 12 oluklu yapı daha yüksek tork sunmakla birlikte, tork dalgalanmaları belirgin şekilde artmakta ve hız düşmektedir. Bu yapı, yüksek güç gerektiren ancak dalgalanmanın tolere edilebileceği uygulamalara hitap etmektedir. 18 oluklu yapı, tork seviyesi ile tork dalgalanması arasında makul bir denge kurarak, hem performans hem de kararlılık açısından optimal bir yapı sunmaktadır. 24 oluklu yapı ise tork dalgalanmalarının en düşük olduğu ve kararlılığın yüksek olduğu bir yapı olmakla birlikte, tork seviyesinin görece daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Bu durum, bu yapının düşük titreşimli ve sessiz çalışan motor uygulamaları (Elektrikli cam açma motorları) için daha uygun olabileceğini düşündürmektedir.

Genel olarak, 18 oluklu yapı, motor tasarımında performans ve kararlılık arasında optimum dengeyi kuran bir yapı olarak öne çıkmıştır. Ayrıca, mıknatıs malzemesi ve oluk sayısı arasında karşılıklı etkileşimlerin olduğu görülmüş; örneğin, düşük torklu ancak kararlı bir mıknatıs malzemesinin (XG196/96), yüksek oluk sayısı ile desteklenerek performansın dengelenebileceği anlaşılmıştır.

V. SONUÇLAR

Bu çalışmada, FSDAM tasarım sürecinde mıknatıs malzemesi seçimi ve stator oluk sayısının motor performansı üzerindeki etkileri kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. Elektromanyetik analizler doğrultusunda, farklı mıknatıs malzemelerinin (XG196/96, NdFeB, SmCo) manyetik doyma özellikleri ile bu malzemelerin tork dalgalanmalarına etkileri karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular, mıknatıs malzemesi seçiminde manyetik doyma davranışının motor verimliliği açısından kritik bir parametre olduğunu ortaya koymaktadır.

Çalışmada ayrıca, stator oluk sayısındaki değişimin ortalama tork üretimi, tork dalgalanmaları ve manyetik akı yoğunlukları üzerindeki etkileri analiz edilmiştir. Motorun dış çapı, iç çapı, mıknatıs kalınlığı ve tel çapı sabit tutulurken; her senaryoda oluk başına iletken sayısı, oluk yüksekliği ve genişliği yeniden belirlenerek performans değerlendirmeleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar, stator oluk sayısının artırılmasının tork dalgalanmalarını azalttığını ve motorun çalışma kararlılığını iyileştirdiğini göstermektedir.

Genel olarak, bu çalışma mıknatıs malzemesi ve stator oluk sayısının FSDAM performansı üzerindeki etkilerini ortaya koyarak, daha verimli ve stabil motor tasarımları için önemli bir referans sunmaktadır. Bulgular, hem motor tasarımının optimizasyonuna katkı sağlamakta hem de gelecekte yapılacak çalışmalar için sağlam bir temel oluşturmaktadır.

24 oluklu yapı için: Yüksek tork isteniyorsa, NdFe35 en iyi seçim gibi görünmektedir, ancak bu durumda tork dalgalanması yüksek ve hız en düşük seviyededir. Daha dengeli bir performans isteniyorsa SmCo iyi bir seçenek olabilir çünkü orta seviyede tork üretirken dalgalanma ve hız açısından daha dengeli bir performans segilemektedir. XG196/96, ise en düşük tork değerine sahip olmasına rağmen en yüksek hızı sunmakta ve tork dalgalanması en düşük seviyede bulunmaktadır. Buradaki seçim, uygulamanın gereksinimlerine bağlı olacaktır. Yüksek hız ve düşük titreşim gerekiyorsa XG196/96, yüksek tork gerekiyorsa NdFe35 tercih edilebilir.

12 oluklu yapı için: Yüksek tork gerektiren uygulamalarda NdFe35 en iyi seçim olabilir, ancak tork dalgalanması oldukça yüksek ve motor hızıda düşüktür. Daha dengeli bir performans istenirse SmCo uygun olabilir. Tork seviyesi iyi, tork dalgalanması orta seviyede ve hız da uygundur. Yüksek hız ve düşük titreşim gereken durumlar için XG196/96 daha avantajlı performans sergilediği görülmektedir. Ancak tork seviyesi en düşük olduğu için yüksek yük gerektiren uygulamalar için uygun olmayabilir.

18 oluklu yapı için: Yüksek tork gerektiren uygulamalarda NdFe35 en iyi seçim olabilir, ancak tork dalgalanması en yüksek seviyede ve hız en düşüktür. Dengeli bir performans için SmCo uygun olabilir. Tork seviyesi iyi, tork dalgalanması orta seviyede ve hız da uygundur. Yüksek hız ve düşük titreşim gereken durumlar için XG196/96 avantajlı görünmektedir. Ancak düşük tork değerine sahip olduğu için yüksek yük gerektiren uygulamalarda tercih edilmeyebilir.

Genel karşılaştırmalar: 24 oluklu motorla kıyaslandığında, 12 oluklu motor genel olarak daha yüksek tork üretmektedir, ancak tork dalgalanması daha fazladır. Yani, 12 oluklu motor, daha güçlü ancak daha düzensiz bir tork karakteristiği sunmaktadır. 18 oluklu motor, 12 olukluya göre daha düşük tork dalgalanması sağlar, bu da daha stabil bir çalışma sunar. 24 oluklu motorla kıyaslandığında ise tork

seviyesi daha yüksek olmakla birlikte, hız biraz daha düşüktür. Sonuç olarak, 18 oluklu motor, tork ve dalgalanma açısından dengeli bir yapı sunar; bu da hem stabilite hem de güç açısından avantajlı bir seçenektir.

VI. ETİK KURUL ONAYI ve ÇIKAR ÇATIŞMASI BEYANI

Hazırlanan makalede etik kurul izni alınmasına gerek yoktur. Herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır.

KAYNAKLAR

- [1] Chen, Z., Li, H., & Xu, L. (2021). A review on BLDC motor design and applications. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 68(4), 3321–3330.
- [2] Song, J., et al. (2022). High-efficiency BLDC motors for electric mobility: Design trends and challenges. Energies, 15(3), 875.
- [3] Ozturk, S. B., & Toliyat, H. A. (2020). Direct torque control of brushless DC motors. IEEE Transactions on Power Electronics, 35(7), 7191–7200.
- [4] Kim, D. Y., et al. (2021). Magnet shape optimization for torque ripple reduction in BLDC motors. IEEE Access, 9, 16501–16510.
- [5] Li, X., et al. (2023). Investigation on slot/pole combinations for performance enhancement in BLDC motors. Electric Power Components and Systems, 51(2), 123–135.
- [6] Bianchi, N., et al. (2020). Design techniques for torque ripple minimization in BLDC motors. IET Electric Power Applications, 14(5), 711–720.
- [7] Park, C., et al. (2021). Influence of magnet material on cogging torque in surface-mounted PM motors. IEEE Transactions on Magnetics, 57(6), 1–4.
- [8] Kwon, J., et al. (2020). Comparison of permanent magnet materials for EV applications. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 499, 166191.
- [9] Zhao, H., et al. (2023). Material impact on electromagnetic performance of BLDC machines. Materials, 16(2), 445.
- [10] Luo, Y., et al. (2021). Performance comparison of SmCo and NdFeB magnets in PM motors. Applied Sciences, 11(6), 2651.
- [11] Ren, Y., et al. (2022). Review of rare-earth-free magnets for BLDC motors. Journal of Materials Science, 57(10), 5672–5690.
- [12] Tan, X., et al. (2023). Investigation on low-cost ferrite magnets in electric motors. IEEE Access, 11, 23022–23032.
- [13] Ersoy, H., & Kose, E. (2020). Slot number optimization in axial flux motors. Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences, 28(4), 2146–2156.
- [14] Aydin, M., et al. (2021). Stator slot/pole number effects on torque ripple in BLDC motors. Electrical Engineering, 103(4), 2207–2216.

-
- [15] Wang, L., et al. (2022). Noise and vibration analysis in BLDC motors with various slot/pole combinations. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 172, 108956.
- [16] Sezer, O., & Karabiber, A. (2020). Slot shape and skewing effects in BLDC motors. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 23(6), 1305–1313.
- [17] Evirgen, S., & Acar, T. (2021). Performance evaluation of different slot/pole configurations in BLDC motors. *International Journal of Energy Research*, 45(12), 17256–17268.
- [18] Gul, I., et al. (2023). Multi-objective optimization of BLDC motor design using finite element method. *IEEE Access*, 11, 129003–129014.
- [19] Kaya, E., & Demir, A. (2022). Parametric study on torque characteristics of BLDC motors. *Elektronika ir Elektrotechnika*, 28(5), 35–42.
- [20] Ozdemir, M., et al. (2021). Comparative analysis of magnet materials in PM motors. *Acta Physica Polonica A*, 139(4), 520–525.
- [21] Hendershot, J. R. (2010). *Design of brushless permanent-magnet machines*. Venice, Florida :Motor Design Books.
- [22] Hanselman, Duane C. (2003). *Brushless permanent magnet motor design*. Cranston, R.I. :The Writers' Collective.
- [23] Mohanraj, D. et al. (2022). A Review of BLDC Motor: State of Art, Advanced Control Techniques, and Applications. in *IEEE Access*, vol. 10, pp. 54833-54869.
- [24] Gürdal, O. (2001). *Elektrik Makinaları Tasarımı*, Atlas Yayın.
- [25] G.Tatar, (2017), *Hafif elektrikli araçlar için akıllı FSDAM sürücü ve kontrolör tasarımı*, Yüksek Lisans tezi, Marmara Üniversitesi Fen bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [26] Tosun, Ö., Oyman Serteller, N.F. (2019). Fırçasız Doğru Akım Motoru Stator Oluk Geometrisinin Ve Sargı Yapısının Sey İle Analizi, ISMSIT 2019, Ankara, Türkiye, 105-111.
- [27] Miller, T.J.E. (1989). *Brushless Permanent-Magnet and Reluctance Motor Drives*, Claredon Press, Oxford University Press.
- [28] Soyaslan, M. (2023). External Rotor BLDC Motor Design for a Light Electric Vehicle: 24 Slot/22 Pole Combination. in *2023 18th Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems, ELMA 2023 - Proceedings*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.
- [29] Toren, M. (2022). Comparative analysis of the magnet effects on the permanent magnet BLDC motor performance used in electric vehicles. *Electrical Engineering*, 104(5), 3411–3423.
- [30] Patel, A.N. (2023). Slot opening displacement technique for cogging torque reduction of axial flux brushless DC motor for electric two-wheeler application. *Electrical Engineering and Electromechanics*, 2023(2), 7–13.
- [31] Kıyak, İ., & Kaya, K. Y. (2020). Elektrikli Taşıtlarda Kullanılan İndüksiyon/Sabit Mıknatıslı Motor Sürücülerinin Simülasyonu ve Motor Dinamiklerinin Analizi. *International Journal of Advances in Engineering and Pure Sciences*, 32(2), 152-157.
- [32] Kumar, A. et al. (2020). Analysis of Permanent Magnet BLDC Motor Design with Different Slot Type. 1-6.
- [33] Sundaram, J., Raj, K., Stephen, J.E. et al., (2025) Advanced reduction of torque ripple in BLDC motors using polynomial reference stator current generation. *Int J Adv Manuf Technol*.

Evaluation of biomaterial containing alginate and egg-shell membrane incorporated with β -tricalcium phosphate for treatment of bone defects

Semra UNAL^{1,2} 

¹ Genetic and Metabolic Diseases Research and Investigation Center, Marmara University, Istanbul, Turkey

² Institute of Neurological Sciences, Marmara University, Istanbul, Turkey

Abstract

The freeze-drying procedure was used to create the scaffold that was meant to cure bone deformities. Fourier transform infrared (FTIR) spectroscopy, X-ray diffraction analysis, swelling and degradation ratio, and scanning electron microscopy (SEM) tests were used to characterize the scaffolds. Osteoblast cells were used in an in vitro cytotoxicity test to evaluate the scaffolds' biocompatibility. The results of the characterization revealed an interconnected porous structure and significant ionic connections between the alginate, egg-shell membrane, and β -tricalcium phosphate (β -TCP). The scaffolds are regarded as nontoxic because the cell viability was more than 80%. When all the findings are evaluated, β -TCP with alginate/egg-shell membrane can be regarded as appropriate for bone treatment applications.

Keywords: alginate, egg shell membrane, beta-tricalcium phosphate, tissue engineering

1. INTRODUCTION

Biomaterials utilized in tissue engineering that emulate the physicochemical features of the native extracellular matrix (ECM) have been demonstrated to support cellular adhesion, proliferation, migration, and new tissue formation. The structure of natural bone is a complex composite, consisting of hydroxyapatite (HA) crystals organized within an organic matrix primarily composed of type I collagen (Col) [1]. According to the current state-of-the-art, it is compatible with the combination of different materials, inorganic and organic, as well as the immediate incorporation of cells to accelerate the bone regeneration process [2]. The three-dimensional (3D) composite systems developed in recent studies aim to replicate the structural and biochemical characteristics of bone ECM—comprising a mineral phase mainly of calcium phosphate, typically in the form of HA, and a fibrous organic matrix rich in type I collagen [3]. To achieve this, the researchers combine ceramics with advanced mechanical properties such as hydroxyapatite, tricalcium phosphate (TCP) and glass ceramics with highly bioactive and biocompatible polymers such as collagen, alginate, chitosan and gelatin to create matrices that support bone tissue formation. [4]. Eggshell membrane (ESM), being a rich source of collagen, glycosaminoglycans, chondroitin sulfate, and hyaluronic acid, is considered a promising candidate for biomedical applications in tissue engineering [5–7]. These components closely resemble those found in bone's natural collagenous matrix, positioning ESM as a suitable structural base for scaffold fabrication. Eggshell, one of the approximately 5 million tons of high-value biological resources produced annually in industry and households, is ignored and generally discarded as waste [8]. It is important to consider the cost-effectiveness of a biomaterial that can reduce the economic burden of high-priced biomedical materials. ESM can therefore be considered as a cost-reducing natural material alternative. Sodium alginate, a hydrophilic, biocompatible polysaccharide extracted from brown algae, is well-known for its gel-forming ability and high viscosity in aqueous environments [2]. Composite biomaterials combining alginate with inorganic fillers have been effectively employed to mimic the microenvironment of bone [9]. In this context, incorporating β -tricalcium phosphate into alginate/ESM-based biopolymers may further enhance their regenerative capacity in treating bone defects. Furthermore, innovations in fabrication techniques could improve the performance of such scaffolds in bone tissue engineering applications. Thus, a hybrid scaffold composed of alginate, β -TCP, and ESM is anticipated to offer an effective platform for *in vitro* osteoblast culture. The objective of this study is to synthesize and characterize scaffolds composed of alginate, egg shell membrane, and β -TCP for tissue engineering applications. To the best of our knowledge, this

novel ternary system has not been previously explored for cell proliferation. In this study, swelling and degradation properties and assessment of cell proliferation activity of cells on designed material have been carried out.

II. MATERIALS AND METHODS

2.1. Fabrication of ALG/ESM/TCP scaffolds

Fresh eggs separated from yolk and albumen were obtained from a local restaurant and then rinsed with sterile distilled water followed by disinfected with ethanol. The eggshells were kept in 2% (v/v) acetic acid solution for 1 hour and the ESM were carefully peeled off from eggshells with forceps. Following this, the ECM was subjected to freeze-drying until completely dried. Different types of ALG/ESM/TCP were prepared by 100 mL of ALG (5 wt.%) aqueous solution with various amounts of β -TCP (0, 1, 2.5 wt.%) in the presence of ESM (100 mg). Freeze drying method was used in the production of ALG/ESM/TCP scaffolds. The prepared ALG/ESM/TCP solutions were poured into 24-well plates and treated with 5% CaCl_2 solution overnight. Post-crosslinking, the constructs were extensively washed with double-distilled water to remove residual calcium ions and then freeze-dried at -50°C for 24 hours. The similar procedure was used to prepare the control ALG/ESM scaffold.

2.2. Characterization of ALG/ESM/TCP scaffolds

Chemical analyses of crosslinking of ALG/ESM and ALG/ESM/TCP scaffolds was verified via the Fourier transform infrared (FTIR) spectrometer (model 4600 Jasco, Japan). The analysis was performed within the wavelength range $400\text{--}4000\text{ cm}^{-1}$. All spectra were baseline-corrected and calibrated to ambient atmospheric conditions. The morphology of the control ALG/ESM and ALG/ESM/TCP scaffolds was analyzed by the Scanning Electron Microscopy (SEM, EVO MA-10, Zeiss, Germany) after sputter-coating with gold at an accelerating voltage of 10 kV. The crystalline structures of the nanocomposites was analyzed by X-ray diffraction (XRD, Shimadzu-6100, Japan) using $\text{Cu K}\alpha$ radiation ($\lambda = 1.54060\text{ \AA}$). The scan range was changed from 10° to 40° , and the scan speed was altered to 2° min^{-1} .

2.3. Swelling studies

ALG/ESM and ALG/ESM/TCP scaffolds were allowed to swell in phosphate buffered saline (PBS; pH 7.4) at 37°C to determine their swelling behavior. At the beginning of each experiment, the dried scaffolds were weighed accurately to determine W_d . The swollen samples were removed from PBS at predetermined intervals over a period of 120 hours, excess surface

liquid was removed with filter paper and reweighed to determine the swollen weight (W_w). PBS was replaced by fresh PBS each time. Triplicate measurements were taken for each data point. Swelling ratio was calculated using the formula (1).

$$\text{Swelling degree} = [(W_w - W_d)/W_d] \times 100 \quad (1)$$

2.4. In vitro degradation analysis

Scaffold degradation profiles were monitored over 4 weeks in PBS at 37°C . Samples with known initial weight (W_i) were incubated in 10 mL PBS and retrieved at set intervals. Each specimen was washed with distilled water, freeze-dried, and reweighed to obtain the final weight (W_f). Weight loss percentage was determined using the formula (2):

$$\text{Weight loss(\%)} = [(W_i - W_f)/W_i] \times 100 \quad (2)$$

2.5. In vitro biocompatibility analysis

Biocompatibility analysis of the samples was assessed using the 3-(4,5-dimethylthiazol-2-yl)-2,5-diphenyl tetrazolium bromide (MTT) assay on human osteoblast cells (ATCC hFOB 1.19 CRL-3602TM). Cells were cultured in DMEM medium enriched with 10% fetal bovine serum and 1% penicillin/streptomycin. Disc-shaped scaffolds (16 mm diameter) were sterilized using UV light for 2 hours before being seeded with 1×10^5 cells per well in 24-well plates. Control groups included cells cultured on standard tissue culture plastic (2D). After incubation periods of 1, 4, and 7 days, the culture medium was removed, and wells were rinsed with PBS (pH 7.4). MTT solution (0.5 mg/mL) was added to each well and incubated at 37°C for 4 hours. The resulting formazan crystals were dissolved in 1 mL of dimethyl sulfoxide (DMSO), and absorbance was measured at 590 nm using a microplate reader.

III. RESULTS AND DISCUSSION

The initial mixing of β -tricalcium phosphate (β -TCP) with alginate solution under ambient conditions led to a partial scaffold formation, observed visually as a weak hydrogel. This early-stage network formation is likely initiated by ionic interactions between the divalent calcium ions (Ca^{2+}) on the surface of β -TCP particles and the carboxylate groups of alginate [10]. To enhance scaffold integrity, CaCl_2 solution was added, promoting a complete ion-exchange where Ca^{2+} replaced Na^+ ions in the alginate matrix, resulting in a fully crosslinked structure. The final composite scaffolds were obtained by freeze-drying the crosslinked gels at -50°C for 24 hours.

Fourier-transform infrared (FTIR) spectroscopy revealed characteristic peaks confirming the presence of scaffold components. ALG-ESM, ALG-ESM-TCP1 and ALG-ESM-TCP2.5 samples were freeze-dried. FTIR spectra of freeze-dried ALG-ESM, ALG-ESM-TCP1 and ALG-ESM-TCP2.5 samples are shown in Fig. 1. Most of the peaks in the sample spectrum appeared to come from its components. The sharp peaks at 551 cm^{-1} and 605 cm^{-1} were attributed to phosphate group (PO_4^{3-}) in β -TCP [10]. ESM has a high density of functional groups, such as amines, amides, and carboxylic acids, and strong chemical stability. Covalent cross-links are created between the carboxyl groups on the alginate chains and the amine groups on the ESM particles. Furthermore, a peak at 1411 cm^{-1} and 1601 cm^{-1} for related stretching vibrations of COO^- indicates the presence of carboxylate groups on alginate in the scaffold samples, showing that functional groups were well maintained [2]. The C-O stretching vibrations are represented by the absorption peak at 1156 cm^{-1} [11]. O-H and N-H stretching bonds are represented by the large peak at about 3320 cm^{-1} [11,12]. In addition, the typical ESM bonds are observed in the same spectrum as well.

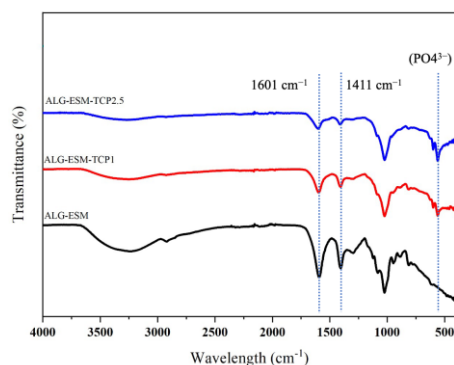


Figure 1: FTIR spectra of ALG-ESM, ALG-ESM-TCP1 and ALG-ESM-TCP2.5 scaffolds.

In Figure 2, the patterns seen at 2θ values of 25.8° (1010) and 32.5° (0210) validated the crystalline structure of the β -TCP sample. All of the scaffold samples' reflection patterns showed up at the same 2θ angles as the β -TCP sample, confirming that the scaffold materials successfully integrated β -TCP. The composite spectrums are observed to be amorphous in nature due to high concentration of sodium alginate–egg shell membrane matrix with crystalline β -TCP.

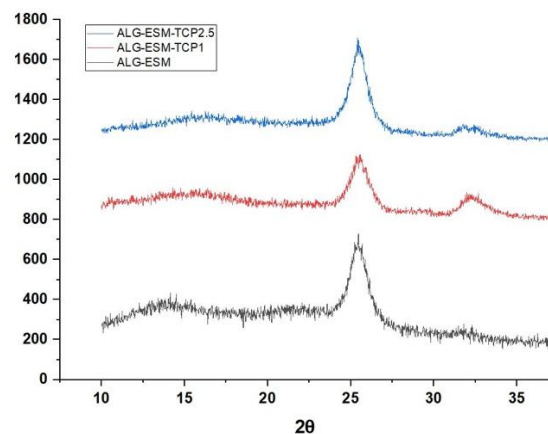


Figure 2: X-ray diffraction (XRD) patterns of ALG-ESM, ALG-ESM-TCP1 and ALG-ESM-TCP2.5 scaffolds.

The cross-sectional surface morphology of freeze-dried ALG-ESM, ALG-ESM-TCP1, and ALG-ESM-TCP2.5 samples was examined using SEM, as shown in Fig. 3. In ALG-ESM-TCP1 and ALG-ESM-TCP2.5 scaffolds, β -TCP is easily seen. While the ESM fiber structure was clearly seen in ALG-ESM, ALG-ESM-TCP1 scaffolds, it was observed that β -TCP particles were integrated into the fibers and covered the surface in ALG-ESM-TCP2.5 scaffold. As can be seen in Figure 5, samples formed complete pore structures and exhibit interconnection pores. Among the samples, the ALG-ESM-TCP2.5 scaffold exhibited the most pronounced porous structure, with more evenly distributed large, prominent pores and thicker pore walls, indicating a stronger overall structure. These features were more clearly visible at 200X magnification. Furthermore, at 1000X magnification, crystalline β -TCP was observed in both scaffold systems, confirming the successful incorporation of β -TCP into the scaffolds. The porous structure plays a crucial role in biomedical applications for cellular adhesion, intercellular communication, and oxygen and nutrient transfer. Composite scaffolds with uniform pore architectures are preferred over those with non-uniform pores in biomedical applications. Although tissue growth on scaffolds with irregular pore sizes may lead to poor biomechanical qualities, cell attachment can occur on heterogeneous scaffolds [10].

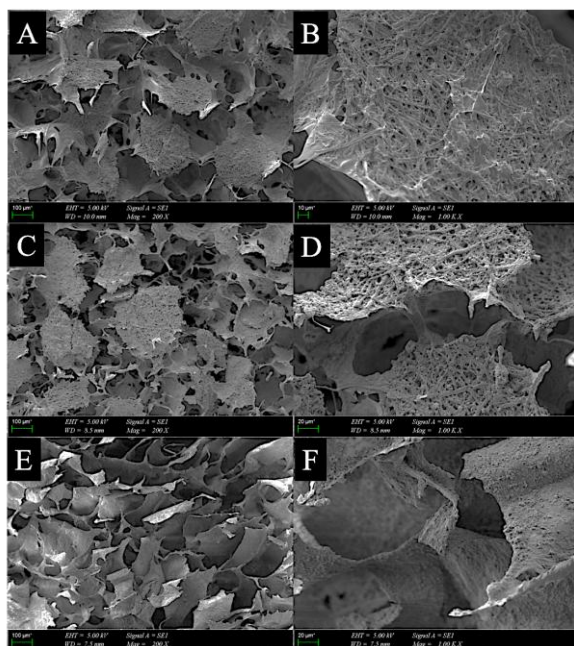


Figure 3: SEM images of ALG-ESM (A, B), ALG-ESM-TCP1 (C, D) and ALG-ESM-TCP2.5 (E, F) scaffold.

The equilibrium swelling behavior of different ALG-ESM scaffold samples was analyzed and the results are presented in Fig. 4. The samples were weighed at various time points—1, 6, 12, 24, 48, 72, 96, and 120 hours—after being immersed in PBS solution at 37°C. All samples began to swell after 1 hour of incubation. The results showed that the degree of swelling was generally higher in samples with greater ALG-ESM-TCP1 content throughout most time points. The highest swelling degrees were observed at 72 hours, with the ALG-ESM, ALG-ESM-TCP1, and ALG-ESM-TCP2.5 samples reaching swelling values of $218.05 \pm 17.01\%$, $283.61 \pm 19.96\%$, and $255.52 \pm 12.96\%$, respectively. Between 72 and 120 hours, the swelling rate slowed and became more stable.

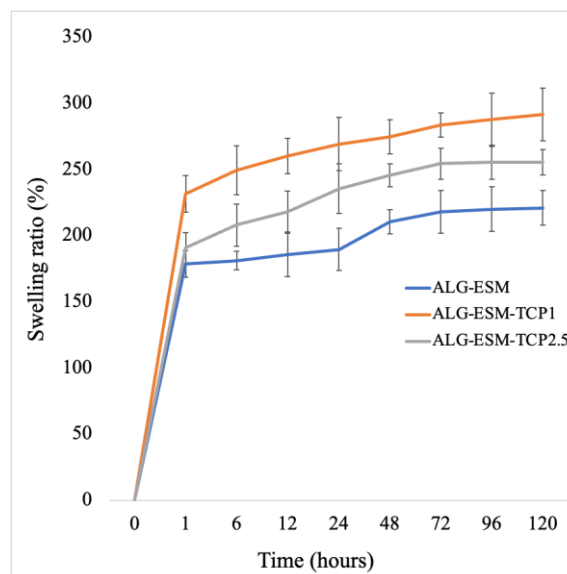


Figure 4: Swelling ratio of ALG-ESM, ALG-ESM-TCP1 and ALG-ESM-TCP2.5 scaffolds according to incubation time.

The degradation kinetics for all scaffold samples were monitored for 4 weeks under simulated physiological conditions at 37 °C and the calculated weight retention percentages are shown in Fig. 5. From the start of the experiment to day 7, the ALG-ESM, ALG-ESM-TCP1, and ALG-ESM-TCP2.5 samples degraded by $70.37 \pm 6.52\%$, $70.16 \pm 7.71\%$, and $52.59 \pm 8.24\%$, respectively. During weeks 1 to 3, the degradation rates slowed, with all samples retaining up to 30% of their original mass. After week 3, the degradation ratio increased and ALG-ESM, ALG-ESM-TCP1 and ALG-ESM-TCP2.5 were calculated the degradation ratio $84.93 \pm 8.59\%$, $89.07 \pm 2.38\%$ and $89.63 \pm 2.79\%$, respectively. After 4 weeks of incubation, the form of all scaffold samples degraded entirely.

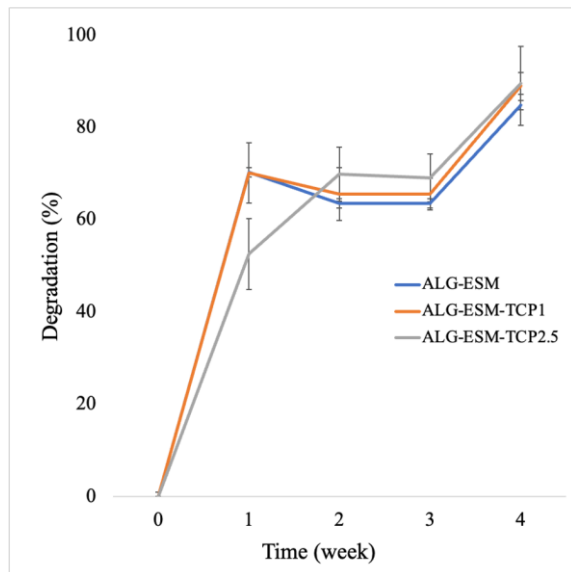


Figure 5. Degradation ratio of ALG-ESM, ALG-ESM-TCP1 and ALG-ESM-TCP2.5 scaffolds according to incubation time.

While the scaffolds used in this study exhibited a relatively rapid degradation profile, which may be advantageous for short-term applications in bone regeneration, their degradation rate was found to be faster than the typical healing time required for bone defects, which may extend up to 6 months. The complete degradation of the scaffolds within 4 weeks raises concerns about their ability to provide sufficient support during the crucial initial stages of bone healing. Several strategies could be employed to extend the degradation time of these scaffolds, including increasing the crosslinking density, incorporating biodegradable polymers with slower degradation rates, and modifying the scaffold's structural properties.

The MTT assay was employed to assess the cytotoxicity of ALG-ESM scaffold samples on human osteoblast cells, with comparison to the control (2D). In the control group, cells were cultured in the culture medium, while in the experimental group, cells were cultured on the scaffold samples. The cell viability rates of the scaffold samples, compared to the control, are shown in Fig. 6. All samples exhibited cell viability exceeding 80% for both β -TCP concentrations in the hydrogels, indicating that they are non-cytotoxic and biocompatible. In all samples, the viability of human osteoblast cells increased with β -TCP concentration at day 1 incubation with $87.3 \pm 1.09\%$, $93.7 \pm 1.72\%$ and $95.4 \pm 1.35\%$ in ALG-ESM, ALG-ESM-TCP1 and ALG-ESM-TCP2.5, respectively. On day 4 and day 7 of cell incubation, ALG-ESM-TCP1 showed cell viability above 100%, which is competitive with the control group. *In vitro* biological response of β -TCP-

based scaffolds was studied using osteoblast [13] and fibroblast cells [14,15] to analyze the biocompatibility of materials for orthopedic applications. Algul et al. [14] noticed that the alginate and chitosan layer with the highest β -TCP concentration (70 wt%) among the samples led to higher cell viability, highlighting the properties of calcium phosphates to facilitate cellular adhesion and promote cellular proliferation. At 7 day of cell incubation in the study, β -TCP content increased the percentage of cell viability. In addition to higher cell viability, they emphasized the ability of calcium phosphates to facilitate cellular adhesion and promote cellular proliferation.

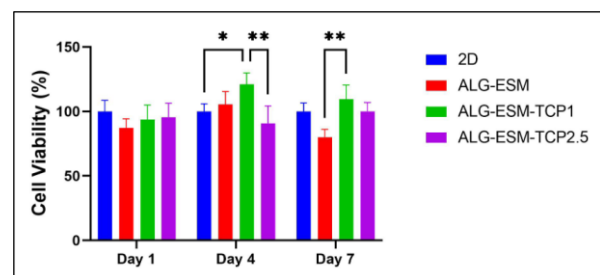


Figure 6: Viability of human osteoblast cells on the ALG-ESM, ALG-ESM-TCP1 and ALG-ESM-TCP2.5 scaffolds after 1, 4, and 7 days of incubation period.

Statistical analysis were done in comparison to the two-dimensional (2D) monolayer culture by one-way ANOVA (* $p < 0.05$, ** $p < 0.01$) Turkey-Kramer Multiple Comparisons Test.

IV. CONCLUSION

In this study, scaffolds based on ALG-ESM, ALG-ESM-TCP1, and ALG-ESM-TCP2.5 were prepared using a freeze-drying method. The formation of Schiff's base linkages was confirmed by FTIR analysis, which also demonstrated the successful integration of β -TCP into the scaffold. The concentration of β -TCP influenced the scaffold formation, characteristics, and *in vitro* cytocompatibility. Overall, the scaffolds were porous, biodegradable, biocompatible, and non-cytotoxic. Among the samples, the ALG-ESM-TCP1 scaffold exhibited the most favorable results, including rapid gelation time, an interconnected porous structure with the highest porosity, acceptable swelling capacity, and excellent *in vitro* cytocompatibility. These findings highlight its potential for supporting, repairing, and regenerating non-displaced or non-load-bearing bone injuries. In order to overcome some limitations of our investigation, the degradation rate could be better aligned with the healing process, ensuring that the scaffold provides sustained support while promoting successful bone regeneration. Future study will aim to explore these approaches to improve the performance and applicability of the scaffolds for long-term bone tissue engineering applications.

REFERENCES

- [1] Cakmak, A.M., Unal, S., Sahin, A., Oktar, F.N., Sengor, M., Ekren, N., Gunduz, O., & Kalaskar, D.M. (2020). 3D printed polycaprolactone/gelatin/bacterial cellulose/hydroxyapatite composite scaffold for bone tissue engineering. *Polymers (Basel)*, 12, 1–14. doi:10.3390/polym12091962.
- [2] Silva-Barroso, A.S., Cabral, C.S.D., Ferreira, P., Moreira, A.F., & Correia, I.J. (2023). Lignin-enriched tricalcium phosphate/sodium alginate 3D scaffolds for application in bone tissue regeneration. *International Journal of Biological Macromolecules*, 239. doi:10.1016/j.ijbiomac.2023.124258.
- [3] Lin, X., Patil, S., Gao, Y.G., & Qian, A. (2020). The Bone Extracellular Matrix in Bone Formation and Regeneration. *Frontiers in Pharmacology*, 11, 1–15. doi:10.3389/fphar.2020.00757.
- [4] Garimella, A., Ghosh, S.B., & Bandyopadhyay-Ghosh, S. (2024). Biomaterials for bone tissue engineering: achievements to date and future directions. *Biomedical Materials*, 20. doi:10.1088/1748-605X/ad967c.
- [5] Jia, J., Duan, Y.Y., Yu, J., & Lu, J.W. (2008). Preparation and immobilization of soluble eggshell membrane protein on the electrospun nanofibers to enhance cell adhesion and growth. *Journal of Biomedical Materials Research - Part A*, 86, 364–373. doi:10.1002/jbm.a.31606.
- [6] Farjah, G.H., Mohammadzadeh, S., & Javanmard, M.Z. (2020). The effect of lycopene in egg shell membrane guidance channel on sciatic nerve regeneration in rats. *Iranian Journal of Basic Medical Sciences*, 23, 527–533. doi:10.22038/ijbms.2020.40228.9525.
- [7] Adali, T., Kalkan, R., & Karimizarandi, L. (2019). The chondrocyte cell proliferation of a chitosan/silk fibroin/egg shell membrane hydrogels. *International Journal of Biological Macromolecules*, 124, 541–547. doi:10.1016/j.ijbiomac.2018.11.226.
- [8] Li, X., Cai, Z., Ahn, D.U., & Huang, X. (2019). Development of an antibacterial nanobiomaterial for wound-care based on the absorption of AgNPs on the eggshell membrane. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 183, 110449. doi:10.1016/j.colsurfb.2019.110449.
- [9] Ocando, C., Dinescu, S., Samoila, I., Ghitulica, C.D., Cucuruz, A., Costache, M., & Averous, L. (2021). Fabrication and properties of alginate-hydroxyapatite biocomposites as efficient biomaterials for bone regeneration. *European Polymer Journal*, 151, 110444. doi:10.1016/j.eurpolymj.2021.110444.
- [10] Afriani, F., Dahlan, K., Nikmatin, S., & Zuas, O. (2015). Alginate Affecting The Characteristics Of Porous Beta-Tcp/Alginate Composite Scaffolds. *Journal of Optoelectronics and Biomedical Materials*. <https://publons.com/publon/31759775/>.
- [11] Liang, L., Hou, T., Ouyang, Q., Xie, L., Zhong, S., Li, P., Li, S., & Li, C. (2020). Antimicrobial sodium alginate dressing immobilized with polydopamine-silver composite nanospheres. *Composites Part B: Engineering*, 188, 107877. doi:10.1016/j.compositesb.2020.107877.
- [12] Mohammadzadeh, L., Rahbarghazi, R., Salehi, R., & Mahkam, M. (2019). A novel egg-shell membrane based hybrid nanofibrous scaffold for cutaneous tissue engineering. *Journal of Biological Engineering*, 13, 1–15. doi:10.1186/s13036-019-0208-x.
- [13] Guler, E., Baripoglu, Y.E., Alenezi, H., Arikan, A., Babazade, R., Unal, S., Duruksu, G., Alfares, F.S., Yazir, Y., Oktar, F.N., Gunduz, O., Edirisinghe, M., & Cam, M.E. (2021). Vitamin D3/vitamin K2/magnesium-loaded polylactic acid/tricalcium phosphate/polycaprolactone composite nanofibers demonstrated osteoinductive effect by increasing Runx2 via Wnt/B-catenin pathway. *International Journal of Biological Macromolecules*. doi:10.1016/j.ijbiomac.2021.08.196.
- [14] Algul, D., Sipahi, H., Aydin, A., Kelleci, F., Ozdatli, S., & Yener, F.G. (2015). Biocompatibility of biomimetic multilayered alginate-chitosan/ β -TCP scaffold for osteochondral tissue. *International Journal of Biological Macromolecules*, 79, 363–369. doi:10.1016/j.ijbiomac.2015.05.005.
- [15] Ghaffari, R., Salimi-Kenari, H., Fahimipour, F., Rabiee, S.M., Adeli, H., & Dashtimoghdam, E. (2020). Fabrication and characterization of dextran/nanocrystalline β -tricalcium phosphate nanocomposite hydrogel scaffolds. *International Journal of Biological Macromolecules*, 148, 434–448. doi:10.1016/j.ijbiomac.2020.01.112.

Bioactive Hydrofiber Dressings with Quince (*Cydonia oblonga*) Seed Mucilage for Cutaneous Tissue Repair

Merve ERGİNER^{1,2} 

¹ Istanbul University-Cerrahpaşa Institute of Nanotechnology and Biotechnology, Department of Biotechnology, 34500, Istanbul, Türkiye

² Health Biotechnology Joint Research and Application Center of Excellence, 34220, Esenler, Istanbul, Türkiye

Öz

Cilt, vücudumuzun en dışında bulunan ve en geniş yüzey alanına sahip organ olduğu için, bu dokuda meydana gelen herhangi bir bozulma veya hasar insan yaşamını önemli ölçüde etkileyebilmektedir. Bu tür yaralanmalar genellikle hastaneye yatış, ağrı, travma, yara izi riski ve enfeksiyonlarla sonuçlanabilmekte ve bu nedenle acil tedavi gerektirmektedir. Hidrofiber sistemler ve yara örtüleri, cilt yenilenmesini destekleyen, enfeksiyonları önleyen ve daha az ağrıyla hızlı iyileşmeyi teşvik eden yenilikçi yaklaşımlar olarak kapsamlı şekilde araştırılmaktadır. Biyolojik olarak aktif bileşenler, biyolojik ve hücresel yolları düzenlemede önemli rol oynamakta ve yara iyileşmesi ile cilt yenilenmesi stratejilerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Doğal polimerler, biyolojik kökenleri, doğal biyoaktif özellikleri ve büyüme faktörlerini taklit etme yetenekleri nedeniyle yara iyileştirme uygulamaları için umut verici adaylar olarak değerlendirilmektedir. Doğa, biyopolimerler açısından zengin bir kaynak olup, bitki özleri tarih boyunca tedavi amaçlı kullanılmıştır. Ayva olarak bilinen *Cydonia oblonga*, yara iyileşmesini ve cilt hastalıklarının tedavisini destekleyen çeşitli biyolojik aktiviteleri ile tanınmaktadır. Bu çalışmada, ticari olarak temin edilen bir hidrofiber yara örtüsünün, ayva çekirdeği mülajı (QSM) ile zenginleştirilmiş halinin biyolojik aktivitesi incelenmiştir. QSM ile zenginleştirilen örneklerin, kontrol ve yalnızca hidrofiber ile karşılaştırıldığında İnsan Keratinosit Hücre Hatlarında (HaCaT) hücre canlılığı ve çoğalmasında artırdığı gösterilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Yara iyileşmesi, Doğal Polimerler, Hidrofiber, Ayva Çekirdeği Mülajı

Abstract

Since the skin is the outermost organ with the largest surface area, any disruption to this tissue can significantly affect human life. Such injuries often lead to hospitalization, pain, trauma, risk of scarring, and infections, and therefore require immediate treatment. Hydrofiber systems and wound dressings are extensively investigated and represent innovative fields that support skin regeneration, prevent infections, and promote rapid recovery with reduced pain. Biologically active ingredients play a crucial role in modulating biological and cellular pathways and are widely applied in wound healing and skin regeneration strategies. Natural polymers, due to their biological origin, inherent bioactivity, and their ability to mimic naturally occurring growth factors, are considered promising candidates for wound healing applications. Nature serves as a rich source of biopolymers, and plant extracts have been used since time immemorial for therapeutic purposes. *Cydonia oblonga*, commonly known as quince, is recognized for its diverse bioactivities that support wound healing and the treatment of skin ailments. In this study, a commercially available hydrofiber dressing enriched with quince seed mucilage (QSM) was evaluated. The QSM enrichment demonstrated improved cellular viability in Human Keratinocyte Cell Lines (HaCaT) when compared to control and hydrofibers.

Keywords: Wound Healing, Natural Polymers, Hydrofiber, Quince Seed Mucilage

I. INTRODUCTION

The skin has evolved to protect the body from pathogens, toxins and other potential damage from the external environment and has neural, perceptual, cosmetic and regulatory effects. It maintains the body's moisture and electrolyte balance. It has the ability to "self-renew", resulting in the formation of a new layer of skin every two to three weeks. It consists of 3 layers called epidermis, dermis and hypodermis. The epidermis consists of squamous epithelium, melanocytes (which contain pigment), Langerhans cells, Merkel cells (which sense pressure), and

keratinocytes, which act as a protective layer. The epidermis consists of 5 sub-layers (stratum corneum, stratum spinosum, stratum lucidum, stratum granulosum and stratum corneum) and interacts with textiles, pathogens, toxins, cosmetics and many other surfaces and prevents skin dehydration. The dermis is responsible for the mechanical properties of the skin and is composed of fibroblasts, fibronectin, ECM, proteoglycans, elastin, collagen, blood vessels, lymphatic system and nervous network and is separated from the epidermis by a basal layer. Collagen and elastin are structural proteins that support tissues, bind cells together, and are responsible for the shape and function of the body. The hypodermis is a layer of fatty tissue beneath the epidermis that separates the dermis from the muscle layer [1-4].

Although the skin is defined as the largest and outermost organ and it is exposed to many damaging factors, any wounds or damage to this layer adversely affect the quality of life and it is vitally important to heal these wounds promptly with minimal scarring and scar tissue formation. Acute injuries and traumas (cut, surgery, accident), burns (physical, chemical), ulcers, infections are known to affect the function of tissues, cells, and organs and effect host life and well-being several. The number of health problems related to chronic wounds is increasing rapidly due to the growth of the aging population worldwide. In particular, the money spent on healing chronic wounds threatens not only our country but also the whole world by causing direct and indirect economic losses.) [5,6]. Wound can be classified into three main titles by rank (tidy, untidy), type (clean, lacerating, hematoma, bruising and abrasion) and thickness (epidermal loss only, superficial, deep, and full). Wounds only epidermal loss is known to heal with basic dressings and expected full re-epithelization with minimal scar tissue formation is observed in 5-7 days in epidermal loss and superficial wounds which have partial thickness where epidermis and some papillary dermises are lost and heal 2-4 weeks. Epidermis, papillary dermis and deep into reticular dermis wounds are named as superficial wounds and heal approx. 3-5 weeks with scar formation. Deep and Full thickness wounds require months to heal with no complete tissue regeneration and scar formation where epidermis, dermis and subdermal tissues are damaged [5-8].

Wound healing is a response of body to injury and tissue disruption and known to consist of four main stages namely, hemostasis, inflammation, proliferation, and remodeling. Keratinocytes response to violation and start hemostasis followed by vasoconstriction and clotting. Secretion of growth factors, proinflammatory

cytokines. In the second step, inflammation, is known to start with fibroblast related growth secretion and neutrophil reaction to wound area where monocyte cell transformation to macrophages and result in inflammatory response and angiogenesis. Proliferation stage is named also granulation tissue formation, and several growth factors (VEGF, FGF) start proliferation stage where endothelial cell reproduction and angiogenesis occur together with production of ECM components to support skin. Final stage, remodeling, is the replacement of type III collagen by Type I collagen and degraded in control to correct tissue form [5,6,9,10].

Healing skin wounds fast without any mark on skin surface after trauma, diabetes related conditions or surgery is important because of not only aesthetic reasons but also reducing hospitalization, scarring, pain and life threatening infection problems. Providing microenvironment for cells, non-toxic, antimicrobial, antiallergic, anti- scar tissue former and non-sticky wound dressings are required for skin wound healing while maintaining moisture and hydration of wounded area is known to enhance the quality of the newly formed tissue Keratinocyte proliferation and migration to wounded area is an important process for tissue regeneration and intra and extracellular interactions play role in it. After acute cutaneous injuries cells close to wound bed and start to migrate through wound area and this process play vital role in wound closure. Epidermal cellular migration is known to be much more dynamic and higher than leukocyte migration [11-12]. Tissue engineering and regenerative medicine seek alternative ways to repair injured or dysfunctional tissues in the human body in the light of biology, materials science, medicine, engineering and mechanics. Tissue engineering has become increasingly important over the past three decades [11,13]. This field seeks to develop biocompatible tissue constructs that contact existing cells or tissues to regenerate damaged tissue and provide a three-dimensional matrix at the implanted site, as well as support cell-cell signaling, growth factor production, extracellular matrix (ECM), cell proliferation and differentiation. Natural or synthetic-based scaffolds such as hydrogels, micro/nanofibrous scaffolds, porous matrices, fibers, sponges, and foams are increasingly being used to provide a natural-like ECM environment and support cell growth, proliferation, and differentiation to replace damaged tissue function [14]. Various strategies have been developed to produce scaffolds that can be cellular/cell-free, synthetic, biosynthetic or natural and support the regions where they are placed. Nanofibers, sponges, 3D printed

scaffolds, foams, cryogels, decellularized matrices are widely used in tissue engineering applications [5].

The biological activities of cells and tissues can be regulated by biochemical factors such as hormones and growth factors, and thanks to the concept of "Materiobiology", it is known that the biophysical properties of the designed scaffold have significant effects on the biological response. This concept takes into account the properties of biomaterials that affect the biological response and functionality, and attempts to improve the biological behavior of these materials with a multidisciplinary approach. Cell proliferation, differentiation, migration, and other functions are influenced by pore size, mechanical properties such as Young's modulus (stiffness), elasticity, topography (2D), geometry (3D), chemical and temporal properties such as degradation rate, and biocompatibility of scaffolds [15,16].

Nano- and microfibers produced by solution blowing or electrospinning have been widely applied in biomedical fields such as wound dressing, tissue engineering, immobilized enzymes and artificial blood vessels. Biodegradable polymers such as polylactic acid (PLA) have been converted into PLA nanofibers and applied to drug delivery, bone remodeling, and tissue engineering. The use of existing nanofiber products in the market is still limited due to the lack of sufficient research on the effectiveness of wound treatment, easy availability, and high cost to the patient and the national economy. Therefore, in the treatment of chronic wounds that are difficult to heal, the emergence of qualified health products because of scientific research and development of wound care products that will support healing, which can be an alternative to ordinary dressing materials that are commercially sold and currently used, will make a serious contribution to reducing costs in the field of health expenditure of our country [17,18].

Natural and synthetic polymers are used widely to correct, restore or maintain skin tissue dysfunction. Synthetic polymers are non-biological components with the advantage of stability and controlled production, but they can sometimes be bioinert or lack bioactivity. It is desirable that these polymers do not cause toxic effects when broken down into their components in the living body. Because of their low cost and availability, they are often preferred in tissue engineering applications. Synthetic polymers such as polyvinyl pyrrolidone (PVP), polyvinyl alcohol (PVA), polyethylene glycol (PEG), and polyethylene oxide (PEO) are examples of synthetic materials often preferred in tissue engineering applications. Synthetic

polymers are often used in combination with biopolymers to design combined scaffolds that take advantage of the matrix strength of synthetic materials and the bioactivity of natural polymers [5]. Natural polymers are frequently used in stem cell culture and regenerative medicine applications because they are compatible with the human body. Different types of polysaccharides such as β -glucans, dextran, cellulose (neutral), alginic acid, hyaluronic acid (acidic), chitin, chitosan (basic), heparin, chondroitin, dermatan sulfate and keratan sulfate are frequently preferred in tissue engineering applications [19-21]. Microbial and plant-based polysaccharides are superior to animal-oriented ones with extraction easiness, low risk of contamination and ethical concerns.

Quince namely, *Cydonia oblonga* Miller belongs to Rosaceae family and various components used for medicinal effects like sedative, antipyretic, anti-diarrheal. This leafy tree usually grows in the Middle East, South Africa and Central Europe. Quince is known to be rich in bioactive materials such as tannins, carotenoids, flavonoids, phenolic acids, total polyphenol, vitamins (retinol, thiamine, riboflavin, ascorbic acid), minerals (potassium, sodium, calcium, iron, magnesium) [22-24]. Seeds are known to include polyphenols (C-glucosyl flavones, lucenin-2, vicenin-2, stellarin-2, isoschaftosyde, schaftosyde, 6-C-pentosyl-8-C-Glucosyl chrysoeriol and 6 6-C-glucosyl-8-C-pentosyl chrysoeriol, and kaempferol-3-Orutinoside), fat soluble compounds (tocopherols, phytosterols and phenolic acids), and organic acids (citric, ascorbic, malic, quinic, shikimic, fumaric acids, ursolic acid, tormentic acid, and β -daucosterol) [24-26]. Quince seed mucilage consist of water-soluble polysaccharides and cellulose and acidic hydrolysis (reverse reaction of esterification) is form the sugar presence in quince seeds (D-xylose, 4-Omethyl glucose, and D-glucose) [27]. Quince seed mucilage is reported to have complete healing when applied to wound area of rabbit full thickness model for 13 days reported by Tamri et al., [28]. Wounds infected with *Staphylococcus aureus* is reported to be healed by quince seed extracts [29]. Antifungal activity of quince seed mucilage nano hydrogel decorated with essential oils against *C. albicans* and *M. furfur* reported [30]. QSM is known to have high medicinal properties but cannot be applied to exudative wounds directly due to its high-water content and non-absorption of infection of open wounds [31]. Thus, here in this study quince mucilage (QSM) is combined with hydrofiber wound dressings to observe cell proliferating abilities of mucilage to improve bioactivity of hydrofiber and enlighten their bioactivities to be used in skin tissue

engineering and wound dressing applications when combined with fiber/matrix systems.

II. MATERIALS and METHODS

2.1. Preparation of Quince Seed Mucilage

Quince fruits (*Cydonia oblonga*) are purchased from a local market in city of Istanbul (early fall). Quince seed mucilage (QSM) is prepared after removing seeds from pulp, washed with ethanol and 5 grams of seeds are mixed with 10 mL of dH₂O for 24 hours. Seeds are filtered and mucilage is precipitated with ethanol washed, centrifuged and freeze-dried for further usage [27,32].

2.2. Preparation of QSM- Wound Dressings

Aquacell hydrofiber wound dressings (Convatec) is fortified with QSM. Briefly wound dressings coated with QSM mucilage with different concentrations prepared in PBS (4mg/ml, 2 mg/ml and 1 mg/ml) via dropwise on to precut surfaces (0.5x 0.5 cm) in 400 µl for each concentration and freeze dried and further used for cellular proliferation and attachment studies.

2.3. Characterization of QSM-Wound Dressings

The structural integrity of the wound dressing, QSM and QSM fortified dressings were analyzed using Fourier Transform Infrared Spectroscopy via Thermo Fisher Scientific NICOLET 6700 FTIR spectrometer (Waltham, MA, USA) over a range of 400–4000 cm⁻¹ and attenuated total reflectance (ATR) capability operating in 600–4000 cm⁻¹.

2.4. *In-vitro* Cytotoxicity and Cellular Adhesion Evaluation of the Hydrofibers

2.4.1. Assessment of cytotoxicity

In-vitro cytotoxicity evaluation of the wound dressings fortified with QSM were determined using method of in-direct toxicity assessment according to ISO-10993-5: Biological evaluation of biomedical devices-*in-vitro* cytotoxicity test [33]. Human epidermal keratinocyte cell line (HaCaT) used for *in-vitro* cytotoxicity and adhesion studies. HaCaT cells cultured in 3Dulbecco's Modified Eagle Medium (DMEM (Biosera/France) fortified with 10% FBS (Biosera/France) and 1% penicillin-streptomycin (Pan Biotech/Germany) and cells were maintained at 37 °C in a 5% CO₂, 95% humidity environment. Cell viability is analyzed via MTT, a tetrazolium salt, metabolized by live cell mitochondria to form insoluble purple formazan to inspect cellular viability through optical density [34]. Cells seeded to 96 well cell culture plates at the density of 1X 10⁴ cells/well and incubated for attachment overnight. Hydrofiber wound dressing itself, and

fortified with "QSM (4mg/ml, 2mg/ml and 1 mg/ml) containing samples were extracted according to ISO-10993-12 [35] extraction protocol after UV sterilization for 1 hour both sides and submerged in DMEM (Dulbecco's Modified Eagle Medium) at 37 °C in a 5% CO₂, 95% humidity environment for 24 hours and used as 100% extract and diluted with DMEM (Dulbecco's Modified Eagle Medium) and applied on to cells and cells incubated in DMEM only used as control (0%) and cells incubated with those extracts for 72 hours. After incubation period media in wells replaced by 110 µL MTT reagent prepared in PBS and mixed with DMEM and incubated for 4 h incubation, after which 100 µL of DMSO added on to wells to dissolve formazan crystals and absorbance was measured at 570 nm with a 630 nm reference.

2.4.2. Investigation of cellular adhesion on hydrofibers

Investigation of cellular adhesion on hydrofibers (both QSM fortified and commercial) examined through visualization of cellular attachment via fluorescence microscopy DM:4000B with a DFC7000T camera (Leica, Germany) and SEM investigations (Thermo Fisher Quattro S). Cells at the density of 5X10⁵ cell/well seeded onto presterilized and media saturated hydrofibers and incubated for 72 hours. After incubation period media removed and hydrofibers washed with PBS and fixed with 2.5% glutaraldehyde in PBS for 20 minutes. Hydrofibers examined with Fluorescence microscopy is dyed with DAPI (Sigma-Aldrich) to mark nuclei of the cells for 30 minutes in dark and washed with PBS and further dehydrated via washes with increasing ethanol concentrations (70%, 80% 90% and 100%). Samples used in SEM investigation is washed with PBS and dehydrated as described for fluoresce microscopy investigation samples.

2.5. Statistical Analysis

The experiments were performed at least in triplicate, and Statistical significance between the experimental groups for cell culture experiments was assessed using a one-way ANOVA followed by Kruskal Wallis multiple comparison test. A p-value below 0.05 was considered as statistically significant.

III. RESULTS and DISCUSSION

3.1. Characterization

FTIR analyses of hydrofiber, QSM enriched hydrofibers (1, 2 and 4 mg/ml) and QSM were performed by measuring absorbance values in the frequency range of 400–4000 cm⁻¹. Results shared in figure 1.

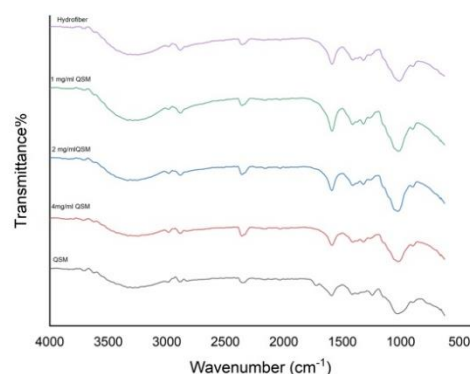


Figure 1. FTIR image of hydrofiber, QSM and QSM enriched hydrofibers (1 mg/ml, 2 mg/ml, 4 mg/ml)

Figure 1 Shows the FTIR spectra of QSM, hydrofiber and QSM absorbed hydrofibers with different concentrations (1mg/ml, 2 mg/ml and 4 mg/ml). QSM is known to contain large fraction of hemicelluloses that consist of charged uronic acids. At the 3323 cm^{-1} , which corresponds to stretching of -OH groups of QSM while the band observed between 1633 and 1784 cm^{-1} is symmetric COOH and asymmetric C=O vibrations. Peaks around $1518\text{-}1530\text{ cm}^{-1}$ could be resonance of COOH functional groups in COO^- ions. Peaks around 610 , 1283 , 1200 , 1620 and 1730 cm^{-1} ascribed to the C-(O)-O stretching and $\beta\text{-D-glycosidic}$ linkages of uronic acid in the polysaccharide structures in Mucilages previously mentioned by researchers while QSM is known to contain large fraction of hemicelluloses that consist of charged uronic acids [36-38].

3.2. *In-vitro* Cytotoxicity and Cellular Adhesion Evaluation of the Hydrofibers

3.2.1. Assessment of cytotoxicity

Viability of QSM fortified hydrofibers and commercially available hydrofiber is incubated with keratinocytes for 72 hours and results shared in figure 2.

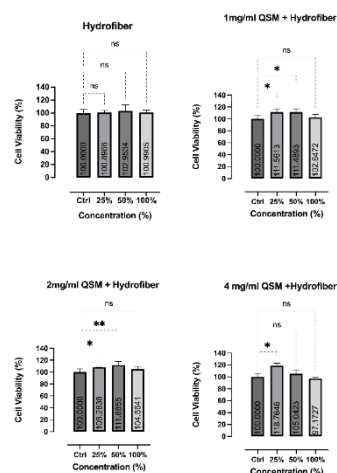


Figure 2. Cell Viability results of HaCaT cell line after being cultivated with hydrofiber and QSM fortified hydrofibers against control (ctrl) for 72h. (A P value below 0.05 considered as statistically significant).

Commercially available hydrofiber showed control similar biocompatibility. Enrichment of QSM increased cellular viability for 1mg/ml at the end of 72 hours for the doses of 25%, 50% and 100% as; 111.561%, 111.489%, 102.642% while control was 100%. Addition of 2 mg/ml QSM increased cellular viability to 108.283%, 111.885%, 104.664% for the doses of 25%, 50% and 100% after 72 hours. Viability recorded for 4 mg/ml QSM addition as 118.764%, 105.042%, 97.172 for 25%, 50% and 100% extracts. All QSM enriched hydrofibers showed greater viability than control and commercial hydrofiber resulting in addition of QSM improved cellular proliferation with the highest viability observed at 4 mg/ml enrichment extraction dose of 25%.

3.2.2. Investigation of cellular adhesion on hydrofibers

Cellular adhesion on the hydrofibers were visualized via fluorescent labelling of nuclei in cells with DAPI and analyzed with fluorescent microscopy and SEM. Results are shared below (Figure 3 and Figure 4).

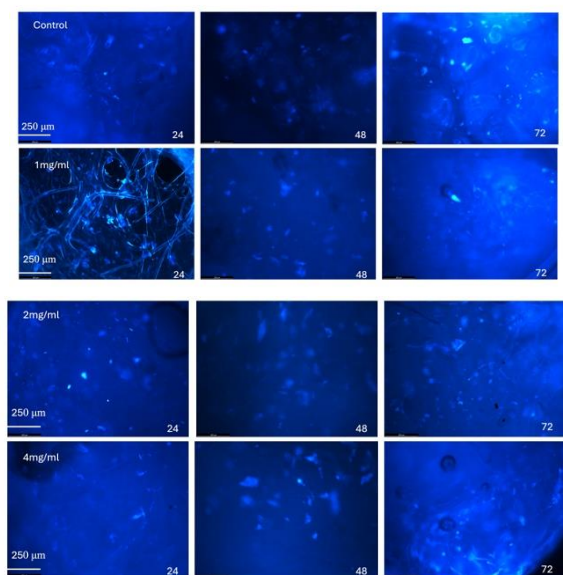


Figure 3 Fluorescent microscopy images of hydrofibers after being cultivated with HaCaT cells for 72 hours (A: Hydrofiber, B: Hydrofiber with 1mg/ml QSM, C: Hydrofiber with 2 mg /ml QSM, F: Hydrofiber with 4 mg /ml QSM)

Cellular adhesion on hydrofibers were examined via fluorescent microscope marked via DAPI are shared in figure 3. Although cells observed inside the fibers due to swollen behavior and cellular adhesion inside the fibers clear images are struggled to be captured.

Cellular adhesion on to hydrofibers are further examined via SEM (Figure 4). Figure 4 A porous and fiber aligned surface structure of hydrofiber. Porous structure observed in figure 4B after being enriched with QSM prior to cell seed. Cells observed on surface figure 4C, D, E and F and enrichment of QSM showed dense cellular attachment on surface with the increase of QSM amount (Figure 4 D, E, F). Cell proliferation and cellular adhesion results evaluated together it can be concluded that QSM enrichment increased cellular viability and attachment on surface of the hydrofibers.

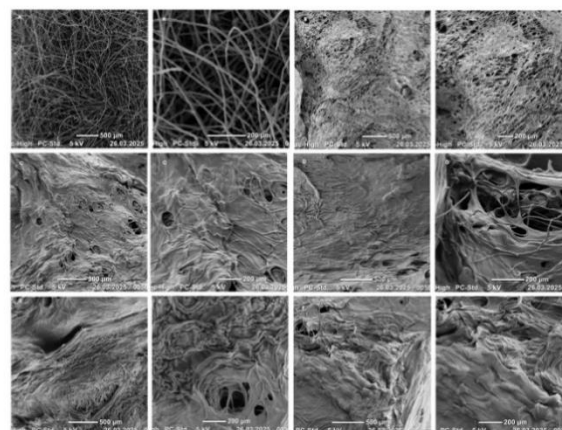


Figure 4: SEM images of hydrofibers after being cultivated with HaCaT cells for 72 hours. (A: hydrofiber without cells, B: Hydrofiber with 4mg/ml QSM without cells, C: Hydrofiber with cells, D: Hydrofiber with 1mg/ml QSM with cells, E: Hydrofiber with 2 mg /ml QSM with cells, F: Hydrofiber with 4 mg /ml QSM with cells).

QSM containing (5%, 10% and 20%) in Eucerin base creams were applied to Iranian male rabbit full thickness model and increased wound contraction between QSM 10 and 20% and high hydroxyproline and growth factors in wound fluid is observed [28]. Aghmiuni et al. [31] examines QSM- based smart/stimuli-responsive PCL/Chitosan//PEG hybrid scaffolds on human adipocyte stem cells (h-ASCs), fibroblasts and keratinocytes and improved cellular adhesion, growth and wound healing and keratinocyte differentiation is observed. Crosslinked QSM porous scaffolds tested on human adipose-derived mesenchymal stem cells and improved cellular adhesion and migration observed [39]. In another study QSM applied to 45 primiparous women for 14 days and improved wound healing and reduced pain recorded [40]. A silicon-integrated QSM 3D cryogel is tested for osteobiologic capacity via human adipose derived mesenchymal stem cells (hAMSCs) and osteogenic differentiation is demonstrated via upregulation of osteogenesis related genes [41]. Hyaluronic acid/QSM injectable hydrogels synthesized for release of dissolved curcumin and hydrogels are proposed to be used in intra-articular drug delivery applications [42]. QSM is applied to mesenchymal stem cells isolated from newborn foreskin (hnFSSCs) and investigated for proliferative activities and dose of 100 µg/mL for 24 h concluded to be the best concentration for cell proliferative activity when compared to control group. Higher immunoreactivity for Ki-67, c-Myc, OCT3/4 QSM H-score: 266.5±12.6), OCT3/4 (H-score: 239±8), and Sall4 (H-score: 243.8±7.5) [43]. Ex situ modification of QSM and bacterial cellulose (BC) are

designed as biocompatible scaffold for fibroblast proliferation and highlighted its great potential to be used as wound dressings in clinical applications with high swelling and good cell proliferation abilities [44]. Presence of positive result in literature for QSM when applied to wounded zones supported with current study data with improved epidermal keratinocyte proliferations.

IV. CONCLUSION

When literature and present data evaluated together it can be concluded that enrichment of QSM could be used to improve bioactivity of the scaffold with its cell proliferative, pain reducer, skin regenerating, wound healing abilities. Thus, QSM can be proposed as a strong candidate to be used together with PLA like biodegradable polymers to design wound dressings via electrospinning or solution blowing like technologies and further studies are in need for mechanical, antimicrobial, wettability and biological activities both in histological and molecular level of QSM enriched fiber systems to support wound healing *in-vivo* and *in-vitro* are in need.

ACKNOWLEDGEMENT

I would like to thank my son Artun for his invaluable presence and admirable patience in the lab—an impressive feat for a 5-year-old companion.

REFERENCES

- [1] Bailey, A.J. (2001). Molecular mechanisms of ageing in connective tissues. *Mechanisms of Ageing and Development*, 122), 735-755.
- [2] Vig, K., Chaudhari, A., Tripathi, S., Dixit, S., Sahu, R., Pillai, S., Dennis, V.A. & Singh, S.R. (2017). Advances in skin regeneration using tissue engineering. *International Journal of Molecular Sciences*, 18(4), 789-
- [3] Wong, D.J. & Chang, H.Y.(2009) Skin tissue engineering. StemBook. Girard L. (Ed). Harvard Stem Cell Institute, Cambridge (MA).
- [4] Yildirimer, L., Thanh, N.T. & Seifalian, A.M. (2012). Skin regeneration scaffolds: a multimodal bottom-up approach. *Trends in Biotechnology*, 30, 638-648.
- [5] Selvi, S. S., Hasköylü, M. E., & Öner, E.T. (2022). Skin Tissue Engineering: Past, Present, and Perspectives. In *Tissue Engineering* (First edition, pp. 159-202). *Apple Academic Press*, United States.
- [6] Erginer, M., Gökalsin, B., Tornaci, S., Sesal, C., & Öner, E. T. (2023). Exploring the potential of Halomonas levan and its derivatives as active ingredients in cosmeceutical and skin regenerating formulations. *International Journal of Biological Macromolecules*, 240, 124418.
- [7] Adigbli, G., Alshomer, F., Maksimcuka, J., & Ghali, S. (2016). Principles of plastic surgery, wound healing, skin grafts and flaps. Textbook of plastic and reconstructive surgery, 1, 3-37.
- [8] Madaghiele, M., Demitri, C., Sannino, A., & Ambrosio, L. (2014). Polymeric hydrogels for burn wound care: Advanced skin wound dressings and regenerative templates. *Burns & trauma*, 2(4), 2321-3868.
- [9] Barrientos, S., Brem, H., Stojadinovic, O., & Tomic-Canic, M. (2014). Clinical application of growth factors and cytokines in wound healing. *Wound repair and regeneration*, 22(5), 569-578.
- [10] Barrientos, S., Stojadinovic, O., Golinko, M. S., Brem, H., & Tomic-Canic, M. (2008). Growth factors and cytokines in wound healing. *Wound repair and regeneration*, 16(5), 585-601.
- [11] Zhang, M. Z., Dong, X. H., Guan, E. L., Si, L. B., Zhuge, R. Q., Zhao, P. X. & Wang, X. (2017). A comparison of apoptosis levels in keloid tissue, physiological scars and normal skin. *American journal of translational research*, 9(12), 5548.
- [12] Castano, O., Pérez-Amodio, S., Navarro-Requena, C., Mateos-Timoneda, M. Á., & Engel, E. (2018). Instructive microenvironments in skin wound healing: Biomaterials as signal releasing platforms. *Advanced drug delivery reviews*, 129, 95-117
- [13] Rahmani Del Bakhshayesh, A., Annabi, N., Khalilov, R., Akbarzadeh, A., Samiei, M., Alizadeh, E., ... & Montaseri, A. (2018). Recent advances on biomedical applications of scaffolds in wound healing and dermal tissue engineering. *Artificial cells, nanomedicine, and biotechnology*, 46(4), 691-705.
- [14] Iqbal, N., Khan, A. S., Asif, A., Yar, M., Haycock, J. W., & Rehman, I. U. (2019). Recent concepts in biodegradable polymers for tissue engineering paradigms: A critical review. *International Materials Reviews*, 64(2), 91-126.
- [15] Tchobanian, A., Van Oosterwyck, H., & Fardim, P. (2019). Polysaccharides for tissue engineering: Current landscape and future prospects. *Carbohydrate polymers*, 205, 601-625.

- [16] Gao, C., Zhang, L., Wang, J., Jin, M., Tang, Q., Chen, Z., ... & Zhao, G. (2021). Electrospun nanofibers promote wound healing: Theories, techniques, and perspectives. *Journal of Materials Chemistry B*, 9(14), 3106-3130
- [17] Parthasarathy, V., Babu, M. D., Kumar, P. S., Arivazhagan, T., Sundaresan, B., & Chandrasekar, M. (2025). Advanced PLA biocomposites for tissue engineering and drug delivery applications. In *Natural Fiber-Reinforced PLA Composites* (pp. 251-269). Woodhead Publishing
- [18] Zhou, R., Ma, Y., Yang, M., Cheng, Y., Ma, X., Li, B., ... & Li, C. (2025). Wound dressings using electrospun nanofibers: mechanisms, applications, and future directions. *European Polymer Journal*, 113900.
- [19] Bedian, L., Villalba-Rodríguez, A. M., Hernández-Vargas, G., Parra-Saldivar, R. & Iqbal, H. M. (2017). Bio-based materials with novel characteristics for tissue engineering applications—A review. *Interntional Journal of Biological Macromolecules*, 98, 837-846
- [20] Bhardwaj, N., Chouhan, D. & Mandal, B. B. (2018) *Functional 3D Tissue Engineering Scaffolds* (Deng & Kuiper Ed), 3D functional scaffolds for skin tissue engineering Woodhead Publishing: Cambridge, United Kingdom.
- [21] Mogoşanu, G. D. & Grumezescu, A. M. (2014). Natural and synthetic polymers for wounds and burns dressing. *International Journal of Pharmaceutics*, 463, 127-136.
- [22] Najman, K., Adrian, S., Sadowska, A., Świąder, K., Hallmann, E., Buczak, K., ... & Sztark, A. (2023). Changes in physicochemical and bioactive properties of quince (*Cydonia oblonga* Mill.) and its products. *Molecules*, 28(7), 306.
- [23] Hanan, E., Sharma, V. & Ahmad, F. (2020). Nutritional Composition, Phytochemistry and Medicinal Use of Quince (*Cydonia oblonga* Miller) with Emphasis on its Processed and Fortified Food Products. *Journal of Food Processing & Technology*, 11, 1–13.
- [24] Silva, B.M., Casal, S., Andrade, P.B., Seabra, R.M., Oliveira, M.B. & Ferreira, M.A. (2004) Free amino acid composition of quince (*Cydonia oblonga* Miller) fruit (pulp and peel) and jam. *Joujrnal of Agricultural and Food Chemistry*, 52, 1201–1206.
- [25] Hegedűs, A., Papp, N., & Stefanovits-Bányai, É. (2013). Review of nutritional value and putative health-effects of quince (*Cydonia oblonga* Mill.) fruit. *International Journal of Horticultural Science*, 19(3-4), 29-32.
- [26] Ghopur, H., Usmanova, S. K., Ayupbek, A., & Aisa, H. A. (2012). A new chromone from seeds of *Cydonia oblonga*. *Chemistry of Natural Compounds*, 48, 562-564.
- [27] Ermiş, I. S., Deveci, E., & Aşır, F. (2023). Effects of Quince Gel and Hesperidin Mixture on Experimental Endometriosis. *Molecules*, 28(16), 5945.
- [28] Tamri, P., Hemmati, A., & Boroujerdnia, M. G. (2014). Wound healing properties of quince seed mucilage: In vivo evaluation in rabbit full-thickness wound model. *International Journal of Surgery*, 12(8), 843-847.
- [29] Alizadeh, H., Rahnema, M., Semnani, S. N., & Hajizadeh, N. (2013). Detection of compounds and antibacterial effect of quince (*Cydonia oblonga* Miller) extracts in vitro and in vivo. *Journal of Biologically Active Products from Nature*, 3(5-6), 303-309.
- [30] Mirzaei, M., Yaeghoobi, M., Afzali, M., Amirkhalili, N., Mahmoodi, M., & Sajirani, E. B. (2021). Antifungal activities of quince seed mucilage hydrogel decorated with essential oils of *Nigella sativa*, *Citrus sinensis* and *Cinnamon verum*. *Iranian journal of microbiology*, 13(3), 352
- [31] Aghmiuni, A. I., Keshel, S. H., Sefat, F., & Khiyavi, A. A. (2020). Quince seed mucilage-based scaffold as a smart biological substrate to mimic mechanobiological behavior of skin and promote fibroblasts proliferation and h-ASCs differentiation into keratinocytes. *International journal of biological macromolecules*, 142, 668-679.
- [32] Ali, A. B., Ahmed, T. A., Saydaxmetova, S., Mayani, S. V., Ballal, S., Gupta, H., ... & Islam, S. (2025). Quince Seed Mucilage mediated biosynthesis of silver nanoparticles as a novel nanocatalyst for O-acetylation of alcohols. *Journal of Organometallic Chemistry*, 123683.
- [33] ISO 10993-5:2009, Biological evaluation of biomedical devices-chapter 5: *in-vitro* cytotoxicity tests.
- [34] Tornaci, S., Erginer, M., Bulut, U., Sener, B., Persilioglu, E., Kalaycilar, İ. B., ... & Barlas, F. B. (2024). Innovative fluorescent polymers in niosomal carriers: a novel approach to enhancing cancer therapy and imaging. *Macromolecular Bioscience*, 2400343
- [35] ISO10993-12:2021, Biological evaluation of biomedical devices-chapter 12: sample preparation and reference materials.

- [36] Yousuf, S., & Maktedar, S. S. (2023). Utilization of quince (*Cydonia oblonga*) seeds for production of mucilage: functional, thermal and rheological characterization. *Sustainable Food Technology*, 1(1), 107-115.
- [37] Fatima, Z., Fatima, S., Muhammad, G., Hussain, M. A., Raza, M. A., Amin, M., & Majeed, A. (2024). Stimuli-responsive glucuronoxylan polysaccharide from quince seeds for biomedical, food packaging, and environmental applications. *International Journal of Biological Macromolecules*, 133016
- [38] Hosseinzadeh, H., & Mohammadi, S. (2015). Quince seed mucilage magnetic nanocomposites as novel bioadsorbents for efficient removal of cationic dyes from aqueous solutions. *Carbohydrate polymers*, 134, 213-221.
- [39] Şimşek, E., Karaca, B., & Arslan, Y. E. (2020). Bioengineered three-dimensional physical constructs from quince seed mucilage for human adipose-derived mesenchymal stem cells. *Journal of Bioactive and Compatible Polymers*, 35(3), 240-
- [40] Sharifipour, F., Salari, N., Jamshidi, N., Javanbakht, Z., Azizi, F., & Faal Siahkal, S. (2025). The effect of quince seed mucilage on perineal pain and healing following episiotomy: A randomised, triple-blind, placebo-controlled study. *Wound Repair and Regeneration*, 33(2), e70012
- [41] Yilmaz, H. D., Cengiz, U., Arslan, Y. E., Kiran, F., & Ceylan, A. (2021). From a plant secretion to the promising bone grafts: Cryogels of silicon-integrated quince seed mucilage by microwave-assisted sol-gel reaction. *Journal of bioscience and bioengineering*, 131(4), 420-433
- [42] Kolay, S., Apohan, N. K., Babuç, E., & Gün, G. (2025). Investigation of Curcumin- β -Cyclodextrin Complex Release in Injectable Hyaluronic Acid/Quince Seed Gum Hydrogel. *American Association of Pharmaceutical Scientists*, 26(4), 99.
- [43] Mammadov, B., Mammadov, E., Becer, E., & Vatansever, H. S. (2024). The Effect of Quince Seed Mucilage on Human Foreskin Stem Cell Proliferation and Self-Renewal Potential. *Cyprus Journal of Medical Sciences*, 9(6):444-449

Green Supplier Selection in Food Industry: Fuzzy AHP Based Hybrid GRA and Axiomatic Design Approach

Ecmel Şeza ARDALI¹, Tijen ÖVER ÖZÇELİK², Yasin KIRELLİ³

¹Sakarya University, Faculty of Engineering, Industrial Engineering Department, Sakarya, Türkiye

²Düzce University, Faculty of Engineering, Industrial Engineering Department, Düzce, Türkiye

³Kütahya Dumlupınar University, Tavşanlı Faculty of Applied Sciences, Management Information Systems, Kütahya, Türkiye

Abstract

Today, most consumers are more conscious and sensitive about environmental sensitivity. The development of technology and the increasing awareness of people have led businesses to produce products in line with the “green” preferences of consumers in order to sustain their existence. In this context, selecting the most suitable supplier has gained importance. The concept of a green supply chain covers all activities from raw material procurement to production, logistics to marketing, and recycling to re-inclusion in the production cycle throughout the life cycle of products. Green supply chain management applies to all sectors, positively impacting businesses and the environment. One of these sectors is the food sector. Food is an essential consumption need that increases with the rising population. This study addresses the problem of green supplier selection for an integrated meat plant in the red meat sector in Sakarya. In this multi-criteria decision-making (MCDM) problem, two different methods, Gray Relational Analysis (GRA) and Axiomatic Design (AD), have been applied separately for supplier selection. In the problem, both the needs and demands of the consumer and the expectations of the producer have been evaluated, and the most appropriate criteria for the sector have been created by considering expert opinions because of literature research. However, since the importance level of each of these criteria is different, the Fuzzy Analytic Hierarchy Process (FAHP) method has been used to calculate the criteria weights. As a result of the study, the best green supplier ranking has been created for the company after determining which criterion is more critical and evaluating both methods. According to the results obtained in BAHP, the most essential criterion is “quality,” which is 0.27. The results evaluated in terms of green criteria show that the most suitable supplier is the S2 supplier in both hybrid applications and the S4 supplier in the last place. As a result of the research, it has been observed that the supplier companies are susceptible to their green policies, but some areas need to be improved.

Keywords: Green supply chain, Fuzzy analytic hierarchy process, Gray relational analysis, Axiomatic design

I. INTRODUCTION

In today's world, with increasing environmental awareness, individuals and societies have become more sensitive to environmental sustainability. This increased sensitivity has directly affected consumers' product selection and consumption habits and forced companies to be more selective in their production and supply processes. Competition among firms has become incredibly intense, making adopting environment-friendly policies necessary. This situation requires companies to develop environmentally sensitive strategies to sustain their existence. Sustainable supply chain practices in developed and developing countries are significant for environmentally responsible companies. In accordance with global trends, the concept of “sustainability” has also become increasingly crucial in Türkiye. According to research, consumers are affected by the sustainability approach of brands and are inclined towards more sustainable brands by customizing their consumption habits accordingly. Consumer behavior in recent years reveals that many consumers (85%) have adopted sustainable shopping habits, and 60% consider sustainability as an essential criterion in their purchasing decisions [1]. Companies' efforts to increase customer satisfaction and performance are not limited to their processes. It is also directly related to the performance of the suppliers they cooperate with.

The rising environmental awareness and global pressures on sustainability require companies to consider their environmental responsibilities while evaluating their suppliers [2]. Therefore, a supplier's environmentally sensitive production and service processes increase the chance of preference.

Companies prioritize environmental sustainability criteria in supplier selection and can fulfill their ecological responsibilities and achieve competitive advantages by creating a green brand identity in the sight of customers. This leads to an increase in customer loyalty in the long term and positively affects the company's overall performance. Thus, each link of the supply chain contributes to the company's sustainability goals, helping to create a more holistic and sustainable business model [3,4].

This study makes a unique contribution to the literature by examining the issue of green supplier selection, which is usually addressed through durable and long shelf-life products, in the context of sensitive products like red meat, which has a high risk of spoilage. In this context, the study aims to contribute theoretically to literature by integrating industry-specific elements like food safety and cold chain sustainability into green supplier selection criteria. This study also examines the process of determining the most suitable suppliers among seven suppliers of a company in the food sector in line with customer demands and sustainability policies. In the second part, literature research on green supplier selection is presented. The third section describes the methods used. The fourth section presents the results.

II. LITERATURE REVIEW

The use of multi-criteria decision-making (MCDM) methods in the supplier selection process is an instrument that facilitates the correct and sustainable supplier selection of enterprises. In supplier selection, different multi-criteria decision-making methods such as AHP, TOPSIS, PROMETHEE, SWARA, WASPAS, ANP, VIKOR, and ELECTRE have come to prominence in the literature and have been found to provide successful results in complex supplier selection processes [5]. In supplier selection problems, MCDM methods have seen many applications in several sectors.

Supçiller and Çapraz (2011) have evaluated AHP and TOPSIS methods with criteria such as cost, quality, and delivery; Çakın and Özdemir (2013) have used ANP and ELECTRE methods in the automotive industry, while Alakaş et al. (2019) has used AHP, TOPSIS and VIKOR methods in the health sector. Ergül (2018) evaluated FAHP, GIA, and MOORA methods in the food sector, while Demirci (2020) focused on the AT technique in logistics supplier selection. Adalı and Işık (2017) have conducted supplier selection by applying SWARA and WASPAS methods in the textile industry

[6–9]. Opricovic, in the study aimed at determining the consequences of choosing the right supplier for firms, found that the compliance of suppliers to the business improves trust and loyalty to them [10]. Kılınç has emphasized that in the past years, factors such as quality and cost have been the priorities in traditional supplier selection problems. Still, today, in addition to these factors, all kinds of studies, including environmental activities, have gained importance in sustainable supplier selection [11].

Legal regulations and the increasing environmental sensitivity of customers have encouraged businesses to reorganize their supply chain activities to minimize adverse environmental impacts. Green supplier selection is essential for green supply chain management in this context. In Yin et al.'s study, supplier selection for a construction company in China has been analyzed, and the main criteria including sustainable business potential, green operations, green technology, and sub-criteria regarding environmentally friendly materials, green logistics, green manufacturing, green R&D innovation, green certification have been used [13]. Batur and Özyörük discussed the importance of infant food in human health and made a green supplier selection for an infant formula manufacturer using the AD method [14]. Ardalı analyzed the green supplier selection problem for a company in the automotive industry by using the FAD method weighted with FAHP and used green design, green logistics, green production, green purchasing and green reverse logistics criteria [15]. Soyer and Türkay used the ANP method in the green supplier selection model developed in the home appliance industry and identified five main criteria for the model: green competencies, environmental effectiveness, organizational factors, costs and green image [16].

Human health is adversely affected by several reasons, including environmental pollution, deterioration of the ecological system, and climate change. Societies, states, and producers take specific measures to ensure this balance. In the food industry, it is highly recommended to adopt processes that meet consumer demands in the production, processing, and consumption stages and, at the same time, do not cause harm to the natural balance [17].

Recent studies have highlighted that businesses have an increasing tendency to work with environmentally friendly suppliers and that this selection plays a critical role in sustainable supply chain management. The studies conducted in sustainable supplier selection in diverse fields are analyzed, and selected methods and criteria in the literature are given in Table 1.

Table 1. Methods and criteria from literature

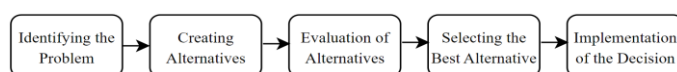
Author	Year	Industry	Criteria	Methodology
[18]	2015	Automotive	Price, Quality, Technology, Resource Consumption, Pollution Generation, Management Commitment	Analytic Network Process (ANP) Gray Relational Analysis (GRA)
[19]	2022	Health Care	Green Production, Green Packaging Green Design, Green Distribution Green Procurement, Green Storage Reverse Logistics	AHP, TOPSIS
[20]	2017	Nutrition	Financial Stability, Environmental Management Systems, Waste Disposal Program, Management Commitment, Quality Control Systems, Manufacturing, Plant, Reverse Logistics	Quality Function Deployment (QFD) Complex Proportional Assessment (COPRAS) Multi-objective Optimization Based on Ratio Analysis (MOORA)
[21]	2015	Plastic	Quality, Price, Delivery Capability Service, Environmental Management Corporate Social Responsibility Pollution Control, Green Product Green Image, Green Innovation Hazardous Material Management	Fuzzy Axiomatic Design (FAD)
[15]	2020	Automotive	Green Design, Green Logistics, Green Logistics, Green Manufacturing, Green Procurement, Green Reverse Logistics	Fuzzy Analytic Hierarchy Process (FAHP) Axiomatic Design (AD)

It has been observed that different methods have been applied in literature on the subject, and it has been determined that fuzzy methods, which have become prominent in recent years, are preferred and produce more accurate results. Consequently, two different hybrid methods (WFGRA and WFAD) have been proposed by using fuzzy logic and multi-criteria decision-making techniques together in the solution process of the problem. This study aims to provide a new perspective to the literature by examining the issue of red meat supply, which has a high risk of spoilage during supply in the food sector, which has not been sufficiently addressed before. The paper is a systematic

study that evaluates supplier selection criteria that prioritize environmental sustainability for companies in the food sector.

III. MATERIALS AND METHODS

In many areas of life, there are situations where a correct decision is needed. The decision-making process, an important step, consists of the steps in Figure 1. It is recommended to implement this process in a planned and effective manner for a correct decision.

**Figure 1.** Decision Making Process

One of the decision analysis techniques is MCDM methods. As a field of operations research, it is one of the preferred decision analysis methods. These methods are analytical methods designed to be used with quantitative and/or qualitative criteria to identify the best alternatives. In this study, for a red meat

retailing company that needs to make a sustainable supplier selection, seven supplier alternatives have been evaluated using WFGRA and WFAD methods through five criteria determined by experienced experts. The steps followed in the study are as shown in Figure 2.

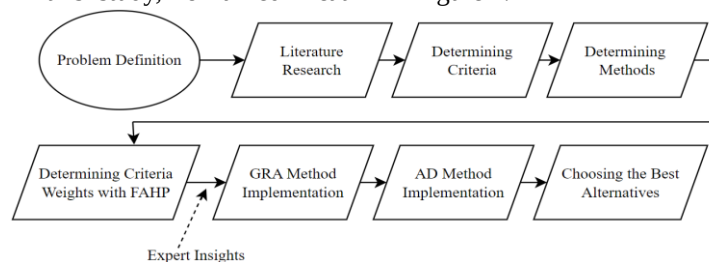


Figure 2. Application Model Flow Chart

In this study, the green supplier selection problem for an integrated meat plant operating in Sakarya is considered. There are five different criteria and seven suppliers in the problem. The criteria have been determined by prioritizing the suitable criteria for the food sector according to the literature studies and by taking the opinions of the experts in the company. The criteria in the problem are listed as follows. Among these criteria, quality (C1), green image (C2), use of environmentally friendly technology (C3) and waste management (C4) are verbal criteria and have been evaluated by the experts in the company through a questionnaire, fuel use (C5) is a numerical criterion and

has been taken as estimated data from the suppliers through the integrated meat plant. Before starting the implementation steps, firstly, a survey has been conducted to convert the evaluations of seven experts in the company into quantitative data for this green supplier selection problem in the red meat sector and an initial evaluation matrix has been created as shown in Table 2. The initial matrix has been created to evaluate the data, classified as "Very Weak Poor (VP)", "Poor (P)", "Moderately Poor (MP)", "Average (F)", "Moderately Good (MG)", "Good (G)", and "Very Good (VG)".

Table 2. Initial expert opinion supplier evaluation matrix

Criteria	Expert	Supplier						
		S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7
Quality	E1	G	G	VG	G	MG	G	MG
	E2	G	VG	VG	G	G	G	G
	E3	MG	G	G	G	MG	G	MG
	E4	G	VG	G	MG	MG	MG	MG
	E5	G	VG	VG	G	G	G	MG
	E6	MG	VG	G	MG	MG	VG	G
	E7	G	G	VG	G	G	G	MG
Green Image	E1	MG	MG	MG	F	G	G	MG
	E2	F	MG	MG	F	MG	G	MG
	E3	MG	G	G	MG	MG	MG	MG
	E4	F	G	MG	F	G	G	F
	E5	F	MG	G	MG	G	G	MG
	E6	F	MG	MG	F	MG	MG	F
	E7	MG	G	MG	MG	MG	MG	F
Eco-friendly Technology Usage	E1	MG	G	MG	F	MG	MG	G
	E2	F	MG	MG	F	MG	F	MG
	E3	MG	MG	F	MG	MG	F	MG
	E4	MG	MG	MG	F	F	MG	MG
	E5	MG	G	MG	MG	MG	F	G
	E6	F	MG	MG	F	MG	F	G
	E7	MG	MG	F	MG	F	MG	MG
Fuel Utilization	E1	MG	F	MG	F	G	MG	G
	E2	F	F	MG	MG	G	MG	G
	E3	F	F	G	MG	G	G	G
	E4	MG	MG	G	MG	G	MG	G
	E5	MG	F	G	F	MG	MG	MG
	E6	MG	F	MG	F	G	MG	G
	E7	F	F	MG	MG	MG	MG	MG

3.1. Fuzzy AHP Implementation (FAHP)

AHP is a method frequently used in decision making problems. Nevertheless, reaching the right decision in criteria evaluation and decision-making problems is not always sufficient. For this purpose, AHP and fuzzy logic have been combined, and the FAHP process has emerged. The solution phases are as follows.

Creation of a pairwise comparison matrix for the criteria as Eq. 1 and 2.

The comparison between the two criteria has been performed by assigning the numbers corresponding to the linguistic expression using the fuzzy importance levels shown in Table 3, which Akyüz uses for linguistic expressions [22]. For the criterion evaluation, the opinion of an experienced expert in the company is in question.

Table 3. Fuzzy importance levels

Importance Level	Fuzzy Scale	Corresponding Scale
Equally Important	1, 1, 1	1, 1, 1
A Few More Important	2/3, 1, 3/2	2/3, 1, 3/2
More Important	3/2, 2, 5/2	2/5, 1/2, 2/3
Very Important	5/2, 3, 7/2	2/7, 1/3, 2/5
Absolutely Important	7/2, 4, 9/2	2/9, 1/4, 2/7

Step 1: The fuzzy geometric mean is calculated with the help of geometric mean as Eq 3.

$$r_i = \sqrt[n]{a_{i1} \otimes a_{i2} \dots \otimes a_{in}} \quad (3)$$

Step 2: The fuzzy weights for each criterion are calculated as Eq 4.

$$\tilde{w}_i = r_i \otimes (r_1 + r_2 \dots + r_n)^{-1} \quad (4)$$

Step 3: A weight calculation is created for each criterion as Eq 5.

$$w = \frac{[(u_{wi} - l_{wi}) + (m_{wi} - l_{wi})]}{3} + l_{wi} \quad (5)$$

3.2. Gray Relational Analysis Implementation

In gray system theory, white represents known data, black represents unknown data, and gray represents partially known or predicted data. GRA is used in these uncertainty conditions. Before the implementation steps of the GRA, the criteria are separated into numerical and verbal, and the verbal expressions are converted into gray number equivalents, as shown in Table 4 [24]. This verbal evaluation includes the opinions of seven experts who have experience

evaluating all suppliers and are employed in different departments. The solution phases are as follows.

Table 4. Gray number equivalents for verbal criteria

Rating	Abbreviation	Gray Number Equivalent
Very Weak Poor	VP	0-10
Poor	P	10-30
Moderately Poor	MP	30-40
Average	F	40-50
Moderately Good	MG	50-60
Good	G	60-90
Very Good	VG	90-100

Step 1: Calculation of the data set and creation of the decision matrix as Eq. 6 and 7.

$$x_i = (x_i(j), \dots, x_i(n)), \quad i = 1, 2, \dots, n \text{ and } j = 1, 2, \dots, n \quad (6)$$

$$X = \begin{matrix} x_1(1) & x_1(1) & x_1(n) \\ x_2(1) & x_2(1) & x_2(n) \\ x_m(1) & x_m(1) & x_m(n) \end{matrix} \quad (7)$$

Step 2: Creation of the reference series and comparison matrix.

Where $(x_0(j))$, represents the best value of criterion j among the normalized criteria as Eq. 8.

$$x_i = (x_0(j)) \text{ and } j = 1, 2, \dots, n \quad (8)$$

Step 3: Normalizing the decision matrix and creating the normalization matrix: The normalization process varies according to the way the data affects the objective function. That is, if a larger value of the series (max) has a positive effect on the objective, the normalization process as Eq 9.

$$x_i^* = \frac{x_i(j) - \min(x_i(j))}{\max(x_i(j)) - \min(x_i(j))} \quad (9)$$

Normalization if a minimum series value (min) positively affects the objective as Eq. 10.

$$x_i^* = \frac{\max(x_i(j)) - x_i(j)}{\max(x_i(j)) - \min(x_i(j))} \quad (10)$$

Normalization of the series values according to an optimum value as Eq. 11 and 12.

$$x_i^* = \frac{|x_i(j) - x_0(j)|}{\max(x_i(j)) - x_0(j)} \quad (11)$$

$$X^* = \begin{matrix} x_1^*(1) & x_1^*(2) & x_1^*(n) \\ x_2^*(1) & x_2^*(2) & x_2^*(n) \\ x_m^*(1) & x_m^*(2) & x_m^*(n) \end{matrix} \quad (12)$$

Step 4: Creating the absolute value table as Eq. 13 and 14.

$$\Delta_{0i} = |x_0^*(j) - x_i^*(j)|, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad \text{ve} \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (13)$$

$$\Delta_{0i} = \begin{matrix} \Delta_{01}(1) & \Delta_{01}(2) & \Delta_{01}(n) \\ \Delta_{02}(1) & \Delta_{02}(2) & \Delta_{02}(n) \\ \Delta_{0m}(1) & \Delta_{0m}(2) & \Delta_{0m}(n) \end{matrix} \quad (14)$$

Step 5: Creating the gray relational coefficient matrix as Eq. 15 and 16.

$$\gamma_{0i}(j) = \frac{\Delta_{\min} + \zeta \Delta_{\max}}{\Delta_{0i}(j) + \zeta \Delta_{\max}} \quad (15)$$

$$\Delta_{\max} = \max_i + \max_j \Delta_{0i}(j) \quad \text{ve} \quad \Delta_{\min} = \min_i + \min_j \Delta_{0i}(j) \quad (16)$$

Step 6: Calculation of gray relational degrees: Gray relational degrees are calculated in two different ways depending on whether the criteria are of equal or different importance. If of equal importance as Eq. 17.

$$r_{0i} = (1/n) \sum_{j=1}^n \gamma_{0i}(j) \quad \text{ve} \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (17)$$

If the criteria weigh different as Eq. 18.

$$r_{0i} = \sum_{j=1}^n [w_i(j) \cdot \gamma_{0i}(j)] \quad \text{ve} \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (18)$$

3.3. Axiomatic Design (AD) Implementation

The aim of AD, developed by Suh, is to reduce the random search space and time for designers, minimizing erroneous and repetitive processes and leading the designer to a solution [25]. In certain cases, it is not possible to reach exact data in this method used for ranking and decision making. In similar cases, researchers have proposed the FAD method.

A functional need F_i whose information content is expressed as I_i , has a probability as p of fulfillment. Another name for this equation is the Shannon. Equation I_i calculation as Eq. 19.

$$I_i = \log_2(1/p_i) \quad (19)$$

Logarithmic expressions are used to generate information content. Given F_i , the information content is equal to the sum of these probabilities as Eq. 20.

$$I_{\text{system}} = \sum_{i=1}^n \log_2(1/p_i) \quad (20)$$

The probability of the realization of F_i is formulated by calculating the design range dr and the system range sr for the design that provides the functional requirements F_i . When the system probability distribution function of an F_i is uniform, the region where the design range is determined by the designer and the system range realized by the system intersect is called the common area and this area is the solution area [26] Figure 3 shows these areas.

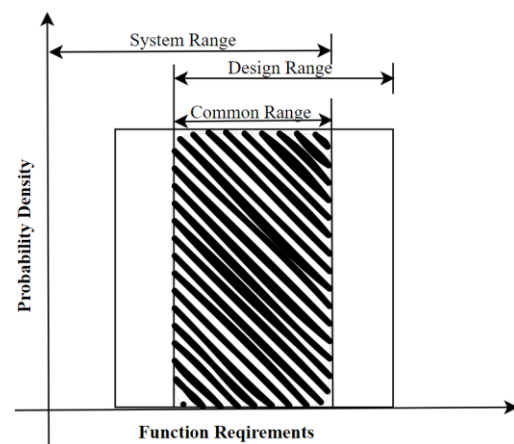


Figure 3. Probability distribution of design parameter

P_i , which is the probability of occurrence if the system probability distribution function is uniform as Eq. 21.

$$P_i = \frac{\text{Common Range}}{\text{System Range}} \quad (21)$$

Information content as Eq. 22.

$$I_i = \log_2 \frac{\text{System Range}}{\text{Common Range}} \quad (22)$$

The information content of P_i if F_i is a continuous random variable as Eq. 23.

$$P_i = \int_{dr_1}^{dr_u} P_s(F_i) dF_i \quad (23)$$

The probability of realization of the system range is derived by calculating the integral of the probability density function. In Figure 4, the system range is

defined [27], and the probability density function is shown according to the functional requirements.

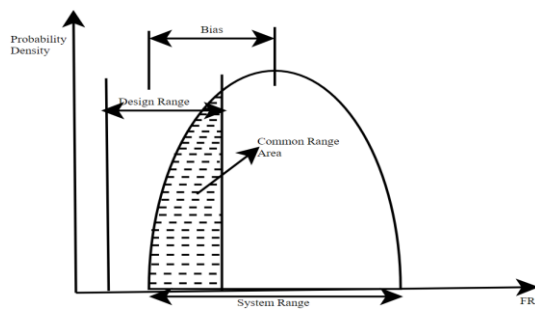


Figure 4. Common area of system range and design range

The region where only F_i is achieved is represented as the common area cr between the design range and the system range. Consequently, the area of the system range divided by the area of the common range is equal to the probability of obtaining the target set for the design as Eq 24.

$$I = \log_2(A_{sr}/A_{cr}) \quad (24)$$

The area of the system range is denoted by A_{sr} and the area of the common range is denoted by A_{cr} , shown hatched with lines in Figure 4.

$$I = \log_2(1/A_{cr}) \quad (25)$$

Calculation of information content as a conclusion as Eq 26.

$$I = \log_2\left(\frac{\text{Triangular Fuzzy Sys. Design}}{\text{Common Area}}\right) \quad (26)$$

In the AD, the weight of each criterion is generally considered equal. However, since each criterion has a different weight value, the following expression is used to calculate the information content. This structure is expressed as Eq. 27.

$$I_{ij} = \begin{cases} \left[\log_2\left(\frac{1}{p_{ij}}\right) \right]^{\frac{1}{w_j}}, & 0 \leq I_{ij} \leq 1 \\ \left[\log_2\left(\frac{1}{p_{ij}}\right) \right]^{\frac{1}{w_j}}, & I_{ij} \geq 1 \\ w_j, & I_{ij} = 1 \end{cases} \quad (27)$$

IV. RESULTS

The gray relational coefficients considering the criteria weights have been found as shown in Table 5. The S2

supplier, with the highest coefficient value, has been found to be the best supplier alternative.

Table 5. Weighted gray relational coefficient (WGRC)

	C1Max	C2Max	C3Max	C4Max	C5Min	GRC	Rank
w_i	0.2711	0.2494	0.1274	0.2181	0.134	-	-
S1	0.429	0.333	0.385	0.381	0.375	0.382	6
S2	1	0.75	0.714	0.333	0.667	0.711	1
S3	1	0.6	0.385	0.667	0.545	0.688	2
S4	0.429	0.333	0.333	0.381	0.333	0.37	7
S5	0.36	0.75	0.385	1	0.857	0.667	4
S6	0.529	1	0.333	0.5	1	0.678	3
S7	0.333	0.353	1	1	0.462	0.586	5

Calculation results according to weighted fuzzy axiomatic design (WFAD) method: S2 supplier with the lowest total information content has been found to be the best supplier alternative. The results of total information content according to WFAD method are as shown in Table 6.

Table 6. WFAD knowledge content results

	Quality	Green Image	Eco-friendly Technology Usage	Waste Management	Fuel Utilization	Total	Rank
S1	0.05428	1.0988	0.147	1.0064	0.055	2.3614	5
S2	0.039	0.01246	0.00000582	1.0064	0.00451	1.06238	1
S3	0.039	1.0988	0.147	0.00215	0.00000277	1.28695	3
S4	0.05428	1.0988	0.147	1.0064	0.134	2.44048	7
S5	1.2309	0.01246	0.147	0.00215	1.0472	2.43971	6
S6	0.05428	0.01246	0.147	1.0064	0	1.22006	2
S7	1.2309	1.0988	0.00000582	0.00215	0.0183	2.3505	4

This study evaluates the criteria that are effective in supplier selection. It consists of five criteria (quality,

green image, use of environmentally friendly technology, waste management, fuel use) that consumers demand, supports the company's sustainable policies, is regarded as adequate by experts, and is also preferred in literature.

According to the criteria weights determined by FAHP, the essential criterion is “quality.” Therefore, it would be appropriate for suppliers with low sustainability performance to prioritize the quality criterion. The best supplier ranking for the two different methods applied is as shown in Table 7.

Table 7. Rankings according to the applied methods

Rank	WFGRA	WFAD
1	S2	S2
2	S3	S6
3	S6	S3
4	S5	S7
5	S7	S1
6	S1	S5
7	S4	S4

According to Table 7, supplier S2 is seen as the best alternative in both hybrid methods. Both hybrid methods found the lowest sustainable supplier performance as an S4 supplier.

V. CONCLUSION AND DISCUSSION

Green image is an important criterion that directly affects consumer preferences, provides a competitive advantage, and increases trust in the brand. Green image is a strategic element that affects not only the present but also the future success of a company. Waste management is highly essential in terms of the prevention of environmental pollution, protection of natural resources, and human health. In addition, companies that are successful in waste management also have economic advantages. The use of environmentally friendly technology: even though companies do not prefer it due to its costs, its importance has been understood in recent years, and its benefits are high with the long-term savings. Minimizing fuel use, reducing carbon emissions, and improving air quality are essential criteria for cost savings.

The information observed in the study emphasizes how sustainable supplier selection is significant for companies and societies. The findings of this study provide a basis for sustainable supplier selection and may offer new approaches for a more detailed

examination of the field. In addition, the cost savings to be achieved through these and similar practices are expected to contribute to the national economy.

This study proposes an integrated model to contribute to the sustainability-based decision-making process in the food sector, especially in the supply of perishable products like red meat. The criteria weights determined by fuzzy AHP are supported by GRA and AD methods for a more comprehensive supplier evaluation. The results show that the evaluation of sector-specific critical factors including cold chain sustainability, logistics competence and quality assurance in addition to environmental performance has a positive impact on decision-making processes. The study both contributes to theoretical literature and provides guidance to practitioners on green supplier selection.

In future research, it could be useful to apply the model to different food product groups (e.g. dairy, seafood, frozen foods) to test the generalizability of the methods. Multiple criteria decision-making methods can be applied on the same data set to analyze the consistency of the results and the impact of the selection of the method. In this study, an evaluation has been made based on expert opinions; future research with official supplier data could improve the accuracy of the method. Integration of multi-criteria decision-making methods with artificial intelligence-based models can contribute to making supplier selection processes more automated.

Conflict of interest

The authors declare that they have no conflict of interest.

REFERENCES

- [1] Güzel, D., & Demirdöğen, O. (2016). Tedarik zinciri bütünleşmesi, yeşil tedarik zinciri uygulamaları ve işletme performansı arasındaki ilişki üzerine bir araştırma. *Karabük Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 6, 362–394.
- [2] Choudhury, R.R., Islam, A.F., & Sujaudhin. (2024). More than just a business plot: Greenwashing as a barrier to circular economy and sustainable development: A case study-based critical review. *Circular Economy and Sustainability*, 4, 233–266.
- [3] Jain, S., Basu, S., & Dwivedi, Y.K. (2024). Green brand identity and B2B channel partners' tactical green marketing orientation: Moderating effect of brand governance. *Industrial Marketing Management*, 119, 218–237.
- [4] Khandelwal, U., Tripathi, V., & Gupta, A. (2024). A bibliometric analysis of green branding research from 2000 to 2019. *Vision*, 28, 87–97.

- [5] Al-Baldawi, Z.A. (2024). Assessment Lean Level in Manufacturing Enterprises Based on Fuzzy Multi-Criteria Decision Making (FMCDM)-Literature Review. *International Journal of Supply and Operations Management*, 11, 1–18.
- [6] Supçiller, A., & Çapraz, O. (2011). AHP-TOPSIS yöntemine dayalı tedarikçi seçimi uygulaması. *Istanbul University Econometrics and Statistics E-Journal*, 1–22.
- [7] Çakın, E., & Özdemir, A. (2013). Tedarikçi Seçim Kararında Analitik Ağ Süreci (ANP) ve Electre Yöntemlerinin Kullanılması ve Bir Uygulama. *Journal of Economics & Administrative Sciences*, 15.
- [8] Ergül, Ö. (2018). Gri ilişkisel analiz ve MOORA yöntemleriyle tedarikçi seçimi ve bir işletmede uygulaması.
- [9] Demirci, A. (2020). Lojistik Tedarikçi Seçiminde Aksiyomatik Tasarım Tekniği Uygulaması. *Uluslararası Ekonomi Siyaset İnsan ve Toplum Bilimleri Dergisi*, 3, 90–105.
- [10] Opricovic, S. (2011). Fuzzy VIKOR with an application to water resources planning. *Expert Systems with Applications*, 38, 12983–12990.
- [11] Kılınç, S. (2018). Yeşil tedarikçi seçimi için gri ilişkisel analizine dayalı çok kriterli karar verme yöntemlerinin kullanımı ve sonuçların istatistiksel karşılaştırması.
- [12] Madenoğlu, F.S. (2019). Green supplier selection in fuzzy multi-criteria decision making environment. *Business & Management Studies: An International Journal*, 7, 1850.
- [13] Yin, S., Li, B., Dong, H., & Xing, Z. (2017). A New Dynamic Multicriteria Decision-Making Approach for Green Supplier Selection in Construction Projects under Time Sequence. *Mathematical Problems in Engineering*, 2017, 7954784.
- [14] Batur, G.D., & Özyörük, B. (2018). Supplier Selection via Axiomatic Design: An Application in Turkey for Baby Formula Production. *Bilişim Teknolojileri Dergisi*, 11, 195–201.
- [15] Ardalı, Z. (2020). Bulanık AHP ve bulanık aksiyomatik tasarım ile yeşil tedarikçi seçimi. <https://acikerisim.sakarya.edu.tr/handle/20.500.12619/97061>
- [16] Soyer, A., & Türkay, B. (2020). Yeşil Satın Alma ve Yeşil Tedarikçi Seçimi: Beyaz Eşya Sektöründe Bir Uygulama. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 8, 1202–1222.
- [17] Güneş, E., Keskin, B., & Kıymaz, T. (2014). Gıda sanayiinde yeşil ekonomi ve uygulamaları. XI. Tarım Ekonomisi Kongre Kitabı, 1528–1532.
- [18] Hashemi, S.H., Karimi, A., & Tavana, M. (2015). An integrated green supplier selection approach with analytic network process and improved Grey relational analysis. *International Journal of Production Economics*, 159, 178–191.
- [19] Şahin, K., & Cezlan, E.Ç. (2022). Hospital selection of health tourists: A study with AHP and TOPSIS Methods. *OPUS Journal of Society Research*, 19, 327–339.
- [20] Yazdani, M., Chatterjee, P., Zavadskas, E.K., & Zolfani, S.H. (2017). Integrated QFD-MCDM framework for green supplier selection. *Journal of Cleaner Production*, 142, 3728–3740.
- [21] Kannan, D., Govindan, K., & Rajendran, S. (2015). Fuzzy axiomatic design approach based green supplier selection: a case study from Singapore. *Journal of Cleaner Production*, 96, 194–208.
- [22] Akyuz, G. (2012). Bulanık Analitik Hiyerarşi Prosesi ile Fabrika İmalat Performansının Ölçümü. *Ege Academic Review*, 12, 323–338.
- [23] Ayaydin, H., Durmuş, S., & Pala, F. (2017). Gri İlişkisel Analiz Yöntemiyle Türk Lojistik Firmalarında Performans Ölçümü. *Gümüşhane University Electronic Journal of the Institute Of Social Science*, 8.
- [24] Köse, E., Aplak, H.S., & Kabak, M. (2013). Personel Seçimi için Gri Sistem Teori Tabanlı Bütünleşik Bir Yaklaşım. *Ege Akademik Bakış*, 13, 461.
- [25] Suh, N.P. (1998). Axiomatic Design Theory for Systems. *Research in Engineering Design - Theory, Applications, and Concurrent Engineering*, 10, 189–209. <https://doi.org/10.1007/S001639870001/METRIC> S.
- [26] Özel, B., & Özyörük, B. (2007). Bulanık Aksiyomatik Tasarım ile Tedarikçi Firma Seçimi. *Journal of the Faculty of Engineering & Architecture of Gazi University*, 22.
- [27] Kulak, O., & Kahraman, C. (2005). Fuzzy multi-attribute selection among transportation companies using axiomatic design and analytic hierarchy process. *Information Sciences*, 170, 191–210.

Savunma Sektöründe Çok Kriterli Karar Verme Yöntemleri ile Tedarikçi Seçimi

Supplier Selection with Multi-Criteria Decision Making Methods in the Defense Sector

Meltem HASKALFALI ¹, İpek Damla AKPINAR ², Barış KEÇECİ ²

¹Başkent Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, İşletme Bölümü, Ankara, Türkiye

²Başkent Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye

Öz

Türk savunma sanayi firmaları son yirmi yıl içerisinde elde ettikleri başarılar, ulaştıkları yüksek ciro rakamları ve yürüttükleri çeşitli savunma projeleri sayesinde uluslararası platformlarda küresel çözümler sunmaktadır. Savunma sanayinde rekabet gücünü elde tutmak için, tedarikçi seçimi kritik bir öneme sahiptir. Farklı tedarikçi alternatiflerinin bulunduğu, kriterlerin hem nitel hem de nicel özelliğe sahip olması ve bu kriterlerin birbiriyle çelişen ve birbirini tamamlayan özelliklerinin bulunması tedarikçi seçim kararını karmaşıktırılmaktadır. Tedarikçi seçiminde doğru karar vermek, firmaların maliyetlerini düşürmesine, kaliteli ürünler çıkarmasına sebep olmakta ve rekabet gücünü arttırmaktadır. Firmalar bu kararı verirken genellikle sezgisel yaklaşımlardan yararlanmaktadır. Buradaki karar problemi doğası gereği zor ve karmaşık olduğundan firmaların doğru karar verebilmesi için karar biliminin yöntemlerine başvurmak faydalı olacaktır. Bu nedenle çok kriterli karar verme yöntemlerinin ışığında en uygun çözüme ulaşılabilecektir. Çalışmanın uygulama bölümünde savunma sanayisinde faaliyet gösteren bir firmanın tedarikçi seçim problemi incelenmiş, firmanın tedarikçi seçim prosedüründe kullanılan 5 kriter ile TOPSIS ve VIKOR uygulanmıştır. Ayrıca literatürde seçimde faydalı olacağı düşünülen ek kriterler incelenmiş ve firmada çalışan yetkili personellerin ortak kararı ile 2 yeni kriter eklenerek, toplam 7 kriterle TOPSIS ve VIKOR yeniden uygulanarak, ideal tedarikçi seçimi yapılması amaçlanmış ve yöntemlerin sonuçlarına yer verilmiştir. Firma yönetimi uygulamanın faydalı olduğunu ve tedarikçi seçim prosedürlerine 2 yeni kriteri dahil edeceklerini, ayrıca tedarikçi seçiminde uyguladıkları mevcut prosedür yerine ÇKKV yöntemlerini kullanabileceğini belirtmiştir.

Anahtar Kelimeler: Savunma sanayi, Tedarikçi seçimi, Çok kriterli karar verme, TOPSIS, VIKOR

Abstract

Turkish defense industry companies offer global solutions on international platforms with the successes they have achieved in the last twenty years, the high turnover figures they have reached and the various defense projects they have carried out. In order to maintain competitive power in the defense industry, supplier selection is of critical importance. The supplier selection decision is complicated by the fact that there are different supplier alternatives, the criteria have both qualitative and quantitative features, and these criteria have conflicting and complementary features. Making the right decision in supplier selection allows companies to reduce their costs, produce quality products and increase their competitive power. Companies generally benefit from intuitive approaches when making this decision. Since the decision problem here is difficult and complex by nature, it would be useful to apply the methods of decision science for companies to make the right decision. Therefore, the most appropriate solution can be reached in the light of multi-criteria decision-making methods. In the application section of the study, the supplier selection problem of a company operating in the defense industry is examined, and TOPSIS and VIKOR are applied with the 5 criteria used in the supplier selection procedure of the company. In addition, additional criteria that are thought to be useful in selection in the literature are examined and 2 new criteria are added with the joint decision of authorized personnel working in the company, TOPSIS and VIKOR are re-applied with a total of 7 criteria, aiming to make an ideal supplier selection and the results of the methods are included. The company management stated that the application is useful and that they would include 2 new criteria in their supplier selection procedure, and that they could also use MCDM methods instead of the current procedure they apply in supplier selection.

Keywords: Defense industry, Supplier selection, Multi-criteria decision making, TOPSIS, VIKOR

I. GİRİŞ

Küresel olarak yaşanan çatışmalar, terör ve savaşlar ülkelerin kendi savunma kuvvetlerini güçlendirmesini önemli hale getirmiştir. Türk savunma sanayinin gelişmesi için özellikle son yirmi sene içerisinde kalkınma planları hazırlanmış olup, devlet teşvikleri artmıştır [1]. Nitelikli iş gücü ve üstün teknolojik altyapı gereksinimlerini içeren savunma sanayi artan bir ivme ile gelişmektedir.

Birçok sektörde olduğu gibi savunma sektöründe de firmaların çalıştıkları tedarikçileri belirlemeleri önemli ve stratejik kararlardan biri olarak karşlarına çıkmaktadır. Savunma sektöründe ham maddelerin, yarı mamullerin veya mamullerin askeri, dayanıklılık ve kalite gereksinimleri diğer sektörler nazaran daha farklıdır. Küresel rekabet koşullarının fazla olduğu ve politik kararların etken olduğu savunma sektöründe, firmaların faaliyetlerine devam edebilmesi ve hedeflerine ulaşabilmesi için güçlü tedarik zinciri yapısına sahip olması önem arz etmektedir. Tedarik zinciri yönetiminde, tedarikçi seçimi önemli bir karar verme problemlerinden birisidir. Alternatif tedarikçilerin bulunması, değerlendirilmesi gereken kriterlerin nicel ve/veya nitel özellikte olması ve bu kriterlerin birbiriyle çelişen veya birbirini tamamlayan özelliklerinin bulunması, firmaların tedarikçi seçimi konusunda karar vermesini zorlaştırmaktadır. Bu karar problemi ile başa çıkabilmek için kişisel kararlar yerine, bilimsel yaklaşıma sahip Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV) metodlarının kullanılması ile daha sağlıklı çözümlere ulaşılması sağlanabilecektir.

Çalışma kapsamında, savunma sanayinde faaliyet gösteren bir firmanın tedarikçi seçim problemi bir ÇKKV problemi olarak ele alınmıştır. İlk olarak firmanın kurulduğu ilk yıllarda yayınladığı prosedür ve tedarikçi seçim kuralları incelenmiştir. Uygun koşullara sahip tedarikçi alternatifleri ve seçim kriterleri belirlenerek, öncelikle prosedürde yer alan kurala göre tedarikçi seçimi sıralaması belirlenmiştir. Daha sonra tedarikçiler ÇKKV yöntemlerinden TOPSIS ve VIKOR kullanılarak yeniden sıralanmıştır. İkinci aşamada; tedarikçi seçimi konusunda literatür incelenerek seçim kriterleri incelenmiş, kaynak taraması sonucunda elde edilen ve firma tarafından önemli olan kriterler, halihazırdaki kriterlere eklenerek TOPSIS ve VIKOR bir kez daha uygulanmıştır.

Literatürde tedarikçi seçimi konusunda çok çeşitli yöntemler bulunmaktadır ve firma seçimi sektör bazında ve müşteri isteklerine göre değişiklik göstermektedir. Bu çalışmada TOPSIS ve VIKOR yöntemleri kullanılmıştır. ÇKKV yöntemlerinin uygulanması ile elde edilen bu know-how ve bilgi

birikimi sonrasında firmanın amacına göre diğer ÇKKV yöntemleri de uygulanıp sonuçlar genişletilebilir. Bölüm 2’de problem tanımı yapılmış; Bölüm 3 çözüm yöntemi olarak önerilen ÇKKV yöntemlerine ayrılmış; yöntemlerin etkinliğini test etmek için elde edilen sonuçlar Bölüm 4’te tartışılmış; ve son olarak Bölüm 5’de ise sonuçlara yer verilmiştir.

II. PROBLEM TANIMI

Türkiye’nin jeopolitik konumu, yeraltı kaynaklarına yakınlığının yanı sıra komşu ülkelerdeki savaşlar, çatışmalar jeostratejik pozisyonunu tehlikeye sokmaktadır. Küresel savunma ve silahlanmanın artması, Türkiye’nin uluslararası alanda politik ve stratejik etkinliğe sahip olmasının önemini arttırmakta ve savunma kuvvetlerinin güçlü olmasını zorunlu kılmaktadır. Bu sebeplerle, Türkiye savunmasını güçlendirme ve bu sektörde yerli üretimi artırma politikasını yürütmektedir [1]. Günümüzde Savunma Sanayii Başkanlığı (SSB), savunma sanayinin çağdaş ve ileri teknolojiye sahip olması ve Türk Silahlı Kuvvetleri’nin modernizasyonu için kurulmuştur. SSB, Savunma Sanayii Destekleme Fonu ve kalkınma planları ile savunma projelerini desteklemekte ve yürütmektedir [1].

Türk savunma sanayisinde faaliyet gösteren firmalar nitelikli iş gücü ve üstün teknolojik altyapıları sayesinde, farklı savunma sanayi pazarlarında çok sayıda ülkenin yerel gereksinimlerini karşılayan küresel çözümler sunmaktadır. Türk savunma sanayi, faaliyet gösteren 3.000’e yakın firma ve 80.000’i aşkın çalışanıyla ülke ekonomisine en yüksek katkıyı sağlayan sektörlerden biri haline gelmiştir [1]. Faaliyet gösteren firmaların ürettikleri ürünler, SSB destekleriyle ve özel teşebbüslerin yatırımları ile yurt içi ve yurt dışında tüm operasyonlarda başarıyla kullanılmaktadır. Savunma sanayinin son yıllarda göstermiş olduğu başarılar sayesinde, Türk firmaları platform, sistem ve yeteneklerini yurtdışı pazarlarda gösterebilmiş ve ürünleri talep edilebilir hale gelmiştir. 230’a yakın savunma sanayi ürününün ihracatı 170 ülkeye yapılmaktadır. Geniş ürün çeşidi arasında İnsansız Hava Aracı (İHA), Silahlı Hava Aracı (SİHA), kara araçları, deniz platformları, hava araçları, mühimmatlar ve füze sistemleri en önemli ihracat kalemleridir [1].

Savunma firmalarının tüm savunma ve havacılık satışları Şekil 1’de gösterilmiştir ve sektör ile ilgili güncel bilgilere SSB’nin resmî sitesinden ulaşılabilir. Savunma ve havacılık cirosu 2002 yılında 1 milyar \$ iken, 2022 yılında yaklaşık 12 kat büyüyerek 12 milyar \$’a ulaşmıştır. Ayrıca savunma ve havacılık ihracat

hacmi, 2002 yılına nazaran 22 katın üstünde artarak 2023 yılında 5,545 milyar \$'a ulaşmıştır [1].

Türkiye'nin savunmasına önem vererek, devlet bütçesinin bir bölümünü savunma sektörüne ayırmasının çıktıları ise, Şekil 2'de gösterilen proje sayısı bilgisinden görülebilmektedir. Savunma projeleri 2022 yılında yalnızca 62 adet iken, 2024 yılında 17 kat artarak 1000'in üzerine çıktığı görülmektedir. Ayrıca, 2002 yılında toplam 5,5 milyar \$ bütçeye sahip savunma ve havacılık projeleri yönetilirken, 2024 yılında ihale süreci devam eden projeler de dâhil olmak üzere yaklaşık 17 kat bir artış yaşanmış ve proje hacmi toplam 96,3 milyar \$'a ulaşmıştır [1].



Şekil 1. Toplam savunma ve havacılık ciroosu



Şekil 2. Savunma projeleri

III. ÇÖZÜM YÖNTEMİ

Savunma sektörüne verilen önem ve destekler sayesinde sektörde yurt içinde hizmet veren şirketlerin sayısı artmaktadır. Bununla birlikte ana yüklenicinin yurt içi ya da yurt dışı şirketler içerisinde belirlediği ve kriterlerine uygun tedarikçileri seçip, tedarikçi ağına katması stratejik öneme sahiptir. Günümüzde küresel rekabet koşullarında hayatta kalabilmek için güçlü tedarik zincirinin oluşturulması şirketleri de güçlü kılmaktadır.

Tedarikçi seçim kararı verilirken, çok sayıda nitel ve nicel kriterin aynı anda değerlendirilip, bu kriterler arasında dengeli bir tercih yapılması gerekmektedir. Uygun tedarikçi seçilmesi ile firmanın başarısı, sürdürülebilirliği ve rekabet gücü artarken, uygun olmayan tedarikçi seçilmesi ile eksik siparişler, kalitesiz ürünler ve uygun ürün için hesaplanmayan maliyetler ortaya çıkmaktadır. Bu olumsuzluklar firmanın uzun dönem performansı üzerinde olumsuz etkiler yaratmaktadır [2].

Tedarikçi seçim sürecinde, kararların verilmesi için ölçülebilir ve ölçülemeyen stratejik ve operasyonel kriterlerin aynı anda değerlendirilmesi ve çok sayıda kişinin karar verme sürecine dâhil edilerek ortak bir karara varılması açısından ÇKKV metodları uygulanmaktadır. ÇKKV ile, bilimsel yaklaşımlar göz önünde bulundurularak verilen kararlar, doğruya en yakın çözümleri sunmaktadır [3].

Bu çalışmada ele alınan tedarikçi seçimi problemi, çok sayıda ve çoğu zaman birbiriyle çelişen hem nicel hem nitel kriterlerin değerlendirilmesini gerektiren ÇKKV problemidir. Bu bağlamda, literatürde sıklıkla uygulanan ve karar vericilerin tercihlerini sistematik şekilde yansıtabilecek güçlü araçlar olan TOPSIS ve VIKOR yöntemleri tercih edilmiştir. Her iki yöntem de karar matrisindeki alternatifleri ideal çözüme olan uzaklık temelli analizlerle sıralar; ancak yaklaşım biçimleri farklıdır.

Alternatif yöntemler olan AHP ve Fuzzy AHP, kriterler arası karşılaştırmaların ikili karşılaştırma matrisi yoluyla yapılmasını gerektirir. Bu durum, kriter sayısı arttıkça karar vericiler için bilişsel yük oluşturabilir ve tutarsızlıklara yol açabilir. Ayrıca AHP, ağırlık belirleme odaklı bir yöntem olup alternatif sıralama konusunda sınırlıdır. Fuzzy AHP, belirsizlikleri modelleme açısından avantajlı olsa da, hesaplama süreci daha karmaşıktır ve uzmanlık gerektirir.

ELECTRE ve PROMETHEE gibi üstünlük temelli yöntemler, özellikle karar vericiler arasında çelişkili öncelikler olduğunda güçlüdür; ancak bu yöntemler eşik değerlerinin belirlenmesini zorunlu kılar. Bu eşiklerin sübjektif belirlenmesi, sonuçların tutarlılığını etkileyebilir. Ayrıca, bu yöntemlerin uygulanması genellikle daha karmaşıktır ve yazılım desteği gerektirir.

Buna karşın, TOPSIS ve VIKOR, karar matrisinin doğrudan normalize edilmesi ve ideal çözümlere uzaklık temelli sıralama yapmaları sayesinde hem uygulama kolaylığı sağlar hem de güçlü sezgisel temellere dayanır. VIKOR'un uzlaşma çözümü

yaklaşımı, grup kararlarında dengenin sağlanmasına olanak verirken; TOPSIS, pozitif ve negatif ideal çözüme olan uzaklığı esas alarak pratik bir değerlendirme sunar. Bu iki yöntemin birlikte kullanılması, karar sürecinde hem en uygun çözüme yakınlığı hem de karar vericilerin uzlaşma düzeylerini dikkate alarak daha dengeli ve sağlam sonuçlar elde edilmesine olanak tanır.

Ayrıca, her iki yöntemin hesaplama adımlarının görece basit ve uygulanabilir olması, karar verici birimler açısından da pratiklik sunmaktadır. Literatürde savunma sanayiinde yapılan benzer çalışmalarda da TOPSIS ve VIKOR'un etkin şekilde kullanıldığı görülmektedir. Bu nedenle, çalışmamızda bu iki yöntemin birlikte kullanılması, problemin doğasına uygunluk ve literatürle uyum açısından uygun bulunmuştur. Yanı sıra hesaplama basitliği, sezgisel açıklık ve karar verici tercihlerini objektif olarak yansıtılma yetenekleri nedeniyle TOPSIS ve VIKOR yöntemleri tercih edilmiştir.

Çalışmada kullanılan kriterler (maliyet, zamanında teslim, kalite skoru vb.) sayısal ve objektif verilerden oluşmaktadır. Bu nedenle, klasik (deterministik) TOPSIS ve VIKOR yöntemlerinin kullanımının yönetsel açıdan uygun olduğu değerlendirilmiştir. Karar verme sürecinde, kurumun satın alma biriminde görevli tek bir uzman karar verici yer almıştır. Grup kararı veya uzmanlar arası ağırlıklandırma yapılmamış, çalışma tekil karar verici bağlamında gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, çalışmada kullanılan veriler belirsizlik içermemekte, tamamı ölçülebilir ve sayısal verilerden oluşmaktadır. Bu durum, bulanık mantık tabanlı yöntemler yerine klasik ÇKKV yöntemlerinin (TOPSIS, VIKOR) tercih edilmesini desteklemiştir.

3.1. Tedarikçi Değerlendirme Kriterleri

Tedarikçi seçimi firmalar için kritik bir konu olduğu için literatürde de birçok araştırmaya konu olmuştur. Bu araştırmalara bakıldığında; tedarikçi seçim probleminin çözümünde yapılan en önemli çalışmanın Dickson'ın yapmış olduğu araştırma olduğu görülmektedir. Dickson, Amerika ve Kanada'da çalışan satın alma müdürleri arasından 273 yönetici ile anket yapmıştır. Bu anket sonucunda belirlenen kriterler Tablo 1'de gösterilmektedir. Dickson yapmış olduğu çalışmada 23 farklı kriter belirlemiş ve bu kriterleri önem sırasına göre gruplandırmıştır. Bu gruplar "Çok önemli", "Önemli", "Orta derecede önemli", "Az önemli" olarak sıralanmıştır. "Çok Önemli" olarak nitelenen kriterler; kalite, teslim tarihine uyum, geçmiş dönem performansı, garanti

politikası ve üretim tesisi ve kapasite olarak belirtilmiştir [4].

Dickson'ın tablosunda yer alan kriterlerin önem sırası sektörün ihtiyacına ve firmaların değerlendirdiği kriterlerin üretim sistemleri ile müşteri isteklerine göre farklılık gösterdiği unutulmamalıdır. Örnek vermek gerekirse tedarikçi seçimi düşük kârlı bir sektörde yapılırsa, maliyet en önemli kriterlerden biri olabilir [5].

Tablo 1. Dickson kriterleri

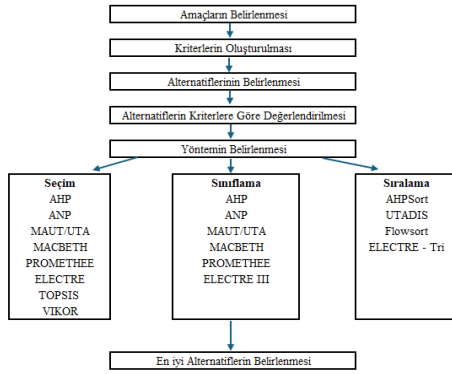
Sıra	Kriter	Sıra	Değerlend
1	Kalite	3,508	Çok önemli
2	Teslim tarihine	3,147	
3	Geçmiş dönem performansı	2,998	
4	Garanti politikası	2,849	Önemli
5	Üretim tesisi ve kapasite	2,775	
6	Fiyat	2,758	
7	Teknik yeterlilik	2,545	
8	Finansal durum	2,514	
9	Prosedüre uyum	2,488	
10	Kontrata uyum	2,426	
11	İletişim sistemi	2,412	
12	Endüstrideki yeri	2,256	
13	İş yapma isteği	2,216	
14	Yönetim ve organizasyonu	2,211	
15	Tamarin seviyesi	2,187	Orta derecede önemli
16	Tutum	2,120	
17	Görüşme sonrası	2,054	
18	Paketleme yeteneği	2,009	
19	İşçi ilişkileri	2,003	
20	Coğrafi yer	1,872	
21	Çeçmiş dönemde yapılan iş	1,597	
22	Ürün kullanım sonrası eğitim	1,537	
23	Karşılıklı	0,610	Az önemli

3.2. Tedarikçi Seçiminde Kullanılan ÇKKV Yöntemleri

ÇKKV, 1970 yılının başlarında yöneylem araştırması ve karar teorisi alanlarında kullanılmaya başlanmıştır. ÇKKV yöntemleri birden fazla ve birbirleriyle uyuşmayan kriterlerin bulunduğu karar problemlerinin çözümünde karar vermeye yardımcı olur. Bu sayede, büyük miktarda ve dağınık olan verilerin değerlendirilmesi sürecinde karar vericiye kolaylık sağlamaktadır [6].

Literatür incelendiğinde, tedarikçi seçim problemlerinde çok sayıda çok kriterli yöntemlerin kullanıldığı görülmektedir. Genellikle bu yöntemlerde, fayda veya maliyet içeren ve çoklu kriterlerin çözümlenmesi, modellenmesi ve uzlaşık çözümlerin

değerlendirilmesi amaçlarına yönelinmiştir. ÇKKV alanı; diğer bilim dalları ile etkileşim içerisinde kalarak, yeni yöntemler ortaya çıkmaya devam etmektedir [7]. ÇKKV süreci ve kullanılan yöntemler Şekil 3'te görüldüğü üzere; sınıflama, sıralama ve seçim olmak üzere üç temel başlık altında incelenmektedir [8].



Şekil 3. ÇKKV süreci ve yöntemleri

Uygulama kapsamında belirlenen tedarik seçim problemine ÇKKV yöntemlerinden TOPSIS ve VIKOR uygulanmış ve sonuçlarına yer verilmiştir.

Savunma sektörü, yüksek stratejik değer taşıması, uzun vadeli proje döngüleri ve sıkı güvenlik gereklilikleri nedeniyle, geleneksel tedarik ortamlarından oldukça farklılık göstermektedir.

Aşağıdaki özetlenen çalışmalar, savunma sanayiinde tedarikçi seçimi konusunda literatürdeki önemli boşlukları doldurmuş ve bu alandaki bilgi birikimine katkı sağlamıştır.

[9] Soygüder & Geçer (2023), savunma sanayiinde yüzey işleme tedarikçisi seçimi üzerine uygulamalı çalışma yapmış ve Bulanık AHP ile Bulanık TOPSIS yöntemlerini kullanmıştır. [10] Evcioğlu & Kabak (2023), savunma sanayiinde tedarikçi değerlendirme için AHP ve TOPSIS yöntemlerini kullanarak yazılım tabanlı bir sistem geliştirmiştir. AHP, Bulanık TOPSIS ve SECA yöntemlerini kullanan [11] Rasmussen ve ark. (2023), havacılık ve savunma sanayiinde sürdürülebilirlik ve teknoloji kriterlerinin tedarikçi seçimindeki etkisini araştırmıştır. [12] Akpınar (2021), Bulanık TOPSIS ve Bulanık VIKOR yöntemlerini kullanarak gıda sektöründe tedarikçi seçimi üzerine bir çalışma yapmıştır. [13] Yalçın & Kılıç (2019), IF-AHP ve PROMETHEE yöntemlerini kullanarak çevresel faktörlerin tedarikçi seçimindeki rolü araştırmıştır. Her ne kadar son iki çalışma savunma sektörü dışına odaklanmış olsa da, tedarikçi seçimi karar problemlerinin farklı sektörlerde benzer ÇKKV

yaklaşımlarıyla ele alınabileceğini göstermesi açısından bu çalışma, savunma sanayi bağlamındaki bu araştırmaya metodolojik bir referans niteliğindedir.

Bu bağlamda literatürde, savunma sanayiine özgü tedarikçi seçim kriterlerinin sistematik biçimde belirlendiği ve ÇKKV yöntemleriyle değerlendirildiği çalışmalar oldukça sınırlıdır. Ayrıca TOPSIS ve VIKOR gibi yöntemlerin savunma sektöründe karşılaştırmalı analizinin yapıldığı kapsamlı uygulamalara rastlanmamaktadır.

Bu çalışmanın özgün katkısı; iki farklı ÇKKV yönteminin (TOPSIS ve VIKOR) bu bağlamda uygulanması ve yöntemlerin sonuçlarının karşılaştırmalı biçimde analiz edilmesidir. Gerçek bir tedarik sürecinden alınan verilerle yapılan bu uygulama, literatürdeki önemli bir boşluğu doldurmayı amaçlamaktadır.

3.2.1. TOPSIS yöntemi ve adımları

TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution) 1980 senesinde Hwang ve Yoon tarafından ortaya konmuştur. Bu yöntemin temel işleyişi seçeneklerin ideal çözüme olan yakınlıklarına dayanmaktadır ve alternatiflerin, ideal/negatif ideal çözüm noktalarına olan mesafelerini hesaplayarak çalışmaktadır. Alternatifler arasında, pozitif ideal sonuca en yakın olan ve negatif ideal sonuca en uzak olan alternatif, en iyi seçenek olarak kabul edilmektedir. Ancak belirlenen en iyi alternatif, her zaman pozitif ideal sonuca en yakın ya da negatif ideal sonuca en uzak olmayabilir. Bu durumda negatif ideal çözümlerin optimum kriter değerleri en azdır, optimum kriter değerlerinden oluşan veriler ise ideal çözümlerdir [14].

TOPSIS yönteminin özellikleri şu şekilde sıralanabilir [15]: i) içeriği anlaşılabilir, ii) hesaplanması kolaydır, iii) basit bir formül ile alternatifler arasındaki ilişki kurulabilir, iv) alternatifler, belirlenmiş olan kriterler ve bu kriterlerin maksimum, minimum değerlerinde ideal pozisyona göre karşılaştırılabilir.

Adım 1: Karar Matrisi

Karar matrisinde alternatifler (m) satırlarda bulunurken, kriterler (n) ise sütunlarda bulunmaktadır ve $m \times n$ boyutunda Eşitlik (1) ile gösterilen matris yapısal olarak aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir.

$$A_{ij} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \cdots & a_{mn} \end{pmatrix} \quad (1)$$

Adım 2: Karar Matrisinin Normalizasyonu

Hesaplama hatalarını önlemek amacıyla, karar matrisinin standart hale getirilmesi gerekmektedir. Karar matris sütunundaki her bir a_{ij} , Eşitlik (2)'deki gibi sütun değerlerindeki a_{ij} 'lerin kareleri toplamının kareköküne bölünerek, Eşitlik (3)'te yer alan normalize karar matrisi N_{ij} elde edilmektedir.

$$n_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m a_{ij}^2}} \quad \begin{matrix} i=1,\dots,m; \\ j=1,\dots,n \end{matrix} \quad (2)$$

$$N_{ij} = \begin{pmatrix} n_{11} & n_{12} & \dots & n_{1n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ n_{m1} & n_{m2} & \dots & n_{mn} \end{pmatrix} \quad (3)$$

Adım 3: Normalize Matrisin Ağırlıklandırılması

Kriterlerin ağırlık değerlerinin ($w_i, i=1,2,\dots,n$) toplamı 1 olacak şekilde belirlenmektedir. Normalize karar matrisinde bulunan değerler (n_{ij}), Eşitlik (4) uyarınca o sütuna ait ağırlık (w_i) ile çarpılıp, Eşitlik (5)'teki normalize karar matrisi (V) elde edilmektedir.

$$v_{ij} = w_i * n_{ij} \quad (4)$$

$$V = \begin{pmatrix} v_{11} & v_{12} & \dots & v_{1n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ v_{m1} & v_{m2} & \dots & v_{mn} \end{pmatrix} \quad (5)$$

Adım 4: İdeal ve Negatif İdeal Çözüm Değerlerinin Belirlenmesi

Eğer kriter eniyisi-enbüyük olan ise, o sütundaki en büyük değer ideal değer, en küçük değer ise negatif ideal çözüm değeri olarak belirlenmektedir. Fakat kriter eniyisi-enbüyük olan ise, o sütundaki değerlerden en küçük değer ideal değer, en büyük değer ise negatif ideal çözüm değeri olarak belirlenmektedir. İdeal (A^+)/negatif ideal (A^-) değerler aşağıda Eşitlik (6) ve (7)'de gösterilmektedir.

$$A^+ = \left\{ \max_{v_{ij}} \|j = 1, \dots, n; i = 1, \dots, m\right\} \\ = \{v_1^+, v_2^+, \dots, v_n^+\} \quad (6)$$

$$A^- = \left\{ \min_{v_{ij}} \|j = 1, \dots, n; i = 1, \dots, m\right\} \\ = \{v_1^-, v_2^-, \dots, v_n^-\} \quad (7)$$

Adım 5: İdeal ve Negatif İdeal Noktalara Olan Uzaklıkların Bulunması

İdeal ve negatif ideal noktalara olan uzaklık, öklid uzaklığı hesaplanmaktadır. Her bir alternatifin ideal çözümünden uzaklığı S_i^+ , negatif ideal çözüme uzaklığı ise S_i^- olarak gösterilmekte ve Eşitlik (8)-(9) ile hesaplanmaktadır.

$$S_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^+)^2} \quad (8)$$

$$S_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^-)^2} \quad (9)$$

Adım 6: İdeal Çözüme Göreli Yakınlığın Belirlenmesi ve Alternatiflerin Sıralaması

Alternatif i 'nin ideal çözüme göreli mesafe değeri $[0,1]$ aralığındadır. C_i^+ Eşitlik (10) ile hesaplanmaktadır. $C_i = 0$ durumunda i 'nin negatif ideal çözüme, $C_i = 1$ durumunda ise i 'nin pozitif ideal çözüme yaklaştığı yorumu yapılmaktadır. Alternatiflerin C_i değerleri büyükten küçüğe sıralanarak, tercih sıralaması belirlenmektedir [16].

$$C_i^+ = S_i^- / (S_i^+ + S_i^-) \quad 0 \leq C_i \leq 1 \quad (10)$$

3.2.2. VIKOR yöntemi ve adımları

Opricovic tarafından 1998 senesinde geliştirilen VIKOR (Vise Kriterijumska Optimizacija I Kompromisno Resenje) yöntemi, ölçülemeyen ve çelişkili kriterlerin olması durumunda problemin çözümlenmesinde kullanılmaktadır. Birden çok alternatif arasında sıralama ve seçim yapılmasını sağlayan VIKOR yöntemi, karar vericilerin kullanacakları çelişkili kriterleri değerlendirerek, ideale en yakın uzlaşık sonuçları belirlemektedir. Bu yöntem çoğunluğun grup faydasını enbüyüklemeyi yanı sıra rakiplerin bireysel pişmanlığını enküçüklemeyi hedeflemektedir. Hesaplamaları basit ve anlaşılabilir yapıda olduğu için yaygın kullanıma sahiptir [17].

Adım 1: Karar Matrisi

Karar matrisinde alternatifler (m) satırlarda, kriterler (n) ise sütunlarda bulunmaktadır ve $m \times n$ boyutundaki karar matrisi daha önce verilen Eşitlik (1)'de gösterilmektedir.

Adım 2: Kriterler İçerisinde En İyi (f_i^+) ve En Kötü (f_i^-) Değerlerin Bulunması

Karar matrisindeki kriterlerin amaca yönelik etkisinin fayda ya da maliyet yönünde olup olmamasına göre kullanılacak eşitlik değişiklik göstermektedir. Eşitlik (11) ve (12)'e göre f_i^+ ve f_i^- değerleri hesaplanmaktadır.

- Kriterin amaç üzerinde etkisi fayda yönünderse kullanılacak eşitlik;

$$\begin{aligned} f_i^+ &= \max_i x_{ij} \\ f_i^- &= \min_i x_{ij} \end{aligned} \quad (11)$$

- Kriterin amaç üzerinde etkisi maliyet yönünderse kullanılacak eşitlik;

$$\begin{aligned} f_i^+ &= \min_i x_{ij} \\ f_i^- &= \max_i x_{ij} \end{aligned} \quad (12)$$

Adım 3: Karar Matrisinin Normalizasyonu

Karar matrisini oluşturan verilerin karşılaştırılabilir olabilmesi için doğrusal normalizasyon işlemi uygulanarak, Eşitlik (14)'teki R normalize matris elde edilmektedir. Normalize karar matrisinin elemanları r_{ij} ile gösterilmekte olup, aşağıdaki Eşitlik (13)'e göre hesaplanmaktadır.

$$r_{ij} = \frac{f_i^+ - x_{ij}}{f_i^+ - f_i^-} \quad (13)$$

$$R_{ij} = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{m1} & r_{m2} & \cdots & r_{mn} \end{pmatrix} \quad (14)$$

Adım 4: Normalize Karar Matrisinin Ağırlıklandırılması

Normalize karar matrisindeki r_{ij} değerleri, Eşitlik (15)'e göre kriter ağırlığı w_i ile çarpılıp, ağırlıklandırılır ve Eşitlik (5)'te ki gibi V matrisi elde edilir.

$$v_{ij} = r_{ij} * w_j \quad (15)$$

Adım 5: S_i ve R_i Değerlerinin Hesaplanması

Alternatifler (i) için Eşitlik (16)'da hesaplanan S_i değerleri ortalamayı gösterirken, Eşitlik (17)'de R_i değerleri ise en kötü değerleri ifade etmektedir.

$$S_i = \sum_{j=1}^n V_{ij} \quad (16)$$

$$R_j = \max_j V_{ij} \quad (17)$$

Adım 6: Q_i Değerlerinin Hesaplanması

Q_i değerlerinin Eşitlik (18) ve (19)'a göre hesaplanmasında;

- S_i ve R_i değerlerine bakılarak içlerindeki en büyük değer S^- olarak, en küçük değer ise S^+ olarak bulunmaktadır.
- q değeri, grubun en yüksek faydayı elde etmesini sağlayan strateji ağırlığını temsil etmektedir. $(1-q)$ değeri ise karşıt görüşte olanların en küçük pişmanlık seviyesini temsil etmektedir.

Uzlaşma şu şekilde sınıflandırılmaktadır: i) $q > 0,5$ “çoğunluk oyu”, ii) $q = 0,5$ “konsensus”, iii) $q < 0,5$ “veto” olarak ifade edilmektedir.

Literatür incelendiğinde q değerinin genel olarak 0,5 alındığı görülmüştür, bu nedenle uygulama kapsamında da $q = 0,5$ olarak alınmıştır [16].

$$\begin{aligned} S^+ &= \min_i S_i, S^- = \max_i S_i, \\ R^+ &= \min_i R_i, R^- = \max_i R_i \end{aligned} \quad (18)$$

$$Q_i = \frac{q * (S_i - S^+) + (1 - q) * (R_i - R^+)}{S^- - S^+ + R^- - R^+} \quad (19)$$

Adım 7: Alternatiflerin Sıralanması ve Koşulların Sınanması

Hesaplamalar sonucu ortaya çıkan S_i , R_i ve Q_i verileri sıralanmaktadır. Bu sıralamanın küçükten büyüğe yapılması gerekmektedir ve bu sıralamaya göre alternatiflerin 3 farklı sıralaması ortaya çıkmaktadır. Sıralamaların doğruluk kontrolünün yapılması gerekmektedir. En az Q_i değerine sahip olan alternatif için aşağıda detayları bulunan kabul edilebilir avantaj ve istikrar şartlarını sağlayıp sağlamadığı kontrolünün yapılması gerekmektedir.

Şart 1: Kabul Edilebilir Avantaj

Kabul edilebilir avantaj şartı Eşitlik (20) ve (21)'in sağlanmasını gerektirir. Sıralanan Q_i değerlerinde ilk sıradaki A^1 alternatifi, ikinci sıradaki ise A^2 alternatifi ifade eder. Alternatif sayısının 4'ten az olduğu karar problemlerinde $DQ = 0,25$ alınması gerekmektedir [18].

$$Q(A^2) - Q(A^1) \geq DQ \quad (20)$$

$$DQ = \frac{1}{n - 1} \quad (21)$$

Şart 2: Kabul Edilebilir İstikrar

Sıralanan Q_i değerlerinde ilk sıradaki A^1 alternatifi, küçükten büyüğe doğru sıralanan S ve/veya R değerlerinde en küçük değere sahip ise en iyi alternatiftir. Uzlaşık çözümün istikrarlı olduğuna, bu koşulun sağlanması ile karar verilmektedir. Bu iki şartlardan birinin sağlanamaması durumunda;

- a) Şart 2 sağlanmazsa, her ne kadar A^1 'in nispi bir avantajı olsa da karar vermede tutarsızlık olduğu için, hem A^1 hem de A^2 alternatifleri uzlaşık çözümdür.
- b) Şart 1 sağlanmazsa, $A^1, A^2, \dots, A^m$ tüm alternatifler uzlaşık çözüm kümesindedir ve Eşitlik (22)'yi sağlayan tüm alternatifler çözüm olarak alınmaktadır. Uzlaşık çözüm kümesi dâhilinde en küçük değere sahip Q değeri en iyi alternatiftir [19].

$$Q(A^m) - Q(A^1) < DQ \quad (22)$$

Hem TOPSIS hem de VIKOR, ÇKKV metotları içerisinde anlaşılması kolay, Excel yardımı ile nitel ve nicel verilerin kolaylıkla hesaplanmasına olanak sağlamaktadır. Tek başlarına kullanılabilecekleri gibi, diğer yöntemlerle bütünleşik olarak da kullanıldığı literatürde görülmektedir.

VIKOR ve TOPSIS metotlarını birbirinden ayıran özelliklerine bakılacak olursa; farklı normalizasyon yöntemleri ve toplama işlevlerine sahiptir. TOPSIS yöntemi riskten kaçan karar vericiler için uygun bir yöntemdir. VIKOR yönteminde nihai karar sonuçlarında 0'a en yakın değeri alan alternatif, en uygun alternatif olarak belirlenmektedir. TOPSIS yönteminin nihai sıralamasından farklılık göstermektedir [17].

IV. HESAPLAMALI SONUÇLAR

Uygulama yapılan firma, savunma sektöründe üretim, bakım ve satış sonrası hizmetleri ile ulusal ve uluslararası platformlarda 40 yıldır hizmet veren bir firmadır. Bu sektörde ileri teknolojiye sahip ve AS 9100 Havacılık ve Savunma Sanayi Kalite Yönetim Sistemi belgesi kalite gereksinimlerini karşılamaktadır. Firma üretim yapacağı yeni proje kapsamında, kapasitesini aşan mekanik parçalar için yurt içi ve yurt dışı tedarikçilerden teklif alıp, gelen tekliflerden uygun tedarikçileri seçmeyi hedeflemiştir. Proje kapsamında tedarikçilerden sağlanacak ürünün özelliği; mekanik, hidrolik testler ve özel prosesler dâhil bitmiş üründür. Bu ürünün kapsamı bilgi güvenliği gereksinimlerini

karşıladığı için tedarikçi ile Gizlilik Sözleşmesi imzalanması gerekmektedir. Ayrıca tedarikçilerin ön koşul olarak aşağıdaki standartları sağlaması gerekmektedir:

- 10 yıldan fazla faaliyet gösteren üretim işletmesi olmalı,
- Çalışan sayısı ortalama 30-200 olmalı,
- AS 9100 Kalite Yönetimi Sistemi veya ISO EN9100 Havacılık ve Savunma Sanayi Kalite Yönetim Sistemi belgesine sahip olmalı.

4.1.Şirket Tedarikçi Seçim Prosedürü

4.1.1. Şirket prosedüründeki kriterler

Uygulama kapsamında, savunma sektöründe faaliyet gösteren bir firma için öne çıkan kriterler, firmanın yayınladığı “Kaynak Seçimi, Yan Sanayi Seçme ve Değerlendirme Prosedürü” incelenerek belirlenmiş ve 5 kriter olduğu tespit edilmiştir. Bu kriterlerin içerikleri aşağıda sunulmuştur.

Zamanında Teslimat (ZT): Üretici firmanın verilen işleri teslimat tarihine uygun bir şekilde yapıp yapmadığını ölçmektedir. Bu ölçü değeri şirketin Kurumsal Kaynak Planlama (ERP) sisteminde hesaplanmaktadır. Tablo 1 Dickson Kriterleri'nde Teslim Tarihine Uyum adı ile 2. sırada yer almaktadır.

Teslim Edilen Miktar (M): Üretici firmanın verilen işlerin ne kadarını teslim edip etmediğini ölçmektedir. Bu ölçü değeri şirketin ERP sisteminde hesaplanmaktadır. Tablo 1 Dickson Kriterleri'nde bulunmamaktadır.

Kalite (K): 1 milyondaki hatalı parça sayısı (Defective Parts Per Million - dppm) yani hatalı üretilen parça sayısı ile toplam kabul edilen parça sayısı oranının 1.000.000 ile çarpılması ile hesaplanmaktadır. Bu ölçü değeri şirketin ERP sisteminde hesaplanmaktadır. Tablo 1 Dickson Kriterleri'nde 1. sırada yer almaktadır.

Paketleme (P): Teslim edilen ürünlerin paketlemelerinin uygun olup olmadığını ölçmektedir. Paketleme puanı, herhangi bir uygunsuz ambalajın alınması veya gözlemlenmesi durumunda tesellüm personeli tarafından ERP sistemine girilmektedir. Tablo 1 Dickson Kriterleri'nde Paketleme Yeteneği adı ile 18. sırada yer almaktadır.

İletişim (İ): Tedarikçinin iletişim kabiliyetinin yeterli olup olmadığını ölçmektedir. İletişim puanı, dönem içerisinde herhangi bir yetersiz iletişim ya da iletişim eksikliği gözlemlenmesi durumunda lojistik personeli tarafından ERP sistemine girilmektedir. Tablo 1 Dickson Kriterleri'nde İletişim Sistemi adı ile 11. sırada yer almaktadır.

4.1.2. Şirket prosedürüne göre tedarikçi seçimi

Şirketin yayınlamış olduğu prosedürde yer alan ve tedarikçi puanı (TP) hesaplamada kullanılan değerlendirme formülü Eşitlik 23'te yer almaktadır. Firma kriter puanını (ZT, M, K, P, İ) 0-100 arasında belirleyip tedarikçi seçimini bu eşitliğe göre hesapladığı tedarikçi puanlarını kullanarak yapmaktadır.

$$TP = 0,30 * K + 0,30 * ZT + 0,10 * P + 0,10 * İ + 0,20 * M \quad (23)$$

4.1.3. Şirket prosedürüne göre tedarikçilerin sıralanması

Uygulama kapsamında firmanın ERP sistemine bakıldığında, Tablo 2'de bulunan 10 adet tedarikçinin ön koşullardan geçtiği belirlenmiş ve bu tedarikçiler ardışık sayılar ile kodlanmıştır. Aynı tabloda şirketin yayınlamış olduğu prosedürde yazılı olan 5 kriter de gösterilmektedir.

Tablo 2. Alternatif ve kriter puanları

Tedarikçi	K	ZT	P	İ	M
T1	76	70	90	90	90
T2	100	75	90	80	100
T3	90	90	90	90	60
T4	100	60	100	90	100
T5	100	90	50	100	90
T6	100	65	80	70	80
T7	85	95	90	80	90
T8	90	70	90	100	80
T9	75	55	90	90	90
T10	78	70	100	90	100

Uygulama kapsamında şirketin prosedüründe bulunan Eşitlik (23)'e göre 10 tedarikçiye ait tedarikçi puanları ve sıralamaları Tablo 3'te yer almaktadır.

Sonuç olarak, firmanın tedarikçileri T5, T2, T7, T4, T3, T10, T8, T6, T1, T9 olarak sıralaması gerektiği ortaya

çıkmiştir. Tek tedarikçi ile çalışmak isterse, T5 tedarikçisi ile çalışması uygun görülmektedir.

4.1.4. TOPSIS ile tedarikçilerin sıralanması

TOPSIS yöntemi firma prosedüründe yer alan 5 kriter kullanılarak uygulanmıştır. Eşitlik (23)'teki kriterlerin katsayıları, bu kriterlerin ağırlıkları olarak kullanılmıştır. TOPSIS yöntemi uygulama adımları aşağıda gösterilmektedir.

Tablo 3. Tedarikçi puanları ve sıralama

Tedarikçi	Tedarikçi Puanı	Sıralama
T1	79.80	9
T2	89.50	2
T3	84	5
T4	87	4
T5	90	1
T6	80.50	8
T7	89	3
T8	83	7
T9	75	10
T10	83.40	6

Adım 1: Karar Matrisi

Ön incelemeden geçen 10 adet tedarikçiden ve şirketin prosedüründeki 5 kriterden oluşan karar matrisi Tablo 4'te yer almaktadır.

Tablo 4. TOPSIS karar matrisi

Alternatifler	Kriter Tipi/Ağırlık				
	Fayda	Fayda	Fayda	Fayda	Fayda
	0.3	0.3	0.1	0.1	0.2
	Kriterler				
	K	ZT	P	İ	M
T1	76	70	90	90	90
T2	100	75	90	80	100
T3	90	90	90	90	60
T4	100	60	100	90	100
T5	100	90	50	100	90
T6	100	65	80	70	80
T7	85	95	90	80	90
T8	90	70	90	100	80
T9	75	55	90	90	90
T10	78	70	100	90	100

Adım 2: Karar Matrisinin Normalizasyonu

Önceki adımda elde edilen karar matrisi kullanılarak Eşitlik (2)'ye göre hesaplanan normalize karar matrisi Tablo 5'te yer almaktadır.

Adım 3: Normalize Matrisin Ağırlıklandırılması

2. adımda elde edilen matris Eşitlik (4) kullanılarak ağırlıklandırılmıştır ve Tablo 6'da gösterilmektedir.

Adım 4: İdeal ve Negatif İdeal Çözüm Değerlerinin Belirlenmesi

İdeal ve negatif ideal çözümler Eşitlik (6) ve (7)'ye göre hesaplanmış ve Tablo 7'de verilmiştir. Tüm kriterler fayda yönlü olduğundan ideal çözüm değerleri en büyük değerlerden oluşmuştur.

Tablo 5. Normalize karar matrisi

Alternatifler	Kriter Tipi/Ağırlık				
	Fayda	Fayda	Fayda	Fayda	Fayda
	0.3	0.3	0.1	0.1	0.2
Kriterler					
	K	ZT	P	İ	M
T1	0.267	0.295	0.323	0.322	0.321
T2	0.352	0.316	0.323	0.286	0.356
T3	0.316	0.379	0.323	0.322	0.214
T4	0.352	0.253	0.359	0.322	0.356
T5	0.352	0.379	0.180	0.358	0.321
T6	0.352	0.274	0.287	0.250	0.285
T7	0.299	0.400	0.323	0.286	0.321
T8	0.316	0.295	0.323	0.358	0.285
T9	0.264	0.232	0.323	0.322	0.321
T10	0.274	0.295	0.359	0.322	0.356

Tablo 6. Ağırlıklı normalize karar matrisi

Alternatifler	Kriter Tipi/Ağırlık				
	Fayda	Fayda	Fayda	Fayda	Fayda
	0.3	0.3	0.1	0.1	0.2
Kriterler					
	K	ZT	P	İ	M
T1	0.080	0.088	0.032	0.032	0.064
T2	0.105	0.095	0.032	0.029	0.071
T3	0.095	0.114	0.032	0.032	0.043
T4	0.105	0.076	0.036	0.032	0.071
T5	0.105	0.114	0.018	0.036	0.064
T6	0.105	0.082	0.029	0.025	0.057
T7	0.090	0.120	0.032	0.029	0.064
T8	0.095	0.088	0.032	0.036	0.057
T9	0.079	0.069	0.032	0.032	0.064
T10	0.082	0.088	0.036	0.032	0.071

Tablo 7. İdeal ve negatif ideal çözüm değerleri

Kriterler					
	K	ZT	P	İ	M
A+	0.105	0.120	0.036	0.036	0.071
A-	0.079	0.069	0.018	0.025	0.043

Adım 5: İdeal ve Negatif İdeal Noktalara Olan Uzaklıkların Hesaplanması

Eşitlik (8) ve (9)'a göre hesaplanan uzaklıklar Tablo 8'de paylaşılmıştır.

Adım 6: İdeal Çözüme Göreli Yakınlık Belirlenmesi ve Tercih Sıralaması

Eşitlik (10)'a göre hesaplanan yakınlık katsayıları ve tedarikçilerin bu katsayılarla göre büyükten küçüğe

sıralaması Tablo 8'de verilmiştir. Maksimum fayda analizine göre tedarikçiler arasında sıralama T7, T5, T2, T3, T10, T4, T8, T6, T1, T9 olarak elde edilmiştir.

Tablo 8. Alternatiflerin göreli uzaklıkları

Alternatifler	S_i^+	S_i^-	C_i	Sıralama
T1	0.041	0.033	0.442	9
T2	0.027	0.049	0.647	3
T3	0.031	0.050	0.612	4
T4	0.044	0.044	0.497	6
T5	0.020	0.057	0.736	2
T6	0.042	0.034	0.446	8
T7	0.019	0.058	0.752	1
T8	0.036	0.034	0.481	7
T9	0.058	0.027	0.317	10
T10	0.039	0.039	0.501	5

4.1.5. VIKOR ile tedarikçilerin sıralanması

İkinci olarak VIKOR yöntemi firma prosedüründe yer alan 5 kriter kullanılarak uygulanmıştır. Eşitlik (23)'teki kriterlerin katsayıları, VIKOR yönteminde kriter ağırlıkları olarak kullanılmıştır. VIKOR yöntemi uygulama adımları aşağıda gösterilmektedir.

Adım 1: Karar Matrisi

VIKOR'da kullanılan karar matrisi TOPSIS yöntemindeki ile aynıdır ve daha önce Tablo 3'te verilmiştir.

Adım 2: Kriterler İçerisinde En İyi (F_i^+) ve En Kötü (F_i^-) Değerlerin Bulunması

Kriterlerin amaç üzerine etkileri fayda yönünde olduğu için Eşitlik (12) kullanılarak hesaplanan f^+ ve f^- değerleri Tablo 9'da verilmiştir.

Tablo 9. En iyi ve en kötü değerler

Kriterler					
	K	ZT	P	İ	M
f^+	100	95	100	100	100
f^-	75	55	50	70	60

Adım 3, 4, 5: Normalize Karar Matrisi, Ağırlıklandırılması, S_i ve S_i Değerleri

Eşitlik (13)'e göre normalize edilen karar matrisi, daha sonra Eşitlik (15)'e göre ağırlıklandırılmıştır. S_i ve R_i değerleri ise Eşitlik (16) ve Eşitlik (17)'ye göre hesaplanmış ve Tablo 10'da verilmiştir.

Tablo 10. S_i ve R_i değerleri

Alternatifler	Kriter Tipi/Ağırlık					S_i	R_i
	Fayda	Fayda	Fayda	Fayda	Fayda		
	0.3	0.3	0.1	0.1	0.2		
	Kriterler						
	K	ZT	P	İ	M		
T1	0.288	0.188	0.020	0.033	0.050	0.579	0.288
T2	0.000	0.150	0.020	0.067	0.000	0.237	0.150
T3	0.120	0.038	0.020	0.033	0.200	0.411	0.200
T4	0.000	0.263	0.000	0.033	0.000	0.296	0.263
T5	0.000	0.038	0.100	0.000	0.050	0.188	0.100
T6	0.000	0.225	0.040	0.100	0.100	0.465	0.225
T7	0.180	0.000	0.020	0.067	0.050	0.317	0.180
T8	0.120	0.188	0.020	0.000	0.100	0.428	0.188
T9	0.300	0.300	0.020	0.033	0.050	0.703	0.300
T10	0.264	0.188	0.000	0.033	0.000	0.485	0.264

Adım 6: Q_i Değerlerinin Hesaplanması

Eşitlik (18)'e göre S^+ , S^- , R^+ , R^- değerleri sırasıyla, 0,188, 0,703, 0,100 ve 0,300 olarak bulunmuştur. q değeri (literatürde genel olarak 0,50 alındığı için) uygulama kapsamında $q=0,5$ olarak alınmış ve Eşitlik (18) ve (19) kullanılarak, Q_i değerleri hesaplanmış ve Tablo 11'de gösterilmiştir.

Tablo 11. VIKOR Q_i değerleri

Alternatifler	S_i	R_i	Q_i ($q=0,50$)
T1	0.579	0.288	0.849
T2	0.237	0.150	0.173
T3	0.411	0.200	0.466
T4	0.296	0.263	0.511
T5	0.188	0.100	0.000
T6	0.465	0.225	0.581
T7	0.317	0.180	0.325
T8	0.428	0.188	0.451
T9	0.703	0.300	1.000
T10	0.485	0.264	0.698

Adım 7: Alternatiflerin Sıralanması ve Koşulların Sınanması

Alternatifler ayrı ayrı S_i , R_i ve Q_i 'ye göre sıralanmış ve koşul sınamaları ile birlikte Tablo 12'de verilmiştir.

Tabloda, $q=0,50$ alınarak bulunan Q_i değeri sıralamasına göre ilk sırada yer alan alternatif, her iki koşulu birlikte sağladığı için bu değerlerin sıralamasına göre tedarikçi seçimi yapılması anlamlıdır. Bu durumda firma VIKOR yöntemine göre tedarikçileri T5, T2, T7, T8, T3, T4, T6, T10, T1, T9 sıralaması ile seçmelidir. Firma tek tedarikçi ile çalışmak isterse VIKOR yöntemine göre T5 tedarikçisini seçmesi uygun olacaktır.

Tablo 12. Alternatiflerin sıralanması

Alternatifler	Sıralama		
	S_i	R_i	Q_i ($q=0,50$)
T1	9	9	9
T2	2	2	2
T3	5	5	5
T4	3	7	6
T5	1	1	1
T6	7	6	7
T7	4	3	3
T8	6	4	4
T9	10	10	10
T10	8	8	8
$Q(A^2)$			0.173
$Q(A^1)$			0.000
$Q(A^2)-Q(A^1)$			0.173
$DQ=1/(10-1)$			0.111
1. KOŞUL			Sağlandı
2. KOŞUL			Sağlandı

4.2. Ek Kriterlerin İncelenmesi

Literatür incelendiğinde, tedarikçi seçimi problemlerinde sıklıkla kullanılan kriterlerin, Dickson Kriterleri (Tablo 1) kapsamında yer aldığı ve seçim sürecinde önemli rol oynadığı değerlendirilmiştir. Bu kriterler, firma yetkilileri ile yapılan görüşmeler doğrultusunda ele alınmış; firma, ideal çözüme ulaşabilmek amacıyla deneyimli personellerle projenin yürütülmesine olanak sağlamıştır. Proje kapsamında, şirkette en az 5 yıl deneyime sahip 3 personele seçim sürecinde önemli olduğunu düşündükleri kriterler sorulmuş ve literatürde yer alan kriterler kendilerine seçenek olarak sunulmuştur. Personeller, oy birliğiyle, Üretim Kapasitesi ve Fiyat kriterlerinin seçim sürecine

dahil edilmesinin faydalı olacağını belirtmiştir. Bu kriterlere ilişkin detaylı bilgilere aşağıda yer verilmiştir.

Üretim Kapasitesi (ÜK): Bu kriter, tedarikçi firmanın gerçekleştireceği üretim faaliyeti için sahip olduğu uygun tezgâh sayısını ifade etmektedir. Üretim sürecinde oluşabilecek arızalara karşı, üretimin yedek tezgâhlar aracılığıyla kesintisiz devam edebilmesi açısından kritik bir öneme sahiptir. Tezgâh sayısına ilişkin bilgiler, ön değerlendirme sürecinde tedarikçiye yöneltilen sorular aracılığıyla elde edilmekte ve ERP sistemine kaydedilmektedir. Tedarikçi firmalar, tezgâh sayısında herhangi bir değişiklik olması durumunda bu durumu firmaya bildirmekle yükümlüdür; bu yükümlülük, yapılan sözleşmelerle güvence altına alınmıştır. Söz konusu kriter, Dickson'ın Kriterleri (Tablo 1) arasında 'Üretim Tesisi ve Kapasitesi' başlığı altında 5. sırada yer almaktadır.

Fiyat (F): Bu kriter, tedarikçilerin teklifleri kapsamında sundukları fiyatları ifade etmektedir. Dickson Kriterleri içerisinde (Tablo 1) 6. sırada yer almaktadır.

Bahsi geçen kriterler mevcut kriter setine eklenerek, TOPSIS ve VIKOR çok kriterli karar verme yöntemleri yeniden uygulanmıştır. Tüm kriterlerin ağırlıkları, projeye katkı sağlayan ve en az 5 yıllık deneyime sahip üç personelin ortak görüşü doğrultusunda belirlenmiştir. Belirlenen ağırlıkların toplamı, çok kriterli karar verme yöntemlerinin gerekliliklerine uygun olarak 1'e eşittir.

4.2.1. TOPSIS yöntemi ile tedarikçilerin yeniden sıralanması

Firmanın prosedüründe belirlenen 5 kriterin yanı sıra 2 ek kriter dahil edilerek, toplamda 7 kriter ile TOPSIS hesaplamaları yeniden yapılmıştır.

Adım 1: Karar Matrisi

Ön koşullardan geçen 10 tedarikçi ve 7 kriterden oluşan karar matrisi aşağıda bulunan Tablo 13'de verilmiştir. Matristeki değerlere ERP'den ulaşılmış olup, ağırlıklar Bölüm 4.2'de belirtildiği gibi yetkili personeller tarafından belirlenmiştir. Ayrıca kriterlerin amaç üzerine fayda ve maliyet yönleri dikkate alınarak TOPSIS yöntemi uygulanmıştır.

Tablo 13. TOPSIS karar matrisi (Ek kriterler ile birlikte)

Alternatifler	Kriter Tipi/Ağırlık						
	Fayda	Fayda	Fayda	Fayda	Fayda	Fayda	Maliyet
	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2
	Kriterler						
	K	ZT	P	İ	M	ÜK	F
T1	76	70	90	90	90	4	536
T2	100	75	90	80	100	6	658
T3	90	90	90	90	60	4	735
T4	100	60	100	90	100	8	584
T5	100	90	50	100	90	10	825
T6	100	65	80	70	80	6	590
T7	85	95	90	80	90	10	960
T8	90	70	90	100	80	4	560
T9	75	55	90	90	90	8	963
T10	78	70	100	90	100	6	836

Adım 2: Karar Matrisinin Normalizasyonu

Karar matrisinden eşitlik (2)'ye göre hesaplanan Normalize Karar Matrisi aşağıdaki Tablo 14'te yer almaktadır.

Adım 3: Normalize Matrisin Ağırlıklandırılması

Adım 2 sonucunda elde edilen matris değerleri kriter ağırlıklarına göre, Eşitlik (4) uygulanarak,

ağırlıklandırılmış normalize karar matrisi Tablo 15'te gösterilmiştir.

Adım 4: İdeal ve Negatif İdeal Çözüm Değerlerinin Belirlenmesi

Eşitlik (6) ve (7)'ye göre hesaplanan ideal ve negatif ideal çözüm kümeleri aşağıda Tablo 16'da bulunmaktadır.

Tablo 14. Normalize karar matrisi (Ek kriterler ile birlikte)

Alternatifler	Kriter Tipi/Ağırlık						
	Fayda	Fayda	Fayda	Fayda	Fayda	Fayda	Maliyet
	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2
	Kriterler						
	K	ZT	P	İ	M	ÜK	F
T1	0.267	0.295	0.323	0.322	0.321	0.182	0.229
T2	0.352	0.316	0.323	0.286	0.356	0.273	0.281
T3	0.316	0.379	0.323	0.322	0.214	0.182	0.314
T4	0.352	0.253	0.359	0.322	0.356	0.364	0.249
T5	0.352	0.379	0.180	0.358	0.321	0.455	0.352
T6	0.352	0.274	0.287	0.250	0.285	0.273	0.252
T7	0.299	0.400	0.323	0.286	0.321	0.455	0.410
T8	0.316	0.295	0.323	0.358	0.285	0.182	0.239
T9	0.264	0.232	0.323	0.322	0.321	0.364	0.411
T10	0.274	0.295	0.359	0.322	0.356	0.273	0.357

Tablo 15. Ağırlıklı normalize karar matrisi (Ek kriterler ile birlikte)

Alternatifler	Kriter Tipi/Ağırlık						
	Fayda	Fayda	Fayda	Fayda	Fayda	Fayda	Maliyet
	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2
	Kriterler						
	K	ZT	P	İ	M	ÜK	F
T1	0,053	0,059	0,032	0,032	0,032	0,018	0,046
T2	0,070	0,063	0,032	0,029	0,036	0,027	0,056
T3	0,063	0,076	0,032	0,032	0,021	0,018	0,063
T4	0,070	0,051	0,036	0,032	0,036	0,036	0,050
T5	0,070	0,076	0,018	0,036	0,032	0,045	0,070
T6	0,070	0,055	0,029	0,025	0,028	0,027	0,050
T7	0,060	0,080	0,032	0,029	0,032	0,045	0,082
T8	0,063	0,059	0,032	0,036	0,028	0,018	0,048
T9	0,053	0,046	0,032	0,032	0,032	0,036	0,082
T10	0,055	0,059	0,036	0,032	0,036	0,027	0,071

Tablo 16. İdeal ve negatif ideal çözüm değerleri (Ek kriterler ile birlikte)

	Kriterler						
	K	ZT	P	İ	M	ÜK	F
A ⁺	0,070	0,080	0,036	0,036	0,036	0,045	0,046
A ⁻	0,053	0,046	0,018	0,025	0,021	0,018	0,082

Fiyat kriteri hariç diğer tüm kriterler fayda odaklıdır, bu nedenle ideal çözüm değeri olarak her bir kriter için en büyük değerler belirlenmiştir. Ancak fiyat kriteri maliyet odaklıdır; yani firmanın daha düşük fiyatlı teklifi seçmesi, maliyetini azaltacağı için ideal çözüm değeri olarak en küçük değer seçilmiştir.

Adım 5: İdeal ve Negatif İdeal Noktalara Olan Uzaklıkların Hesaplanması

Eşitlik (8) ve (9)'ya göre hesaplanan uzaklık ölçüleri Tablo 17'de gösterilmiştir.

Adım 6: İdeal Çözüme Göreli Yakınlık Belirlenmesi ve Tercih Sıralaması

Eşitlik (10) kullanılarak hesaplanan yakınlık katsayıları ile tedarikçilerin büyüktan küçüğe sıralanması Tablo 17'de sunulmuştur. TOPSIS yöntemine göre elde edilen sıralama şu şekildedir: T5, T4, T2, T7, T8, T6, T1, T3, T10, T9. Firma yalnızca tek bir tedarikçi ile çalışmayı planlıyorsa, en yüksek yakınlık katsayısına sahip olan T5 tedarikçisinin tercih edilmesi anlamlı olacaktır.

Tablo 17. Alternatiflerin göreceli uzaklıkları (Ek kriterler ile birlikte)

Alternatifler	S_i^+	S_i^-	C_i	Sıralama
T1	0.039	0.043	0.526	7
T2	0.028	0.042	0.600	3
T3	0.036	0.040	0.525	8
T4	0.031	0.048	0.604	2
T5	0.031	0.048	0.607	1
T6	0.035	0.041	0.538	6
T7	0.039	0.048	0.551	4
T8	0.036	0.043	0.542	5
T9	0.054	0.027	0.330	10
T10	0.041	0.031	0.428	9

4.2.2. VIKOR yöntemi ile tedarikçilerin yeniden sıralanması

VIKOR yöntemi, firma prosedüründe yer alan mevcut kriterlere eklenen yeni kriterlerle birlikte toplam 7

kriter ve 10 tedarikçi alternatifi için uygulanmıştır. Kriter ağırlıkları, TOPSIS yönteminde de kullanılan ve proje kapsamında görevlendirilen personelin ortak görüşü doğrultusunda belirlenen ağırlıklardır.

Adım 1: Karar Matrisi

Karar matrisi TOPSIS yönteminde kullanılan Tablo 13 ile aynıdır.

Adım 2: Kriterler İçerisinde En İyi (F_i^+) ve En Kötü (F_i^-) Değerlerin Bulunması

Eşitlik (11) ve Eşitlik (12)'ye göre ve Tablo 13'deki karar matrisinden hesaplanan f^+ ve f^- değerleri aşağıdaki Tablo 17'de verilmiştir. Fiyat maliyet yönlü olduğu için en iyi değer olarak en küçük değer alınmıştır. Diğer kriterlerde ise en iyi değerler için en büyük değerler alınmıştır.

Tablo 17. En iyi ve En kötü değerler (Ek kriterler ile birlikte)

	Kriterler						
	K	ZT	P	İ	M	ÜK	F
f^+	100	95	100	100	100	10	536
f^-	75	55	50	70	60	4	963

Adım 3, 4, 5: Normalize Karar Matrisi, Ağırlıklandırılması, S_i ve R_i Değerleri
İlk olarak karar matrisi, Eşitlik (13) kullanılarak normalize edilmiştir. Ardından, normalize edilmiş karar matrisinin ağırlıklandırılması için Eşitlik (15) uygulanmıştır. S_i ve R_i değerlerinin hesaplanmasında ise Eşitlik (16) ve Eşitlik (17) kullanılmış; elde edilen sonuçlar Tablo 18'de sunulmuştur.

Adım 6. Q_i Değerlerinin Hesaplanması

Eşitlik (18)'e göre S^+ , S^- , R^+ , R^- değerleri sırasıyla, 0,264, 0,712, 0,100 ve 0,200 olarak bulunmuştur. q değeri (literatürde genel olarak 0,50 alındığı için) uygulama kapsamında $q=0,5$ olarak alınmış ve Eşitlik (18) ve (19) kullanılarak, Q_i değerleri hesaplanmış ve Tablo 19'da gösterilmiştir.

Tablo 18. S_i ve R_i değerleri (Ek kriterler ile birlikte)

Alternatifler	Kriter Tipi/Ağırlık							S_i	R_i
	Fayda	Fayda	Fayda	Fayda	Fayda	Fayda	Maliyet		
	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2		
	Kriterler								
	K	ZT	P	İ	M	ÜK	F		
T1	0.192	0.125	0.020	0.033	0.025	0.100	0.000	0.495	0.192
T2	0.000	0.100	0.020	0.067	0.000	0.067	0.057	0.310	0.100
T3	0.080	0.025	0.020	0.033	0.100	0.100	0.093	0.452	0.100
T4	0.000	0.175	0.000	0.033	0.000	0.033	0.022	0.264	0.175
T5	0.000	0.025	0.100	0.000	0.025	0.000	0.135	0.285	0.135
T6	0.000	0.150	0.040	0.100	0.050	0.067	0.025	0.432	0.150
T7	0.120	0.000	0.020	0.067	0.025	0.000	0.199	0.430	0.199
T8	0.080	0.125	0.020	0.000	0.050	0.100	0.011	0.386	0.125
T9	0.200	0.200	0.020	0.033	0.025	0.033	0.200	0.712	0.200
T10	0.176	0.125	0.000	0.033	0.000	0.067	0.141	0.542	0.176

Adım 7: Alternatiflerin Sıralanması ve Koşulların Sınanması

Alternatifler ayrı ayrı S_i , R_i ve Q_i ye göre sıralanmış ve koşul sınamaları ile birlikte Tablo 20’de verilmiştir.

Tablo 19. VIKOR Q_i değerleri (Ek kriterler ile birlikte)

Alternatifler	S_i	R_i	Q_i ($q=0,50$)
T1	0.495	0.192	0.718
T2	0.310	0.100	0.052
T3	0.452	0.100	0.209
T4	0.264	0.175	0.375
T5	0.285	0.135	0.201
T6	0.432	0.150	0.437
T7	0.430	0.199	0.679
T8	0.386	0.125	0.261
T9	0.712	0.200	10
T10	0.542	0.176	0.690

Tablo 20. Alternatiflerin Sıralaması (Ek Kriterler ile Birlikte)

Alternatifler	S_i	R_i	$Q_i(q=0,50)$
T1	8	8	9
T2	3	1	1
T3	7	2	3
T4	1	6	5
T5	2	4	2
T6	6	5	6
T7	5	9	7
T8	4	3	4
T9	10	10	10
T10	9	7	8
$Q(A^2)$			0.201
$Q(A^1)$			0.052
$Q(A^2)-Q(A^1)$			0.149
$DQ=1/(10-1)$			0.111
1.Koşul			Sağlandı
2.Koşul			Sağlandı

1. ve 2. koşullar birlikte sağlamıştır. Tedarikçi sıralaması T2, T5, T3, T8, T4, T6, T7, T10, T1 ve T9 olarak bulunmuştur. Firma tek tedarikçi ile çalışmak isterse VIKOR yöntemine göre T2 tedarikçisini seçmesi anlamlı olacaktır.

Uygulanan tüm yöntemler ve karşı gelen tedarikçi sıralamaları özet olarak aşağıdaki Tablo 21’de gösterilmiştir.

4.3. Duyarlılık Analizi

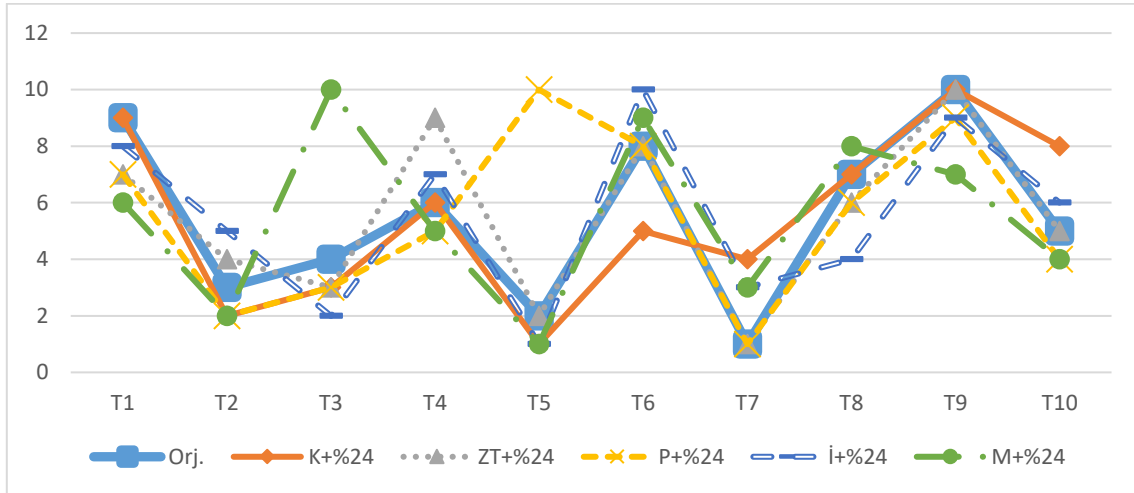
ÇKKV problemlerinde kullanılan yöntemlerin güvenilirliğini ve karar sonuçlarının istikrarını değerlendirmek amacıyla duyarlılık analizleri önemli bir araçtır. Bu çalışma kapsamında, savunma sanayii tedarikçi seçimi problemi için uygulanan TOPSIS ve VIKOR yöntemlerinin duyarlılığı sistematik olarak incelenmiştir. Duyarlılık analizi, hem 5 kriterli hem de 7 kriterli problem versiyonları için ayrı ayrı gerçekleştirilmiştir.

Tablo 21. Yöntem sonuçlarının karşılaştırmalı değerlendirmesi

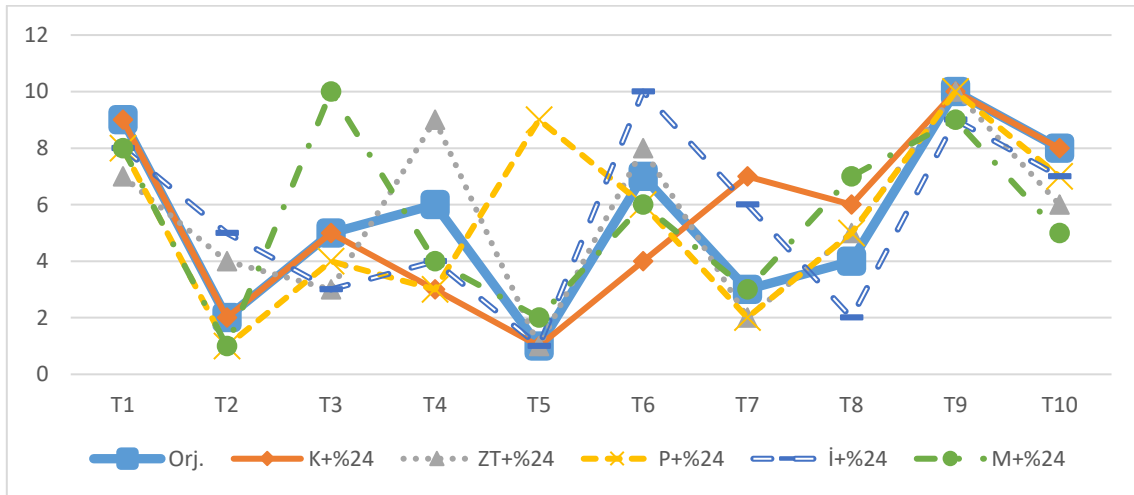
Sıralama	Prosedür	5 KRİTER		7 KRİTER	
		TOPSIS	VIKOR	TOPSIS	VIKOR
1	T5	T7	T5	T5	T2
2	T2	T5	T2	T4	T5
3	T7	T2	T7	T2	T3
4	T4	T3	T8	T7	T8
5	T3	T10	T3	T8	T4
6	T10	T4	T4	T6	T6
7	T8	T8	T6	T1	T7
8	T6	T6	T10	T3	T10
9	T1	T1	T1	T10	T1
10	T9	T9	T9	T9	T9

Analiz sürecinde, ilk olarak her bir kriterin ağırlığı tek tek %24 oranında artırılmış; buna karşılık, diğer kriterlerin ağırlıkları oransal olarak azaltılarak toplam ağırlığın %100’ü geçmemesi sağlanmıştır. Bu yöntemle, bireysel kriter ağırlıklarının karar sonuçlarına etkisi analiz edilmiştir. Böylece, kriter ağırlıklarındaki değişimlerin alternatif sıralamalarını ne ölçüde etkilediği gözlemlenmiştir.

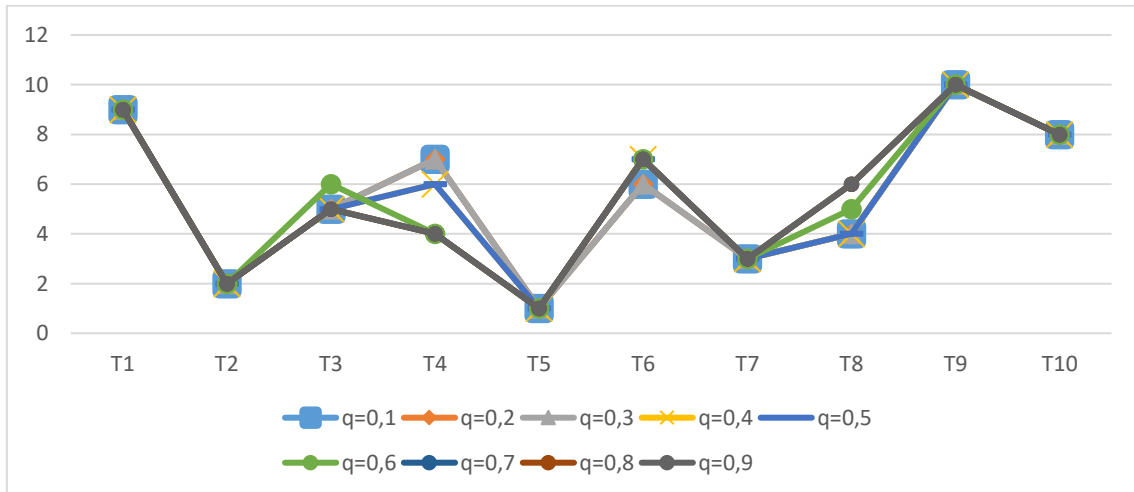
Duyarlılık analizinde her bir kriterin ağırlığı tek tek artırılırken, kalan kriterlerin ağırlıkları orantılı şekilde azaltılmıştır. Bu işlem sırasında, artış oranı olarak %24 tercih edilmiştir. Bu oran, rastgele belirlenmemiş; 5 kriterli problemde bir kriterin ağırlığı artırıldığında geriye kalan 4 kriterin, 7 kriterli problemde ise geriye kalan 6 kriterin ağırlıklarının azaltılması gerektiği göz önünde bulundurulmuştur. %24 artış oranı, hem 4’ün hem de 6’nın tam böleni olması sayesinde, kalan kriter ağırlıklarının orantılı olarak ve kolaylıkla yeniden dağıtılmasına olanak tanımaktadır. Bu sayede hem hesaplama kolaylığı sağlanmış hem de ağırlıkların toplamının %100’ü geçmemesi garanti altına alınmıştır.



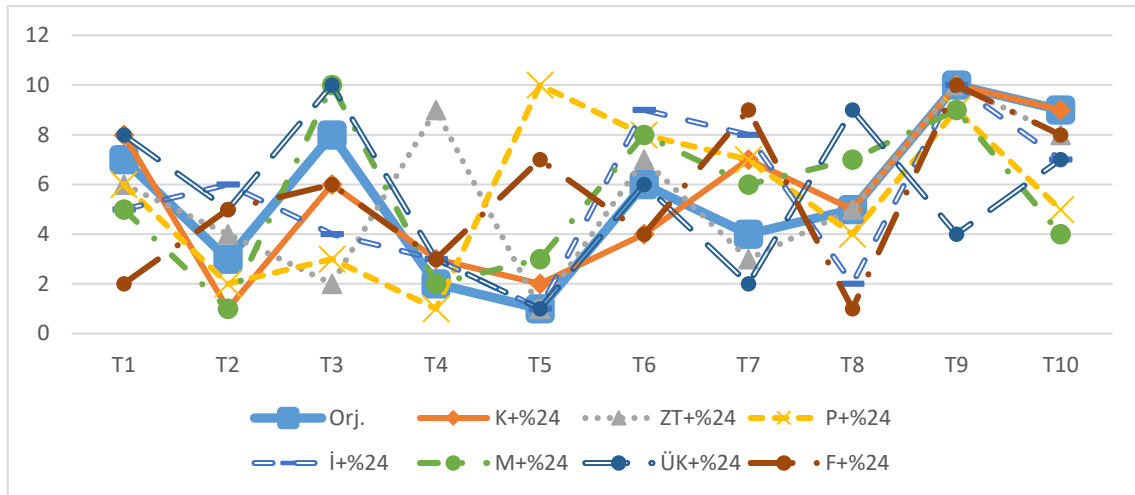
Şekil 4. Kriter ağırlıklarının (5 kriter) değişimine göre duyarlılık analizi (TOPSIS)



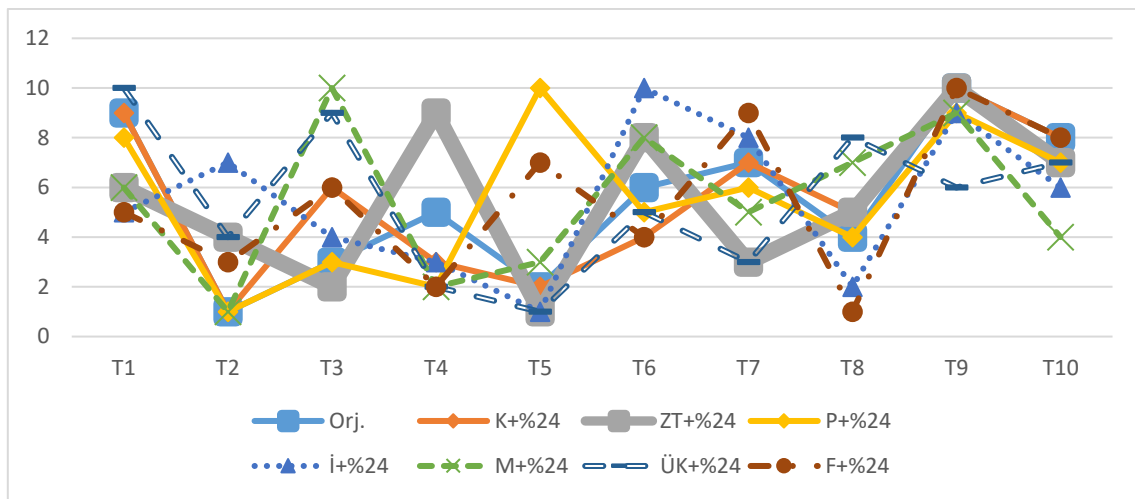
Şekil 5. Kriter ağırlıklarının (5 kriter) değişimine göre duyarlılık analizi (VIKOR)



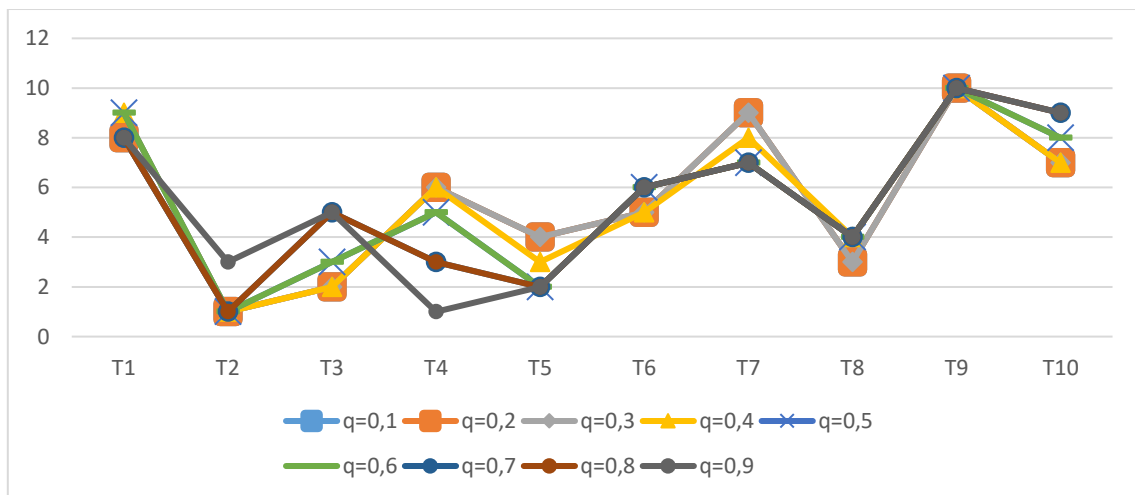
Şekil 6. q parametresinin değişimine göre duyarlılık analizi (5 kriterli VIKOR)



Şekil 7. Kriter ağırlıklarının (7 kriter) değişimine göre duyarlılık analizi (TOPSIS)



Şekil 8. Kriter ağırlıklarının (7 kriter) değişimine göre duyarlılık analizi (VIKOR)



Şekil 9. q parametresinin değişimine göre duyarlılık analizi (7 kriterli VIKOR)

Buna ek olarak, VIKOR yöntemine özgü bir parametre olan ve karar vericinin maksimum gruplama tatmini ile bireysel tatmin arasında dengeyi kontrol eden q parametresi de analiz kapsamına alınmıştır. q parametresi 0,1 ile 0,9 aralığında 0,1'lik artışlarla değiştirilerek elde edilen sıralamalar karşılaştırılmış ve sonuçların parametreye duyarlılığı değerlendirilmiştir. Bu analiz, karar vericinin risk algısına göre sonuçların nasıl farklılaştığını ortaya koymak açısından önem arz etmektedir.

Yapılan duyarlılık analizleri, kullanılan yöntemlerin karar sonuçlarındaki kararlılığını test etmekle kalmamış; aynı zamanda karar sürecinde hangi kriterlerin daha etkili olduğunu da belirlemeye yardımcı olmuştur. Böylece hem yönetsel hem de pratik açıdan daha sağlam bir karar modeli oluşturulması hedeflenmiştir.

Şekil 4.'de elde edilen analiz sonuçlarına göre, T5 ve T7 alternatifleri genel olarak en üst sıralarda yer almakta ve sıralama değişikliklerinden görece az etkilenmektedir. Özellikle T5, kalite, zamanında teslimat, iletişim ve miktar kriterlerinin ağırlığının artırıldığı senaryolarda 1. sırada yer alarak, bu kriterlerdeki güçlü performansını ortaya koymuştur. Ancak paketleme kriterinin ağırlığı artırıldığında sıralaması önemli ölçüde değişmiş ve 10. sıraya kadar gerilemiştir. Bu durum, T5'in paketleme açısından görece zayıf bir alternatif olduğunu, dolayısıyla bu kriterin öneminin artması durumunda toplam performansın olumsuz etkilendiğini göstermektedir.

T7, tüm senaryolarda üst sıralarda (1–4 arası) yer alarak dikkat çekici bir kararlılık sergilemiştir. Kalite, zamanında teslimat ve paketleme kriterlerinde özellikle öne çıkan T7, kriter ağırlıklarındaki değişimlerden en az etkilenen alternatiflerden biri olmuştur. Bu özellik, T7'yi farklı öncelik senaryolarında dengeli ve güvenilir bir seçenek haline getirmektedir.

T3, analizde ilginç bir davranış göstermiştir. Orijinal sıralamada orta düzeyde yer alırken, iletişim kriterinin ağırlığının artırılmasıyla 2. sıraya kadar yükselmiş, buna karşın miktar kriteri ön plana çıktığında 10. sıraya kadar düşmüştür. Bu durum, T3'ün iletişim yönünden güçlü ancak miktar açısından zayıf olduğunu göstermektedir. Benzer şekilde T2, kalite ve paketleme kriterleri ağırlık kazandığında sıralamada yükselmekte, ancak diğer kriterlerde bu avantajını kaybetmektedir. Bu iki alternatif, kriter ağırlıklarına duyarlı, yani kırılgan karar adayları olarak öne çıkmaktadır.

T1, genel olarak orta sıralarda yer almakta, ancak miktar kriterinin ağırlığı artırıldığında nispeten daha

avantajlı konuma gelmektedir. T6 ise orijinal sıralamada alt sıralarda bulunmasına rağmen, kalite ve zamanında teslimat ağırlıklı senaryolarda sıralamasını iyileştirmekte; bu durum T6'nın belirli kriterlerde görece avantajlara sahip olduğunu göstermektedir.

Öte yandan, T9 neredeyse tüm senaryolarda son iki sırada yer almış; bu da söz konusu alternatifin genel olarak düşük performans sergilediğini ve hangi kriter öne çıkarılırsa çıkarılsın güçlü bir konuma ulaşamadığını ortaya koymuştur.

Genel olarak değerlendirildiğinde, kriter ağırlıklarındaki değişimlerin bazı alternatiflerin sıralamasını önemli ölçüde etkilediği, bazılarının ise daha stabil kaldığı gözlemlenmiştir. Özellikle T5 ve T3 gibi alternatiflerin belirli kriterlerdeki ağırlık artışına karşı yüksek duyarlılık sergilediği, buna karşın T7'nin çok daha istikrarlı bir sıralama performansı sunduğu görülmektedir. Bu bulgular, karar vericilerin tedarikçi seçim sürecinde hangi alternatiflerin hangi kriterler açısından avantajlı olduğunu daha net değerlendirmelerine ve önceliklerine uygun en uygun adayı belirlemelerine katkı sağlamaktadır.

Şekil 5.'de elde edilen analiz sonuçlarına göre, bazı alternatiflerin sıralama değişimlerine karşı oldukça duyarlı, bazı alternatiflerin ise daha kararlı olduğunu göstermektedir. Özellikle T5 alternatifi, neredeyse tüm senaryolarda üst sıralarda yer alarak dikkat çekmiştir. T5, orijinal sıralamada 1. sırada yer almakta olup; kalite, zamanında teslimat, iletişim ve miktar kriterlerinin ağırlığının artırıldığı senaryolarda da 1. veya 2. sıradaki yerini korumuştur. Ancak paketleme kriterinin ağırlığının artırıldığı durumda ciddi bir sıralama kaybı yaşayarak 9. sıraya gerilemiştir. Bu durum, T5'in paketleme kriteri açısından zayıf olduğunu ve bu kriterin önem kazanması durumunda tercih edilirliğinin ciddi biçimde azaldığını ortaya koymaktadır.

T2 alternatifi de sıralama açısından oldukça güçlü ve istikrarlı bir profil sergilemiştir. Zamanında teslimat ve paketleme kriterlerinin ağırlığının artırıldığı durumlar dışında genellikle ilk üç içerisinde yer almıştır. Özellikle kalite ve miktar kriterlerinin önem kazandığı senaryolarda 1. veya 2. sırada yer alması, T2'nin bu kriterler açısından avantajlı olduğunu göstermektedir.

T3, analiz boyunca orta sıralarda konumlanmakla birlikte, maliyet kriterinin ağırlığının artırıldığı senaryoda ciddi bir düşüş yaşayarak 10. sıraya gerilemiştir. Bu durum, T3'ün maliyet açısından dezavantajlı olduğunu ortaya koymaktadır. Benzer şekilde T6, genelde alt sıralarda yer almakla birlikte

kalite ve zamanında teslimat kriterleri öne çıktığında sıralamasını kısmen iyileştirmiştir. Bu da alternatifin belirli kriterlere duyarlı olduğunu göstermektedir.

T4, orijinal sıralamada alt orta sıralarda yer almasına rağmen kalite kriterinin artırıldığı senaryoda 3. sıraya kadar yükselmiştir. Bu durum, kalite açısından rekabetçi olduğunu göstermektedir. T8 de iletişim ve miktar kriterleri ön plana çıktığında daha avantajlı hale gelmiş, ancak genel sıralama içinde orta düzeyde kalmıştır.

T7, özellikle zamanında teslimat ve paketleme kriterlerinin ön plana çıktığı senaryolarda üst sıralara çıkmıştır (örneğin $ZT+\%24 \rightarrow 2.$ sıra; $P+\%24 \rightarrow 2.$ sıra). Ancak kalite kriteri ağırlıklandırıldığında sıralaması 7. sıraya gerilemiştir, bu da T7'nin kalite kriterinde daha zayıf olduğunu göstermektedir.

T9, tüm senaryolarda alt sıralarda kalmış ve hiçbir kriter ağırlığı değişiminde anlamlı bir sıralama kazanımı elde edememiştir. Bu durum, T9'un genel olarak düşük performans gösterdiğini ve hangi kriterin önceliklendirildiğinden bağımsız olarak tercih edilmeyecek bir alternatif olduğunu ortaya koymaktadır.

Genel olarak, analiz sonuçları VIKOR yönteminin kriter ağırlıklarındaki değişimlere karşı duyarlılığını açıkça ortaya koymaktadır. Bazı alternatifler (örneğin T5, T2) belirli kriterler altında güçlü performans sergilerken, bazı alternatifler (T3, T4, T7) daha kırılgan bir yapıya sahiptir ve sıralamaları ağırlık değişimlerinden belirgin biçimde etkilenmektedir. Bu analiz, karar vericilere hangi kriterin tedarikçi seçimini daha çok etkilediğini ve hangi alternatiflerin hangi koşullarda daha uygun olduğunu belirlemede yol gösterici olmaktadır.

5 kriterli tedarikçi seçim probleminde gerçekleştirilen duyarlılık analizinde TOPSIS ve VIKOR yöntemleri açısından duyarlılık analizine ilişkin elde edilen bulgular karşılaştırıldığında, her iki yöntemin bazı yönlerden benzer, bazı yönlerden ise farklı duyarlılık profilleri sergilediği gözlemlenmiştir. Her iki yöntemde de T5 alternatifi, çoğu kriter önceliklendirildiğinde yüksek sıralarda yer almış; bu da onun genel olarak güçlü bir aday olduğunu göstermiştir. Ancak her iki yöntemde de paketleme kriterinin ağırlığı artırıldığında T5'in sıralaması belirgin şekilde düşmüş, bu durum alternatifin bu kriter karşısında kırılgan olduğunu ortaya koymuştur. T7 alternatifi, TOPSIS yönteminde daha istikrarlı bir performans sergileyerek tüm senaryolarda üst sıralarda kalmayı başarmış; VIKOR'da ise bazı kriter ağırlıklandırılmalarında

yükselmiş ancak kalite gibi bazı kriterlerde düşüş yaşamıştır. Öte yandan T3 ve T4 gibi alternatifler her iki yöntemde de kriter ağırlıklarına karşı duyarlılık göstermiş, özellikle maliyet ve iletişim gibi kriterlerin öne çıkması durumunda sıralamalarında ciddi oynamalar görülmüştür. Genel olarak, TOPSIS yöntemi daha stabil sıralamalar üretirken, VIKOR yöntemi kriter ağırlıklarındaki değişikliklere karşı daha hassas bir yapı sergilemiştir. Bu fark, VIKOR'un çatışan kriterler arasındaki dengeyi daha belirgin şekilde gözetmesi ve çözümde uzlaşmaya dayalı bir yaklaşım benimsemesinden kaynaklanmaktadır.

Şekil 6.'da ki analize göre, özellikle T1, T2, T5, T7, T9 ve T10 alternatifleri, q parametresi farklılaşsa da sıralamalarını büyük ölçüde korumuş; bu alternatiflerin performanslarının, uzlaşma ve bireysel kriterlere dayalı yaklaşımlar arasında değişmeyen istikrarlı bir yapıya sahip olduğunu göstermektedir.

Bununla birlikte, T3, T4, T6 ve T8 alternatiflerinde q parametresi arttıkça sınırlı da olsa sıralama değişimleri gözlemlenmiştir. Örneğin, T4 alternatifi $q=0,1$ 'de 7. sırada iken, $q=0,6$ ve sonrası için 4. sıraya yükselmiş; bu durum q parametresinin uzlaşma ve bireysel en iyi performans kriterleri arasında karar vermede belirleyici olabileceğini ortaya koymaktadır. Benzer şekilde T8 alternatifi de q değeri yükseldikçe sıralamada bir miktar iyileşme göstermiştir.

Genel olarak, VIKOR yönteminde q parametresi, karar vericinin uzlaşma ile bireysel kriter ağırlığını dengeleme tercihinine bağlı olarak sıralamada küçük oynamalara neden olmakta, ancak temel sıralama yapısını kökten değiştirmemektedir. Bu durum, karar vericilere farklı q değerleri ile esneklik sağlarken, alternatiflerin genel performans trendlerinin stabil kalmasını garantilemektedir.

Şekil 7.'de ki analiz sonuçlarına göre, genel olarak, T5 alternatifi orijinal sıralamada 1. sırada yer almakta olup, kalite, zamanında teslimat, iletişim ve üretim kapasitesi ağırlıklarının artırıldığı durumlarda sıralamada üst sıralarını korumuştur. Ancak paketleme kriterinin ağırlığının artırılmasıyla sıralaması 10. sıraya kadar gerilemiştir, bu durum T5'in paketleme açısından göreceli zayıflığını göstermektedir. Ayrıca, fiyat kriterinin ağırlığının yükseldiği senaryoda T5'in sıralaması 7. sıraya düşmüş, fiyatın önem kazanmasının bu alternatif için bir dezavantaj olduğunu ortaya koymuştur.

T2 alternatifi, kalite ağırlıklandırması artırıldığında 1. sıraya yükselmiş ve maliyet (fiyat) gibi önemli kriterlerde de üst sıralarda konumlanmıştır. Buna

karşın, paketleme ve iletişim kriterlerinde ağırlık artışlarında sıralaması biraz gerilemiş, bu alternatifin bu kriterlere karşı daha hassas olduğunu göstermektedir.

T4 ve T3 alternatifleri, özellikle zamanında teslimat ve üretim kapasitesi kriterlerinde ağırlık artırılması durumunda sıralamada belirgin yükselmeler göstermiştir. T4, zamanında teslimatın önem kazandığı senaryoda 9. sıradan 1. sıraya kadar yükselmiş, bu kriterdeki güçlü performansını ortaya koymuştur. T3 ise miktar ve üretim kapasitesi ağırlıklarının artmasıyla daha üst sıralara çıkmış ancak kalite ve fiyat ağırlıklarında zayıflık yaşamıştır.

T7 ve T8 alternatifleri, fiyat ve iletişim kriterlerinin ağırlıklarında artış yaşandığında sıralamada önemli değişimler göstermiştir. Özellikle fiyat kriterinin öncelik kazandığı durumda T8'in 1. sıraya yükselmesi, maliyet açısından avantajlı olduğunu göstermektedir.

T1, T6, T9 ve T10 alternatifleri genellikle alt-orta sıralarda yer almakla birlikte, ağırlık değişimlerine karşı nispeten sabit bir performans sergilemiştir. Ancak fiyat ve paketleme gibi bazı kriterlerde ağırlık artışı, bu alternatiflerin sıralamalarını kısmen olumsuz yönde etkilemiştir.

Genel olarak, 7 kriterli TOPSIS duyarlılık analizi, kriter ağırlıklarının alternatif sıralamalarında belirgin etkiler yarattığını göstermektedir. Paketleme ve fiyat kriterleri, özellikle bazı alternatiflerin performansında sert dalgalanmalara yol açarken, kalite, zamanında teslimat ve üretim kapasitesi gibi kriterlerin ağırlık artışı, daha istikrarlı alternatiflerin öne çıkmasına imkan sağlamıştır. Bu durum, karar vericilere hangi kriterlerin tedarikçi seçiminde kritik rol oynadığını ve hangi alternatiflerin hangi önceliklerle daha uygun olduğunu net biçimde göstermektedir.

Şekil 8.'de ki analiz sonuçlarına göre, T2 ve T5 alternatifleri genel olarak istikrarlı ve yüksek performans sergilemiştir. T2, kalite ve miktar kriterlerinin ağırlıklarının artırıldığı durumlarda 1. ve 2. sıralarda kalmayı sürdürmüş, fiyat kriteri önceliklendiğinde ise sıralamasında küçük düşüşler gözlenmiştir. T5 alternatifi ise çoğu kriter ağırlıklandırmasında üst sıralarda konumlanmış, ancak paketleme kriterinin ağırlığının artması durumunda 10. sıraya kadar gerilemiş ve bu kritere karşı hassasiyeti ortaya çıkmıştır.

T3 alternatifi, üretim kapasitesi ve miktar kriterlerinin öncelikli olduğu durumlarda üst sıralara yükselirken, kalite ve fiyat kriterlerinde sıralaması belirgin şekilde

düşüş göstermiştir. Bu, T3'ün maliyet ve kalite açısından zayıf olduğu, ancak üretim kapasitesi ve miktar açısından avantajlı olduğunu göstermektedir.

T4 alternatifi, zamanında teslimat ve iletişim kriterlerinin ağırlığı artırıldığında sıralamasını önemli ölçüde iyileştirmiş, bu alanlardaki güçlü performansını ortaya koymuştur. Benzer şekilde, T7 ve T8 alternatifleri de fiyat ve iletişim kriterlerinin ağırlıklandırıldığı durumlarda sıralamada yükselişler yaşamış ve bu kriterlerde avantajlı oldukları anlaşılmıştır.

Öte yandan, T9 alternatifi, tüm senaryolarda alt sıralarda kalmaya devam etmiş, herhangi bir kriter ağırlığının artırılması durumunda da önemli bir sıralama avantajı elde edememiştir. Bu durum, T9'un genel olarak düşük performans gösterdiğinin ve hangi kriterler önceliklendirildiğinden bağımsız olarak tercih edilmemesi gerektiğinin göstergesidir.

Genel olarak, VIKOR yöntemi duyarlılık analizinde, kriter ağırlıklarındaki değişimlerin alternatiflerin sıralamalarında önemli dalgalanmalara yol açtığı gözlemlenmiştir. Özellikle paketleme ve fiyat kriterlerinin ağırlığının artırılması bazı alternatiflerin sıralamalarında sert düşüşlere neden olurken, kalite, zamanında teslimat ve üretim kapasitesi gibi kriterlerin ağırlıklarının artırılması daha istikrarlı ve yüksek performans sergileyen alternatiflerin öne çıkmasını sağlamıştır. Bu sonuçlar, karar vericilerin kriter önceliklerini belirlerken, alternatiflerin hangi kriterlerde güçlü ya da zayıf olduğunu dikkate almalarının önemini vurgulamaktadır.

7 kriterli tedarikçi seçim probleminde gerçekleştirilen duyarlılık analizinde, hem TOPSIS hem de VIKOR yöntemleri kriter ağırlıklarındaki değişimlerin alternatiflerin sıralamalarında önemli etkiler yarattığını göstermiştir. Her iki yöntem de kalite, zamanında teslimat ve üretim kapasitesi gibi kritik kriterlerin ağırlıklarının artması durumunda, bu alanlarda güçlü performans sergileyen alternatiflerin sıralamada yükseldiğini ortaya koymuştur. Ancak TOPSIS yöntemi, genel olarak alternatiflerin sıralamalarında daha istikrarlı ve tutarlı bir yapı sergilerken, VIKOR yöntemi ağırlık değişikliklerine karşı daha hassas tepki vermiş, bu da uzlaşma odaklı yapısından kaynaklanmaktadır. Paketleme ve fiyat kriterlerinde yapılan ağırlık artışları, her iki yöntemde de bazı alternatiflerin sıralamasında belirgin dalgalanmalara yol açmış, ancak bu etkiler VIKOR'da daha belirgin olmuştur. Sonuç olarak, TOPSIS yöntemi karar vericilere daha stabil bir sıralama sunarken, VIKOR yöntemi farklı önceliklendirmelerde alternatiflerin

değişen performanslarını daha ayrıntılı ve esnek şekilde yansıtarak karar sürecine derinlik kazandırmaktadır.

Şekil 9.'daki analiz sonuçlarına göre, özellikle T1, T2 ve T9 alternatifleri q parametresi değişiminden nispeten az etkilenmiş ve genel olarak yüksek veya istikrarlı sıralamalarını korumuşlardır. T2 alternatifi, çoğu durumda 1. sırada yer alırken, $q=0,9$ değerinde 3. sıraya gerilemiş; bu da uzlaşma düzeyindeki artışın alternatifin sıralamasını kısmen etkilediğini göstermektedir. T9 alternatifi ise her durumda 10. sırada kalmış, dolayısıyla performans açısından düşük ve sabit bir konumda olduğu teyit edilmiştir.

Diğer alternatiflerde ise q parametresi ile sıralamalarda daha belirgin değişiklikler gözlenmiştir. Örneğin, T4 alternatifi, düşük q değerlerinde 6. sıradayken, q arttıkça sıralaması yükselmiş ve $q=0,9$ 'da 1. sıraya kadar çıkmıştır. Bu durum, T4'ün uzlaşma kriterine daha uygun bir performans sergilediğine işaret etmektedir. Benzer şekilde, T3 ve T5 alternatifleri de q arttıkça sıralamalarında yükseliş yaşamış, özellikle orta ve yüksek q değerlerinde daha üst sıralarda yer almışlardır.

T7 ve T10 alternatifleri ise q parametresi yükseldikçe sıralamada gerileme göstermiştir. Bu durum, bu alternatiflerin bireysel kriterlerde güçlü olsa da, uzlaşma önceliğinin arttığı durumlarda tercih edilme olasılıklarının azaldığını göstermektedir. Genel olarak, q parametresinin artışı, karar vericinin bireysel kriterlere olan önceliğini azaltıp uzlaşmayı ön plana çıkarması anlamına gelmekte ve bu değişim alternatiflerin sıralamasını etkileyerek bazı alternatiflerin avantajlarını ön plana çıkarmaktadır. Bu sonuçlar, VIKOR yönteminin esnek yapısını ve karar sürecinde farklı uzlaşma seviyelerinin karar sonuçlarına etkisini ortaya koymaktadır.

V. SONUÇ

Günümüzde Türk savunma sanayisinde yaklaşık 30 firma faaliyet göstermekte olup, bu firmaların başarıları hem ulusal hem de uluslararası basında geniş yer bulmaktadır. Savunma sanayi şirketlerinin yurt içi ve yurt dışı pazarlarda rekabet gücünü sürdürebilmesi, stratejik bir öneme sahip olan güçlü bir tedarik zinciri ağına bağlıdır. Tedarikçi firmaların sayıca fazla olduğu, seçim kriterlerinin çok sayıda ve birbiriyle çelişebildiği durumlarda, tedarikçi seçimi karmaşık bir süreç hâline gelmektedir. Bu noktada, bilimsel temellere dayanan ÇKKV yöntemleri önemli bir rol oynamaktadır.

Bu çalışma kapsamında, yeni başlayacak bir proje için ön koşulları sağlayan 10 tedarikçi firma belirlenmiştir. Firma prosedüründe tanımlanan Kalite, Zamanında

Teslimat, Paketleme, İletişim ve Miktar olmak üzere 5 kritere ilişkin veriler, ERP sisteminden temin edilmiştir. Tedarikçi seçimine yönelik karar sürecinde, hem prosedürde yer alan kurallar hem de ÇKKV yöntemlerinden TOPSIS ve VIKOR yöntemleri kullanılmıştır. Şirketin kuruluş aşamasında hazırlanmış olan prosedürde yer alan kriterlerin güncelliğini değerlendirmek amacıyla literatür taraması yapılmış ve firma tarafından yetkilendirilen personel ile gerçekleştirilen görüşmeler sonucunda Fiyat ve Üretim Kapasitesi kriterleri önemli bulunarak değerlendirme sürecine dahil edilmiştir. Böylece, toplam 7 kriter esas alınarak TOPSIS ve VIKOR yöntemleri yeniden uygulanmıştır.

Yapılan tüm hesaplamalar sonucunda elde edilen tedarikçi sıralamaları, özet olarak Tablo 21'de sunulmuştur. Tablo incelendiğinde, farklı yöntemlerin farklı sıralama sonuçları ürettiği görülmektedir. Beş kriterli değerlendirme sonucunda, firma prosedürüne göre sıralamanın başında T5, TOPSIS yöntemine göre T7 ve VIKOR yöntemine göre yeniden T5 yer almaktadır. Yedi kriterli değerlendirmede ise, TOPSIS yöntemi T5'i en uygun tedarikçi olarak belirlerken, VIKOR yöntemi T2'yi ilk sırada değerlendirmiştir.

TOPSIS ve VIKOR yöntemleri ile elde edilen tedarikçi sıralamaları karşılaştırıldığında bazı benzerlikler bulunmakla birlikte sıralama farklılıkları da gözlemlenmiştir. Bu durum, her iki yöntemin karar yapılarındaki farklılıklardan kaynaklanmaktadır. Her iki yöntemde de en yüksek ağırlığa sahip olan kriter "Zamanında Teslimat" ve "Kalite" olmuştur. Bu kriterler, özellikle TOPSIS'te karar noktalarını ideal ve negatif ideal çözüme olan uzaklıklarına göre etkilerken, VIKOR'da uzlaşık çözüm üzerinden, yani grup faydası ve bireysel pişmanlık değerlerinin dengesi üzerinden etkide bulunmuştur. Örneğin, T2 alternatifi, kalite açısından oldukça iyi olmasına rağmen zamanında teslimat açısından görece zayıf performansı nedeniyle TOPSIS'te geriye düşmüştür. Ancak VIKOR yöntemi, bu alternatifi daha ılımlı değerlendirerek daha yüksek bir sıralamada göstermiştir.

TOPSIS yöntemi hesaplamalarında vektör normalizasyonu, VIKOR yöntemi ise doğrusal normalizasyon kullanmaktadır. Ayrıca, bu iki yöntem farklı toplama fonksiyonlarıyla işlem yapmaktadır. TOPSIS, ideal çözüme olan geometrik uzaklığa göre karar verirken; VIKOR, uzlaşma çözümünü esas alır. Bu nedenle, TOPSIS daha "katı" bir sıralama sunarken, VIKOR "dengeleyici" bir bakış açısı sergiler. VIKOR'un pişmanlık ölçütü, zayıf performans gösteren kriterlerdeki farkları daha fazla ön plana

çıkarabilir. Bu farklılıklar, sıralama sonuçlarında çeşitliliğe yol açabilmektedir.

Uygulama sonuçları, firmanın yetkili yöneticileri ile paylaşılmıştır. Yapılan görüşmeler sonucunda, firma prosedüründe yer alan 5 kriter yerine, karar verme sürecinde önemli bir etken olarak değerlendirilen 2 ek kriterin dahil edilmesiyle, toplamda 7 kriter ile tedarikçi seçiminin yapılmasına karar verilmiştir. Ayrıca, prosedürdeki basit kural yerine, bilimsel temellere dayanan ÇKKV yöntemlerinden biri olan TOPSIS veya VIKOR yöntemlerinin kullanılmasının daha faydalı olacağına karar verilmiştir. Yanı sıra, yapılan görüşmelerde, karar vericiler TOPSIS'in sıralamasını daha sezgisel bulduklarını belirtmiştir. Ancak VIKOR'un da özellikle çatışmalı kriterler arasında bir uzlaş sağladığı için değerli bulunduğu ifade edilmiştir. Sonuç olarak, her iki yöntemden elde edilen veriler, birlikte değerlendirilerek daha dengeli bir karar destek yapısı oluşturulmuştur.

Karar verme sürecinde kullanılan TOPSIS ve VIKOR yöntemleri ÇKKV yaklaşımının yaygın tekniklerinden olup, yalnızca tedarikçi seçimi değil; makine seçimi, proje önceliklendirme, strateji belirleme, yer seçimi ve risk değerlendirme gibi farklı karar problemlerinde de etkili biçimde kullanılabilir. Bu yönüyle çalışmanın metodolojik altyapısı farklı sektör ve karar ortamlarına uyarlanabilir niteliktedir. Ancak çalışmanın bazı sınırlılıkları bulunmaktadır. Öncelikle, karar vericilerin (ya da uzmanların) değerlendirmeleri doğrultusunda belirlenen kriter ağırlıkları öznel unsurlar içerebilir ve bu durum, elde edilen sonuçların hassasiyetini etkileyebilir. Ayrıca sınırlı sayıda alternatifin ve kriterin kullanılmış olması, yöntemin daha büyük ölçekli sistemlerdeki uygulanabilirliğini tam olarak yansıtmamaktadır. Gelecekteki çalışmalar, daha geniş veri kümeleriyle ve farklı kriter ağırlıklandırma yöntemleriyle bu tür etkileri değerlendirebilir. Belirsizlik, bilgi eksikliği ya da grup kararı gibi daha karmaşık ortamlarda klasik TOPSIS ve VIKOR yöntemleri bazı kısıtlar barındırabilir. Bu gibi durumlarda Bulanık TOPSIS, Entropi tabanlı ağırlıklandırmalar, DEMATEL-TOPSIS entegrasyonu veya Grup VIKOR gibi gelişmiş versiyonların tercih edilmesi önerilmektedir. Ayrıca, karar vericiler arasındaki görüş ayrılıklarının ve belirsizliğin etkisini azaltmak amacıyla yapay zekâ destekli karar destek sistemleri de geliştirilebilir. Gelecek araştırmalarda yöntemlerin hibritleştirilmiş versiyonları denenerek, daha dinamik ve gerçekçi tedarikçi değerlendirme modelleri tasarlanabilir. Aynı zamanda sektörel farklılıkların etkisi de araştırılarak, ÇKKV yöntemlerinin sektörel hassasiyetlere ne ölçüde duyarlı olduğu sorgulanabilir.

Çalışmada önerilen yöntemlerin, hem firmanın hem de savunma sanayisindeki benzer firmaların tedarikçi seçim süreçlerine katkı sağlayacağı öngörülmektedir. Zamanla konjonktürdeki değişiklikler ve firmanın tedarikçilerden beklediği farklılıklar doğrultusunda, değerlendirme kriterlerinde yeniden düzenlemeler yapılması gerekebilir. Ayrıca, karar verme amacına bağlı olarak farklı ÇKKV yöntemleri kullanılarak karşılaştırmalar yapılabilir. Uygulama, savunma sektöründe faaliyet gösteren birden fazla firma ile genişletilerek, sektördeki önemli kriterler ve bu kriterlerin dereceleri hakkında anketler düzenlenebilir.

VI. ETİK KURUL ONAYI ve ÇIKAR ÇATIŞMASI BEYANI

Hazırlanan makalede etik kurul izni alınmasına gerek yoktur. Hazırlanan makalede herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır.

KAYNAKLAR

- [1] T.C Savunma Sanayii Başkanlığı. (2024). 2024-2028 Stratejik planı. https://www.ssb.gov.tr/Images/Uploads/MyContents/V_20240405145902497059.pdf
- [2] Çakin, E., & Özdemir, A. (2013). Tedarikçi Seçim Kararında Analitik Ağ Süreci (Anp) Ve Electre Yöntemlerinin Kullanılması Ve Bir Uygulama. Afyon Kocatepe Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi, 15(2), 339-364.
- [3] Dağdeviren, M., Eraslan, E., Kurt, M., & Dizdar, E. N. (2005). Tedarikçi Seçimi Problemine Analitik Ağ Süreci İle Alternatif Bir Yaklaşım. Teknoloji, 8(2).
- [4] Dickson, G. W. (1966). An analysis of vendor selection systems and decisions. Journal of purchasing, 2(1), 5-17.
- [5] Yılızati, T., & Yazıcıoğlu, O. (2019). Çok Kriterli Karar Verme Yöntemleri ile Global Tedarikçi Seçimi: Otomotiv Yan Sanayi'de Bir Uygulama. Avrasya Sosyal ve Ekonomi Araştırmaları Dergisi, 6(5), 296-307.
- [6] Toksoy, M. E. (2012). Çok nitelikli karar verme yöntemleri ve VIKOR yöntemi ile bir uygulama. Yüksek lisans tezi, İstanbul Üniversitesi, Türkiye
- [7] Arslan, R., & Bircan, H. (2018). Alternatif sayısının çok kriterli karar verme yöntemlerinin sonuçlarına etkisi. Bartın Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi, 9(18), 239-264.
- [8] Oğuz, M. A. (2018). AHP ve TOPSIS yöntemi ile tedarikçi seçimi. İstanbul Ticaret Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 17(34), 69-89.
- [9] Soygüder, S., & Geçer, E. (2023). Application of Multi-Criteria Decision-Making Methods in Supplier Selection. Journal of Optimization and Decision Making, 2(2), 349-356.
- [10] Evcioğlu, H. E., & Kabak, M. (2023). Supplier selection in supply chain network using MCDM methods. Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences, 41(1), 1-16.

-
- [11] Rasmussen, A., Sabic, H., Saha, S., & Nielsen, I. E. (2023). Supplier selection for aerospace & defense industry through MCDM methods. *Cleaner Engineering and Technology*, 12, 100590.
- [12] Akpınar, M. E. (2021). An Application on The Most Suitable Supplier Selection with Fuzzy TOPSIS and Fuzzy VIKOR Methods. *Dokuz Eylül Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 23(2), 627-640.
- [13] Yalçın, A. S., & Kılıç, H. S. (2018). A model for supplier selection under environmental considerations. In *16th International Logistics and Supply Chain Congress October* (pp. 18-20).
- [14] Soba, M., & Eren, K. (2011). Topsis Yöntemini Kullanarak Finansal Ve Finansal Olmayan Oranlara Göre Performans Değerlendirilmesi, Şehirlerarası Otobüs Sektöründe Bir Uygulama. *Sosyal Ekonomik Araştırmalar Dergisi*, 11(21), 23-40.
- [15] Subaşı, H. (2011). Çok kriterli karar vermede kullanılan TOPSIS ve AHP yöntemlerinin karşılaştırılması ve bir uygulama. Yüksek lisans tezi, Marmara Üniversitesi, Türkiye.
- [16] Ertuğrul, İ., & Özçil, A. (2014). Çok kriterli karar vermede TOPSIS ve VIKOR yöntemleriyle klima seçimi. *Çankırı Karatekin Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 4(1),
- [17] Karaatlı, M., Ömürbek, N., & Köse, G. (2014). Analitik Hiyerarşi Süreci Temelli Topsis Ve Vikor Yöntemleri ile Futbolcu Performanslarının Değerlendirilmesi. *Dokuz Eylül Üniversitesi İktisadi İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 29(1), 25-61.
- [18] Yıldız, A. (2014). Bulanık VIKOR yöntemini kullanarak proje seçim sürecinin incelenmesi. *Anadolu Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 14(1), 115-127.
- [19] Yücel, Y. (2018). Çok kriterli karar verme teknikleri ile tekstil sektöründe en uygun tedarikçi seçimi ve bir yazılım uygulaması. Yüksek lisans tezi, Bartın Üniversitesi, Türkiye.

Entropi Tabanlı Gri İlişkisel Analiz Modeliyle En Uygun İHA Modelinin Tarım Faaliyetleri İçin Değerlendirilmesi

Evaluation of the Most Appropriate UAV Model for Agricultural Activities with Entropy-Based Grey Relational Analysis Model

Beyzanur ÇAYIR ERVURAL ¹ 

¹Necmettin Erbakan Üniversitesi, Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Havacılık Yönetimi Bölümü Konya, Türkiye

Öz

Tarım faaliyetleri insanlığın devamı için önemli olup üretimde sürdürülebilirliğin sağlanmasında büyük rol oynamaktadır. Teknolojik gelişmeler sayesinde tarım faaliyetlerinde ve arazi çalışmalarında iyileşme ve verimlilik artmıştır. Hassas tarım uygulamaları sayesinde uzaktan kontrol ve algılama sistemleri ile insansız hava araç (İHA) teknolojileri kullanılarak daha etkili tarım yönetim stratejileri geliştirilmiştir. Güncel teknolojiler sayesinde hem verimlilik artmış hem de ekonomik ve güvenilir biçimde uydu uzay teknoloji entegrasyonu ile geleneksel yöntemlerin dışına çıkılmaktadır. İHA'ların farklı alanlardaki başarısı göz önünde bulundurulduğunda, tarımsal faaliyetlerde etkinliğin artırılmasına yönelik en uygun İHA modelinin belirlenmesi, önemli bir karar verme problemi. Problemin karmaşık yapısı, birden fazla kriter ve alternatifi barındırması, verilerdeki belirsizlik nedeniyle karar verme ve gri ilişkisel analiz (GİA) yaklaşımı kullanılarak başarılı sonuçlar elde edilmektedir. Öncelikle İHA teknolojisinin tarım sektörü üzerindeki etkilerini daha geniş bir perspektiften değerlendirmek için PEST (politik, ekonomik, sosyal ve teknolojik) analizi yapılmıştır. Ardından çok boyutlu ve stratejik önemde bir karar problemi olması nedeniyle daha güvenilir sonuç sunması beklendiği için iki aşamalı bir yaklaşım olan entropi tabanlı gri ilişkisel analiz yaklaşımı ile ideal İHA modeli araştırılmaktadır. Buna göre A1 modeli en uygun İHA tipi olarak ortaya çıkmış bunu A6, A4, A2, A3 ve A5 modelleri izlemektedir. Bu çalışmadan elde edilen sonuçların araştırmacılara ve tarım faaliyetlerinde aktif rol alanlara, sunduğu analitik yaklaşımıyla yardımcı olması beklenmektedir.

Anahtar Kelimeler: Gri ilişkisel analiz, entropi, tarımsal verimlilik, PEST analizi, İHA

Abstract

Agricultural activities are important for the continuation of humanity and play a major role in ensuring sustainability in production. Thanks to technological developments, improvements and efficiency in agricultural activities and land studies have increased. Thanks to precision agriculture practices, more effective agricultural management strategies have been developed by using remote control and sensing systems and unmanned aerial vehicle (UAV) technologies. In this way, thanks to current technologies, both productivity has increased and traditional methods are overcome with the integration of satellite space technology in an economical and reliable way. Considering the success of UAVs in various fields, determining the most suitable UAV model to improve efficiency in agricultural activities is a significant decision-making problem. Due to the complex nature of the problem, multiple criteria and alternatives, and uncertainty in the data, successful results are obtained by using decision making and grey relational analysis (GRA) approach. First, a political, economic, social and technological (PEST) analysis was conducted to assess the impacts of drone technology on the agricultural sector from a broader perspective. Then, since it is a multidimensional and strategically important decision problem, the ideal UAV model is investigated with the entropy-based grey relational analysis approach, which is a two-stage approach since it is expected to provide more reliable results. Accordingly, the A1 model emerged as the most suitable UAV type, followed by the A6, A4, A2, A3 and A5 models. The results obtained from this study are expected to help researchers and those who take an active role in agricultural activities with the analytical approach it offers.

Keywords: : Grey relationship analysis, entropy, agricultural productivity, PEST analysis, UAV

I. GİRİŞ

İnsansız hava aracı (İHA) teknolojilerindeki gelişmeler sayesinde ihtiyaç duyulan pek çok alanda hem stratejik hem de operasyonel seviyede yüksek verimlilikte ve hızlı bir şekilde sonuçlar alınabilmektedir. Özellikle yaygın olarak askeri alanda kullanılmakla birlikte keşif, trafik gözlem, yangın söndürme, tarımda, acil tıbbi hizmetlerde, arama kurtarma çalışmalarında, kolluk kuvvetlerinde, ulusal güvenlik ve lojistik gibi temel belli başlı uygulama alanları mevcuttur [1].

Drone olarak da ifade edilebilen İHA'lar, kullanımlarının artmasıyla birlikte, ülkeler bu araçları havacılık düzenleme çerçevelerine dahil etmekte ve ilgili mevzuatlar sürekli olarak gözden geçirilmektedir. Dünya genelinde, her türlü İHA için farklı düzenleyici standartlar uygulanmaktadır. Dronelar mekanik ve elektronik bileşenlerden oluşmaktadır. Buna göre sensor, uygun kamera seçimi, hız, dayanıklılık, pil ömrü gibi unsurlar dronelerin performansını ve tercih edilebilirliğini etkilemektedir. Drone kullanımı kısıtlayan en önemli sınırlılıklardan biri pil süresinin yeterli olmamasıdır [1]. Şuan pil teknolojisi için yapılan çalışmalarda havada şarj edilmesine yönelik ve alternatif batarya teknolojileriyle havada kalış süresini uzatmaya yönelik iyileştirmeler devam etmektedir [2].

Bu çalışmada, geniş bir kullanım alanına sahip olan İHA'ların tarımsal arazilerdeki kullanımına odaklanılmıştır. Tarım arazilerinde verimliliğin artırılması ve işgücüne bağımlılığın azaltılması için otonom sistemlerin yani teknolojik ürünlerin tarım sahasında yaygın ve pratik biçimde uygulanması gerekmektedir. Buna göre tarım piyasasında rakiplere göre daha avantajlı hale gelinmektedir. Ayrıca tüm dünyanın takip ettiği İHA teknolojisinin tarımsal uygulamaları ile küresel dünya ile paralel ilerlenebilmektedir. Bu amaçla, öncelikle, bu teknolojinin tarım sektörü üzerindeki etkilerini daha kapsamlı bir bakış açısıyla değerlendirebilmek amacıyla PEST (politik, ekonomik, sosyal ve teknolojik) analizi gerçekleştirilmiştir. İncelenen konu çok sayıda farklı tipte unsuru (sayısal/sözel veri tipi) içerdiği, verilerde belirsizlikler bulunduğu ve yapısı karmaşık olduğu için analitik karar verme yöntemlerine başvurulması gerekmiştir. Buna göre hangi İHA modelinin tarımsal uygulamalarda başarılı olduğu değerlendirilmiş ve bu değerlendirmenin objektif ve etkin biçimde olabilmesi için iki aşamalı Entropi temelli GİA ilişkisel analiz modeli kullanılmıştır.

İHA'ların teknik donanım uzaktan komuta edilmesi ya da otonom olarak kendi güç sistemiyle çalışabilmesi ve kullanım alanına göre gövdeye takılan yük desteği ile çeşitli görevlerde kullanılabilir. Buna göre

dikey uçuş yapan, yatay uçuş yapan, iki özelliği birleştiren döner kanatlı araçlar olarak tasarlanan modelleri mevcuttur. Farklı teknik özelliklerde çeşitli tasarımlarla çeşitli amaçlarla kullanılmaktadır. Çeşitli görevler için tasarlanan farklı şekil ve boyutlarda, farklı kanat ve motor yapılarına sahip İHA'lar geliştirilmiştir. Buna göre sabit kanatlı, döner kanatlı ve hareketli kanat olmak üzere üç farklı İHA kategorisine vurgulama yapılmaktadır:

Sabit kanatlı İHA'lar, göç eden kuşlar gibi kısa mesafelerde uçabilen, aerodinamik tasarımları sayesinde sürüklenmeyi minimize edebilen ve dikey dengede kalabilen hava araçlarıdır [2]. Bu İHA'lar, özellikle araştırma ve geliştirme çalışmalarında büyük bir ilgi görmektedir. Genellikle, sabit kanatlı İHA'lar pervane, motor, ana gövde ve kanatlardan oluşur [2]. Döner kanatlı İHA'lar, üzerlerindeki rotorlar aracılığıyla ürettikleri kuvveti dengeleyerek uçabilen hava araçlarıdır [2]. Yüksek manevra kabiliyeti ile belirli yörüngeleri izleyebilme, dikey iniş ve kalkış yapabilme, ayrıca havada asılı kalabilme gibi özelliklere sahiptirler. Bu özellikleri sayesinde döner kanatlı İHA'lar, geniş bir kullanım alanına sahip olup, pist ya da geniş alan gerektirmediği için araştırma merkezleri ve üniversiteler tarafından havadan yapılan robotik araştırmalarda yaygın olarak tercih edilmektedir [3]. Hareketli kanatlı İHA'lar, kuşlar ve böceklerin kanat çırpma hareketlerinden ilham alarak tasarlanmış hava araçlarıdır. Bu araçlar, biyolojik yapıları kuşlardan ve böceklerden alıp, uçuş dinamikleri açısından diğer İHA'lara göre daha karmaşık bir yapıya sahiptir [4]. Çoğunlukla elle kontrol edilen bu İHA'lar, ileri yönde başarılı bir şekilde uçuş gerçekleştirebilmektedir. Ayrıca, dikey iniş ve kalkış yapabilme, havada asılı durabilme gibi özellikleri sayesinde geniş bir kullanım potansiyeline sahiptir.

Havacılık konusunda atılan her adım ülkelerin birbirleriyle olan üstünlük yarışında önemli olmaktadır. Çünkü içinde bulunulan koşullarda hava sahalarının yarıştığı ve egemenlik sağlandığı en büyük arena olarak ifade edilmektedir. Bu çalışmada oldukça geniş uygulama alanı olan İHA'ların tarımsal arazi kullanımlarındaki uygulamalarına değinilecektir. Öncelikle bu teknolojinin tarım sektörü üzerindeki etkilerini daha geniş bir perspektiften değerlendirmek için PEST (politik, ekonomik, sosyal ve teknolojik) analizi yapılmıştır. Kapsadığı çok sayıda nicel ve nitel faktör varlığı, verilerdeki belirsizlik ve karmaşık yapısı nedeniyle analitik karar verme yöntemlerine ihtiyaç vardır. Bu çalışmada Entropi temelli GİA ilişkisel analiz yönteminden yararlanılarak tarımsal faaliyetlerde en uygun İHA modeli belirlenmeye

çalışılacaktır. Özellikle zirai ve tarımsal süreçlerin planlamasında bu çalışmanın yol gösterici olması beklenmektedir. Entropi yönteminin objektif bir ağırlıklandırma yöntemi olması ve belirsizlik ve eksik veri altında karar vermede GİA yönteminin başarılı sonuçlar sağlaması nedeniyle tercih edilmiştir.

Bu çalışmanın ikinci kısmında tarımda İHA uygulamalarından ve PEST analizi ile değerlendirilmesinden bahsedilecektir. Üçüncü kısımda genel olarak literatür araştırması ele alınmaktadır. Dördüncü kısımda kullanılan yöntemler açıklanmış ve beşinci kısımda iki aşamalı yöntemin uygulanmasından bahsedilmiştir. Altıncı kısımda elde edilen analiz sonuçları paylaşılmış ve son kısımda sonuç ve gelecek araştırmalara yönelik öneriler verilmiştir.

II. TARIMDA İHA UYGULAMALARININ ÖNEMİ ve PEST ANALİZİ İLE DEĞERLENDİRİLMESİ

Tarımda İHA uygulamaları son yıllarda büyük bir gelişme göstermiş ve bu teknolojiler tarım sektörünün farklı alanlarında önemli katkılar sunmaktadır. İHA'lar, tarımda kullanılan geleneksel yöntemlerin yerine daha verimli, hızlı ve hassas çözümler sunmaktadır. Tarımda İHA uygulamalarının önemini anlatan bazı başlıca hususlar şu şekilde açıklanabilir:

- **Verimlilik Artışı:** İHA'lar, tarlaların havadan hızlı bir şekilde izlenmesini sağlayarak, ürünlerin büyüme durumunu, sulama ihtiyacını, hastalık veya zararlıların varlığını daha hızlı tespit etmeye yardımcı olur. Bu da üreticilerin daha etkin ve zamanında müdahalelerde bulunmasına olanak tanır. İHA'ların tarımda kullanımıyla ilgili yapılan araştırmalar ve pilot projeler, verimlilik artışlarının ciddi oranda olduğunu göstermektedir [5]. Özellikle hassas tarım uygulamaları sayesinde toprak sağlığı, bitki gelişimi ve sulama ihtiyaçları daha doğru bir şekilde tespit edilebilmiştir.
- **Hassas Tarım:** İHA'lar, tarlalar üzerinde yüksek çözünürlüklü görüntüler elde ederek, bitkilerin gelişim süreçlerini detaylı şekilde izler. Böylece, her bitkinin ihtiyacına göre farklı müdahaleler yapılabilir. Bu da tarımda su, gübre ve ilaç kullanımını optimize ederek maliyetleri düşürür ve çevreye olan etkileri azaltır. FAO (Birleşmiş Milletler Gıda ve Tarım Örgütü) raporlarına göre, tarım sektörü küresel su tüketiminin yaklaşık %70'ini kullanmaktadır [6]. İHA'lar sayesinde su yönetimi daha hassas hale gelirken, su tüketiminin ciddi oranda azaldığı görülmüştür.

- **Zararlı Tespiti ve Hastalık İzleme:** İHA'lar, tarım alanlarında potansiyel zararlıları veya hastalıkları erken aşamalarda tespit edebilir. Bu sayede, kimyasal ilaçların gereksiz yere kullanılmasının önüne geçilerek, hem maliyet düşmekte hem de çevreye zarar verilmemektedir. Bitki hastalıkları ve zararlılar hakkında erken uyarı sistemlerinin daha hızlı ve doğru sonuç verdiği ortaya çıkmıştır[7]. Bu sayede, çiftçiler hastalıkları erken tespit edip gerekli tedbirleri daha hızlı alabilmektedir. İHA teknolojileri sayesinde pestisit kullanımının azaldığı ortaya konulmuştur.
- **Veri Toplama ve Analiz:** İHA'lar, çok sayıda sensörle donatılarak, tarım alanlarındaki verileri (toprak nemi, sıcaklık, ürün sağlığı, vb.) toplar ve bu veriler analiz edilir. Bu sayede, tarım yönetimi daha bilinçli bir şekilde yapılabilir. Araştırmalara göre, gübre dağıtımı ile geleneksel yöntemlere kıyasla yaklaşık %30 daha verimli sonuçlar elde edilmiştir [8].
- **Zaman ve İş Gücü Tasarrufu:** İHA'lar, özellikle geniş arazilere sahip tarım işletmeleri için çok büyük bir zaman ve iş gücü tasarrufu sağlar. Uçuşlar hızlı bir şekilde gerçekleştirilebilir ve insan gücü gereksinimi azalır. Tarımda geniş arazilerde yapılan çalışmalarda, iş gücü ve zaman tasarrufu açısından İHA'ların büyük katkı sağladığı görülmektedir. Özellikle geniş alanların izlenmesinde, geleneksel yöntemlere göre ciddi bir iş gücü tasarrufu sağlanmıştır [9].
- **İklim Değişikliği ile Mücadele:** Tarımda kullanılan su ve enerji kaynaklarının daha verimli kullanılması, İHA'ların en büyük katkılarının biri olmuştur. Bu, iklim değişikliğiyle mücadeleye de dolaylı olarak katkı sağlamaktadır. İHA'lar kullanılarak yapılan tarla izleme işlemleriyle, toprak sağlığına ilişkin daha fazla veri toplanmış ve ürün gelişiminde %10-15 arasında bir iyileşme sağlanmıştır. Tarımda İHA kullanımı, karbon salınımını önemli oranda azaltabilir. Bu, çevreye daha az zarar verilmesine ve sürdürülebilir tarım uygulamalarının teşvik edilmesine olanak tanımaktadır [10].
- **Erken Uyarı Sistemi:** Tarım alanındaki doğal afetler, kuraklık, sel gibi durumlar hakkında erken uyarılar alınabilir. Bu, üreticilerin önceden hazırlık yapmalarına ve olası zararları en aza indirmelerine olanak tanır.

Sonuç olarak, İHA' lar tarım sektörünü dönüştüren önemli bir araç haline gelmiş ve üreticilere daha verimli, çevre dostu ve sürdürülebilir bir tarım yapma imkanı sunmaktadır. İHA' lar, tarımda verimlilikten çevre dostu uygulamalara kadar pek çok açıdan büyük katkı sağlamaktadır. İstatistiksel veriler ve akademik çalışmalar, bu teknolojilerin tarım sektöründe verimlilik artışı, maliyet düşüşü ve çevresel sürdürülebilirlik sağlama konularında ne denli etkili olduğunu göstermektedir. Bu veriler, tarımda İHA uygulamalarının gelecekteki potansiyelinin ve sektördeki yerinin daha iyi anlaşılmasına yardımcı olmaktadır.

Tarımda İHA kullanımı için bir PEST analizi yapmak, bu teknolojinin tarım sektörü üzerindeki etkilerini daha geniş bir perspektiften değerlendirmek için önemlidir. PEST analizi, dış faktörlerin (Politik, Ekonomik, Sosyal ve Teknolojik faktörler) bir sektöre nasıl etki edebileceğini inceleyen bir yöntemdir. Tarımda İHA kullanımını bu faktörler açısından ele alalım:

Politik Faktörler

Tarımda İHA kullanımının politik boyutu, hükümetlerin ve düzenleyici organların belirlediği yasalar, teşvikler ve düzenlemelerle ilgilidir.

- **Tarım Politikaları ve Teşvikler:** Çiftçilerin İHA teknolojilerini benimsemeleri için devlet destekleri, sübvansiyonlar ve teşvikler önemli bir faktördür. Bazı ülkelerde, tarımda dijitalleşme ve teknolojik yeniliklere yönelik teşvikler mevcuttur. Örneğin, Avrupa Birliği, hassas tarım uygulamalarını teşvik etmek için fonlar sunmaktadır.
- **Düzenlemeler ve Lisanslar:** İHA kullanımına dair belirli hava sahası düzenlemeleri ve güvenlik protokolleri vardır. İHA'ların kullanımı, hava güvenliği ve özel mülk hakları ile ilgili yasal kısıtlamalarla karşılaşabilir.
- **Çevre Düzenlemeleri:** İHA'lar, çevre dostu tarım uygulamaları için teşvik edilebilir. Ancak, aşırı kullanım veya yanlış yönetim, çevreyi olumsuz etkileyebilir, bu da düzenleyicilerin dikkatini çeker.

Örneğin, Türkiye'de Tarım ve Orman Bakanlığı, İHA'ların tarımda kullanımını denetleyen düzenlemeler yayınlamıştır. Ayrıca, çiftçilerin İHA alımlarını kolaylaştırmak için belirli finansal destekler de sağlanmaktadır.

Ekonomik Faktörler

Tarımda İHA kullanımı, ekonomik koşullar ve tarım sektöründeki maliyet yapılarıyla doğrudan ilişkilidir.

- **Yatırım ve İşletme Maliyetleri:** İHA teknolojilerinin başlangıç maliyetleri yüksek olabilir. Ancak, uzun vadede gübre, ilaç ve su gibi kaynakların daha verimli kullanılması, maliyetleri düşürebilir. İHA'lar, geniş alanlarda hızlı veri toplama ve işlem yapma kapasitesi sayesinde iş gücü ve zaman tasarrufu sağlar.
- **Kâr Artışı:** İHA kullanımı, verimliliği artırarak çiftçilerin ürünlerinden elde ettiği kârı artırabilir. Hassas tarım sayesinde gereksiz harcamalar ve kaynak israfı azaltılabilir.
- **Finansman ve Erişim:** İHA'ların tarımda yaygınlaşması, tarım işletmeleri için finansman zorluklarıyla da ilgilidir. Küçük ölçekli çiftçiler için İHA'lar pahalı olabilir. Ancak finansman modelleri, leasing ya da kooperatif bazlı çözümlerle bu engel aşılabılır.

Örneğin, Hindistan'da, hükümetin sağladığı tarımda dijitalleşme teşvikleri ve tarımsal krediler, İHA'ların daha yaygın bir şekilde kullanılmasını sağlamaktadır.

Sosyal Faktörler

Tarımda İHA kullanımının sosyal etkileri, çiftçilerin bu yeni teknolojilere adaptasyonu ve toplumun teknolojiyi kabul etme seviyesini kapsar.

- **Eğitim ve Bilinçlenme:** Çiftçilerin İHA kullanımına yönelik eğitimi önemli bir faktördür. İHA teknolojisi, yeni ve gelişen bir alan olduğu için, çiftçilerin bu konuda bilinçlenmesi ve eğitim alması gerekebilir. İHA'ların kullanımı, çiftçiler arasında dijital okuryazarlık seviyesini artırabilir.
- **Genç Tarım İşgücü:** Genç nüfusun tarım sektörüne ilgisi, teknolojiye olan yatkınlıkları ile artabilir. İHA'lar, genç nesli tarıma çekebilecek bir araç olabilir. Dijital tarım, yeni nesil için cazip bir kariyer alanı yaratabilir.
- **Toplumun Teknolojiye Uyumu:** Tarımda İHA kullanımına karşı toplumsal direnç olabilir. Bazı çiftçiler, teknolojiye karşı temkinli yaklaşabilir ve geleneksel yöntemlere sadık kalabilir. Bu, sosyal uyum ve kabul edilme açısından bir zorluk yaratabilir.

Örneğin, Hollanda'da, tarımda yüksek teknoloji kullanımına karşı halkın büyük bir ilgisi bulunmaktadır ve çiftçiler İHA'ları kullanmak için eğitim programlarına katılmaktadır.

Teknolojik Faktörler

Tarımda İHA kullanımı, teknolojinin gelişimi ve inovasyonu doğrudan ilişkilidir.

- **Teknolojik Gelişmeler:** İHA'lar, yüksek çözünürlüklü kameralar, sensörler ve veri işleme sistemleri gibi gelişmiş teknolojilere dayanır. Bu teknolojiler zaman içinde daha erişilebilir hale gelmekte ve maliyetler düşmektedir. Ayrıca, yapay zeka ve makine öğrenimi gibi yeni teknolojilerle İHA'lar daha verimli hale gelmektedir.
- **Veri Analizi ve Yapay Zeka:** İHA'lar tarafından toplanan verilerin doğru bir şekilde analiz edilmesi ve işlenmesi, tarımsal verimliliği artırabilir. Bu,

tarımda veri odaklı karar alma süreçlerini güçlendirebilir.

- **Otomasyon:** İHA'ların ve diğer tarımsal robot teknolojilerinin otomasyonu, tarımın geleceğini şekillendirebilir. Daha düşük iş gücü gereksinimi ve daha fazla verimlilik sağlanabilir.

Örneğin, Çin'de, drone teknolojisi kullanılarak yapılan tarımsal ilaçlama ve gübreleme uygulamaları, geleneksel yöntemlere kıyasla çok daha hızlı ve etkili sonuçlar vermektedir. Ayrıca, yeni teknolojilerle birlikte İHA'lar daha hafif, daha uzun süre uçabilen ve daha ucuz hale gelmiştir.

Politik faktörler

- *Tarım politikaları ve teşvikler
- *Düzenlemeler ve lisanslar
- *Çevre düzenlemeleri

Sosyal faktörler

- *Eğitim ve bilinçlenme
- *Genç tarım işgücü
- *Toplumun teknolojiye uyumu

Ekonomik faktörler

- *Yatırım ve işletme maliyetleri
- *Kâr artışı
- *Finansman ve erişim

Teknolojik faktörler

- *Teknolojik gelişmeler
- *Veri analizi ve yapay zeka
- *Otomasyon

Görüldüğü gibi, tarımda İHA kullanımı, PEST analizinin dört ana faktörü göz önünde bulundurulduğunda, oldukça potansiyelli ancak dikkatle yönetilmesi gereken bir alan olarak karşımıza çıkmaktadır. Politika yapımcıların, ekonomik teşviklerin, sosyal kabulün ve teknolojik yeniliklerin uyum içinde çalışması, İHA'ların tarımda başarıyla uygulanmasını destekleyecektir. Yine de, bu teknolojinin yaygınlaşması için eğitim, düzenlemeler ve finansal çözümler gibi faktörler de göz önünde bulundurulmalıdır.

III. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

İHA'ların hemen hemen tüm tarım uygulamalarında, görev gereksinimlerini karşılamak için yüksek manevra kabiliyeti ve taşıma kapasitesi gereklidir. Bu nedenle, çok rotorlu tipler, aynı boyuttaki sabit kanatlı dronlardan daha esnek ve güçlü oldukları için giderek daha fazla ilgi görmektedir (Wen ve diğerleri, 2019).

Örneğin, dronlar bulutlu günlerde yüksek kaliteli ve yüksek çözünürlüklü görüntüler sunabilir [3]. Ayrıca, kullanılabilirlikleri ve transfer hızları da diğer faydalarını oluşturur[4]. Uçaklarla karşılaştırıldığında, dronlar oldukça uygun maliyetlidir ve kurulumu ve bakımı kolaydır [5]. Başlangıçta esas olarak askeri amaçlarla kullanılmalarına rağmen, dronlar tedarik

zinciri yönetiminde [6] insani amaçlarda [7] akıllı tarımda, araştırma ve haritalamada, kültürel miras dokümantasyonunda, afet yönetiminde ve orman ve yaban hayatı korumada [8] gibi çok sayıda sivil uygulamaya fayda sağlayabilir.

Tarımda, dronların çok çeşitli uygulama alanları mevcuttur; bunlar, mahsul yönetimini (örneğin, haritalama, izleme, sulama, bitki teşhisi) (H. Huang vd., [9] afet azaltmayı, erken uyarı sistemlerini, yaban hayatı ve ormancılığın korunmasını (Negash vd., [10] desteklemek için yeni teknolojiler, bilgi işlem yetenekleri ve yerleşik sensörlerle entegre edilebilir. Benzer şekilde, dronlar mahsul ve büyüme izleme, verim tahmini, su stresi değerlendirmesi ve yabancı otlar, zararlılar ve hastalık tespiti dahil olmak üzere çeşitli tarımsal faaliyetlerde kullanılabilir (Inoue, [11], Panday vd., [11]. Dronlar yalnızca duyuşal verilerine dayalı izleme, tahmin ve tespit amaçları için değil, aynı zamanda hassas sulama ve hassas yabancı ot, zararlı ve hastalık yönetimi için de kullanılabilir. Başka bir deyişle, dronlar çevresel verilere dayanarak hassas miktarlarda su ve pestisit püskürtebilir. Dronların tarımdaki faydaları Tablo 1'de özetlenmiştir.

Tarımda çok disiplinli ve çok amaçlı bir teknoloji olarak dronlar çeşitli perspektiflerden araştırılmıştır. Örneğin, araştırmacılar tarımda dron uygulamalarını (Kulbacki vd.,[26], Mogili ve Deepak, [27]), hassas tarıma katkılarını (Puri vd., [28], Tsouros vd., [29]) diğer son teknolojilerle tamamlayıcılığını (Al-Thani vd., [30], Dutta ve Mitra, [31], Nayyar vd.,[32]) ve navigasyon ve algılama yeteneklerini geliştirme olanaklarını (Suomalainen vd., [33]) incelemiştir. Tarımda dron uygulamalarına ilişkin araştırmalar

yaygınlaştığından (Khan vd., 2021), mevcut literatürü özetlemeye ve alanın entelektüel yapısını ortaya koymaya ihtiyaç vardır. Ayrıca, sürekli iyileştirmelerin yapıldığı yüksek teknoloji bir alan olarak, mevcut literatürü periyodik olarak özetlemek ve önemli araştırma boşluklarını belirlemek için detaylı incelemelerin yapılması gerekmektedir. Bugüne kadar, tarım sektöründe drone uygulamalarını tartışan birkaç inceleme bulunmaktadır.

Tablo 1. Tarımda dron kullanım alanları (Rejeb ve diğ. [6])

Dronların tarımsal uygulama örnekleri	Kullanılan yöntemler	Kaynak
Zamansal ve mekânsal algılama çözünürlüklerinin geliştirilmesi	Güncel uzaktan algılama sistemlerinin bitki su durumunun incelenmesinde kullanılır	Gago ve diğ., [12]
Hassas tarımın kolaylaştırılması	Bu çalışmaların temel amacı dar ve geniş bantlı çok spektral kameraların hassas tarımdaki yeteneklerini karşılaştırmaktır.	L. Deng ve diğ.,[14] , Kalischuk ve diğ.,[15] ; Maimaitijiang ve diğ., [14].
Mahsullerin sınıflandırılması ve araştırılması	Akıllı tarım için uzaktan algılama alanındaki son gelişmeler, temel alınarak tartışılmaktadır.	Inoue, [11], Kalischuk ve diğ., [13]; López-Granados ve diğ., [15]; Maimaitijiang ve diğ., [14] ; Melville ve diğ., [16], Moharana ve Dutta, [17].
Gübre kullanımı	İHA multispektral uzaktan algılama teknolojisinin hassas tarım için yararlı olduğu, ancak bitki örtüsü için kalibrasyon yöntemleri, son işlem teknikleri ve sağlam nicel çalışmalar konusunda daha fazla çabaya ihtiyaç duyulduğunu göstermektedir.	L. Deng ve diğ., [18], Guan ve diğ., [19]
Kuraklığın izlenmesi	Çok spektral sensörler, ölçekler arası endeks tabanlı bitki örtüsü izleme çalışmalarında kullanım için iyi bir potansiyel göstermektedir ayrıca diğer çalışmada buğday kuraklık durumunun değerlendirilmesinde İHA tarafından uzaktan algılama RGB görüntülerinin kullanılabilirliği değerlendirilmektedir.	Fawcett ve diğ., [20], Panday ve diğ., [21]; Su ve diğ., [22]
Biyokütle tahmini	Hassas tarımda mahsul izleme önemlidir. Yer üstü biyokütlesini, tahmin etmek, mahsul canlılığını izlemeye ve verimi tahmin etmeye yardımcı olur. Süper yüksek çözünürlüklü, çok zamanlı küçük bir İHA'dan çekilen kırmızı, yeşil, mavi görüntülerden türetilmiştir.	Bendig ve diğ., [23]
Verim tahmini	Bitkilerin ve toprakların tanısal bilgilerine yönelik uzaktan algılama teknolojisindeki (platformlar, sensörler, algoritmalar) son gelişmeler değerlendirilmiştir.	Inoue, [11], Panday ve diğ., [21]

Tablo 1. Tarımda dron kullanım alanları (Rejeb ve diğ. [6]) (devamı)

Afet azaltma	Pahalı uyduların aksine, belirli sensörler ve araçlarla donatılmış İHA'lar kanıta dayalı planlama ve mekansal veri toplamada tarımı desteklemede büyük bir potansiyele sahiptir.	Negash ve diğ.[10]
Yaban hayatının ve ormancılığın korunması	Uzaktan algılama teknolojisindeki (platformlar, sensörler, algoritmalar) son gelişmeler değerlendirilmiştir.	Negash ve diğ.[10], Panday ve diğ., [21]
Su stresinin değerlendirilmesi	Uzaktan algılama teknolojisindeki (platformlar, sensörler, algoritmalar) son gelişmeler	(Inoue, [11])
Zararlı, yabancı otlar ve hastalık tespiti	Tarım alanlarındaki yabancı otların doğru tespiti ve tedavisi, ürün verimini yönetmek ve herbisit kirliliğinden kaçınmak için gerekli bir prosedürdür. Bu makalede, otomatik ve manuel yöntemleri birleştiren yabancı ot haritalarının oluşturulması için dört bağımsız sınıflandırma algoritmasını ve ayrıca iki alt kümede ayrı ayrı kullanılan nesne tabanlı ve piksel tabanlı sınıflandırma yaklaşımlarını test edilmiştir.	Gašparović ve diğ., [25], Inoue[11]

Örneğin, Mogili ve Deepak [27], drone'ların mahsul izleme ve pestisit püskürtme üzerindeki etkilerini kısaca incelemektedir. Inoue [11], tarımda uzaktan algılamada uydu ve drone kullanımını incelemektedir. Yazar, akıllı çiftçiliği benimsemenin teknolojik zorluklarını ve vaka çalışmaları ve en iyi uygulamalara dayalı olarak uyduların ve drone'ların katkılarını araştırmaktadır. Tsouros ve diğerleri [29], çeşitli veri toplama ve işleme yöntemlerini vurgulayarak farklı drone tiplerini ve tarımdaki ana uygulamalarını özetlemektedir. Daha yakın zamanda, Aslan ve diğerleri [34], tarımsal faaliyetlerde İHA uygulamalarını kapsamlı bir şekilde incelemiş ve serada bir İHA için eş zamanlı yerleştirme ve haritalamanın önemini vurgulamıştır.

Çalışmalar değerlendirildiğinde temel olarak üç başlıkta toparlanmıştır: İlki uzaktan algılama ve sensör teknolojilerini kullanarak tarımda İHA uygulamaları, ikincisi toprak ve ürün verimliliği gibi tohum ve gübreleme faaliyetlerine dayalı İHA uygulaması ve üçüncüsü temel olarak karar verme yaklaşımlarını kullanarak İHA kullanımıyla tarımda iyileştirme yapan çalışmalardır. Öncelikle sensör ve uzaktan algılama yaklaşımlarına entegre eden İHA uygulamasına örnekler şöyledir: Diaz-Gonzalez ve diğ.[35], farklı makine öğrenme teknikleri ve uzaktan algılama sistemlerine dayalı mahsul verimi üretimine ilişkin son çalışmaları incelemiştir. Buna göre, İHA'ların toprak göstergelerini tahmin etmede yararlı olduğunu ve mekansal çözünürlük, bilgi zamansallığı ve esneklik açısından uydu sistemlerinden daha iyi performans sağladığını göstermiştir. Awais vd. [36], su durumunu tahmin etmek için mahsullerde İHA uzaktan algılama verilerinin uygulanmasını ve atık stresi uygulaması için

İHA uzaktan algılamanın olası kapasitesinin ölçülmesinde yararlanmıştır. Son olarak, Aquilani vd. [37], mera bazlı hayvancılık sistemlerinde uygulanan öngörülü çiftçilik teknolojilerini incelemiş ve İHA'lar tarafından sağlanan uzaktan algılamanın biyokütle değerlendirmesi ve sürü yönetimi için avantajlı olduğu sonucuna varmıştır. Ayrıca, son zamanlarda İHA'ları hayvanların izlenmesi, takip edilmesi ve toplanmasında kullanma çabaları da belirtilmiştir. Marin vd. [38], ürün hasarını belirlemek için multispektral kamera ile donatılmış bir İHA kullanmanın, çiftçilerin doğru kararlar almasına ve üretim kayıplarını azaltmasına yardımcı olmak için zamanında ve kesin bilgiler sağlayabileceğini belirtmiştir.

Ürün verimliliği, tohum ekme, gübreleme gibi tarım arazilerini iyileştirme ve verimlilik artırma amaçlı şu çalışmalar örnek verilebilir: Vayssade ve diğ. [39], çiftlik hayvanlarını izlemek için etkili bir yol önermiş ve Xu ve diğ. [40], ürün verim tahmininde dronedan yararlanmıştır. Nahiyoon vd. [41], havadan ilaçlama için İHA kullanmayı önermiş ve ortalama öldürücü damlacık sayısını ve biyosidal yarıçaplarını değerlendirerek ilaçlama parametrelerinin pestisitlerin etkinliği üzerindeki etkisini araştırmıştır. Bu durumda, İHA kimyasal ve gübre dağıtımının hassas kontrolünde yardımcı olarak milyarlarca dolar tasarruf sağlayabileceği fark edilmiş ve bu sayede kimyasal kullanımın ve potansiyel çevre kirliliğinin önemli ölçüde azaltılabileceği ortaya konulmuştur. Wu vd. [42], bir İHA'ya bir tohum ekme makinesi monte ederek toprakta daha iyi bir dağılım için tohumların yörüngesini değiştirmek üzere bir engel halkası tasarlamıştır. İHA ile doğrudan tohumlamanın uygulanabilirliği kanıtlanmıştır.

Karar verme yaklaşımlarını ele alan çalışmalar değerlendirildiğinde şu şekilde özetlenebilir. Kara vd. [43] itfaiye dronları arasından en uygun olanının seçilmesi için AHP temelli COPRAS yaklaşımı ile yangın müdahalesi konusunu ele almışlardır. Buna göre çalışmada ele alınan kriterler tank kapasitesi, püskürtme hızı, uçuş hızı, tam kapasiteli havada kalma süresi, optimum atış irtifası ve birim fiyatı şeklindedir.

Göncü [44] çalışmasında tarımsal ilaçlama işlemi için kullanılacak dron tercihlerini etkileyen faktörleri değerlendirmek için SWARA yöntemini kullanmıştır. Buna göre taşınabilecek yük miktarı en önemli faktör olarak ortaya çıkarken ağırlık kriteri en az öneme sahip faktör şeklinde elde edilmiştir. Eren ve diğ.[45] afet durumunda kullanılan İHA'ların olay yerine en hızlı ulaşımına yönelik bir karar modeli geliştirmişlerdir buna göre AHP tabanlı TOPSIS yöntemiyle en uygun İHA'lar temel olarak havada kalma süresi, yük taşıma kapasitesi, birim fiyat, menzil ve ağırlık kriterlerine göre seçilmiştir. Kara ve Eren [46] afet bölgelerinde en uygun dron seçim problemi Pisagor bulanık AHP temelli PROMETHEE ve TOPSIS yöntemleri kullanılarak seçilmiş ve hasar tespit çalışmalarında en yüksek verimde görüntü alma kabiliyeti olan dron seçimi yapılmıştır. Demir ve Boz (2024) sağlık sektöründe ilaç dağıtımında kullanılacak dronlar için DEMATEL ve SWARA temelli MAUT yaklaşımı kullanılarak ideal dron seçiminin değerlendirilmesini sağlamaktadır. Singh ve diğ. [47], sürdürülebilir tarım faaliyetlerinde drone kullanımının önündeki engelleri incelemiştir. Sürdürülebilir tarımda drone uygulamasının önündeki engelleri analiz etmek için hibrit bulanık-DEMATEL-MMDE-ISM tabanlı bir yaklaşım önermiştir. Bulanık-DEMATEL tekniği benimsenmiştir. Ardından, engellerin üç seviyeli hiyerarşik yapısını oluşturmak için yorumlayıcı yapısal modelleme yöntemi için eşik değerini belirlemek üzere maksimum ortalama de-entropi yöntemi uygulanmıştır. En önemli engellerin kararlılık ve güvenilirlik, drone sensor kalitesi ve drone yük kapasitesi olduğu görülmüştür. Uçuş süresi, yüksek ilk maliyet ve bakım altyapısı, önemli engeller ile kamu algısı ve psikolojik engel arasında bağlantı engelleri olarak hizmet etmektedir.

Literatürde İHA'nın tarım uygulamaları hakkında farklı çalışmalar olsa da halen konunun öneminden dolayı pek çok uygulamaya ihtiyaç vardır. Ayrıca incelemelerden elde edilen sonuca göre, bu çalışmada ele alındığı biçimde hem PEST analiz yapılarak hem de entropi tabanlı GİA yaklaşımını kullanan entegre bir model önerisine rastlanmamış bu açıdan literatüre katkı sunulması beklenmektedir.

IV. YÖNTEMLER

Bu kısımda çalışmada kullanılan yöntemlerden öncelikle entropi yöntemi açıklanacak ardından gri ilişkisel analiz yöntemine değinilecektir.

4.1. Entropi Yöntemi

Entropi kavramı, mühendislik ve fen bilimleri gibi birçok temel disiplinde, ayrıca matematik ve bilgi teorisi alanlarında önemli bir rol oynamaktadır. Entropi yöntemi, karar verme süreçlerinde, AHP ve Delphi gibi geleneksel yöntemlere göre, karar vericinin subjektif yargılarına gerek kalmadan kriterlerin önem derecelerini belirlemede kullanılan objektif bir değerlendirme yöntemidir. Bu yöntemin adımları şu şekilde sıralanabilir:

$$\begin{bmatrix} x_{11} & \cdots & x_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix}_{m \times n}$$

burada x_{ij} : i . alternatifin j . kritere göre başarı değeridir, $i = 1, 2, \dots, m$ ve $j = 1, 2, \dots, n$.

1. Karar Matrisi Normalizasyonu (Eşitlik 1)

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^m x_{ij}} \quad j = 1 \dots n \quad (1)$$

i : alternatif j : kriter r_{ij} : normalize değerler

x_{ij} : i . alternatifin j . kriter için karar matrisinde karşı gelen değeri

2. Kriterlere ait entropi değerlerinin elde edilmesi (Eşitlik 2):

$$e_j = -k \sum_{i=1}^n r_{ij} \ln(r_{ij}) \quad i = 1 \dots m \quad (2)$$

k entropi sabiti, e_j entropi değeri (Eşitlik 3)

$$k = 1/\ln(m) \quad (3)$$

3. Bilginin farklılaşma derecesi hesabı (Eşitlik 4)

$$d_j = 1 - e_j \quad j = 1 \dots n \quad (4)$$

4. Entropi kriter ağırlıklarının hesaplanması (Eşitlik 5-6)

$$w_j = \frac{d_j}{\sum_{j=1}^n d_j} \quad (5)$$

$$\sum_{j=1}^n w_j = 1 \quad (6)$$

4.2. Gri İlişkisel Analiz

Gri İlişkisel Analiz (GİA), çok kriterli karar verme süreçlerinde, alternatiflerin belirli kriterler açısından değerlendirilmesinde kullanılan objektif bir yöntemdir. GİA, özellikle belirsizlik ve eksik veri içeren durumlarda etkili bir analiz aracı sunar. Bu yöntem, belirli bir alternatifin diğerleriyle olan ilişkisini

ölçerek, en uygun çözümü bulmak için kullanılır. GİA'nın temel avantajı, veri setindeki belirsizliğe karşı dayanıklı olması ve sübjektif yargıların minimize edilmesidir.

Bu yöntem, belirsizlik altında verilerle etkili sonuçlar elde edebilmesi, az sayıda veriyle uygulanabilir olması, gri ilişkisel katsayıları kolayca hesaplayabilmesi ve veri setinin belirli bir dağılıma uymasını gerektirmemesi gibi avantajlara sahiptir.

GİA'nın temeli, her alternatifin, belirli kriterlere göre diğer alternatiflerle ilişkisini incelemektir. Bu ilişki, bir gri ilişkisel katsayısı kullanılarak hesaplanır. Gri ilişkisel katsayısı, alternatiflerin ne kadar benzer olduğunu gösterir; yüksek bir katsayı, alternatiflerin birbirine daha yakın olduğunu, düşük bir katsayı ise daha uzak olduklarını ifade eder. GİA yönteminin adımları aşağıdaki şekildedir:

1. Karar matrisinin oluşturulması:

m adet alternatif n adet kriterden oluşan matris bütünüdür. Burada y_{ij} , i . alternatif j . kriterdeki performansı göstermektedir.

2. Verilerin normalize edilmesi:

Çalışmada değerlerde fayda esaslı ise yani maksimum çıkması istenen verilerden oluşursa aşağıdaki Eşitlik 7 ile normalize edilir:

$$x_{ij} = \frac{y_{ij} - \min\{y_{ij}, i = 1, 2, \dots, m\}}{\max\{y_{ij}, i = 1, 2, \dots, m\} - \min\{y_{ij}, i = 1, 2, \dots, m\}} \quad j = 1 \dots n \quad (7)$$

Çalışmada değerlerde maliyet esaslı ise yani minimum çıkması istenen verilerden oluşursa Eşitlik 8 ile normalize edilir:

$$x_{ij} = \frac{\max\{y_{ij}, i = 1, 2, \dots, m\} - y_{ij}}{\max\{y_{ij}, i = 1, 2, \dots, m\} - \min\{y_{ij}, i = 1, 2, \dots, m\}} \quad j = 1 \dots n \quad (8)$$

Çalışmada değerlerde fayda veya maliyet esaslı durum değil de belirli bir optimal değere göre normalizasyon yapılması gerekirse aşağıda verilen Eşitlik 9 kullanılır:

$$x_{ij} = 1 - \frac{|y_{ij} - y_j^*|}{\max\{\max\{y_{ij}, i = 1, 2, \dots, m\} - y_j^*, y_j^* - \min\{y_{ij}, i = 1, 2, \dots, m\}\}} \quad j = 1, 2 \dots n \quad (9)$$

3. Gri ilişkisel katsayı matrisinin oluşturulması:

x_{ij} 'nin x_{0j} 'ye ne kadar yakın olduğunu belirlemek için gri ilişkisel katsayısı (Eşitlik 10-12) kullanılmaktadır.

$$\gamma(x_{0j}, x_{ij}) = \frac{\Delta_{\min} + \zeta \Delta_{\max}}{\Delta_{ij} + \zeta \Delta_{\max}} \quad i = 1, 2 \dots m \quad j = 1, 2 \dots n \quad (10)$$

$$\Delta_{ij} = |x_{0j} - x_{ij}| \quad (11)$$

$$\Delta_{\min} = \min\{\Delta_{ij}, i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n\}$$

$$\Delta_{\max} = \max\{\Delta_{ij}, i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n\} \quad \zeta (0 \leq \zeta \leq 1) \quad (12)$$

burada $\zeta (0 \leq \zeta \leq 1)$ ayırt edilebilirlik indeksi olarak ifade edilmektedir ve bu değer ne kadar küçükse ayırt edilebilirliği o kadar yüksektir. Genellikle ζ orta seviyede bir ayırt edicilik katsayısını yansıtmak için 0,5 değerini almaktadır [48]–[50].

4. Gri ilişkisel derecelerin hesaplanması:

Eşit önem seviyesindeki kriterler için Eşitlik 13 kullanılmaktadır. Ancak farklı önem seviyesindeki kriterler için ikinci sıradaki formül olan Eşitlik 14 kullanılmaktadır.

$$x_{ij} = 1 - \Gamma_{0i} = 1/m \sum_{j=1}^n \gamma_{0i}(j) \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (13)$$

$$\Gamma_{0i} = \sum_{j=1}^n [w(j) * \gamma_{0i}(j)] \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (14)$$

Gri ilişkisel dereceler hesaplandıktan sonra, seriler arasındaki benzerlik oranı referans seriye göre değerlendirilir ve en yüksek gri ilişkisel derecesine sahip alternatif, en iyi alternatif olarak belirlenir.

V. UYGULAMA

Son yıllarda tarım sektörü, verimliliği artırmak, hasat üretkenliğini artırmak, tarım alanlarını izlemek ve yönetmek, hastalık ve zararlıları kontrol etmek gibi bir dizi görevde teknolojik çözümlere yönelmektedir. Dronelar, bu gereksinimleri karşılamak için ideal bir araç olabilir, ancak farklı drone modelleri arasında seçim yapmak zorlu bir süreç olabilir. Her geçen gün teknolojik gelişmelerle yeni kalifikasyonlara sahip üst model dronelerin sisteme katılmasıyla aralarında en uygun ve en etkinin belirlenmesinde yer alan çoklu kriter ve alternatif çeşitliliği karar verme modellerinin kullanılması faydalı olmaktadır. Uzman görüşlerine ve literatürdeki araştırmalara göre tarım sektöründeki önemli olan hususları dikkate alarak taşıma kapasitesi, havada kalma süresi, optimum artış irtifası, fiyat, püskürtme hızı, uçuş hızı ve saatlik iş verimliliği gibi yedi temel kriter ve altı model drone için değerlendirme yapılacaktır. Her bir modelin farklı özelliklere sahip olması objektif karar verme sürecini zorlaştırmaktadır. Ele alınan kriterler kısaca şu şekilde açıklanabilir:

Taşıma kapasitesi: İHA'ların taşıma kapasitesi, kullanılan modele, tasarımına ve amaçlarına bağlı olarak değişiklik gösterir. Tarımda kullanılan İHA'lar genellikle daha hafif ve orta büyüklükte olur, ancak taşınabilecek yük miktarı yine de önemli bir faktördür [45].

Havada kalma süresi: Kullanılan modelin batarya kapasitesine, taşıdığı yük miktarına, hava koşullarına ve İHA'nın tasarımına bağlı olarak değişir. Tarımda kullanılan İHA'lar genellikle verimlilik ve uzun uçuş süreleri için optimize edilmiştir[45].

Optimum artış irtifası: Bir uçuşun veya aracın en verimli şekilde yüksekliğini artırabileceği irtifadır. Bu kavram, özellikle uçaklar için kullanılır ve uçuşun başlangıcından itibaren yakıt tüketimi, hava koşulları, yük ve aerodinamik faktörlere bağlı olarak belirlenir. Optimum artış irtifası, uçuş planlamasında önemli bir faktör olup, uçakların mümkün olan en verimli irtifada kalmalarını sağlamaya yardımcı olur [43,51].

Fiyat: Drone modelleri arasındaki fiyat farkları ve ekonomik avantajlar da önemli bir karar faktörüdür. Tarım İHA'ları, yüksek kaliteli sensörler ve kameralarla donatıldığından, fiyatları genellikle yüksek seviyede olur [43,45].

Püskürtme hızı: Tarımda kullanılan İHA'ların püskürtme hızı, genellikle kullanılan sistemin kapasitesine ve tasarımına bağlı olarak değişir. Püskürtme hızı, bitkilere ilaç veya gübre püskürtme işleminde ne kadar hızlı ve verimli çalışıldığını belirler. Bu hız, İHA'nın taşıma kapasitesi, püskürtme başlıklarının sayısı, ilaç tankının kapasitesi ve hava koşulları gibi faktörlerden etkilenir [43,51].

Uçuş hızı: Özellikle tarımsal alanlarda yapılan ilaçlama ve diğer tarım görevlerinde uçuşun verimliliğini etkileyebilir. Çok yüksek hızlarda uçmak, ilaçların düzgün bir şekilde yayılmasını engelleyebilir ve çevresel faktörlerden (örneğin rüzgar) etkilenerek daha fazla kayıp olabilir. İHA'nın hızının, uçuşun görevine, alandaki koşullara ve kullanılan sensörler veya ekipmanlara göre optimize edilmesi önemlidir [43,45].

Saatlik iş verimliliği: Tarımsal İHA'ların saatlik iş verimliliği, uçuş hızına, püskürtme kapasitesine, İHA'nın taşıma kapasitesine ve işlenecek alana göre değişir. Saatlik verimlilik, genellikle hektar başına yapılan iş miktarıyla ölçülür. Tarımsal İHA'lar, özellikle ilaçlama ve gübreleme gibi işlemlerde büyük verimlilik sağlar, çünkü geleneksel yöntemlere göre çok daha hızlı ve hassas bir şekilde çalışabilirler [52].

Çalışmada yer alan alternatif ve kriter kümesine ilişkin oluşturulan karar matrisi Tablo 2'de sunulmuştur.

Tablo 2. Entropi için karar matrisi

Hedef	ma ks.	maks.	maks .	min.	maks.	ma ks.	maks.
Drone Modeli	Ta şı ma ka pa sit esi (l) (C 1)	Ort. havada kalma süresi (dak) (C2)	Opti mum artış irtifa sı(m) (C3)	Ort. fiyat (USD) (C4)	Püsk ürtme hızı (L/dk) (C5)	Uç uş hızı (m/ sn) (C6)	Ort. saatlik iş verimliliğ i (hektar/sa at) (C7)
DJI Agras T40 (A1)	40	23	5000	\$27. 000	16	20	10
DJI Agras T10 (A2)	10	25	5000	\$11. 000	8	18	8
DJI AGRAS MG1-P (A3)	10	25	2500	\$5.0 00	6	15	4
DJI AGRAS T20 (A4)	20	18	5000	\$14. 000	8	18	6
DJI AGRAS MG1-S (A5)	10	25	2500	\$5.0 00	6	15	4
DJI AGRAS T30 (A6)	30	28	5000	\$17. 000	12	18	8

Tablo 3'te normalize karar matrisi yer almaktadır.

Tablo 3. Normalize karar matrisi

Dro ne Mo deli	Taşı ma Kapa sitesi	Ort. havada kalma süresi	Optim um Artış İrtifası	Or t. fi ya t	Püs kürt me Hızı	Uç uş Hı zı	Ort. saatlik iş verimli liği
A1	0,33 3	0,159	0,2	0, 05 6	0,28 5	0, 19 2	0,25
A2	0,08 3	0,173	0,2	0, 13 8	0,14 23	0, 17 3	0,2
A3	0,08 3	0,173	0,1	0, 30 3	0,10 71	0, 14 4	0,1
A4	0,16 66	0,125	0,2	0, 10 8	0,14 28	0, 17 3	0,15
A5	0,08 33	0,173	0,1	0, 30 3	0,10 71	0, 14 4	0,1
A6	0,25	0,194	0,2	0, 08 9	0,21 4	0, 17 3	0,2

Ardından entropi yöntemi için gerekli adımlar uygulanmıştır. Kriterler için entropi değerleri aşağıdaki Tablo 4'de sunulmuştur. Bir önceki tabloda normalize edilmiş değerler logaritma değerleri ile çarpılmıştır. Daha sonra bu işlemten hesaplanan değerler toplanarak entropi değeri elde edilmiştir. Formüldeki entropi katsayısı k , $1/\ln 6$ (0,558) hesaplanarak bulunmuş ve formüle uyarlanmıştır.

Tablo 4. Entropi değerleri

Drone Modeli	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
A1	-	-	-	-	-	-	-
	0,3	0,2	0,3	0,1	0,3	0,3	0,3
	66	93	21	61	57	17	46
A2	-	-	-	-	-	-	-
	0,2	0,3	0,3	0,2	0,2	0,3	0,3
	07	04	21	73	78	03	21
A3	-	-	-	-	-	-	-
	0,2	0,3	0,2	0,3	0,2	0,2	0,2
	07	04	30	62	39	79	30
A4	-	-	-	-	-	-	-
	0,2	0,2	0,3	0,2	0,2	0,3	0,2
	98	59	21	41	78	03	84
A5	-	-	-	-	-	-	-
	0,2	0,3	0,2	0,3	0,2	0,2	0,2
	07	04	30	62	39	79	30
A6	-	-	-	-	-	-	-
	0,3	0,3	0,3	0,2	0,3	0,3	0,3
	46	18	21	15	30	03	21

Buna göre elde edilen değerler sırasıyla 0.9112, 0.9953, 0.9756, 0.9020, 0.9614, 0.9970, 0.9686 olmuştur. Daha sonra 1'den çıkarılarak bilginin farklılaşma dereceleri (d_j) hesaplanmıştır (0.0888, 0.0047, 0.0244, 0.0980, 0.0386, 0.0030). Tablo 5'e göre faktörlerin entropi dereceleri ve her bir kriterin ağırlık değeri aşağıdaki gibi bulunmuştur.

Tablo 5. Entropi ve faktör ağırlığı değerleri

Entropi	0,91	0,99	0,97	0,90	0,96	0,99	0,96
i	1	5	5	2	1	7	8
Ağırlık	0,30	0,01	0,08	0,33	0,13	0,01	0,10
k	7	6	4	9	3	0	8
Rank	2	6	5	1	3	7	4

Karşılaştırma matrislerini elde etmek için, referans serileri birinci adımda oluşturulan Tablo 6'da karar matrislerine ilk satır olarak eklenmiştir.

Tablo 6. GİA için karar matrisi

Drone Modeli	Taşıma Kapasitesi	Ort. Havada Kalma Süresi	Optimum İrtifası	Artış	Ort. Fiyat	Püskürtme Hızı	Uçuş Hızı	Ort. Saatlik Verimliliği-Hektar	İş
wj	0,307	0,016	0,084		0,339	0,133	0,010	0,108	
Referans	40	28	5.000		0,000370	16	20	10	
A1	40	23	5.000		0,000037	16	20	10	
A2	10	25	5.00		0,00009	8	18	8	
A3	10	25	2.50		0,0002	6	15	4	
A4	20	18	5.000		0,000071	8	18	6	
				4					
A5	10	25	2.500		0,0002	6	15	4	
A6	30	28	5.000		0,000058	12	18	8	

Tablo 7'de Normalizasyon matrisi oluşturulurken maksimum çıkmasının fayda sağlayacağı formül, fiyat

kriterinde ise minimum çıkmasının fayda sağlayacağı formül kullanılmıştır.

Tablo 7. Normalize karar matrisi

Referans	1	1	1	1	1	1	1
A1	1	0,5	1	1	1	1	1
A2	0	0,7	1	0,669	0,2	0,6	0,666
A3	0	0,7	0	0	0	0	0
A4	0,333	0	1	0,789	0,2	0,6	0,333
A5	0	0,7	0	0	0	0	0
A6	0,666	1	1	0,866	0,6	0,6	0,666

Tablo 8'de, mutlak değer tablosu, normalizasyon matrislerindeki değerler ile bu matrislerde kullanılan

referans serilerinin değerleri arasındaki mutlak farklar hesaplanarak oluşturulmuştur.

Tablo 8. Mutlak değer tablosu

A1	0	0,5	0	0	0	0	0
A2	1	0,3	0	0,330	0,8	0,4	0,333
A3	1	0,3	1	1	1	1	1
A4	0,666	1	0	0,211	0,8	0,4	0,666
A5	1	0,3	1	1	1	1	1
A6	0,333	0	0	0,134	0,4	0,4	0,333

Gri ilişkisel katsayı matrisinin (Tablo 9) oluşturulmasında kullanılan formüldeki ayrııcı katsayının, literatür araştırmalarında 0.5 olarak

önerildiği tespit edildiği için hesaplamalarda 0.5 değeri kullanılmıştır.

Tablo 9. Gri ilişkisel katsayı matrisi

A1	1	0,5	1	1	1	1	1
A2	0,333	0,625	1	0,601	0,384	0,555	0,6
A3	0,333	0,625	0,333	0,333	0,3333	0,3333	0,333
A4	0,428	0,333	1	0,703	0,3846	0,5555	0,428
A5	0,333	0,625	0,333	0,333	0,3333	0,333	0,333
A6	0,6	1	1	0,789	0,5555	0,555	0,6
Δ mak	1						
Δ min	0						
f	0,5						

Öncelikle, gri ilişkisel dereceler (Tablo 10), tüm değişkenlerin (kriterlerin) eşit derecede önemli olduğu kabul edilerek hesaplanmıştır.

Tablo 10. Gri ilişkisel dereceler

								Gri ilişkisel derece	Sıra
A1	1	0,5	1	1	1	1	1	0,928	1
A2	0,33	0,625	1	0,60	0,38	0,55	0,6	0,585	3
A3	0,33	0,625	0,333	0,33	0,33	0,33	0,33	0,375	5
A4	0,42	0,333	1	0,70	0,38	0,55	0,42	0,547	4
A5	0,33	0,625	0,333	0,33	0,33	0,33	0,33	0,375	5
A6	0,6	1	1	0,78	0,55	0,55	0,6	0,728	2

Belirlenen değerler 0 ile 1 arasında değişmektedir. 1'e en yakın performans puanına sahip olan drone, en ideal İHA modeli olarak kabul edilmiş ve bu doğrultuda sıralamalar gerçekleştirilmiştir. Eşit önem ağırlığına sahip olduğunda elde edilen sıralama $A1 > A6 > A2 > A4 > A5$, A3 şeklinde yer almıştır (Tablo 10).

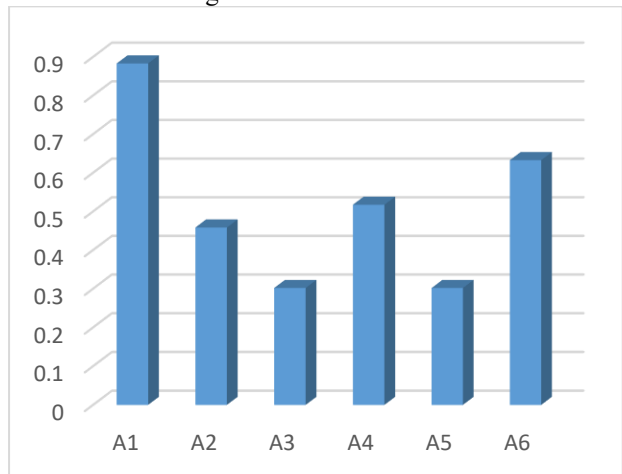
Tablo 11'de görüleceği gibi, ardından entropi yöntemiyle elde edilen kriter ağırlıkları yansıtılarak Tablo 11'deki alternatif sıralamalar şöyle elde edilmiştir, $A1 > A6 > A4 > A2 > A5, A3$.

Burada iki yöntemde en önemli olan seçeneğin 1. alternatif ardından 6. alternatif olduğu görülmektedir. Eşit ağırlıklı GİA yapıldığında en az önemli olan 3.alternatif ve 5. alternatif iken, entropi ağırlıklı GİA yapıldığında da aynı şekilde 3.alternatif ve 5. alternatif son sırada yer almıştır. Sıralamalar birbirine çok yakın elde edilmiştir. Her iki durumda sadece 3. Sıradaki alternatifin sıralaması değişmiştir. Eşit ağırlıklı GİA'da 2. alternatif üçüncü sırada iken, entropi ağırlıklı GİA'dan elde edilen sonuçta da 4. alternatif üçüncü sırada yer almıştır. Burada elde edilen sonuçların çok yakın elde edilmesi analiz sonuçlarının tutarlı ve gerçekçi olduğunu göstermektedir.

Tablo 11. Entropi temelli GİA yöntemiyle elde edilen sıralama

Ağırlıklı ar	0,307	0,016	0,084	0,339	0,133	0,010	0,109	roi	Sıralama
A1	1	0,5	1	1	1	1	1	0,883	1
A2	0,33	0,62	1	0,601	0,384	0,55	0,6	0,458	4
A3	0,33	0,62	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,30	5
A4	0,42	0,33	1	0,7	0,384	0,55	0,42	0,517	3
A5	0,33	0,62	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,30	5
A6	0,6	1	1	0,789	0,55	0,55	0,6	0,632	2

Tablo 12'de ilgili İHA modelleri için sıralama sütun grafik ile sunulmuştur.

Tablo 12. Entropi temelli GİA yöntemine göre sütun grafik ile sıralama

Gerçek hayat problemlerinde karar verme süreci karmaşıklığının nedenlerinden biri, kriterlerin doğru ve tutarlı biçimde analiz edilerek değerlendirilmemesidir. Bu sebeple en önemli olan kritere daha yüksek önem seviyesinin atanması beklenirken daha az önemli kritere daha düşük önem seviyesinin atanması beklenmektedir. Bu çalışmada öncelikle eşit ağırlıkla değerlendirilmiş ardından entropi yöntemiyle önem seviyeleri belirlenerek ataması sağlanmıştır. Entropi yönteminin objektif bir yöntem olması bu derecelendirmeyi doğru ve güvenilir biçimde yapmayı kolaylaştırmaktadır.

VI. DUYARLILIK ANALİZİ ve KARŞILAŞTIRMA

Verilerle yapılan bazı değişikliklerin çözüme etkisini incelemek ve modelin kararlılığını değerlendirmek için duyarlılık analizine ihtiyaç vardır. Çalışmada uygulanan yöntemin geçerliliğini sınamak için entropi ağırlıklı GİA yöntemine alternatif olarak eşit ağırlıklı olarak değerlendirme yapılmaya çalışılmış ve buna göre elde edilen sonuçlar paylaşılmıştır. Tüm kriterler eşit ağırlıklı olarak 0,143 olarak alındığında ikinci ve dördüncü alternatiflerin sıralamasında ufak bir değişiklik olduğu görülmüştür. Ayrıca çalışmada farklı ağırlık değerleriyle de analiz değerlendirilmiş ve genel olarak aynı sonuca ulaşıldığı gözlenmiştir.

Tablo 13. Eşit ağırlıklı GİA yöntemi ile karşılaştırma

Eşit ağırlıklı GİA yöntemi	Entropi ağırlıklı GİA yöntemi
A1	A1
A6	A6
A2	A4
A4	A2
A3	A5
A5	A3

Tablo 13'te iki yaklaşımla elde edilen sonuçlar karşılaştırmalı olarak sunulmuş ve A2 ve A4 alternatifleri arasında değişiklik olduğu görülmüştür. Ağırlıklarda meydana gelen değişikliklerin önerilen yaklaşımın sonuçlarını büyük ölçüde değiştirmediği ve yöntemin güvenilir olduğu söylenebilir.

Karşılaştırmalı alternatif yöntem olarak da entropi ağırlıklı SAW yöntemi ile değerlendirilmiştir. Buna göre öncelikle normalize edilen veri setine SAW yönteminin aşamaları entegre edilmiştir. Buna göre elde edilen sonuçlar Tablo 14'te şu şekilde ortaya çıkmıştır.

Tablo 14. Entropi ağırlıklı SAW yöntemi ile karşılaştırma

Entropi ağırlıklı SAW yöntemi	Entropi ağırlıklı GİA yöntemi
A1	A1
A6	A6
A4	A4
A2	A2
A3	A5
A5	A3

Entropi ağırlıklı GİA yöntemi ile karşılaştırıldığında aynı sıralama elde edilmiş ve analiz sonuçlarının tutarlı ve gülbüz olduğu ortaya çıkmaktadır.

VII. SONUÇ VE GELECEK ARAŞTIRMALAR

Teknolojik gelişmelere paralel olarak ülkelerin en büyük yatırım planı işgücüne bağlı sektörlerde kolaylık sağlamaktır. Bu kapsamda İHA'ların yaygın bir kullanım alanı mevcut iken insanlık için önemli olan tarımsal uygulamalar da son dönemlerde ilk sıralarda yer almaktadır. Bu sayede tarım ve arazi kullanımında verimlilik ve başarı artarak işgücüne bağımlılık azalmakta bu sayede zaman ve enerji tasarrufu sağlanarak insan kaynaklı hataların önüne geçilmektedir. Örneğin, zamanında sulama ya da hastalık tespiti ve/veya mahsulde kayıp anında gözlenerek olası tedbirler alınabilmektedir. İnsan ile uzun süreli yapılabilecek eylemler daha kısa sürede üst düzey sensor algılama mekanizmasıyla hızlı ve etkin biçimde değerlendirilmektedir.

Bu çalışmada birden çok kriter ve alternatifin olduğu tarımsal uygulamalarda en uygun dronun belirlenmesi sürecinde problem belirsiz ve karmaşık bir yapı sergilemektedir. Bu yüzden karar verme yöntemleriyle değerlendirilmesine ihtiyaç vardır. Bu çalışmada entropi tabanlı GİA yaklaşımıyla iki aşamalı bir model önerilerek tarımsal uygulamalarda ideal drone modeli belirlenmeye çalışılmıştır. Öncelikle entropi yaklaşımı objektif bir ağırlıklandırma yöntemi olarak ele alınmış ve kriterin önem seviyeleri elde edilmiştir. Ardından bu kriter ağırlıklarına göre GİA ile uygun drone seçenekleri sıralanmıştır. GİA yöntemi eksik veya kesin olmayan veri kümesinde ideal sonuçlar sağlamaktadır.

En uygun tarımsal uygulama aracı olarak öncelik A1 alternatifi ardından A6, A4 alternatifi ve A2 alternatifi yer almıştır. Son sırada A5 ve A3 alternatifleri bulunmaktadır. Burada, sıralama kriterlerinin önem derecesi etki yaratmaktadır. Çünkü eşit önem seviyesinde de karşılaştırma yapıldığı sıralamalarda bazı farklılıkların olduğu görülmektedir. Seçilen İHA modellerinin çiftçilere sağladığı yararlar şu şekilde sunulabilir: Hassas tarım uygulamaları sayesinde bitki yoğunluğuna göre akıllı ilaçlama ve gübreleme yapılabilir. Sağlanana püskürtme sistemi özelliği sayesinde daha homojen ve etkili uygulama sağlanır. Zaman ve işgücünde tasarruf sağlanır ve bu sayede geniş alanlarda traktörle günler sürecektir iş, bu dronelar sayesinde birkaç saatte tamamlanabilir. Verimlilik artabilir ve bu sayede sağlıklı olmayan bitki alanları erkenden tespit edilebilir ve ayrıca uçuş rotaları ve verim haritaları sayesinde ilaç/gübre israfı önlenir. Maliyetler düşerek mazot, işçilik ve kimyasal giderlerinde ciddi azalma sağlanır. Engebeli, çamurlu veya erişilmesi zor tarlalarda ilaçlama/gübreleme kolaylıkla yapılabilir. Ayrıca bu dronelar sayesinde akıllı rota planlaması yapılabilir.

Gelecek araştırmalar için daha fazla faktör ve alternatif katılarak geniş perspektiften değerlendirmeler yapılabilmektedir. Ayrıca eksik bilgi ve belirsizlik altında bulanık yaklaşımların ideal sonuç vermesi nedeniyle bulanık küme yaklaşımı kullanılabilir. Sistematik bir uygulama sağlamak için bir karar destek sisteminin geliştirilmesi sürecin daha kolay analiz edilmesini sağlayabilir. Gelecek araştırmalarda kullanılabilecek yöntemler arasında bulanık AHP, bulanık TOPSIS, bulanık SWARA vb. yaklaşımlar ve/veya bulanık yaklaşımların güncel uygulama türleri olan pythagorean ve neutrosophic yaklaşımlar ile de değerlendirmeler yapılabilir. Ayrıca kullanılan entropi yaklaşımı yerine farklı ağırlıklandırma tekniklerinden TOPSIS, VIKOR, AHP, ELECTRE gibi çok kriterli karar verme yaklaşımları ile ağırlıklandırma yapılabilir. Gelecek araştırmalarda çalışmanın kapsamı genişleterek değişen hava koşullarına ve veya ürün türüne ve arazi yapısına göre değerlendirmeler yapılabilir.

KAYNAKLAR

- [1] Özgüven, D. M., & Altaş, Z. (2022). Tarımda drone kullanımı ve geleceği. *Ordu Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 12(1), 64–83. <https://doi.org/10.54370/ORDUBTD.1097519>
- [2] Kutlu, G., Avaroğlu, E., & Yazar, S. (2024). İHA'ların batarya seviyelerinin makine öğrenmesi ile tahmini. *Türkiye İnsansız Hava Araçları Dergisi*, 6(2), 56–62. <https://doi.org/10.51534/TIHA.1437254>
- [3] Gupta, A., Afrin, T., Scully, E., & Yodo, N. (2021). Advances of UAVs toward future transportation: The state-of-the-art, challenges, and opportunities. *Future Transportation*, 1(2), 326–350. <https://doi.org/10.3390/futuretransp1020019>
- [4] AUAV. (2016). İHA türleri: Çok rotorlu, sabit kanatlı, tek rotorlu, hibrit VTOL. Retrieved June 11, 2025, from <https://www.auav.com.au/articles/drone-types/>
- [5] Liu, Z., & Li, J. (2023). Application of unmanned aerial vehicles in precision agriculture. *Agriculture*, 13(7), 1375. <https://doi.org/10.3390/agriculture13071375>
- [6] Ritchie, H., & Roser, M. (2018). Water use and stress. *Our World in Data*. <https://doi.org/10.4060/CB6241EN>
- [7] Abbas, A., et al. (2023). Drones in plant disease assessment, efficient monitoring, and detection: A way forward to smart agriculture. *Agronomy*, 13(6), 1524. <https://doi.org/10.3390/agronomy13061524>
- [8] Akkamaş, M., & Çalışkan, S. (2020). İnsansız hava araçları ve tarımsal uygulamalarda kullanımı. *Türkiye İnsansız Hava Araçları Dergisi*, 2(1), 8–16. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/tiha/issue/54200/707831>
- [9] Wang, L., et al. (2022). Progress in agricultural unmanned aerial vehicles (UAVs) applied in China and prospects for Poland. *Agriculture*, 12(3), 397. <https://doi.org/10.3390/agriculture12030397>
- [10] Narzari, R., Burhan, U., Choudhury, G., Singhal, K., & Choudhary, K. K. (2025). A critical review of how UAVs can transform precision agriculture in the realm of agroecology. *Discover Soil*, 2(1), 1–26. <https://doi.org/10.1007/s44378-025-00055-2>
- [11] Inoue, Y. (2020). Satellite- and drone-based remote sensing of crops and soils for smart farming – A review. *Soil Science and Plant Nutrition*, 66(6), 798–810. <https://doi.org/10.1080/00380768.2020.1738899>
- [12] Gago, J., et al. (2015). UAVs challenge to assess water stress for sustainable agriculture. *Agricultural Water Management*, 153, 9–19. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.01.020>
- [13] Kalischuk, M., et al. (2019). An improved crop scouting technique incorporating unmanned aerial vehicle-assisted multispectral crop imaging into conventional scouting practice for gummy stem blight in watermelon. *Plant Disease*, 103(7), 1642–1650. <https://doi.org/10.1094/PDIS-08-18-1373-RE>
- [14] Maimaitijiang, M., et al. (2017). Unmanned aerial system (UAS)-based phenotyping of soybean using multi-sensor data fusion and extreme learning machine. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 134, 43–58. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2017.10.011>
- [15] López-Granados, F., Torres-Sánchez, J., Serrano-Pérez, A., de Castro, A. I., Mesas-Carrascosa, F. J., & Peña, J. M. (2016). Early season weed mapping in sunflower using UAV technology: Variability of herbicide treatment maps against weed thresholds. *Precision Agriculture*, 17(2), 183–199. <https://doi.org/10.1007/s11119-015-9415-8>
- [16] Melville, B., Lucieer, A., & Aryal, J. (2019). Classification of lowland native grassland communities using hyperspectral unmanned aircraft system (UAS) imagery in the Tasmanian Midlands. *Drones*, 3(1), 5. <https://doi.org/10.3390/drones3010005>
- [17] Moharana, S., & Dutta, S. (2016). Spatial variability of chlorophyll and nitrogen content of rice from hyperspectral imagery. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 122, 17–29. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2016.09.002>
- [18] Deng, L., Mao, Z., Li, X., Hu, Z., Duan, F., & Yan, Y. (2018). UAV-based multispectral remote sensing for precision agriculture: A comparison between different cameras. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 146, 124–136. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2018.09.008>

- [19] Guan, S., et al. (2019). Assessing correlation of high-resolution NDVI with fertilizer application level and yield of rice and wheat crops using small UAVs. *Remote Sensing*, 11(2), 112. <https://doi.org/10.3390/rs11020112>
- [20] Fawcett, D., et al. (2020). Multi-scale evaluation of drone-based multispectral surface reflectance and vegetation indices in operational conditions. *Remote Sensing*, 12(3), 514. <https://doi.org/10.3390/rs12030514>
- [21] Panday, U. S., Pratihast, A. K., Aryal, J., & Kayastha, R. B. (2020). A review on drone-based data solutions for cereal crops. *Drones*, 4(3), 41. <https://doi.org/10.3390/drones4030041>
- [22] Su, J., Coombes, M., Liu, C., Guo, L., & Chen, W. H. (2018). Wheat drought assessment by remote sensing imagery using unmanned aerial vehicle. In *2018 Chinese Control Conference (CCC)* (pp. 10340–10344). IEEE. <https://doi.org/10.23919/CHICC.2018.8484005>
- [23] Bendig, J., Bolten, A., Bennertz, S., Broscheit, J., Eichfuss, S., & Bareth, G. (2014). Estimating biomass of barley using crop surface models (CSMs) derived from UAV-based RGB imaging. *Remote Sensing*, 6(11), 10395–10412. <https://doi.org/10.3390/rs61110395>
- [24] Negash, L., Kim, H. Y., & Choi, H. L. (2019). Emerging UAV applications in agriculture. In *2019 7th International Conference on Robot Intelligence Technology and Applications (RiTA)* (pp. 254–257). IEEE. <https://doi.org/10.1109/RITAPP.2019.8932853>
- [25] Gašparović, M., Zrinjski, M., Barković, Đ., & Radočaj, D. (2020). An automatic method for weed mapping in oat fields based on UAV imagery. *Computers and Electronics in Agriculture*, 173, 105385. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105385>
- [26] Kulbacki, M., et al. (2018). Survey of drones for agriculture automation from planting to harvest. In *2018 IEEE 22nd International Conference on Intelligent Engineering Systems (INES)* (pp. 353–358). IEEE. <https://doi.org/10.1109/INES.2018.8523943>
- [27] Mogili, U. R., & Deepak, B. B. V. L. (2018). Review on application of drone systems in precision agriculture. *Procedia Computer Science*, 133, 502–509. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2018.07.063>
- [28] Puri, V., Nayyar, A., & Raja, L. (2017). Agriculture drones: A modern breakthrough in precision agriculture. *Journal of Statistics and Management Systems*, 20(4), 507–518. <https://doi.org/10.1080/09720510.2017.1395171>
- [29] Tsouros, D. C., Bibi, S., & Sarigiannidis, P. G. (2019). A review on UAV-based applications for precision agriculture. *Information*, 10(11), 349. <https://doi.org/10.3390/info10110349>
- [30] Al-Thani, N., Albuainain, A., Alnaimi, F., & Zorba, N. (2020). Drones for sheep livestock monitoring. In *2020 20th IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference (MELECON)* (pp. 672–676). IEEE. <https://doi.org/10.1109/MELECON48756.2020.9140588>
- [31] Dutta, P. K., & Mitra, S. (2021). Application of agricultural drones and IoT to understand food supply chain during post COVID-19. In *Agricultural Informatics Automation Using IoT and Machine Learning* (pp. 67–87). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781119769231.ch4>
- [32] Nayyar, A., Nguyen, B. L., & Nguyen, N. G. (2020). The internet of drone things (IoDT): Future envision of smart drones. In *Advances in Intelligent Systems and Computing* (Vol. 1045, pp. 563–580). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-15-0029-9_45
- [33] Suomalainen, J., et al. (2013). A light-weight hyperspectral mapping system for unmanned aerial vehicles – The first results. In *2013 5th Workshop on Hyperspectral Image and Signal Processing: Evolution in Remote Sensing (WHISPERS)*. IEEE. <https://doi.org/10.1109/WHISPERS.2013.8080721>
- [34] Aslan, M. F., Durdu, A., Sabanci, K., Ropelewski, E., & Gültekin, S. S. (2022). A comprehensive survey of the recent studies with UAV for precision agriculture in open fields and greenhouses. *Applied Sciences*, 12(3), 1047. <https://doi.org/10.3390/app12031047>
- [35] Diaz-Gonzalez, F. A., Vuelvas, J., Correa, C. A., Vallejo, V. E., & Patino, D. (2022). Machine learning and remote sensing techniques applied to estimate soil indicators – Review. *Ecological Indicators*, 135, 108517. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.108517>
- [36] Awais, M., et al. (2022). UAV-based remote sensing in plant stress imaging using high-resolution thermal sensor for digital agriculture practices: A meta-review. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 20(1), 1135–1152. <https://doi.org/10.1007/s13762-021-03801-5>
- [37] Aquilani, C., Confessore, A., Bozzi, R., Sirtori, F., & Pugliese, C. (2022). Review: Precision livestock farming technologies in pasture-based livestock systems. *Animal*, 16(1), 100429. <https://doi.org/10.1016/j.animal.2021.100429>
- [38] Marin, D. B., Ferraz, G. A. S., Schwerz, F., Barata, R. A. P., de Oliveira Faria, R., & Dias, J. E. L. (2021). Unmanned aerial vehicle to evaluate frost damage in coffee plants. *Precision Agriculture*, 22(6), 1845–1860. <https://doi.org/10.1007/s11119-021-09815-w>

- [39] Vayssade, J. A., Arquet, R., & Bonneau, M. (2019). Automatic activity tracking of goats using drone camera. *Computers and Electronics in Agriculture*, 162, 767–772. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.05.021>
- [40] Xu, R., Li, C., & Paterson, A. (2017). Cotton flower detection using aerial color images. In *2017 ASABE Annual International Meeting*. ASABE. <https://doi.org/10.13031/aim.201701080>
- [41] Lu, N., Zhou, J., Han, Z., Li, D., Cao, Q., Yao, X., Tian, Y., Zhu, Y., & Cao, W. (2019). Improved estimation of aboveground biomass in wheat from RGB imagery and point cloud data acquired with a low-cost unmanned aerial vehicle system. *Plant Methods*, 15, 17. <https://doi.org/10.1186/s13007-019-0391-9>
- [42] Zhou, X., Zheng, H. B., Xu, X. Q., He, J. Y., Ge, X. K., Yao, X., Cheng, T., Zhu, Y., Cao, W. X., & Tian, Y. C. (2017). Predicting grain yield in rice using multi-temporal vegetation indices from UAV-based multispectral and digital imagery. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 130, 246–255. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2017.05.003>
- [43] Yue, J., Feng, H., Jin, X., Yuan, H., Li, Z., Zhou, C., Yang, G., Tian, Q., & Feng, H. (2019). A comparison of crop parameters estimation using images from UAV-mounted snapshot hyperspectral sensor and high-definition digital camera. *Remote Sensing*, 11(2), 166. <https://doi.org/10.3390/rs11020166>
- [44] Gao, F., Jin, Y., & Masek, J. G. (2009). Calibration and validation of BRDF and albedo products derived from MODIS data for crop and pasture sites in the USA. *Agricultural and Forest Meteorology*, 149(5), 672–686. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2008.10.015>
- [45] Maes, W. H., & Steppe, K. (2019). Perspectives for remote sensing with unmanned aerial vehicles in precision agriculture. *Trends in Plant Science*, 24(2), 152–164. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2018.11.007>
- [46] Wan, L., Li, Y., Cen, H., Zhu, J., Yin, W., Wu, W., Wu, C., & Zhu, H. (2018). Combining UAV-based vegetation indices and image classification to estimate wheat grain yield. *International Journal of Remote Sensing*, 39(21), 6693–6717. <https://doi.org/10.1080/01431161.2018.1466089>
- [47] Li, W., Niu, Z., Chen, H., Li, D., Wu, M., & Zhao, W. (2016). Remote estimation of canopy height and aboveground biomass of maize using high-resolution stereo images from a low-cost unmanned aerial vehicle system. *Ecological Indicators*, 67, 637–648. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.03.036>
- [48] Cen, H., Wan, L., Zhu, J., Li, Y., Li, X., Zhu, Y., & Weng, H. (2019). Dynamic monitoring of biomass of rice under different nitrogen treatments using UAV-based multispectral imagery. *Frontiers in Plant Science*, 10, 1176. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01176>
- [49] Duan, T., Zheng, B., Guo, W., Ninomiya, S., Guo, Y., & Chapman, S. C. (2017). Comparison of ground cover estimates from experiment plots in cotton, sorghum, and sugarcane based on images and ortho-mosaics captured by UAV. *Functional Plant Biology*, 44(1), 169–183. <https://doi.org/10.1071/FP16123>
- [50] Bareth, G., & Schellberg, J. (2018). Replacing manual rising plate meter measurements with UAV-based biomass monitoring in grassland for high-throughput applications. *Computers and Electronics in Agriculture*, 150, 226–238. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.04.007>
- [51] Khaliq, A., Comba, L., Biglia, A., Ricauda Aimonino, D., Chiaberge, M., & Gay, P. (2019). Comparison of satellite and UAV-based multispectral imagery for vineyard variability assessment. *Remote Sensing*, 11(4), 436. <https://doi.org/10.3390/rs11040436>
- [52] Vibhute, A., & Bodhe, S. K. (2012). Applications of image processing in agriculture: A survey. *International Journal of Computer Applications*, 52(2), 34–40. <https://doi.org/10.5120/8176-1295>

Implementation of the System Ensuring Energy Continuity of Metro Lines in Disaster and Emergency Situations in Matlab Environment

Osman ARMAĞAN¹, Ercüment KARAKAŞ², Abdulhakim KARAKAYA²

¹Kocaeli University, Institute of Science, Energy Systems Engineering MSc Programme, Kocaeli, Turkey

²Kocaeli University, Faculty of Technology, Energy Systems Engineering, Kocaeli, Turkey

Abstract

Metro systems constitute fundamental components of urban transportation and demand high reliability in terms of energy continuity. In disaster and emergency scenarios, particularly during earthquakes, an uninterrupted energy supply is critical for ensuring both operational continuity and passenger safety. This study investigates the capacity of emergency generators to meet energy demands during an earthquake on the M5 Üsküdar-Çekmeköy metro line. The process of maintaining energy continuity through generators was modeled and simulated within the MATLAB/Simulink environment. In the model, each load was independently activated, and generator output was dynamically adjusted in response to the power demand. Within the methodological framework, a risk-based load management strategy was developed, prioritizing critical loads. The simulation assessed the load management processes of the generators and the system's capability to maintain energy continuity under emergency conditions. The modeling approach facilitated the evaluation of generator control mechanisms and operator intervention processes. Simulation outcomes allowed the assessment of the effectiveness of load management strategies and the continuity of energy supply provided by generators during emergencies. The study findings indicate that effective management of prioritized loads substantially enhances energy continuity, while dynamic control of generators based on demand improves overall system stability. Furthermore, the integration of artificial intelligence-based optimization algorithms and renewable energy sources was found to have the potential to increase the efficiency and sustainability of energy management in metro systems. Finally, recommendations were provided to enhance energy continuity in metro operations and infrastructure during disaster scenarios, with a detailed examination of the potential contributions of advanced technologies.

Key words: Metro systems, energy continuity, emergency management, generator control, risk analysis.

I. INTRODUCTION

Metro systems are among the indispensable transportation networks of modern cities and play a crucial role in public transit thanks to their high passenger capacity and rapid access capabilities. In today's urban environments, the uninterrupted and reliable operation of transportation networks have become a vital necessity. However, natural disasters and unexpected emergencies can pose serious threats to the safety and energy continuity of these systems [1]. Earthquakes, in particular, can severely damage electrical networks and potentially bring metro operations to a standstill. High-magnitude earthquakes may lead to passengers being trapped in underground metro structures with high passenger density, while panic and stampedes can disrupt evacuation processes, resulting in multiple risky situations [2]. In such scenarios, ensuring emergency energy continuity in critical operations like metro systems, protecting passenger safety, and maintaining controlled evacuation from stations and tunnels are of great importance [3]. For this reason, emergency generators are activated within metro infrastructures and facilities to provide energy supply in the event of a power outage [4]. These emergency generators play a vital role in ensuring energy continuity of metro lines during disasters. They are deployed to meet essential electricity demands in unexpected situations such as power outages, disasters, emergencies, and system failures [5]. In the event of a grid power failure, these generators continue the operation of signaling systems, ventilation units, announcement systems, communication networks, and other core infrastructure systems, thereby preventing operational disruption [6]. Particularly in the case of fires, effective operation of ventilation systems is critical to the safe evacuation of passengers. Therefore, efficient operation of emergency generators and the optimization of power generation in line with energy demand are of critical importance for both energy continuity and system reliability [7]. Therefore, efficient operation of emergency generators and the optimization of power generation in line with energy demand are of critical importance for both energy continuity and system reliability.

Classifying loads and managing them according to priority offers an effective solution to prevent problems such as insufficient generator capacity or irregular energy distribution [8]. This optimization process requires advanced monitoring and management strategies to avoid overloading the generator capacity and to ensure the uninterrupted operation of critical systems. In this context, load prioritization must be guided not by random or fixed rules but through a comprehensive risk analysis. Risk analysis is a methodology used to determine which systems should be activated first under different emergency scenarios [9]. Factors such as the criticality of the loads, associated safety risks, energy requirements, and system dependencies are considered in this analysis [10]. One of the widely used methods in risk assessment processes is the Fine-Kinney analysis. This method systematically prioritizes risks by calculating a risk score using the product of probability (P), severity (S), and detectability (D) coefficients. In complex infrastructures such as metro systems, the Fine-Kinney method significantly contributes to decision-support processes by enabling the integration of both quantitative and qualitative data. In the literature, there are various studies where this method has been effectively applied in energy systems for risk-based load prioritization and critical infrastructure management [11]. In this context, the risk-based load management approach developed in our study is compatible with the Fine-Kinney analytical structure and is based on prioritizing loads according to their relative risk levels [12]. For example, systems such as lighting, ventilation, and signaling are of vital importance during large-scale disasters such as earthquakes. In contrast, some auxiliary systems of secondary importance may be temporarily disabled or operated with limited power depending on necessity. In such cases, ensuring energy continuity and prioritizing critical loads plays a key role in enhancing the earthquake resilience of power distribution networks [13]. Accordingly, a hierarchical structure should be established based on the urgency level of the loads through risk-based load management. Emergency lighting systems crucial for passenger safety, activation of CER loads to transfer trains stuck in tunnels to the nearest stations, signaling, ventilation, emergency evacuation systems, and communication infrastructure are classified as first-priority loads [14]. Systems that support main operations but can tolerate short-term interruptions, such as comfort ventilation, escalators, and other station services, are considered secondary priority loads [15]. Auxiliary facilities that are not significantly impacted by comfort-level interruptions or short-term outages are identified as low-priority loads [16]. While these facilities are not critical in terms

of energy supply, they are important for the smooth functioning of operations. For instance, advertising panels, comfort-based lighting systems, and some supportive infrastructures are evaluated as low-priority loads in metro networks. These systems are less affected by power outages during emergencies and can withstand brief interruptions without causing operational failure [17]. In this study, using a model developed in the MATLAB/Simulink environment, loads were dynamically activated based on risk analysis, and the power generated by the emergency generators was managed in real time. This approach enhanced operational efficiency and optimized energy management. The study focused on ensuring the reliable operation of metro systems during disasters, particularly through a scenario simulating an earthquake on the M5 Üsküdar-Çekmeköy metro line. Emergency generator activation mechanisms, load management strategies, and energy optimization processes were analyzed in detail. System responses under varying loads were analyzed using the developed MATLAB/Simulink model. The study aims to propose strategies for ensuring energy continuity in metro systems during disasters and emergencies. The findings contribute to improving energy management in future metro operations, supporting safer and more reliable transportation. Furthermore, integrating smart control and AI-based energy management will provide innovative solutions to enhance efficiency and safety in metro networks.

II. METHODOLOGY

2.1. General Approach

In this study, the load management of emergency generators was examined for the M5 Üsküdar-Çekmeköy metro line in order to ensure energy continuity in metro systems, and simulation model was developed in the MATLAB/Simulink environment. The main goal of working in this direction is to design a control mechanism for prioritizing demand loads, dynamically managing generators, and to evaluate this within the scope of an earthquake scenario specific to the M5 metro line. The Fine-Kinney risk analysis method was used in the process of prioritizing the loads. In this context, all load needs on the M5 line were analyzed in detail and a risk analysis was carried out by considering an example earthquake scenario. Because of the analysis, critical loads were put into operation on a priority basis and were started gradually, considering the general condition of the system. All these processes were modeled in the MATLAB/Simulink environment to fit precisely with the emergency generator system of the M5 metro line, and how the system would react in times of disaster was examined. During the simulation process, the real system parameters of the emergency generators on the M5 metro line, were used. Because of

the Fine-Kinney risk analysis carried out in line with the sample earthquake scenario, the loads on the M5 Üsküdar-Çekmeköy metro line were classified according to risk priority order. Within the scope of this classification, in the event of a disaster, the most critical loads for the continuity of the system were prioritized for operation. However, non-critical loads were not activated to save energy and use generator capacity effectively. The order in which critical loads were put into operation and the entire process of ensuring energy continuity were modeled and evaluated in detail in the MATLAB/Simulink environment. In this way, the analysis was conducted on how the generators responded to the load demands during the disaster and under which scenarios energy management reacted.

2.2. Sample Earthquake Scenario

After a major earthquake that may occur in Istanbul, if three TEIAS entrance points are disabled, the M5 Metro Line will experience a loss of energy. This will cause some trains and stations in the tunnel to remain powerless. The earthquake will not cause any collapse in the stations and tunnels, but passengers will need to be evacuated from these areas. In this emergency scenario, critical systems must be kept operational to safely evacuate passengers trapped in trains in subway tunnels and passengers in stations. To ensure the safety of passengers and effectively carry out the evacuation process, all emergency evacuation systems, especially those involving internal transformers, and all CER power systems required for trains to reach the nearest station should be activated. To ensure continuity, critical systems such as lighting, ventilation, signaling, communication, SCADA, fire safety, and train CER power must operate. Generators detect outages, switch to emergency mode, and supply energy under SCADA control. Station systems and CER power support evacuation, ensuring continuous operation and passenger safety.

2.3. Load Prioritization with Risk Analysis

Fine-Kinney risk analysis is a quantitative risk assessment method used especially in engineering fields [18]. Three main factors are considered in Fine-Kinney analysis. Probability: The probability of hazard occurring, Frequency (Exposure): The frequency of occurrence of the hazard or duration of exposure, Severity: The magnitude of the damage that will occur when the hazard occurs. A risk value is calculated using these three factors as multipliers, see calculations; The parameters in Table.1, Table.2, Table.3 and Table.4 were used. Risk Value=Probability x Frequency x Severity [19]. This risk value determines whether the resulting risk is acceptable based on its severity and areas where the risk needs to be prevented or controlled are identified. Fine-Kinney analysis is often used to

prevent accidents and plan safety measures [20]. On the M5 Üsküdar-Çekmeköy metro line, the Fine-Kinney risk analysis method was used to prioritize loads in order to ensure energy continuity within the scope of a possible earthquake scenario. This analysis; it has helped to identify systems that are critically important in energy management by enabling the evaluation of risk probability, risk impact and risk degree parameters of each system separately. In order to use the limited generator capacity in the most effective way in times of disaster, the systems are classified according to their priority order in line with the risk analysis. Critical systems with a high degree of risk will be put into operation on a priority basis to ensure the safety of metro operations and passenger evacuation. On the other hand, systems with low risk will not be put into operation in order to save energy and preserve generator capacity.

See Table: 1.

2.3.1. Priority group (Vital systems)

These systems are of vital importance for the metro line, as they maintain basic safety and operation processes in the event of an earthquake, and they will be put into operation on a priority basis.

- Emergency Lighting System: Required to ensure visibility during an earthquake.
- Emergency Ventilation System: Plays a critical role in situations such as fire or smoke evacuation.
- Communication Systems: Required to ensure communication and coordination of operators and emergency teams.
- Notification and Announcement Systems: These are critical systems used to inform passengers in case of emergency, provide guidance and ensure security.
- Signaling Systems: Required for safe guidance of trains remaining in the tunnel.

2.3.2. Priority group (Operational systems)

These systems help protect the basic infrastructure of the metro line and ensure continuity of operations.

- Extinguishing and Waste Water Discharge Systems: It is important for fire extinguishing, flood prevention and waste water discharge operations.

2.3.3. Priority group (Tunnel evacuation systems)

These systems are necessary to carry out evacuation processes safely and facilitate effective emergency management. Train Evacuation Systems: Required to deliver the trains remaining in the tunnel area to the nearest station and to evacuate the passengers safely.

2.3.4. Systems that will not be

Commissioned Systems with priorities 4, 5, and 6 will be disabled to save energy and preserve generator

capacity in case of disaster. These systems were not considered critical according to the earthquake scenario and were not a risk in operations.

Table 1. Fine-Kinney Risk Analysis

ANGER/RISK ELEMENT	ANGER	RISK	RISK POSSIBILITY	RISK FREQUENCY	RISK SEVERITY	RISK SCORE	ORDER OF PRIORITY
EMERGENCY LIGHTING SYSTEM	Inability to move and find direction in the dark, inability to reach emergency exit points and inability to evacuate safely. Serious hazards for individuals with reduced vision or mobility.	Loss of direction in a dark environment and injuries due to panic and stampede, being stranded as a result of not finding emergency exit points due to inadequate lighting and directions, Loss of life, etc. Risks.	6	1	100	600	1
EMERGENCY VENTILATION SYSTEM	Serious dangers such as exposure to smoke, decrease in oxygen level, increase in temperature, decrease in air quality, panic and chaos environment.	With the decrease in oxygen quality, the risk of breathlessness and poisoning of passengers, the chaos that will occur during the evacuation process and the loss of life and injury, etc. risks.	6	1	100	600	1
SIGNALING SYSTEMS	Passengers getting stuck in the train and tunnel, Train-Train contact, Train derailment (Deray incident), Trains not being able to move, loss of field control of the command center, etc. dangers.	Serious injuries, loss of life, damage to trains and long-term service disruption as a result of collision, Injury, loss of life, etc. as a result of train movements, signaling and other vital systems being trapped in the train and tunnel by passengers. risks.	6	2	40	480	1
COMMUNICATION SYSTEMS	Inability to manage the Emergency Response process, Lack of Coordination Between Trains and Stations, Impossibility of Rapid Detection and Solution of Faults in the System, inability to provide passenger information and communication processes, etc.	Failure to respond quickly and effectively during an earthquake, loss of life and property, train movement, evacuation process, etc. Injury and loss of life due to failure to fulfill critical processes, risks of serious injury and loss of life due to the creation of a chaos environment as a result of difficulty in responding to and managing all kinds of threats, etc.	6	2	40	480	1
NOTIFICATION AND ANNOUNCEMENT SYSTEMS	Lack of Effective Management and Coordination, Lack of Guidance during the earthquake, Failure to recognize the moment of the earthquake, failure to communicate with passengers, etc. dangers.	Risks of injury and loss of life due to slowing down of decision-making processes during an earthquake, lack of coordination between teams and prolonging the response time, risks of injury and loss of life due to failure to make warnings and announcements as a result of difficulty in evacuation, and failure to guide passengers during evacuation processes.	6	2	40	480	1

Table 1. Fine-Kinney Risk Analysis(cont.)

EXTINGUISHING AND WASTE WATER DISCHARGE SYSTEMS	In case of a possible fire hazard during an earthquake, the extinguishing systems do not work and cannot intervene in the fire, plumbing waste water systems explode, etc. dangers.	Risk of injury and loss of life due to failure of extinguishing systems, rapid spread of fire, failure to intervene in the fire, risk of poisoning of passengers due to flood, bad odor and dirty water, risk of injury and loss of life as a result of disruption of evacuation due to flood and fire.	3	2	40	240	2
TRAIN EVACUATION SYSTEMS	During and after the earthquake, passengers were trapped in the tunnel in the train, disruption of emergency evacuation processes, etc. dangers.	Passengers in the trains trapped in the tunnel result in panic, stampede, and crowded environment risks	2	2	40	160	3
CAMERA AND SECURITY SYSTEMS	Failure to monitor station locations during and after the earthquake event, failure to provide guidance and follow-up processes of the teams, failure to progress the process in a healthy manner, etc. dangers.	Risk of security camera systems not working, incidents not being recorded and subsequent processes not being improved, possible security risks to passengers and station structures.	2	1	40	80	4
PASSENGER INFORMATION SYSTEMS	These systems are classified as business trip information for passengers, but they can also be used as written warnings and guidance in case of emergencies; without them, passengers lack information and guidance, which poses a danger.	When the passenger information and guidance system is disabled, passenger density, a crowded environment, and chaos may occur, resulting in risks such as injuries.	2	1	40	80	4
ENTRANCE AND EXIT CONTROL SYSTEMS	Irregular exits and entrances from station areas during and after the earthquake, etc. dangers.	Uncontrolled entrances and exits to the stations cause congestion, which leads to disruption of passenger evacuation processes, resulting in risks such as stranding or injury.	1	1	40	40	5
TURNSTILE GROUPS	With the turnstiles being disabled, passengers congestion, evacuation processes are disrupted and passenger flow is disrupted, etc. dangers.	Slowdown, disruption of passenger evacuation processes, etc. foreseeable and tolerable risks.	1	1	15	15	6
HEATING AND COOLING SYSTEMS	As a result of the cooling and heating systems not being activated, the environment becomes too hot or too cold, deterioration of thermal air comfort, etc. dangers.	Tolerable risks such as not being able to provide thermal comfort environment as a result of station areas being too hot or too cold and creating a temporary stress environment for passengers.	1	1	15	15	6

Table 1. Fine-Kinney Risk Analysis(cont.)

ESCALATORS	Considering the possibility of damage to the escalators during the earthquake, the escalators will be out of service.	Considering the possibility of damage to the escalators on the ground or in the station areas during the earthquake, the escalators will be out of service.	1	1	15	15	6
ELEVATOR GROUPS	Elevators may face risks such as structural damage, power outage, or failure to detect an emergency during an earthquake. Additionally, elevators can increase hazards such as entrapment, falls, or fire. For these reasons, elevators will be out of service.	Elevators may face risks such as structural damage, power outage or failure to detect an emergency during an earthquake. Additionally, elevators can increase hazards such as entrapment, falls, or fire. For these reasons, elevators will be out of service.	1	1	15	15	6

Frequency Score	Description
0,5	Once a year
1	Once every six months
2	Once a month
3	Once a week
6	Once a day
10	Once an hour or more frequently

2.3.5. Fine kinney risk analysis parameters severity score

This represents the magnitude of damage or loss that may occur if a hazard materializes. Severity is rated based on the following parameters.

Table 2. Fine Kinney Risk Analysis Violence Score

Violence Score	Description
1	Insignificant (minor injuries)
3	Minor (requires treatment)
7	Serious (long-term disability)
15	Very serious (permanent disability)
40	Death or multiple deaths

Probability Score:

Represents the likelihood of a hazard occurring. The probability is rated as follows.

Table 3. Fine Kinney Risk Analysis Probabilit Score

Probabilit Score	Description
0,1	Very low (almost impossible)
0,5	Low (rare occurrence)
1	Medium (possible under conditions)
3	High (regularly occurs)
6	Very high (inevitable)

Frequency Score:

Represents how often and how many times exposure to a hazardous situation occurs. The frequency is rated based on the following parameters.

Table 4. Fine Kinney Risk Analysis Frequency Score
In the Fine-Kinney method, the risk value is calculated with the following formula:

Risk Value (R) = Severity (S) × Probability (P) × Frequency (F) Prioritization According to Risk Value; According to the calculated risk value, the priority of risks and the actions to be taken are determined as follows.

Table 5. Fine Kinney Risk Value Range Score

Risk Value Range	Risk Level	Action Required
1 - 20	Low Risk	Can be reviewed later.
21 - 70	Medium Risk	Control measures should be taken.
71 - 200	High Risk	Should be controlled immediately.
> 200	Very High Risk	Activities should be stopped, and urgent measures should be taken.

2.4. Matlab/Simulink Model of the System

This section explains the methodology of the load management system developed to ensure energy continuity in metro lines. In the study, a simulation model was created by modeling the emergency generators of the M5 Üsküdar - Çekmeköy Metro Line exactly in the MATLAB/Simulink environment and taking them as a reference. The model is designed to analyze the dynamic management of generators, the risk-based prioritization of loads, and how the system ensures energy continuity in line with disaster scenarios.

2.4.1. Simulation design components

Energy flows at TEİAŞ entry points, which feed the line from three different points, are constantly monitored by the logic controller. If all three arms are de-energized, these signals are detected as "1" and a semi-automatic generator scenario warning is sent to the control center. This mechanism plays a critical role in ensuring energy continuity. Based on the risk

analysis created according to the sample earthquake scenario in the study, the simulation ensures that different loads, such as trainload, ventilation, lighting, and pumps, are commissioned separately and that the generators work in accordance with the load demands. Each load is switched on or off by logic signals, optimizing the generators' power production. The control center receives the signal from the TEİAŞ line and activates or deactivates the generators. Additionally, Semi-Automatic Generator Scenario Control Backup Session can be activated as needed. PM values determined for each load are transmitted to the generators according to load demands. The activity of the loads is controlled by logic gates, and the power production of the generators is optimized by combining the total signals from all loads in the sum-block. The 3 Phase Analysis Control Block ensures the energy balance of the system by measuring active and reactive power measurements. As a result, loads are controlled independently, and generators operate according to system needs.

The first data point of the system begins with monitoring the energy flows in the field at the entry points of Bağlarbaşı, Ümraniye, and Dudullu, which feed the line from three different branches. In case of any power outage, the signals are detected as "0" and a semi-automatic generator scenario warning is sent to the control center to activate the generator system.

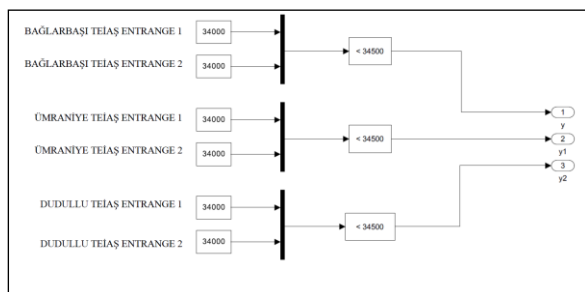


Figure 1. M5 Metro Line Main Line Teiaş Connection Line

2.4.2. M5 command center emergency generator control block

Shape. The M5 Command Center Emergency Generator Control Block in 2 allows multiple loads (train, ventilation, pumps, etc.) to be controlled separately and the generators to operate according to load demands. Loads are switched on with logic signals a PM signal is assigned to each load according to the demand amount. These signals enable generators to be dynamically adjusted to precisely match load demands. Additionally, the logic 1 signal from the TEİAŞ control block activates the system, while the logic 0 signal terminates the simulation. In addition, the semi-automatic generator scenario is also backed up.

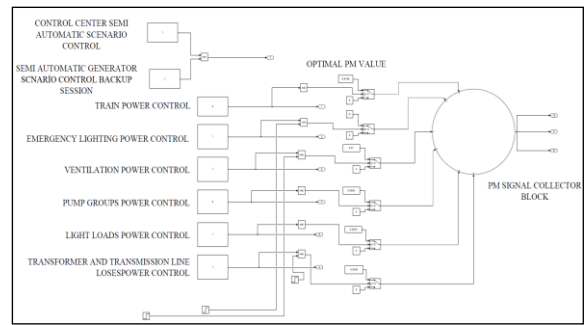


Figure 2. M5 Control Center Emergency Generator Control Block

2.4.3. Logic block controlling generators

This block controls the active or passive state of the generators through the excitation voltage gate input. The mechanical power input of the generators is adjusted according to the optimal PM values from the control block, thereby optimizing power production. Since each load has different power demands, the control block produces the requested power precisely by dynamically adjusting the PM values of the generators.

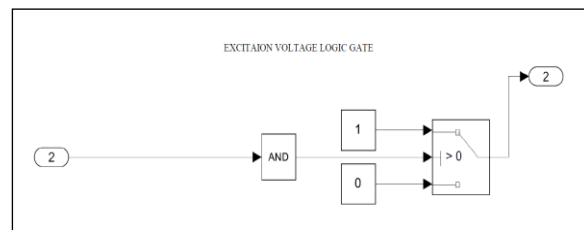


Figure 3. Excitation Voltage Logic Gate

2.4.4. Generators

The three generators in the system (Dudullu Campus Generators 1, 2, and 3) can be started independently but operated simultaneously. While the PM input of the generators determines the power production according to the load demands, the VF input provides reactive power production and voltage regulation. M output represents mechanical status information, and A, B, and C outputs represent phase voltages. The power production of the generators is dynamically adjusted with PM and VF inputs to ensure efficiency. The design data of Dudullu Campus Generators optimize dynamic power generation capacities that vary according to the PM and VF input parameters. While system voltage regulation is provided due to reactive power settings, generators can adapt to different load scenarios.

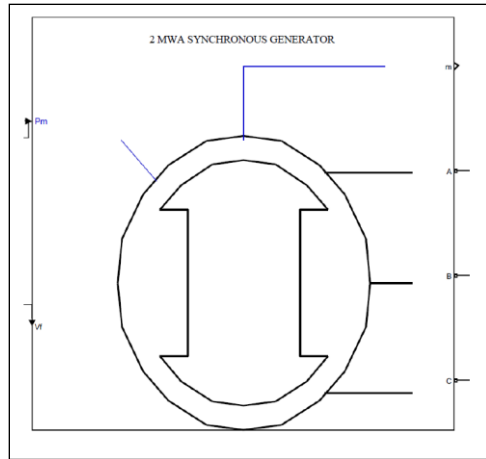


Figure 4. Generator with 2 MVA Apparent Power

Table 6. Simulation Generator Parameters

Parameter	Value	Explanation
Rated Power (Pn)	2MW (2000kW)	The maximum active power that the generator can produce.
Nominal Voltage (Vn)	10,000 V (Vrms)	Nominal voltage value of the generator.
Frequency (fn)	50Hz	Operating frequency of the generator is compatible with the grid.
Rotor Type	Round	Rotor type used for stable operation.
Mechanical input	Mechanical power (Pm)	The generator takes mechanical power as input.
Reactances (Xd, Xd', Xq, Xq', Xl)	1.000, 0.003, 0.0023, 1.0076, 0.0065, 0.0025, 0.0015	d and q axis reactance values; represent magnetic circuit responses. Leakage reactance (Xl) is also included in this group.
d Axis Time Constants (Td, Td')	1.3201 s, 0.0231 s, 0.3371 s	D-axis dynamic responses of the generator in short circuit situations.
q Axis Time Constants (Tq, Tq')	0.3371s, 0.0295s	Q-axis dynamic responses of the generator in short circuit situations.
Stator Resistance (Rs)	0 (pu)	Resistance of the stator winding (ideal case).
Inertia Coefficient (H)	0.1028	Rotor inertia coefficient of the generator; expresses energy change dynamics.
Friction Factor (F)	0.02056	Rotor friction coefficient.
Pole Pairs (p)	2	Pole pairs of the rotor.
Saturation Coefficients (ifd, vt)	[956, 1.082, 1.19, 1.316, 1.457; ...; 1.151, 1.201]	It is used to simulate the behavior of the generator to magnetic saturation levels.
Load Type	PV	It controls the active power and voltage magnitude.
Generated Active Power (P)	2MW (2000000W)	Active power supplied to the grid.
Minimum Reactive Power (Qmin)	Unlimited (inf)	The minimum reactive power limit is specified.
Maximum Reactive Power (Qmax)	Unlimited (inf)	The maximum reactive power limit is specified.
Saturation	Simulation included	The magnetic saturation effect of the generator is simulated.
Measurement Data (Measurement Bus)	Disabled	Signal labels were not used.

2.4.5. Three-phase system active-reactive power measurement circuit and load control block

In this block, energy signals from three phases are analyzed, and active and reactive power values are measured. The data obtained are evaluated according to the energy demands of the loads, and the load control block decides whether the loads will be activated based

on these values. The positions of the loads are determined with logic signals (1 and 0). The balance between power production and consumption is achieved.

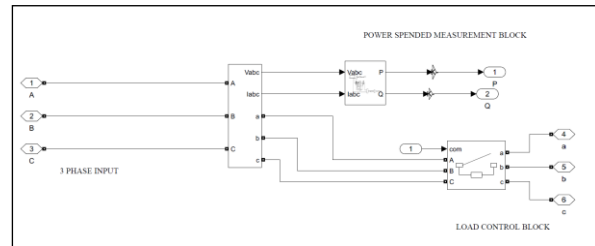


Figure 5. Three-phase System Analysis Circuit and Load Control Block

2.4.6. Load blocks installed in the system

In the simulation, active and reactive power consumption was simulated separately for each load using a three-phase parallel RLC load block. These blocks represent the electrical properties of the loads (resistive, inductive, capacitive) exactly, allowing the generators to feed the loads and the dynamic responses of the system to be analyzed.

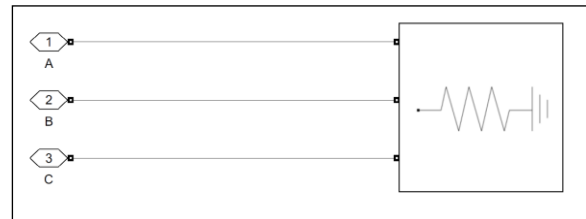


Figure 6. Load Blocks

2.4.7. Energy distribution and load profiles setup

The amount of power obtained from the generators is intended to supply the systems required to be activated in emergency scenarios. All load profiles are activated separately in line with the conditioned signals coming from the control mechanism. Thanks to this approach, the energy requirement and priority of each load were evaluated through a risk analysis prepared specifically for the scenario. Loads with priority order 1, 2, and 3 will be commissioned. Systems that are not identified as critical loads in the scenario will not be put into operation.

2.5. Defining Input and Output Data

The input parameters, scenarios, and relationships of system components used in the simulation are detailed. Under the subheadings below, numerical details specific to the simulation setup are explained step by step.

2.5.1. Providing teiaş login data

The system is triggered when the requested amount of energy cannot be received exactly from Bağlarbaşı, Ümraniye, and Dudullu TEİAŞ inputs. In the simulation, a scenario in which TEİAŞ resources are completely disabled is considered. When the energy

detection sensors cannot provide the 34,500V AC voltage required by the line, the output signals go to "1" to detect the outage. The system initiates the generator commissioning process by monitoring these signals through the control block.

2.5.2. Definition of loads installed in the system

In the simulation, each load component is modeled with a three-phase parallel RLC load block. This block made it possible to analyze how generators feed the loads by simulating the active and reactive power consumption of the loads on an individual basis. Additionally, resistive, inductive, and capacitive load characteristics were represented, enabling power flow and balance analysis.

2.5.3. Train energy need

The system is designed to allow the movement of only one train at a time. There are 16 engines in each train set, and the total energy need is determined as 2,320 kW. In addition, there are 2 auxiliary power systems in each train and the total energy need of these systems is 240 kW. The maximum energy consumption of both systems is calculated as 2.56 MW. See: Figure 8.

2.5.4. Ventilation systems energy requirement

This load is configured to operate uninterruptedly during power outages. Ventilation systems are planned to operate at 70% capacity. 8 TVFs will be activated between both stations, and thus the total energy consumption of these systems is calculated as 660 kW. An EXF will be commissioned at each station and the total energy consumption will be 268 kW. In addition, the energy consumption for a total of 16 INFs, was determined as 201 kW, with one INF active at each station. The total energy consumption of ventilation systems is calculated as 1.128 MW. See: Figure 8.

2.5.5. Emergency lighting systems energy need

The amount of energy required to ensure uninterrupted operation of emergency lighting systems in tunnels and stations has been determined. Energy consumption was calculated as 59.92 kW for a total of 4,280 tunnel emergency luminaires and 39.65 kW for 7,080 station luminaires. The total energy consumption of emergency lighting systems was determined as 0.4565 MVA. See, Figure 8.

2.5.6. Pump groups energy requirement

Water evacuation and fire extinguishing systems are calculated within a load group that operates based on demand. Considering the starting currents and operating times, there is 1 fire pump group (416 kW) and 1 wastewater pump (297 kW) at each station. The total energy consumption of these systems was determined to be 0.7132 MW. See; Figure 8.

2.5.7. Light loads energy requirement

Light Loads is a load group that meets the power needs of low energy consumption systems, within the station.

This group includes systems such as emergency detection and warning systems, signaling systems, station master logins, and command center logins. The total energy consumption of these systems is calculated as 0.155 MW. See; Figure 8.

2.5.8. Transformer and transmission line lost loads

Loss Loads refer to the energy losses occurring in transformers and transmission lines. This group was created by taking into account the transformer and transmission losses associated with the line to obtain accurate values under real field conditions. Three transformers that will feed the main line will be activated: Üsküdar, Çarşı and Çekmeköy CER Transformer. Each transformer has a load of 3.3 MVA and each MVA loss is calculated as 7.12 kW. In this case, the total loss of transformers was determined to be 70,488 kW, and the loss of service transformers was determined to be 220,008 kW. The total amount of lost load was calculated as 0.2878 MW. See: Figure 7.10.

III. IMPLEMENTATION

3.1. Energy Loss of the Line

In a possible earthquake scenario in Istanbul, if TEIAS stops the energy supply or the energy transmission lines in the city are damaged, the three main energy sources feeding the M5 Metro Line will become disabled. According to this scenario, when there is a power outage throughout the city and the 34,500 Volt AC energy normally required by the M5 line cannot be provided, the system will try to ensure uninterrupted operation by quickly activating backup energy sources. When a power outage occurs on the TEIAS line, a "1" signal will be transmitted to the control block. This signal indicates that energy loss has been detected.

3.2. M5 Command Center Control Block Process

After detecting this situation, the M5 Command Center Control Block activated the semi-automatic generator scenario. In this process, logic gates (AND and SWITCH blocks) were activated as needed in line with the required loads, and power management was carried out through the PM (power management) inputs of the generators. This conditioning process ensured that the loads were gradually put into operation.

3.3. Activation Process of Generators

The signals, produced in line with the decisions taken by the command center control block, were transmitted to the generator control block, designed separately for each generator. This control block manages mechanical power and excitation voltage, which are the two basic input parameters of generators. The signal reaching the mechanical power input is first directed to the AND block and transferred to the PM value, which allows the generator to reach the predetermined optimal power production. In the opposite case, when a zero signal is received from the AND block, it will be activated, and the generator will remain in the off position

momentarily. Similarly, the excitation voltage input is controlled. As seen in the simulation output diagrams, the generators become synchronized within the first second of each load change and enter into a stable energy production process.

3.4. Load Energization Process

Before the energy demand passing through the 3-phase system blocks is distributed to the loads, it is prioritized based on a risk analysis prepared according to the scenario aligned with the system's energy needs. In the risk analysis prepared according to these guidelines, the priority-one vital systems were the first to be put into operation. These systems include Emergency Lighting Emergency Ventilation, Communication Notification and Announcement Systems, and Signaling Systems. The primary purpose of these systems is to ensure the safety of passengers and personnel during extraordinary situations and to facilitate effective guidance. In the simulation, systems such as notification, announcement, and signaling were considered part of the light load group and were put into operation as required by the scenario. Within this scope, it was taken into account that such systems are among the first to be activated in emergency situations. Additionally, all transmission line and transformer losses in the system were included as lost loads in the model; thus, the design aims to generate realistic data that reflect possible field conditions. Subsequently, Fire Extinguishing and Water Drainage Systems, which are part of the operational systems, were classified under Priority Group 2 and activated after the necessary checks. These systems play a critical role in ensuring life and property safety by operating in the second phase of emergency response. These systems are important in terms of protecting the critical basic infrastructure of the metro line and sustaining emergency response processes. Finally, Priority Group 3 Tunnel Evacuation Systems will be put into operation, and it has been simulated to deliver the trains stuck in the tunnel during the earthquake to the nearest station and ensure the safe evacuation of the passengers. Systems with priorities 4, 5, and 6 are disabled to provide energy to critical systems and preserve generator capacity in the event of a disaster. These systems, which are not of vital importance according to risk analysis, will increase energy efficiency and ensure that metro operations continue safely and ensure the continuity of energy supply.

3.5. Simulation Finalization Process

The stable power output obtained from the generators met the requested power values and provided the desired level of power to each load group. The termination process of the simulation was initiated when the energy provided by TEİAŞ returned. When the 34,500 V AC voltage required by the line started to be fed from TEİAŞ busbars, the controller signal dropped to zero and was directly transmitted to the M5 Command Center Emergency Generator System Control Block. With this signal, the process of disabling the generators was initiated and the system was manually disabled by the control center operators. With the approval of the operators, the generators were disabled, and all loads started to be fed from TEİAŞ's main energy source again. With the generators having become passive, all processes of the simulation were completed, and the system was terminated safely.

3.6. Produced and Consumed Power Data

3.6.1. Generator production data

The energy production capacity of generators is directly related to their ability to adapt to sudden or continuous changes in loads. Generators do not have any restrictions on reactive power production, which allows the system to operate more flexibly. Thanks to this feature, generators enable more efficient use of energy by making voltage regulation and power factor adjustments. The system used on the M5 Metro Line consists of three separate generators. The generators, each producing 2 MVA power, have a total apparent power capacity of 6 MVA. According to the simulation results, when the systems belonging to the first 3 groups (emergency ventilation, emergency lighting, light loads, train loads, pump loads, and lost loads) were put into operation based on the risk analysis, the total amount of active power produced by the generators was calculated as 5,303 MW (See: Figure 7). When the power-time graphs were examined, it was observed that all three generators produced the same amount of power within the same time period.

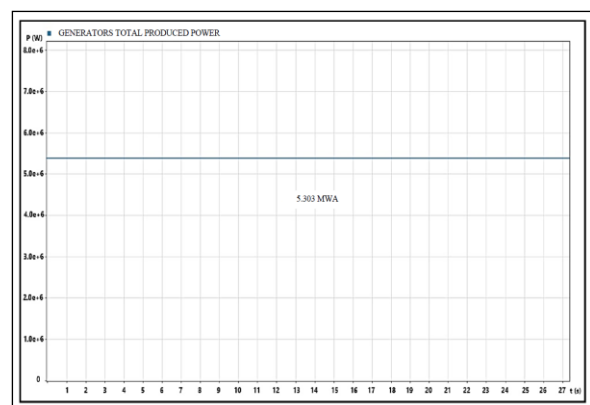


Figure 7. Active Power Time Graph Produced by Generators

3.6.2. Generator production data

The graph below shows the amount of power each load group draws from the generators when all critical loads are put into operation.

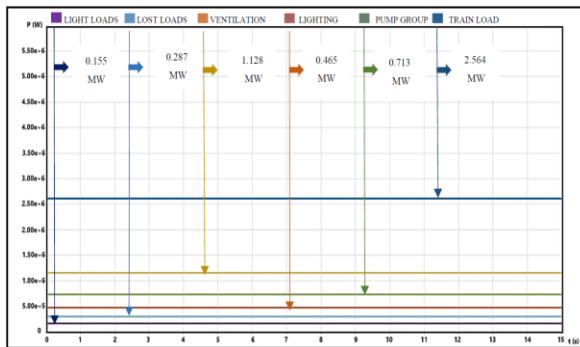


Figure 8. Consumed Active Power Time Graph

3.6.3. Commissioning of loads separately and power change

According to the simulation setup, each load can be activated separately and these generators produce power as much as the amount of loads activated. In the first stage, the priority group and vital systems, namely Ventilation, Lighting, Light loads, Transformer and Transmission line loss loads, were put into operation and it was observed that the generators produced a total of 2,035 MW of power corresponding to the requested load. When other critical systems it was observed that the generators produced 5,303 MW (See Figure 7.) power.

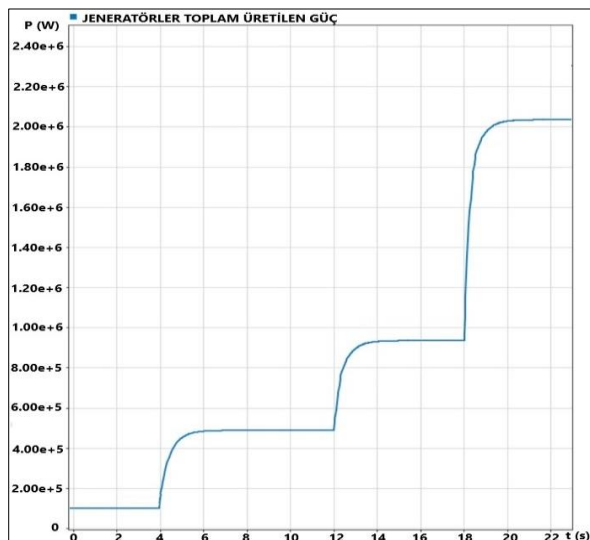


Figure 9. First Demanded Loads Produced Power Time Graph.

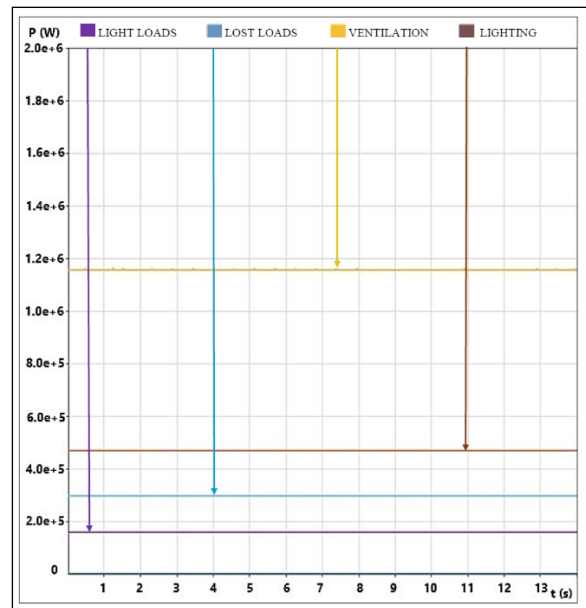


Figure 10. First Demanded Loads Consumed Power Produced Power Time Graph

3.7. Comparison and Analysis of Generator Data in Field and Simulation

The performance of the generators used in the real field was compared with the results of the generators modeled on MATLAB Simulink. This comparison is of great importance in terms of evaluating the accuracy of the system and analyzing the consistency of the modeling approach. When the generator data in the field was examined, it was seen in live tests that each generator produced approximately 1,768 MW active power and the total active power of the system was 5,304 MW. In the Simulink model, the nominal power of the generators is defined as 2 MVA, and in the simulation results, the output power of each generator is calculated as approximately 1.768 MW. This shows that certain energy losses exist both in field conditions and in the simulation environment and that operating conditions are subject to certain limitations. In real operating conditions, generators are not operated at 100% capacity as their installation and permanent operating parameters, but are operated in the 75% - 90% power range for safety, extending equipment life and preventing overload.

This situation was also observed in the simulation results, and the output power of the generators was lower than the nominal value of 2 MVA. Energy losses in real field conditions were calculated and included in the simulation model. The results were obtained accordingly; see Figure 8.

The required results with the field parameters were calculated with the equations below.

$$I = P / \sqrt{3} V \cos\phi \quad (1)$$

$$\cos\phi = P / S \quad (2)$$

$$P = S \cos\phi \quad (3)$$

$$P = \sqrt{3} V I \cos\phi \quad (4)$$

$$MW(s) = \sqrt{3} V I \quad (5)$$

According to these calculations, apparent power = 2 MVA, current value = 2.897, power factor = 0.88 and real power = 1.768 MVA. When the real field data and the general results of the Matlab Simulink simulation model are compared, it is seen that the model is compatible with the real system. The main reasons why real generators operate below their rated power are the maintenance of safe operating limits and losses in transmission lines. Although constant loads and nominal values are taken as basis in the simulation, the results obtained are very close to the values in the field. This supports the accuracy of the model and the system's ability to represent real conditions in the field.

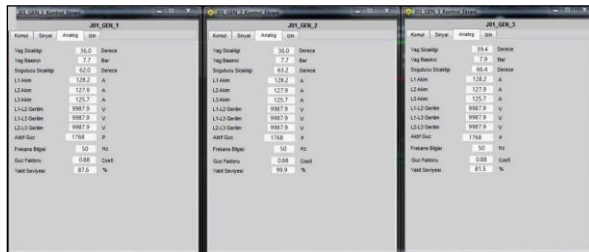


Figure 11. Operating Parameters of Field Generators

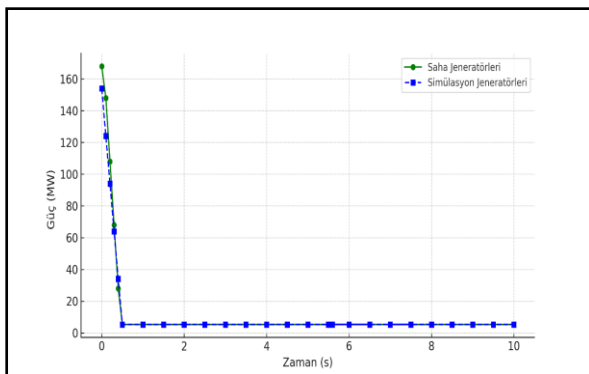


Figure 12. Power Time Curve of Field Generators and Simulation Generators

In the graph, the power change of the real field and Matlab Simulink simulation generators is analyzed. Field generators start with 168 MW and simulation generators start with 154 MW, and the power decreases in both systems over time. In 0.5 seconds, both generators decrease to 5.303 MW and stabilize. This shows that generators initially meet high energy demand and then switch to stable power production. Although the synchronous generators in the simulation exhibit similar performance to field generators, there are differences in their initial values.

IV. CONCLUSIONS

The analysis reveals that generators play a critical role in terms of energy continuity and that a correct load management strategy makes significant contributions to emergency systems that support evacuation processes as well as ensuring energy continuity, based on a long-term risk analysis. In this regard, the energy of the generators was dynamically managed based on the reference to disaster plans and was rented in accordance with the load diversity order. The ability of the generators to respond to sudden load changes, maintain stability and ensure the continuity of energy are important. has been seen. Within the scope of the disaster scenario, vital systems (Emergency Lighting, Emergency Ventilation, Communication, Warning and Announcement, Signaling systems) were first activated, and then operational systems (Fire Extinguishing and Water Evacuation) were activated. In the final stage, tunnel evacuation systems were activated, enabling trains to reach the nearest station and passengers to be evacuated safely in the event of an earthquake. In this process, low priority auxiliary and comfort systems were disabled, and the generator capacity was transferred to critical priority systems. When the simulation and field data were compared to verbatim, it was seen that the model had the ability to represent real-world conditions.

It was determined that the active power of the real generators was 1,768 MW and the total system produced 5,304 MW active power. It has been observed that the simulation outputs match the application results. Therefore, improvements can be made for the current system by simulating different scenarios with the designed model. As a result, power management and generator optimization of generators are of great importance to ensure energy continuity in metro systems. The analyzes have revealed how a load management strategy appropriate to the energy needs of the system can be created, and have shown that energy continuity can be ensured in possible disasters and emergencies by commissioning the generators in a controlled manner and managing the loads in order of priority according to risk analysis, and that energy resources can be used efficiently. Going forward, separate risk analyzes can be prepared for each disaster and emergency scenario and action plans can be created based on these analyses. these plans can be integrated with artificial intelligence-supported control scenarios to create dynamic load management suitable for every scenario. By developing artificial intelligence-based scenarios for each event, the load management of the generator system can be more optimized and energy resources can be used in the most efficient way.

REFERENCES

- [1] Hu, J., Wen, W., Zhai, C., & Pei, S. (2024). A comprehensive review of resilience of urban metro systems: A perspective from earthquake engineering. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 90 (4), 99–126.
- [2] Demir, Fatma, and Mehmet, Saltan. (2017). "Deprem Etkisi Altında Demiryolu Üst Yapısı Davranışlarının İncelenmesi." *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi* 5(3), 615-620.
- [3] Omidvar, B., Malekshah, M. H., & Omidvar, H. (2014). Failure risk assessment of interdependent infrastructures against earthquake: A Petri net approach—case study: power and water distribution networks. *Natural Hazards*, 71(3), 1971–1993.
- [4] Huang, Wujing, et al. (2021). Resilience oriented planning of urban multi-energy systems with generalized energy storage sources. *IEEE-Transactions on Power Systems* 37(4), 2906-2918.
- [5] E. Karakaş And O. Armağan, (2024). Ensuring Energy Continuity in Disaster And Emergency Situations in Metro Lines, an Exemplary Emergency Investigation Imascon 2024 Autumn Nov 29-30, 2024 Kocaeli/Türkiye, *International Marmara Science and Social Sciences Congress, Sciences Proceedings Book vol.1, no.1, Kocaeli, Turkey*, 29(30), 322-330.
- [6] Kırılangoğlu, Cem. (2022). Metro İstasyonu Tasarımlarının Normal İşletme ve Acil Durum Tahliye Senaryoları Açısından 3 Boyutlu Simülasyon Teknolojisi ile Değerlendirilmesi. *Demiryolu Mühendisliği* 8(16), 51-65.
- [7] Singh, M. K., & Tripathi, R. K. (2020). Optimal operation and energy management of emergency power systems in microgrids. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 102(6), 1970 –1993.
- [8] Shang, Jingfu, et al. (2009) The optimized allocation of mobile emergency generator based on the loads importance. 2009 *Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference IEEE* 435(6) 180 –198.
- [9] Ioannou, Ioanna, et al. (2022). Prioritization of hazards for risk and resilience management through elicitation of expert judgement. *Natural hazards* 112(3) 2773-2795.
- [10] Johansson, Jonas, Henrik Hassel, and Enrico Zio. (2013). Reliability and vulnerability analyses of critical infrastructures, Comparing two approaches in the context of power systems. *Reliability Engineering & System Safety* 120(9), 27-38.
- [11] Dey, P. K. (2001). Decision support system for inspection and maintenance: a risk-based approach. *Reliability Engineering & System Safety*, 72(3), 241–247.
- [12] Şen, Z., & Başar, E. (2019). Application of Fine–Kinney and AHP integrated approach for risk assessment of a metro construction project in Istanbul. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 88(3) 172–180.
- [13] Cui, Hongjun, et al. (2024). Earthquake preparedness based on reliability and relief of the emergency supply network: Pre-storage and pre-matching. *Transportation Safety and Environment* 6.(4), 0 - 21.
- [14] Karakulak, Enes, and Yalçın Eyigün (2022). Kent İçi Raylı Sistemlerde Ve Ana Hat Demiryollarında Acil Durumda Yolcu Tahliyesi. *İstanbul Ticaret Üniversitesi Teknoloji ve Uygulamalı Bilimler Dergisi* 4(2), 157-172.
- [15] Leoutsakos, George, et al. (2022). Metro Braking Energy for Station Electric Loads: The Business Case of a Smart Hybrid Storage System. *Conference on Sustainable Urban Mobility. Cham: Springer Nature Switzerland*, 21(3), 2110-2130.
- [16] Liao, Jinlin, et al. (2021). Energy-saving optimization strategy of multi-train metro timetable based on dual decision variables, A case study of Shanghai Metro line one. *Journal of Rail Transport Planning & Management* 17 (1) 02 - 34.
- [17] Hu, Xiaojuan, et al. (2025). Optimal energy management of a DC power traction system in an urban electric railway network with dogleg method. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects* 47(1) 4663-4684.
- [18] Chen, Yu, Xinyue Yu, and Zhengyan Yang. (2025). A fuzzy decision support system for risk prioritization in fine kinney-based occupational risk analysis. *Journal of Soft Computing and Decision Analytics* 3(1) 1-17.
- [19] Wang, Guangpeng, et al. (2021). Flood risk assessment of metro system using improved trapezoidal fuzzy AHP: A case study of Guangzhou. *Remote Sensing* 13.(24) 51 - 54.
- [20] Qi, Qingjie, et al. (2022). Resilience assessment of an Urban Metro Complex Network, case study of the Zhengzhou Metro, *Recovery, Utilization, and Environmental Effects* 14.(18) 115 – 135.

Havadan Suyu Isı Pompasının Farklı Ortam Şartlarında Enerji Verimliliği Açısından Analizi

Analysis of Air-to-Water Heat Pump in Terms of Energy Efficiency under Different Ambient Conditions

İsmail ALTUN ¹, Ayhan ONAT ¹

¹ Marmara Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 34854 Maltepe/İSTANBUL

Öz

Havadan suya ısı pompaları kullanıcıların ısıtma, soğutma ve kullanım sıcak suyu ihtiyacının karşılanmasında kullanılan, buhar sıkıştırma soğutma çevrimi esasına dayalı çalışan cihazlardır. Bu cihazların enerji verimliliği açısından etkin bir şekilde kullanılabilmesi için çalışacağı ortam şartlarının değerlendirilmesi gerekmektedir. Havadan suya ısı pompalarının ısı kaynağı havadır. Bu çalışma kapsamında; yapılan deneyler yardımıyla havanın iki önemli özelliği olan sıcaklık ve bağıl nem değerleri belli aralıklarla değiştirilerek her bir sıcaklık-bağıl nem noktası için havadan suya ısı pompasının performans katsayısı (COP) ve enerji verimlilik oranı (EER) hesaplanmıştır. Su çıkış sıcaklıklarının ortam sıcaklığı ve bağıl nem ile değişimi gösterilmiştir. Deneyler sonucunda COP değerlerinin ortam sıcaklığına bağlı olarak -15 °C ortam sıcaklığında 2,13 ile 20 °C ortam sıcaklığında 5,24 arasında değiştiği görülmüştür. Deneylerden elde edilen veriler IBM SPSS Statistics programı kullanılarak analiz edilmiştir. Yapılan analiz sonucunda COP değerini kompresör giriş-çıkış sıcaklığı, kondenser çıkış sıcaklığı ve evaporatör giriş sıcaklığı ile ilişkilendiren matematiksel model denklemi bulunmuştur. Deneylerde hesaplanan COP değerleri ile programdan elde edilen matematiksel model denklemi kullanıldığında bulunan COP değerleri karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. Ayrıca bağıl nem etkisinin deneysel olarak ele alınması açısından literatüre özgün bir katkı sağlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Isı Pompası, Enerji Verimliliği, Soğutma Çevrimi, Sıcaklık, Bağıl Nem

Abstract

Air-to-water heat pumps are devices that work based on the vapor compression cooling cycle and are used to meet the heating, cooling and domestic hot water needs of users. In order for these devices to be used effectively in terms of energy efficiency, it is necessary to evaluate the environmental conditions in which they will operate. The heat source of air-to-water heat pumps is air. Within the scope of this study; with the help of experiments, the temperature and relative humidity values, which are two important characteristics of the air, were changed at certain intervals and the performance coefficient (COP) and energy efficiency ratio (EER) of the air-to-water heat pump were calculated for each temperature-relative humidity point. The variation of water outlet temperatures with ambient temperature and relative humidity has been shown. As a result of the experiments, it was seen that the COP values varied between 2.13 at -15 °C ambient temperature and 5.24 at 20 °C ambient temperature, depending on the ambient temperature. The data obtained from the experiments were analyzed using IBM SPSS Statistics program. As a result of the analysis, a mathematical model equation was found that relates the COP value to the compressor inlet-outlet temperature, condenser outlet temperature and evaporator inlet temperature. The COP values calculated in the experiments were evaluated by comparing the COP values found when using the mathematical model equation obtained from the program. In addition, an original contribution to the literature has been made in terms of experimentally addressing the effect of relative humidity.

Keywords: Heat Pumps, Energy Efficiency, Cooling Cycle, Temperature, Relative Humidity

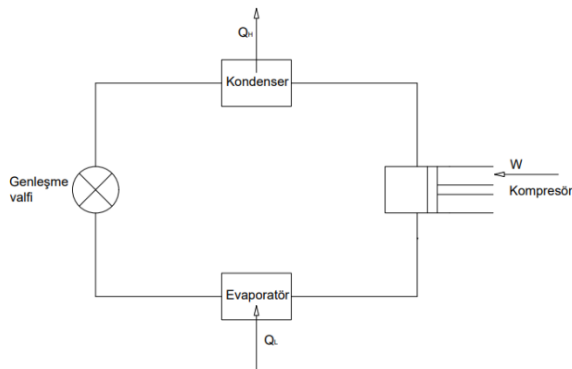
I. GİRİŞ

Isı pompaları bir ısı kaynağındaki ısı enerjisini buhar sıkıştırma soğutma çevrimi yardımıyla farklı bir ortama o ortamın ısıtılması veya soğutulması amacıyla aktaran cihazlardır. Isı pompaları, ısı enerjisini aldıkları kaynağa göre hava kaynaklı, su kaynaklı ve toprak kaynaklı ısı pompaları şeklinde sınıflandırılmaktadır. Isı pompalarının kompresör, kondenser, genleşme vanası ve evaporatör olmak üzere dört temel unsuru vardır. Bir soğutucu akışkanın ısı pompası içerisinde sıvı ve gaz fazları arasında hal değişiminde bulunması yardımıyla ortam ile ısı transferi gerçekleştirilir. Isı pompalarının basitçe çalışma prensibi şu şekildedir: Soğutucu akışkan kompresörde sıkıştırılarak kızgın buhar haline getirilir. Kompresör tarafından basıncı ve sıcaklığı artırılan soğutucu akışkanın

sıcaklığı kondenser kısmında yoğunlaşarak çevreye ısı vermesinden dolayı azalır. Teoride soğutucu akışkanın kondenser kısmında basıncının sabit kaldığı kabul edilir fakat gerçekte boru sürtünmeleri ve yüzey kayıplarından dolayı bir miktar basınç düşümü yaşanmaktadır. Kondenserde yoğunlaşmış halde çıkan düşük sıcaklıktaki soğutucu akışkanın basıncı genişleme (kısılma) vanasında düşerek evaporatör basıncına iner. Evaporatörde ise düşük basınç ve düşük sıcaklıkta olan soğutucu akışkan ortamdan ısı çekerek buharlaşır. Evaporatörde tekrardan gaz fazına geçen soğutucu akışkanın kompresöre girmesiyle çevrim tamamlanmış olur.

Isı pompaları soğutma çevriminin ters yönde çalışmasıyla ısıtma yapılması ve kondenserde atılan ısı enerjisinin suya aktarılmasıyla sıcak su sağlanması için kullanılmaktadır. Bu şekilde çalışan ısı pompaları tek bir sistem olarak kullanıcıların hem ısıtma-soğutma hem de kullanım sıcak suyu ihtiyacını karşılamasından dolayı oldukça yaygın bir kullanım alanına sahiptir. Havadan aldığı ısı enerjisini suya aktaran ısı pompaları havadan suya ısı pompaları olarak adlandırılmaktadır. Isı pompasının kondenserinde yoğunlaşan soğutucu akışkanın ısı enerjisi radyatör, yerden ısıtma ve fan-coil gibi sistemlerle ısıtma maksadıyla kullanılmaktadır. Ayrıca ısı pompasından elde edilen sıcak su boyler veya tanklarda depo edilerek kullanım sıcak suyu olarak da kullanılmaktadır. Bu şekilde çalışan ısı pompaları güneş enerjisi ve ek elektrikli ısıtıcılar ile de desteklenebilmektedir.

Enerji verimliliği basitçe elde edilen faydalı enerjinin bu enerjinin sağlanması için harcanan enerjiye oranı olarak tanımlanabilir. Isı pompalarında fayda sağlanan enerji ısıtma maksadıyla kullanıldığında enerji verimliliği ile ilgili değerlendirmelerde performans katsayısı (COP) göz önüne alınır. Fayda sağlanan ısı enerjisi soğutma maksadıyla kullanıldığında ise verimlilik enerji verimliliği oranı (EER) olarak dikkate alınır. Isı pompasının basit çevrimi Şekil 1 içerisinde verilerek COP ve EER değerlerinin hesaplanmasında kullanılan denklemler belirtilmiştir.



Şekil 1. Isı pompası basit çevrimi

Q_H : ortama atılan ısı enerjisini

Q_L : ortamdan alınan ısı enerjisini

W : harcanan enerjiyi

$Q_H = Q_L + W$ ise Şekil 1'de verilen sistemin enerji dengesi ifade etmektedir.

Yukarıdaki ifadeler göz önüne alındığında ısı pompaları için COP değeri kondenserden ortama atılan ısı enerjisinin kompresörde harcanan enerjiye oranıdır. Isı pompası soğutma maksadıyla kullanıldığında ise EER değeri evaporatörde ortamdan alınan ısıya yine kompresörde harcanan enerjiye oranıdır.

$$COP = \frac{Q_H}{W} = \frac{Q_L + W}{W} = 1 + (Q_L/W) \quad (1)$$

$$EER = Q_L/W \quad (2)$$

Isı pompaları geleneksel ısıtma sistemlerinde kullanılan kömür, doğal gaz ve LPG gibi yanması sonucu havaya karbondioksit, nitrojen ve kükürt gibi zararlı gazlar salan yakıtlara nazaran çevre için daha sağlıklıdır. Havadan suya ısı pompaları ise ısıtma-soğutma ihtiyacı ile birlikte sıcak kullanım suyu sağlaması ve çevre için fosil yakıtlara göre daha sağlıklı olması dolayısıyla kullanımı giderek yaygınlaşmaktadır. Enerjinin verimli kullanılması ise getirilen yasal düzenlemeler, enerji kaynaklarına ulaşımın zorlaşması ve enerji maliyetlerinin artması sebebiyle zorunluluk haline gelmiştir. Havadan suya ısı pompalarının enerji verimliliğinin artırılması ile ilgili birçok çalışma ve değerlendirme bulunmaktadır. Bu çalışma kapsamında ise havadan suya ısı pompalarının kullanıldığı ortamdaki havanın sıcaklık ve bağıl nem değerlerindeki değişimin ısı pompasının enerji verimliliği ve çalışma performansı üzerindeki etkileri incelenmiştir.

1.1. Literatür İncelemesi

Naldi, C., Dongellini, M. ve Morini, G.L. tarafından yapılan çalışmada, ısıtma amacıyla kullanılan ve farklı tipte kompresörlerle çalıştırılan elektrikli ısıtıcı takviyeli havadan suya ısı pompasının bir matematiksel model kullanılarak farklı iklimlerdeki sezonluk performans katsayıları, binanın ısı ihtiyacına göre değerlendirilmiştir [1].

Popa, V., Ion, I. ve Popa, C. L. tarafından yapılan çalışmada, bir havadan suya ısı pompasının ısıtma ihtiyacı için çalıştırılmasının ekonomikliği, fosil yakıtlı sistemlerle karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. Bununla birlikte havadan suya ısı pompası sisteminin performans katsayısı hesaplanmıştır. Ayrıca havadan suya ısı pompası sistemini biyoyakıtlı bir ısıtıcı ile kombine ederek daha ekonomik bir sistem elde edilebileceği belirtilmiştir [2].

Januševičius, K. ve Streckienė, G. tarafından yapılan bu çalışmada, TRNSYS (Transient System Simulation) programı kullanılarak bir havadan suya ısı pompasının performansının değişken dış ortam şartlarına göre deneysel araştırılması ve simülasyonu yapılarak incelenmiştir [3].

Şanslı boyler eklenen bir split klimanın COP değerlerini klimanın boyler ekli ve normal şekilde soğutma modunda çalıştığı durumlar için karşılaştırmıştır. Split klimanın kondenserine boyler eklenmesinin enerji verimliliğini artırdığını tespit etmiştir [4].

Afshari, F., Comakli, O., Adiguzel, N. ve Karagoz, S. tarafından yapılan bu çalışmada, bir havadan suya ısı pompası sistemi için gerekli optimum soğutucu akışkan miktarının tespit edilebilmesi amacıyla üç farklı soğutucu akışkan (R22, R134a ve R404a) çeşitli debilerde kullanılarak havadan suya ısı pompasının performans katsayısı, ısıtma kapasitesi ve kompresör basıncı incelenmiştir [5].

Liu, F., Wang, L., Wang, Q. ve Wang, H. tarafından yapılan bu çalışmada, güneş enerjisi ile desteklenen bir ısı pompası tasarlanarak hava kaynaklı ısı pompasının performansı deneysel olarak değerlendirilmiştir. Bununla birlikte düşük hava sıcaklıklarında oluşabilecek karlanma ile ısı pompasının defrost özelliğinde çalışması ile oluşan enerji kayıplarının böyle bir sistem ile önüne geçilerek daha yüksek verimler elde edilmeye çalışılmıştır. Ayrıca ısıtma kapasitesi ve COP değerinde artış hedeflenmiştir. Sonuçlar ısı pompasına güneş paneli ekli olmadığı durum ile karşılaştırılmıştır [6].

Zhao, X., Long, E., Zhang, Y., Liu, Q., Jin, Z. ve Liang, F. tarafından yapılan bu çalışmada, ortam hava sıcaklığının sabit kaldığı bir hava kaynaklı ısı pompasının performans katsayısı bir sıcak su deposunun içerisindeki suyun sıcaklığının değişmesine göre incelenmiştir. Isı pompasının performans katsayısı (COP) tankın farklı giriş ve çıkış su sıcaklıklarındaki değişime göre hesaplanmıştır [7].

Çoşkun, havadan suya olarak çalışan bir ısı pompasının kompresör, kondenser, evaporatör ve genleşme vanasının matematik modellerini oluşturarak R12, R134a, R22 ve R404a soğutucu akışkanları kullanıldığında farklı su debileri, su giriş sıcaklıkları, hava debileri ve hava sıcaklıklarında havadan suya ısı pompasının çalışma performansını ve enerji analizini değerlendirmiştir [8].

Büyükerzen, R., Kahraman, A., Kaya, M.N. ve Dağ, H.İ. tarafından gerçekleştirilen çalışmada TRNSYS programı kullanılarak modellenen sıcak su ihtiyacını gideren bir güneş enerjisi destekli hava kaynaklı ısı pompası sisteminin test odası, ısı pompası ve su hattından oluşan deneysel sistemi ile doğrulamasını yapmışlardır. Yapılan deneylerde kullanılan test

odasının sıcaklığı 15 °C'den 0 °C'ye düşürülmüş ve nem oranı %70-80 arasında sabit alınarak ısı pompasının ısıtma performans katsayısı, ısı pompasına su giriş sıcaklığı ve ısı pompasından su çıkış sıcaklığı ölçülmüş ve simülasyondan elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır [9].

Gündü ise yaptığı çalışmada sıvı pompası ve ejektör ilavesi yapılan bir ısı pompasının ısıtma performansını incelemiştir. Yapılan matematiksel modellemeye bir ve iki ejektör ile çalışan iki farklı sistem karşılaştırılmıştır. Yapılan incelemeler sonucunda sıvı pompası ile ejektörün ekli olduğu bir ısı pompası kompresörünün geleneksel bir ısı pompası kompresöründen daha az enerji tükettiği ve sistemin COP değerinin daha yüksek bulunduğu gösterilmiştir [10].

Işık, N., Onat, A. ve Mendi, F. tarafından yapılan çalışmada ortam sıcaklıkları değiştirilerek soğutucu akışkan olarak R134a kullanılan bir havadan suya ısı pompasının ısıtma kapasitesi, performans katsayısı, harcanan elektrik enerjisi ve kompresör hacimsel verimliliği incelenmiştir [11].

Kazjonovs, J., Sipkevics, A., Jakovics, A., Dancigs, A., Bajare, D. ve Dancigs, L. tarafından yapılan çalışmada ısı pompası üreticileri tarafından verilen performans katsayısının sadece belirli sıcaklık aralığında tespit edildiği belirtilerek bu performans katsayısına dayalı olarak ısı pompasının verimi hakkında yorum yapılamayacağı ifade edilmiştir. Bu çalışmada Letonya'nın iklim şartlarında çalıştırılan havadan suya ısı pompasının sezonsal performans faktörü gerçek ve deneysel koşullarda hesaplanarak değerlendirilmiştir. Ayrıca havadan suya ısı pompasının yenilenebilir olmayan sistemlerle işletme maliyeti açısından karşılaştırması yapılmıştır [12].

Literatürde havadan suya ısı pompalarının performansı farklı iklim koşullarında, çeşitli soğutucu akışkanlar ve kompresör tipleriyle incelenmiştir. Ancak birçok çalışma bağıl nem değişkenini kapsamlı şekilde analiz etmemiştir. Bu çalışma, bağıl nem parametresini deneysel ve istatistiksel olarak bütünleştirerek literatüre farklı bir perspektif kazandırmaktadır.

II. MATERYAL VE YÖNTEM

Havadan suya olarak çalışan bir ısı pompasının kaynağındaki yani ortam olarak kullanılan havadaki sıcaklık ve bağıl nem değerlerinin değişmesiyle ısı pompasının çalışma performansını nasıl etkilediğinin incelenmesi amacıyla Marmara Üniversitesi Teknoloji Fakültesi İklimlendirme ve Soğutma Laboratuvarında bulunan deney ünitesi üzerinde çeşitli deneyler yapılmıştır. Deney ünitesi; 1900 mm x 2400 mm x 2100 mm ölçülerinde ve 8 cm kalınlığında poliüretan panellerden oluşan yalıtımlı soğuk hava deposu ile bu depoyu ortam olarak kullanan havadan suya ısı pompası deney ünitesinden oluşmaktadır. Soğuk hava deposunun içerisinde ortamın bağıl nemi ve sıcaklığının değiştirilmesinde kullanılan sırasıyla

nemlendirici ünite ile havadan havaya olarak çalışan bir ısı pompası bulunmaktadır. Ortamın bağıl nem ve sıcaklık değerleri soğuk hava deposu üzerinde bulunan dijital kumanda ile ayarlanabilmektedir.

Deneylerde kullanılan ısı pompasında soğutucu akışkan olarak yaygın kullanılabilirliğe ve ortalama sıcaklık değerlerindeki uygulamalara uygunluğu sebebiyle R134a gazı kullanılmıştır. Sistemin kompresörü hermetik yapıda tek silindirli pistonlu tipte, kondenseri su soğutmalı, evaporatörü alüminyum kanatlı, bakır borulu ve entegre fanlıdır. Genleşme vanası olarak ise termostatik genleşme vanası kullanılmıştır.

Deneyler %30, %40, %50, %60 ve %70 bağıl nem oranlarında her bir bağıl nem değeri için ortam sıcaklığı -15 °C'den 40 °C'ye kadar 5'er derece aralıklarla 12 farklı sıcaklık değeri için tekrarlanmıştır. Toplamda beş farklı bağıl nem değeri için 12 farklı sıcaklık değeri olmak üzere 60 farklı sıcaklık-bağıl nem noktası için deneyler yapılmıştır. Ortam şartları ölçümlerin alınacağı şartlara getirilerek havadan suya ısı pompası çalıştırılmış ve sistemin kararlı hale gelmesi için 10 dakika beklenmiştir. Sistemin kararlı hale gelmesi üzerine şu verilerin ölçümü yapılmıştır:

- T₁: Kompresör giriş sıcaklığı (°C)
- T₂: Kompresör çıkış sıcaklığı (°C)
- T₃: Kondenser çıkış sıcaklığı (°C)
- T₄: Evaporatör giriş sıcaklığı (°C)
- T₅: Su giriş sıcaklığı (°C)
- T₆: Su çıkış sıcaklığı (°C)
- P₁: Kompresör basma basıncı (Pa)
- P₂: Kompresör emiş basıncı (Pa)
- m_a: Soğutucu akışkan debisi (g/s)
- m_{su}: Su debisi (g/s)
- t: Elektrik sayacının bir tam devri için geçen süre (saniye)

Deneylerde ölçüm yapılan verilerin gösterge ekranı Şekil 2 içerisinde yer almaktadır.



Şekil 2. Deney ünitesi ölçüm verileri gösterge ekranı

Deneylerden ölçülen veriler kullanılarak kondenserde atılan ısı enerjisi (Q_H, Watt), evaporatörde alınan ısı enerjisi (Q_L, Watt), kompresörde kullanılan elektrik enerjisi (Q_{elektrik}, Watt), COP ve EER değerleri hesaplanmıştır.

Deneylerde kullanılan su soğutmalı kondenserde sürtünme ve yüzey kayıpları ihmal, burada atılan enerjinin tamamının suya geçtiği kabul edilip kondenserde atılan ısı enerjisi 3 numaralı denklemde belirtildiği şekilde hesaplanmıştır.

$$Q_H = \dot{m}_{su} \left(\frac{kg}{s} \right) * c_{su} \left(\frac{J}{kg^\circ C} \right) * (T_6 - T_5) (^\circ C) \quad (3)$$

- Q_H : Kondenserde atılan ısı enerjisi (W)

- c_{su} : Suyun özgül ısısı (4182 J/kg °C)

- m_{su} : Su debisi (kg/s)

- T₆ : Su çıkış sıcaklığı (°C)

- T₅ : Su giriş sıcaklığı (°C)

Sistemin çalışması için gerekli elektrik enerjisi ise deney ünitesi ölçüm verileri gösterge ekranında bulunan elektrik sayacı yardımıyla bulunmuştur. Sistemdeki tüm kayıplar ihmal edilerek kondenserde atılan ısı enerjisinin sistemin çalışması için kompresörde tüketilen elektrik enerjisi ile evaporatörde alınan ısı enerjisinin toplamı olduğu belirtilmiştir.

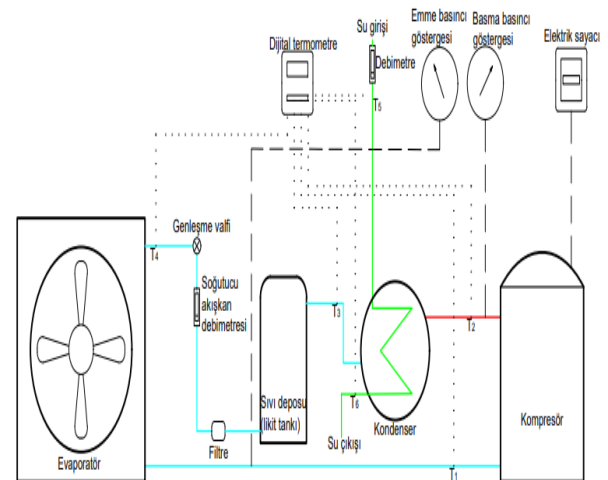
$$Q_H = Q_{elektrik} + Q_L \quad (4)$$

COP ve EER değerlerinin hesaplanması ise denklem 5 ve denklem 6 içerisinde verilmiştir.

$$COP = Q_H / Q_{elektrik} \quad (5)$$

$$EER = Q_L / Q_{elektrik} \quad (6)$$

Havadan suya ısı pompası deney ünitesinin çevrim elemanları ile ölçüm yapılan değerlerin yer aldığı şematik gösterimi Şekil 3 içerisinde sunulmuştur.



Şekil 3. Deney ünitesi şematik gösterimi

2.1. Optimizasyon Çalışması

Gerçekleştirilen deneyler yardımıyla kullanılması veya üretilmesi düşünülen ve R134a soğutucu akışkanı ile çalışan belirli bir havadan suya ısı pompasının anlamlı ve bütüncül bir sıcaklık-bağıl nem değeri aralığında enerji verimliliğinin değerlendirilebilmesi için her sıcaklık-bağıl nem değeri noktası için COP değerleri hesaplanmıştır. Hesaplanan COP değerlerinin doğruluğunun sağlanması ve deney verilerinin optimizasyonunun yapılabilmesi maksadıyla deneylerden elde edilen verilerin tamamı IBM SPSS Statistics 26 programına kaydedilmiştir. Yapılan optimizasyon analizi ile hesaplanan COP değerinin ölçümü yapılan kompresör giriş sıcaklığı, kompresör çıkış sıcaklığı, kondenser çıkış sıcaklığı ve evaporatör giriş sıcaklığı değerleri ile etkileşimi değerlendirilmiştir. Bu analiz ile hedef fonksiyon olan COP değerinin maksimize edilmesi amaçlanmıştır. Yapılan analizde COP değeri bağımlı Y değişkeni, kompresör çıkış sıcaklığı bağımsız X değişkeni, kompresör giriş sıcaklığı M_1 , kondenser çıkış sıcaklığı M_2 , evaporatör giriş sıcaklığı ise M_3 olarak tanımlandığında belirlenen analizin matematiksel model denklemi denklem 7 içerisinde gösterilmiştir.

$$Y = i_y + c'X + b_1M_1 + b_2M_2 + b_3M_3 + e_y \quad (7)$$

Denklem 7'de yer alan i_y ifadesi model denkleminin sabit değerini, e_y ifadesi ise hata payını göstermektedir. c' , b_1 , b_2 ve b_3 değerleri ise sırasıyla X, M_1 , M_2 ve M_3 değişkenlerinin katsayı değerlerini ifade etmektedir. Denklem 7 içerisinde belirtilen bilinmeyen değerlerin bulunabilmesi maksadıyla deneylerden elde edilen veriler kullanılarak model çalıştırıldığında $i_y = 4,2952$, $c' = 0,0149$, $b_1 = -0,0392$, $b_2 = -0,0448$ ve $b_3 = 0,1305$ olarak bulunmuştur. Bu değerler kullanıldığında yapılan çalışmanın matematiksel model denklemi denklem 8 içerisinde belirtilen şekilde bulunmuştur.

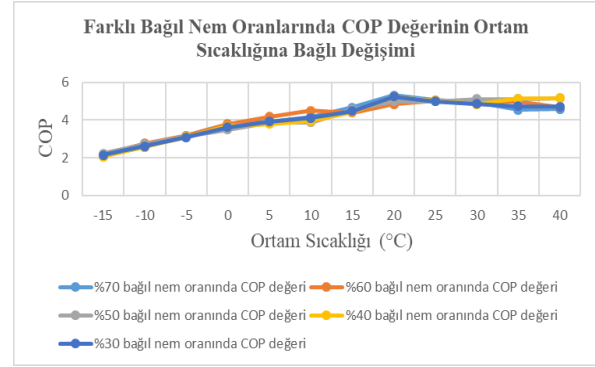
$$Y = 4,2952 + 0,0149X - 0,0392M_1 - 0,0448M_2 + 0,1305M_3 \quad (8)$$

Yapılan optimizasyon sonucunda elde edilen ve denklem 8 içerisinde belirtilen denklem kullanılarak ölçüm yapılan belirli bir sıcaklık-bağıl nem değerindeki kompresör çıkış (X), kompresör giriş (M_1), kondenser çıkış (M_2) ve evaporatör giriş (M_3) sıcaklık değerleri yerine konduğunda o ölçüm noktası için COP değerinin bulunması sağlanmıştır.

III. BULGUAR VE TARTIŞMA

Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen COP, EER ve su çıkış sıcaklığı değerlerinin ortam sıcaklığına bağlı değişimi beş farklı bağıl nem oranı için grafikler yardımıyla sunulmuştur.

Beş farklı bağıl nem oranında deneylerden elde edilen veriler kullanılarak hesaplanan COP değerlerinin ortamın sıcaklığı ile nasıl değiştiği Şekil 4 içerisinde bulunan grafik yardımıyla gösterilmiştir.



Şekil 4. Farklı bağıl nem oranlarında COP değerinin ortam sıcaklığına bağlı değişimi

%70 bağıl nem oranında en düşük COP değeri -15 °C ortam sıcaklığında 2,104 olarak hesaplanmıştır. En yüksek COP değeri ise 20 °C ortam sıcaklığında 5,304 olarak hesaplanmıştır.

%60 bağıl nem oranında en düşük COP değeri -15 °C ortam sıcaklığında 2,161 olarak hesaplanmıştır. En yüksek COP değeri ise 25 °C ortam sıcaklığında 5,024 olarak hesaplanmıştır.

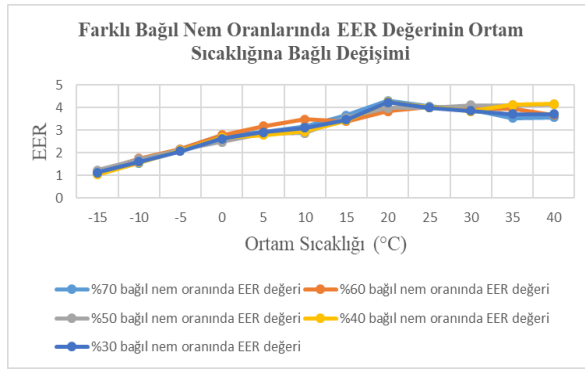
%50 bağıl nem oranında en düşük COP değeri -15 °C ortam sıcaklığında 2,233 olarak hesaplanmıştır. En yüksek COP değeri ise 40 °C ortam sıcaklığında 5,152 olarak hesaplanmıştır.

%40 bağıl nem oranında en düşük COP değeri -15 °C ortam sıcaklığında 2,048 olarak hesaplanmıştır. En yüksek COP değeri ise 20 °C ortam sıcaklığında 5,246 olarak hesaplanmıştır.

%30 bağıl nem oranında en düşük COP değeri -15 °C ortam sıcaklığında 2,133 olarak hesaplanmıştır. En yüksek COP değeri ise 20 °C ortam sıcaklığında 5,244 olarak hesaplanmıştır.

Bu veriler, ortam sıcaklığının genelde COP üzerinde belirgin bir artış etkisine sahip olduğunu göstermekte, ancak 20 °C'den sonra bazı bağıl nem oranlarında verimde düşüşler gözlenebilmektedir. Bu durum kondenser verimi, kompresör yükü ve ısı transfer kayıplarının değişimine bağlanabilir. Bulgular genel olarak literatürde benzer iklim koşullarında raporlanan değerlerle uyumlu bulunmuştur.

Hesaplanan EER değerlerinin farklı ortam sıcaklıklarında ölçüm yapılan tüm bağıl nem oranları için gösterimi ise Şekil 5 içerisinde bulunan grafikte yer almaktadır.



Şekil 5. Farklı bağıl nem oranlarında EER değerinin ortam sıcaklığına bağlı değişimi

%70 bağıl nem oranı için hesaplanan en düşük EER değeri ortam sıcaklığı -15 °C olduğunda 1,104 olarak bulunmuştur. En yüksek EER değeri ise ortam sıcaklığı 20 °C olduğunda 4,304 olarak bulunmuştur.

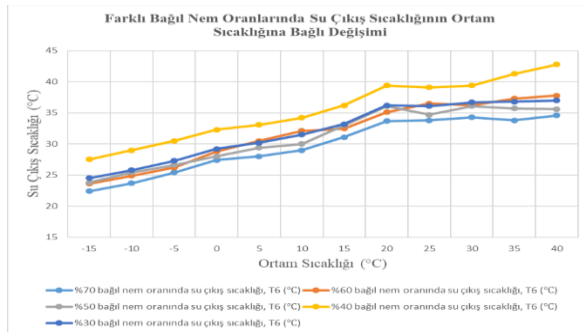
%60 bağıl nem oranı için hesaplanan en düşük EER değeri ortam sıcaklığı -15 °C olduğunda 1,161 olarak bulunmuştur. En yüksek EER değeri ise ortam sıcaklığı 25 °C olduğunda 4,024 olarak bulunmuştur.

%50 bağıl nem oranı için hesaplanan en düşük EER değeri ortam sıcaklığı -15 °C olduğunda 1,233 olarak bulunmuştur. En yüksek EER değeri ise ortam sıcaklığı 40 °C olduğunda 4,152 olarak bulunmuştur.

%40 bağıl nem oranı için hesaplanan en düşük EER değeri ortam sıcaklığı -15 °C olduğunda 1,048 olarak bulunmuştur. En yüksek EER değeri ise ortam sıcaklığı 20 °C olduğunda 4,246 olarak bulunmuştur.

%30 bağıl nem oranı için hesaplanan en düşük EER değeri ortam sıcaklığı -15 °C olduğunda 1,133 olarak bulunmuştur. En yüksek EER değeri ise ortam sıcaklığı 20 °C olduğunda 4,244 olarak bulunmuştur.

Havadan suya ısı pompası deney ünitesi üzerinde yapılan çalışmalar sonucunda bulunan su çıkış sıcaklıklarının ortam sıcaklığına bağlı değişiminin deneylerin yapıldığı beş farklı bağıl nem oranı için gösterimi Şekil 6 içerisindeki grafik yardımıyla sunulmuştur.



Şekil 6. Farklı bağıl nem oranlarında su çıkış sıcaklıklarının ortam sıcaklığına bağlı değişimi

%70 bağıl nem değerinde su çıkış sıcaklığının en yüksek değeri ortam sıcaklığının 40 °C olduğu durumda 34,6 °C olarak ölçülmüştür. Su çıkış sıcaklığının en düşük değeri ise -15 °C ortam sıcaklığında 22,4 °C olarak bulunmuştur.

%60 bağıl nem değerinde su çıkış sıcaklığının en yüksek değeri ortam sıcaklığının 40 °C olduğu durumda 37,8 °C olarak ölçülmüştür. Su çıkış sıcaklığının en düşük değeri ise -15 °C ortam sıcaklığında 23,6 °C olarak bulunmuştur.

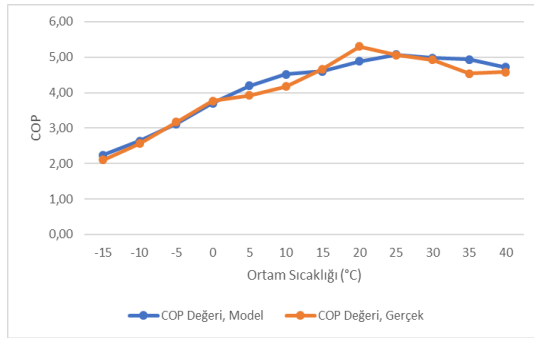
%50 bağıl nem değerinde su çıkış sıcaklığının en yüksek değeri ortam sıcaklığının 20 °C ve 30 °C olduğu durumlarda 36,1 °C olarak ölçülmüştür. Su çıkış sıcaklığının en düşük değeri ise -15 °C ortam sıcaklığında 23,8 °C olarak bulunmuştur.

%40 bağıl nem değerinde su çıkış sıcaklığının en yüksek değeri ortam sıcaklığının 40 °C olduğu durumda 42,8 °C olarak ölçülmüştür. Su çıkış sıcaklığının en düşük değeri ise -15 °C ortam sıcaklığında 27,5 °C olarak bulunmuştur.

%30 bağıl nem değerinde su çıkış sıcaklığının en yüksek değeri ortam sıcaklığının 40 °C olduğu durumda 37 °C olarak ölçülmüştür. Su çıkış sıcaklığının en düşük değeri ise -15 °C ortam sıcaklığında 24,5 °C olarak bulunmuştur.

Su çıkış sıcaklığı değerlerinin incelenmesi elde edilen sıcak suyun kullanımı için önem arz etmektedir. Bununla birlikte; havadan suya ısı pompasının enerji verimliliğinin tam olarak değerlendirilebilmesi için su çıkış sıcaklık değeri ile su giriş sıcaklığı değeri arasındaki farkın göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Şekil 6 içerisinde bulunan grafikte görüleceği üzere %40 bağıl nem oranında ölçülen su çıkış sıcaklığı değerleri diğer bağıl nem oranlarında ölçülen su çıkış sıcaklığı değerlerinden daha yüksektir. Bu durumun sebebi deneylerin yapıldığı farklı zamanlarda su girişini besleyen şebeke suyundaki sıcaklığın değişimidir. %40 bağıl nem değerinde şebeke suyunun sıcaklığı diğer bağıl nem oranlarında ölçülen şebeke suyunun sıcaklığından yaklaşık 3-4 °C daha fazladır. ΔT sıcaklık farkının en yüksek değeri 40 °C ortam sıcaklığında ve %40 bağıl nem oranında 19,7 °C olarak hesaplanmıştır.

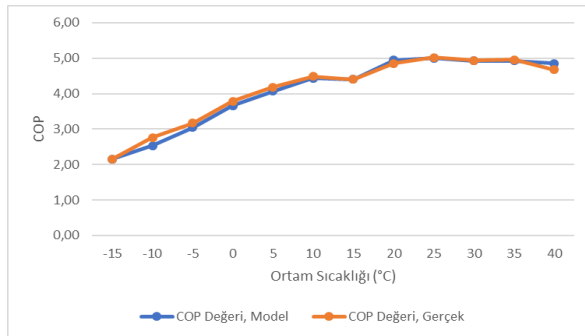
Denklem 8 içerisinde yer alan matematiksel model denkleminde ölçüm yapılan 60 farklı sıcaklık-bağıl nem noktasında elde edilen veriler yerine konulduğunda her bir nokta için COP değeri bulunmuştur. Deneyler sonucunda hesaplanan COP değerleri ile optimizasyon modelinden bulunan COP değerlerinin kıyaslanması her bir bağıl nem oranı için grafikler yardımıyla ayrı ayrı sunulmuştur. Her bir bağıl nem oranında ölçüm yapılan ortam sıcaklıklarında deneylerde hesaplanan COP değerleri ile modelde bulunan COP değerleri arasındaki hata paylarının aritmetik ortalaması alınarak ilgili bağıl nem oranı için hata payları hesaplanmıştır.



Şekil 7. %70 bağıl nem oranında elde edilen COP değerlerinin karşılaştırılması

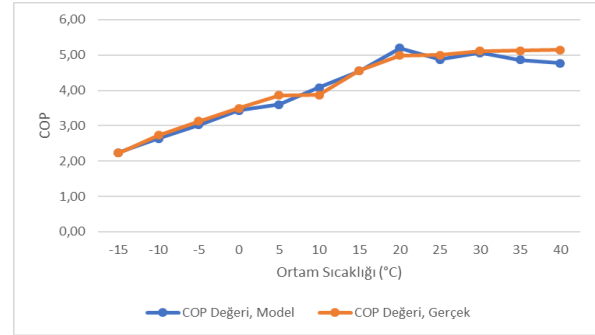
Şekil 7 içerisinde bulunan grafikte optimizasyon modelinden elde edilen COP ile gerçek COP değerlerinin ortam sıcaklığına bağlı olarak değişimi gösterilmiştir. %70 bağıl nem oranı için; hesaplanan COP değerleri kıyaslandığında optimizasyon modelinden elde edilen ile gerçek değerler arasında %4,2 oranında hata payı olduğu belirlenmiştir.

%60 bağıl nem oranındaki optimizasyon modelinden elde edilen COP ile gerçek COP değerlerinin karşılaştırılması Şekil 8 içerisinde bulunan grafikte sunulmuştur. Bu bağıl nem oranında tüm ölçüm noktalarında hesaplanan gerçek COP değerleri ile modelden elde edilen COP değerlerinin hata payının aritmetik ortalaması %2,2 olarak bulunmuştur.



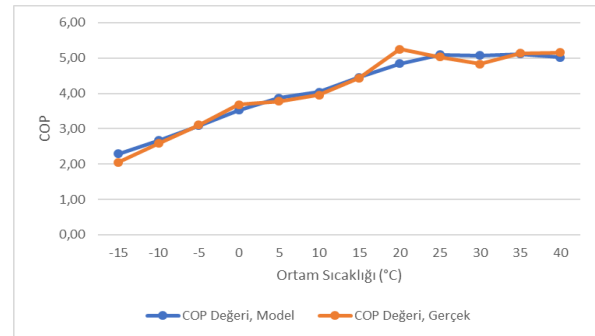
Şekil 8. %60 bağıl nem oranında elde edilen COP değerlerinin karşılaştırılması

%50 bağıl nem oranındaki optimizasyon modelinden elde edilen COP ile gerçek COP değerlerinin karşılaştırılması Şekil 9 içerisinde bulunan grafikte sunulmuştur.



Şekil 9. %50 bağıl nem oranında elde edilen COP değerlerinin karşılaştırılması

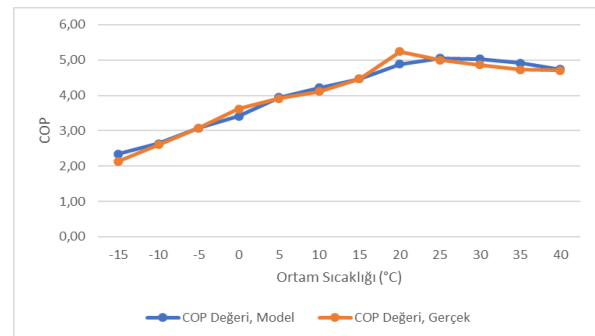
%50 bağıl nem oranında tüm ölçüm noktalarında hesaplanan gerçek COP değerleri ile modelden elde edilen COP değerlerinin hata payının aritmetik ortalaması %3,4 olarak tespit edilmiştir.



Şekil 10. %40 bağıl nem oranında elde edilen COP değerlerinin karşılaştırılması

Şekil 10'da ise COP değerlerinin karşılaştırılması %40 bağıl nem oranı için belirtilmiştir. Her bir ölçüm noktasındaki hata paylarının aritmetik ortalaması alındığında %3,6 oranında bir hata payı görülmüştür.

Son olarak %30 bağıl nem oranı için; COP değerlerinin kıyaslanmasına Şekil 11 içerisinde bulunan grafikte yer verilmiştir.



Şekil 11. %30 bağıl nem oranında elde edilen COP değerlerinin karşılaştırılması

%30 bağıl nem oranında gerçek COP ile modelden elde edilen COP değerleri karşılaştırıldığında %3 oranında bir hata payı görülmüştür.

IV. SONUÇ VE DEĞERLENDİRMELER

Bu çalışma kapsamında havadan suya olarak çalışan bir ısı pompasının kullanıldığı ortam şartlarındaki değişimin ısı pompasının enerji verimliliği üzerinde nasıl bir etkiye bulunduğu deneysel olarak analiz edilmiştir. Isı pompasının ısı kaynağı olan havanın sıcaklık ve bağıl nem parametreleri belirli ve anlamlı bir aralıkta değiştirilerek her bir deney noktası için COP, EER ve su çıkış sıcaklığı değerleri saptanmıştır. Deneylerden elde edilen veriler kullanılarak IBM SPSS Statistics 26 programı yardımıyla optimizasyon çalışması yapılmıştır.

Hesaplanan COP değerleri incelendiğinde görüleceği üzere deneylerin yapıldığı tüm ölçüm noktaları arasında en yüksek COP değeri 5,246 olarak 20 °C ortam sıcaklığında ve %40 bağıl nem oranında tespit edilmiştir. En düşük COP değeri ise yine -15 °C ortam sıcaklığında ve %40 bağıl nem oranında 2,048 değerinde hesaplanmıştır. En yüksek ve en düşük EER değerleri de COP değerlerinin en yüksek ve en düşük değerini aldığı aynı ortam şartlarında bulunmuştur. Genel olarak COP ve EER değerlerinin ortam sıcaklığının yükselmesiyle arttığı gözlemlenmiştir.

Su çıkış sıcaklığı değerleri incelendiğinde ise en yüksek su çıkış sıcaklığı %40 bağıl nem değerinde ortam sıcaklığının 40 °C olduğu durumda 42,8 °C olduğu görülmüştür. En düşük su çıkış sıcaklığı da 22,4 °C olarak %70 bağıl nem oranında ve -15 °C ortam sıcaklığında ölçülmüştür.

Bu çalışmada COP, EER ve su çıkış sıcaklıklarının tespit edilmesiyle R134a soğutucu akışkanı ile çalışan belirli bir havadan suya ısı pompası özelinde ısı pompasının enerji verimliliği ve çalışma karakteristiği hakkında kullanıcı ve üreticilerin bilgi sahibi olmasına katkıda bulunulmuştur. Yapılan optimizasyon çalışmasıyla elde edilen verilerin tutarlı olduğu saptanmıştır. Ölçüm yapılan beş farklı bağıl nem değerlerinde deneylerde hesaplanan COP ile optimizasyon modelinden gelen COP değerleri karşılaştırıldığında bütün bağıl nem oranlarında oldukça düşük hata paylarının olduğu görülmüştür. Tüm hata paylarının aritmetik ortalaması ise %3,3 olarak hesaplanmıştır. Bu değer yapılan çalışmanın son derece anlamlı ve tutarlı olduğunu ortaya koymuştur.

Bu çalışma, havadan suya ısı pompasının farklı bağıl nem ve sıcaklık şartlarında enerji verimliliğini deneysel ve istatistiksel olarak detaylı analiz ederek literatüre özgün katkı sunmuştur. Gelecek çalışmalarda alternatif soğutucu akışkanlar, hibrit sistemler ve farklı iklim koşullarında benzer analizlerin yapılması tavsiye edilmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] Naldi, C., Dongellini, M. ve Morini, G.L. (2015) Climate Influence on Seasonal Performances of Air-to-water Heat Pumps for Heating, 69th Conference of the Italian Thermal Engineering Association, ATI 2014, Italy.
- [2] Popa, V., Ion, I. ve Popa, C. L. (2015) Thermo-Economic Analysis of an Air-to-Water Heat Pump, Sustainable Solutions for Energy and Environment, EENVIRO-YRC 2015, 18-20 November 2015, Bucharest, Romania.
- [3] Januševičius, K. ve Streckienė, G. (2015) Analysis of Air-to-Water Heat Pump in Cold Climate: Comparison Between Experiment and Simulation, Science-Future of Lithuania, Environmental Protection Engineering, 2014 7(4): 468-474, Lithuania.
- [4] Şanslı, B., (2015) Ticari Tip Split Klimada Kondenser Atık Isının Farklı Bir Yöntemle Boylerde Kullanımının Enerji Verimliliğine Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük, Türkiye.
- [5] Afshari, F., Çomaklı, Ö., Adıgüzel, N. ve Karagöz, Ş. (2015) Refrigerant Charge Amount In Heat Pump Systems And Evaluating Optimal Amount Of Gas, ULIBTK'15 20. Ulusal Isı Bilimi ve Tekniği Kongresi, 02-05 Eylül 2015, Balıkesir, Türkiye.
- [6] Liu, F., Wang, L., Wang, Q. ve Wang, H. (2017) Experiment Study on Heating Performance of Solar-Air Source Heat Pump Unit, 10th International Symposium on Heating, Ventilation and Air Conditioning, ISHVAC2017, 19-22 October 2017, Jinan, China.
- [7] Zhao, X., Long, E., Zhang, Y., Liu, Q., Jin, Z. ve Liang, F. (2017) Experimental Study on Heating Performance of Air - source Heat Pump with Water Tank for Thermal Energy Storage, 10th International Symposium on Heating, Ventilation and Air Conditioning, ISHVAC2017, 19 - 22 October 2017, Jinan, China.
- [8] Coşkun, S., (2004) Sürekli Rejimde Farklı Soğutucu Akışkanlar İçin Hava-Su Kaynaklı Mekanik Buhar Sıkıştırıcı Isı Pompasının Simülasyonu, Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, 9, 1, 41-51, Bursa, Türkiye.
- [9] Büyükerzen, R., Kahraman, A., Kaya, M.N. ve Dağ, H.İ. (2021) Experimental Validation of Performance Parameters of An Air Source Heat Pump. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji, 9(4), 739 - 748. 10.29109/gujsc.1015345, Ankara, Türkiye.
- [10] Gündü, İ. (2018) Isı Pompasında Ejektör Yardımı ile Isıtma Kapasitesi ve Etkinliğinin Artırılması, Yüksek Lisans Tezi, Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Osmaniye, Türkiye.

-
- [11] Işık, N., Onat, A. ve Mendi, F. (2000) Havadan Suya Mekanik Isı Pompası Farklı İşletme Koşullarında Deneysel Performans Çalışması, 6. Ulusal Soğutma ve İklimlendirme Tekniği Kongresi, 13-14 Nisan 2000, Çukurova Üniversitesi, Adana, Türkiye.
- [12] Kazjonovs, J., Sipkevics, A., Jakovics, A., Dancigs, A., Bajare, D. ve Dancigs, L. (2014) Performance Analysis of Air-to-Water Heat Pump in Latvian Climate Conditions. Environmental and Climate Technologies, 14(1), 18–22, Latvia.

A Design of Experiments-Based Investigation of Solid Lubricants in Heavy Vehicle Brake Pads

Neslihan DİKBAŞ SARIALTIN^{1,2}, Recep ÖNLER¹

¹Gebze Technical University, Department of Mechanical Engineering, 41400 Kocaeli, Türkiye

²Eren Balatacilık San. ve Tic. AŞ, İzmir, Türkiye

Abstract

Brake pad formulations for heavy-duty vehicles must balance wear resistance, fade resistance, and friction stability under extreme braking conditions. This study systematically investigates the impact of solid lubricant compositions, including graphite, antimony trisulfide (Sb_2S_3), molybdenum disulfide (MoS_2), zinc sulfide (ZnS), and calcium fluoride (CaF_2), on the tribological performance of copper-free brake pads. A Design of Experiments (DOE) approach was employed to develop 29 unique formulations and evaluate them under the ECE R90 test procedure using a Krauss friction tester. Statistical analyses were used to determine the effects of lubricant combinations on performance metrics. The findings revealed that increasing CaF_2 content led to a significant rise in the coefficient of friction (up to 0.46), whereas Sb_2S_3 enhanced fade resistance by reducing loss of friction coefficient to as low as 0.03 but increased wear. MoS_2 was associated with superior thermal stability, while graphite primarily contributed to reduced wear loss (minimum 0.009 g). The formulation containing 10 wt% graphite, 2.5 wt% MoS_2 , and 2.5 wt% CaF_2 demonstrated the most optimal balance of performance. These results underscore the importance of synergistic solid lubricant combinations in improving the durability and effectiveness of environmentally friendly brake pad formulations for heavy-duty applications.

Keywords: Brake pads, solid lubricants, tribology, friction, ANOVA

I. INTRODUCTION

Brake friction materials are essential for ensuring the safety and efficiency of heavy vehicle braking systems. Unlike passenger vehicles, heavy-duty vehicles operate under significantly higher loads, extreme braking conditions, and prolonged service durations. As a result, brake pads for heavy vehicles must exhibit high thermal resistance, minimal wear, stable friction coefficients, and excellent fade resistance to ensure long-term durability and safety in severe operating environments [1, 2]. The performance of disc brake systems in heavy commercial vehicles is determined by the friction and wear characteristics of the brake pad-disc interface, which are heavily influenced by the tribological properties of the friction material [3–5].

Friction materials in brake pads are complex composite systems typically formulated from more than ten different components, each tailored to fulfill a specific function in braking performance. These components generally include binders, reinforcing fibers, abrasives, fillers, and most critically, solid lubricants. Solid lubricants are particularly essential for reducing wear, stabilizing friction, and minimizing stick-slip behavior across a wide range of operating conditions [6–9]. In heavy-duty vehicles, where brake systems are exposed to elevated loads, frequent braking, and high thermal stress, the choice and optimization of solid lubricant combinations are vital [10]. Brake pads must maintain consistent friction behavior and minimal wear despite these harsh conditions and achieving high fade resistance, defined as the ability to retain braking performance at elevated temperatures, is a critical design requirement. Variations in braking response can be minimized by carefully selecting and optimizing solid lubricant compositions, as factors such as chemical structure, particle size, and phase transformations significantly influence tribological behavior. Recent studies indicate that synergistic combinations of metal sulfides and fluorides enhance braking stability by modifying wear mechanisms and regulating interfacial temperature fluctuations [11]. During braking, the oxidation of metallic and carbon-based materials, along with a series of thermochemical reactions, leads to the formation of a tribofilm at the pad-disc interface [12]. This tribofilm plays a vital role in stabilizing friction, minimizing wear enhancing thermal stability and improving overall braking efficiency [9, 13, 14]. Its formation, thickness, and composition are influenced by the type and the amount of solid lubricants in the brake pad formulation [13]. Therefore, a well-balanced selection of solid lubricants is essential for optimizing the performance of heavy-duty brake pads [2, 13].

Graphite is one of the most extensively used solid lubricants in friction materials due to its ability to provide consistent lubrication under both dry and wet conditions [15]. Studies have shown that graphite particle size and structure significantly influence braking performance, with finer particles promoting better dispersion and tribofilm formation, leading to more stable friction behavior [1, 16]. MoS₂ is widely utilized for friction stability, attributed to its layered structure that facilitates easy shear between contact surfaces and excellent thermal resistance [17, 18]. The particle size of MoS₂ has been found to influence tribological properties significantly, with larger particles exhibiting improved wear resistance and thermal endurance [18].

SnS₂ has been a preferred solid lubricant in brake pads due to its ability to form a stable boundary layer at high temperatures, reducing wear and preventing sudden variations in the coefficient of friction [6]. Studies suggest that combining Sb₂S₃ with MoS₂ and SnS₂ can significantly enhance fade resistance and durability while mitigating these environmental issues [9, 13]. Additionally, research indicates that dual and triple metal sulfide combinations provide superior tribofilm stability compared to single-lubricant formulations, leading to improved braking performance under extreme conditions [13, 19].

Calcium fluoride (CaF₂) is another widely studied solid lubricant, valued for its ability to improve wear resistance and thermal stability, particularly in high-load braking conditions [20]. Additionally, tungsten disulfide has been explored as an alternative solid lubricant, demonstrating superior thermal stability and tribofilm formation, which contributes to enhanced fade resistance, wear control, and recovery performance compared to SnS₂ [8]. Further investigations into graphite, coke, and ZnS-based formulations have highlighted the importance of solid lubricant ratios in tribofilm formation, showing that higher graphite content leads to more stable tribofilms and improved durability [11].

As environmental regulations evolve, heavy vehicle brake pad formulations must now comply with stricter standards while maintaining optimal performance. One such regulation is the Better Brakes Rule, enacted by the Washington State Department of Ecology in 2010 and implemented in phases starting from 2014 [21]. This legislation restricts the use of harmful substances such as copper, asbestos, and heavy metals in brake components to reduce environmental pollution caused by brake wear debris. The rule mandates the gradual elimination of copper and other toxic materials from friction materials, thus accelerating the shift towards safer and eco-friendly alternatives [22]. Thus, the alternative brake pads formulations require further investigation, particularly in terms of their ability to compensate for the loss of traditionally used materials

while maintaining or enhancing tribological properties. In this regard, understanding the synergistic effects of different solid lubricants, their impact on tribofilm formation, and their long-term stability under extreme braking conditions is crucial for developing next-generation brake pads that meet both performance and regulatory requirements.

This study aims to systematically investigate the effects of different solid lubricant compositions on the tribological performance of copper-free, asbestos-free organic composite brake pads specifically formulated for heavy-duty vehicles. The formulation used in this study is based on a proprietary organic polymer matrix designed to comply with REACH directives and Better Brakes legislation. The main matrix is a non-metallic, fiber-reinforced composite system that excludes copper and asbestos entirely. The environmental impact of the selected lubricants was also considered. None of the additives used in this study are classified as Substances of Very High Concern (SVHC) under the REACH Regulation (EC) No 1907/2006 [23]. Sb₂S₃, although containing antimony, is used in minimal controlled amounts and in a chemically bound form within the matrix. ZnS and CaF₂ are widely used industrial lubricants with no known harmful emissions during operational use. By analyzing the interaction effects between graphite, Sb₂S₃, ZnS, MoS₂, and CaF₂, this research seeks to optimize solid lubricant formulations that provide superior braking performance under extreme operating conditions. Additionally, Analysis of Variance (ANOVA) based statistical modeling techniques are employed to quantify the significance of each solid lubricant and its interaction with others.

II. MATERIALS AND METHODS

2.1. Materials and Design of Experiments

The experimental approach employed a constrained full factorial Design of Experiments (DOE) framework to evaluate the effects of solid lubricant combinations on tribological properties. The base material matrix was a non-metallic, asbestos-free organic composite composed primarily of phenolic resin, reinforcing fibers, and proprietary fillers. This matrix was fixed at 85 wt% across all samples and represents a standard commercial-grade copper-free heavy-duty brake pad formulation. To systematically investigate the influence of solid lubricants, a mixed-level factorial array, with graphite was included in all formulations at two levels (5% and 10%), while other lubricants, Sb₂S₃, ZnS, MoS₂, and CaF₂, were examined at three levels (0%, 2.5%, and 5%). The total solid lubricant content was constrained to 15 wt% in every formulation, ensuring that all combinations adhered to this compositional limit. Based on this design logic, 29 unique brake pad compositions were generated to represent a constrained full factorial coverage of

feasible solid lubricant mixtures. These combinations are detailed in Table 1.

Table 1. Design of Experiments (DOE) matrix for solid lubricant amounts in the brake pad formulations used in the study.

Sample #	Graphite (%)	Sb ₂ S ₃ (%)	ZnS (%)	MoS ₂ (%)	CaF ₂ (%)
1	5	0	0	5	5
2	5	0	2.5	2.5	5
3	5	0	2.5	5	2.5
4	5	0	5	0	5
5	5	0	5	2.5	2.5
6	5	0	5	5	0
7	5	2.5	0	2.5	5
8	5	2.5	0	5	2.5
9	5	2.5	2.5	0	5
10	5	2.5	2.5	2.5	2.5
11	5	2.5	2.5	5	0
12	5	2.5	5	0	2.5
13	5	2.5	5	2.5	0
14	5	5	0	0	5
15	5	5	0	2.5	2.5
16	5	5	0	5	0
17	5	5	2.5	0	2.5
18	5	5	2.5	2.5	0
19	5	5	5	0	0
20	10	0	0	0	5
21	10	0	0	2.5	2.5
22	10	0	0	5	0
23	10	0	2.5	0	2.5
24	10	0	2.5	2.5	0
25	10	0	5	0	0
26	10	2.5	0	0	2.5
27	10	2.5	0	2.5	0
28	10	2.5	2.5	0	0
29	10	5	0	0	0

To characterize the properties of the investigated solid lubricants, various analytical techniques were employed. Particle size distribution (PSD) analysis was performed using the Malvern Panalytical Mastersizer 3000 to ensure precise measurement of lubricant particle dimensions. X-ray diffraction (XRD) analysis was conducted using the Malvern Panalytical X'Pert³ MRD to identify the crystalline phases present in the lubricants and their interaction within the composite matrix. Furthermore, thermogravimetric analysis (TGA) was carried out to assess the thermal stability and decomposition behavior of the lubricants. These characterization techniques provided comprehensive insights into the physical and thermal properties of the solid lubricants, aiding in the evaluation of their tribological performance.

2.2. Production of Samples

The 85 wt% base formulation for brake pads consisting of phenolic resin, reinforcing fibers, abrasives and fillers was prepared based on a proprietary recipe provided by Eren Balata INC specifically for heavy-

duty commercial vehicle brake pads. The solid lubricant compositions were added to the base formulation according to Table 1. The main manufacturing steps and conditions can be summarized as below:

1. All raw materials were weighed and added into a mechanical mixer, where they were blended at 750 rpm for 14 minutes to ensure homogeneous distribution.
2. The blended mixture was transferred into a mold, where it was compacted using a hot hydraulic press at 165°C and 300 kgf/cm² for 5 minutes.

The compacted samples were post-cured in an industrial oven at 165°C for 8 hours to enhance bonding and mechanical properties.

The final sample size was approximately 85 mm × 52 mm × 13 mm. The samples were ground to achieve uniform thickness after curing.

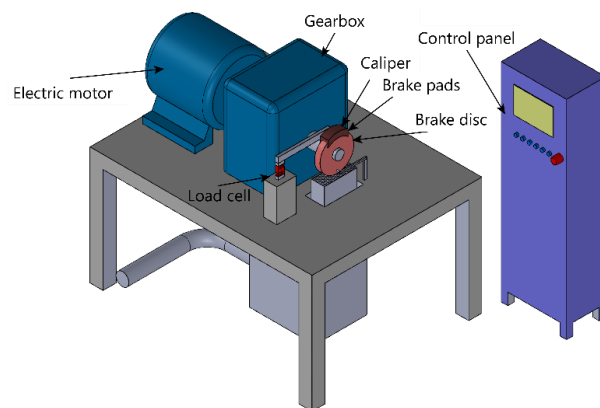


Figure 1. Schematic diagram of Krauss-type test setup used in this study. The device simulates dynamic braking events under controlled thermal and mechanical loading as outlined in ECE R90 Annex 9.

2.3. Tribological Characterization

The tribological performance of the developed friction materials was evaluated using a computer-controlled Krauss-type test machine, schematically illustrated in Figure 1. This setup simulates dynamic braking conditions under controlled thermal and mechanical loading. Testing was performed according to the ECE R90 regulation, specifically Annex 9, Section 3.2.2, which outlines standardized procedures for evaluating replacement brake linings [24]. The program began with an initial bedding phase consisting of 30 consecutive brake applications to stabilize the contact surfaces. This was followed by a sequence of 11 braking stages at varying initial and maximum disc temperatures to assess key performance indicators such as fade behavior, friction stability, and wear resistance under progressively severe conditions. Each stage was designed to replicate real-world thermal and

mechanical stresses encountered during heavy vehicle operation, with or without active cooling. The full test schedule is detailed in Table 2.

Table 2. ECE R90 Annex 9 Section 3.2.2 brake testing sequence applied on Krauss-type test rig. Each stage simulates a defined thermal condition by specifying the number of brake applications, initial brake temperature, and target disc temperature. “Cooling” indicates whether active cooling was applied between applications.

Stage	No. of Brake App.	Initial Brake Temp. (°C)	Target Max. Disc Temp. (°C)	Cooling
1	5	100	300-350	✓
2	5	≤200	300-350	X
3	5	200	300-350	X
4	5	≤300	300-350	X
5	5	300	500-600	X
6	3	250	300-350	✓
7	3	200	300-350	✓
8	3	150	300-350	✓
9	10	100	300-350	✓
10	5	≤300	500-600	X
11	5	300	300-350	X

The friction coefficient and temperatures on the brakes were continuously monitored throughout the tests to evaluate the fade resistance and recovery characteristics of each material. To compare wear behavior of different compositions, the masses of individual brake pads were measured prior to and after each test.

2.4. Analysis

The experimental results were comparatively investigated through statistical approaches. A General Factorial Regression model was employed to establish the relationship between solid lubricant compositions and the tribological performance of the friction materials. This statistical approach was utilized to analyze the effects of solid lubricant type and amount on key response variables, namely friction coefficient, wear rate, and fade resistance.

The model was constructed using Minitab statistical software, incorporating main effects as well as selected two-way interactions. Analysis of Variance (ANOVA) was performed to quantify the contribution and significance of each input factor and their interactions. F-values and P-values were used to evaluate the statistical relevance of the parameters, while contribution percentages were calculated to understand

their relative impact on performance. This approach enabled the identification of the most influential lubricant components for each tribological metric and provided insight into synergistic effects between additives.

Table 3. Characterization test results of solid lubricants

Lubricant	PSD	XRD	TGA	
	d50 (µm)	Main component (%)	Decomposition Temperature (T °C)	
Synthetic Graphite	453	C	100.0	750
Antimony Trisulfide	10	Sb ₂ S ₃	100.0	750
Zinc Sulfide	7	ZnS	97.3	450
Molybdenum Disulfide	11	MoS ₂	100.0	450
Calcium Floride	43	CaF ₂	98.0	550

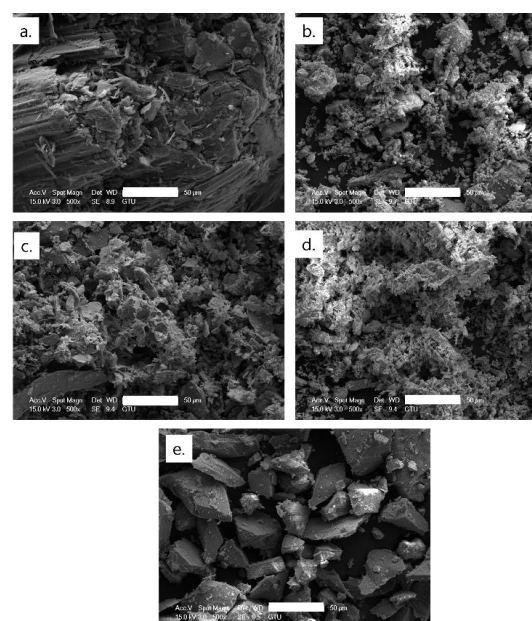


Figure 2. SEM micrographs of solid lubricants: (a) Graphite, (b) Sb₂S₃, (c) MoS₂, (d) ZnS, (e) CaF₂. The images depict morphology prior to blending into the brake pad formulation. (Scale bar corresponds to 50 µm)

III. RESULTS AND DISCUSSION

3.1. Materials Characterization

To evaluate the properties of the investigated solid lubricants, a series of characterization tests were performed. Particle size distribution, main chemical component of the lubricants obtained from X-ray

diffraction (XRD), and decomposition temperatures extracted from thermogravimetric analysis (TGA) results for each solid lubricant are summarized in Table 4. In addition, the morphological characteristics of solid lubricants were examined using scanning electron microscopy (SEM). Figure 2 presents the SEM images of graphite, Sb_2S_3 , MoS_2 , ZnS , and CaF_2 , respectively, providing insights into their microstructural properties and surface morphology.

3.2. Tribological Performance Evaluation

A key requirement for an effective friction material is maintaining a stable coefficient of friction regardless of variations in pressure, speed, torque, or temperature. The 29 formulated samples underwent a fixed-pressure test using the Krauss-type friction tester in accordance with ECE R90 Annex 9. The raw test data, including coefficient of friction and surface temperature responses, were automatically recorded and are presented in Figure 3. Figure 3a illustrates the evolution of the friction coefficient (μ) over successive braking cycles, while Figure 3b shows the corresponding brake disc temperature responses. The initial 30 brake applications represent the bedding period. While disc temperature profiles followed a similar trend due to consistent test settings, μ -values showed marked variation, indicating the strong influence of solid lubricant composition on friction behavior. And the surface temperature has a negative effect on the coefficient of friction.

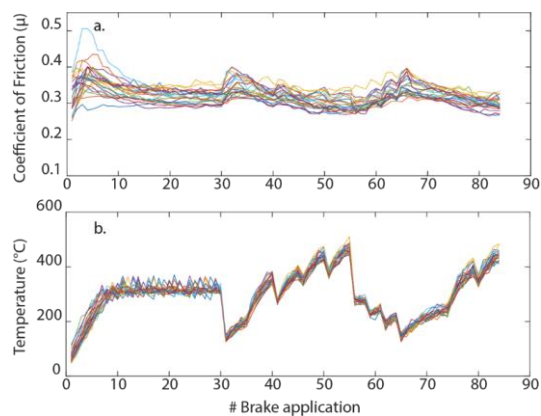


Figure 4. Evolution of (a) friction coefficient and (b) brake disc surface temperature as a function of sequential brake applications during the Krauss test of all tested specimens.

Based on the complete test data, three key performance indicators; fade resistance, average friction coefficient, and total wear rate, were extracted and summarized in Figure 4. Among all samples, the most favorable fade resistance was observed in samples 21, 29, 27, and 11. The highest coefficient of friction (0.46) was recorded in sample 14, while sample 21 demonstrated the lowest value (0.31). Wear rates varied substantially across samples, with sample 16 showing the highest wear and samples 21, 22, and 24 exhibiting the least. Overall, sample 21 (10 wt% graphite, 2.5 wt% MoS_2 , and 2.5

wt% CaF_2) provided the most balanced tribological performance across all metrics.

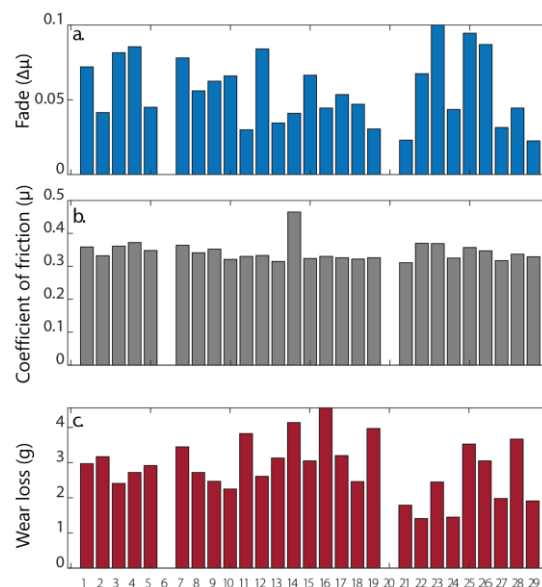


Figure 3. a. fade resistance, b. average friction coefficient, and c. wear amount obtained from the experiments.

It is worth noting that samples 6 and 20 exhibited inconsistent or unstable behaviors upon repeated testing and were thus excluded from final comparisons. These results suggest that specific combinations of solid lubricants not only affect fade resistance and wear but also induce complex interaction effects that dominate friction coefficient behavior—an insight further explored through ANOVA modeling in the next section.

3.3. Statistical Analysis

To determine the statistical significance of various factors affecting tribological performance, an analysis of variance (ANOVA) was conducted. Table 4 provides F and P-values and percentage contribution of each factor and interaction effect for fade resistance, wear amount, and friction coefficient. For simplicity, degree of freedom, sum of squares and mean squares values were removed from the table.

The ANOVA results suggest that in terms of friction coefficient, the statistical significance of individual factors was low, with MoS_2 (20.68%) and ZnS (19.94%) showing the highest contributions. However, the relatively high P-values indicate that these effects are not strongly significant, suggesting that the coefficient of friction is governed by a more complex set of interactions among the lubricants and is not governed by individual components alone. Graphite, despite its widespread usage, contributed only 0.73%, reinforcing the hypothesis that frictional stability

results more from tribofilm integrity than isolated material effects.

In the analysis of fade resistance, MoS₂ and Sb₂S₃ emerged as the dominant contributors with 18.74% and 15.65% contributions respectively, each associated with near-significant P-values (0.053 and 0.067). These findings align with the established understanding of

their thermal stability and effectiveness in supporting tribofilm development at elevated temperatures. The interaction between Sb₂S₃ and MoS₂ (19.59%) and other two-way combinations further confirms that fade resistance is highly dependent on the synergistic behavior of solid lubricants. In contrast, ZnS exhibited minimal contribution, indicating a more limited role in fade performance.

Table 4. Combined ANOVA results for tribological performance

Analysis of Variance	Coefficient of Friction			Fade Resistance ($\Delta\mu$)			Wear		
	Contr..	F-Value	P-Value	Contr.	F-Value	P-Value	Contr.	F-Value	P-Value
Model	79.21%	0.91	0.611	91.98%	2.73	0.134	91.39%	2.53	0.154
Linear	46.75%	1.42	0.36	37.24%	2.83	0.135	40.47%	4.02	0.073
Graphite	0.73%	1.26	0.313	0.01%	3.18	0.134	20.49%	1.52	0.272
Sb₂S₃	5.40%	2.54	0.173	15.65%	4.86	0.067	9.14%	1.97	0.234
MoS₂	20.68%	2.88	0.148	18.74%	5.59	0.053	8.68%	3.18	0.129
ZnS	19.94%	1.36	0.339	2.84%	0.79	0.502	2.17%	1.69	0.275
2-Way Interactions	32.46%	0.56	0.821	54.74%	2.44	0.166	50.92%	2.11	0.21
Graphite*Sb₂S₃	3.09%	0.91	0.46	6.22%	1.84	0.252	11.97%	4.86	0.067
Graphite*MoS₂	3.45%	0.2	0.823	17.54%	0.82	0.492	19.08%	2.26	0.2
Graphite*ZnS	6.40%	0.16	0.857	0.67%	0.12	0.893	2.15%	0.95	0.448
Sb₂S₃*MoS₂	5.17%	0.8	0.574	19.59%	3.38	0.107	13.65%	1.89	0.25
Sb₂S₃*ZnS	14.34%	0.86	0.544	10.73%	1.67	0.291	4.08%	0.59	0.684
Error	20.79%			8.02%			8.61%		
Total	100.00			100.00			100.00		

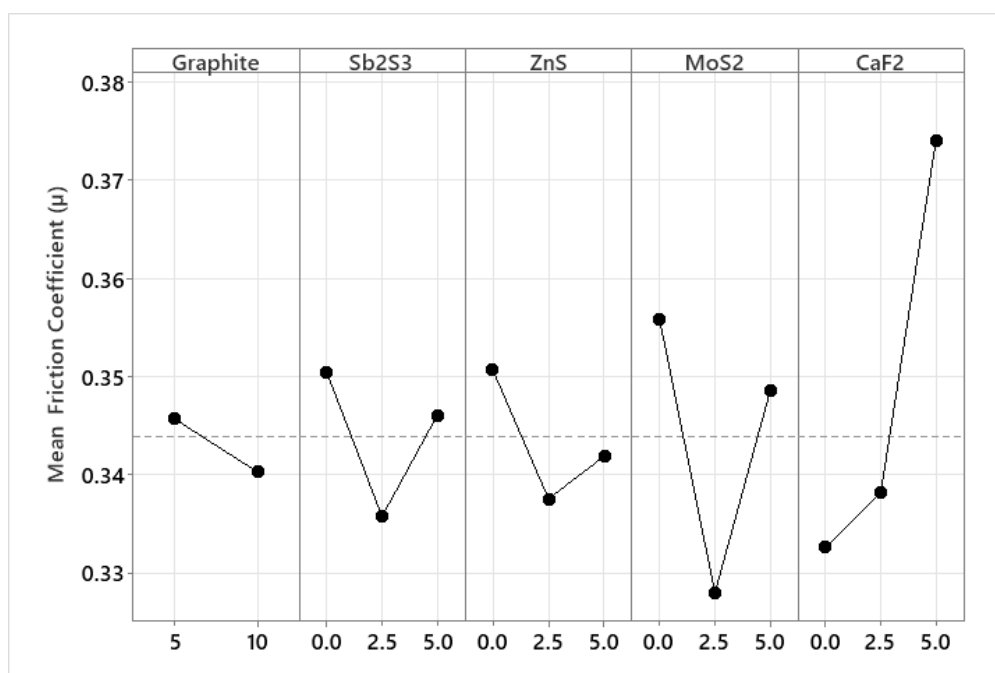


Figure 5. Main effects plot for average coefficient of friction

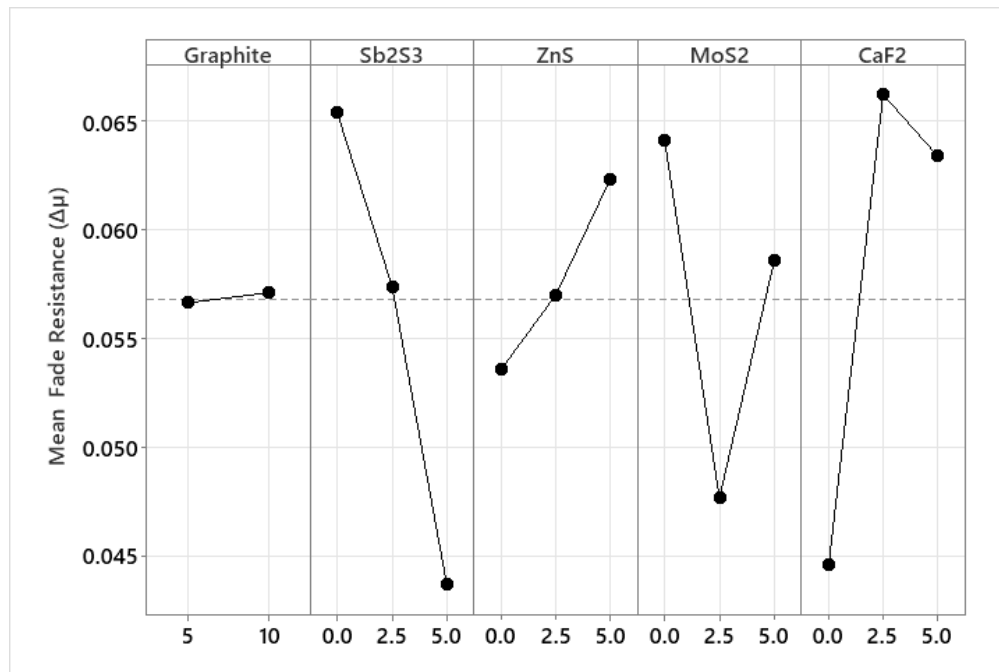


Figure 7. Main effects plot for fade resistance behavior

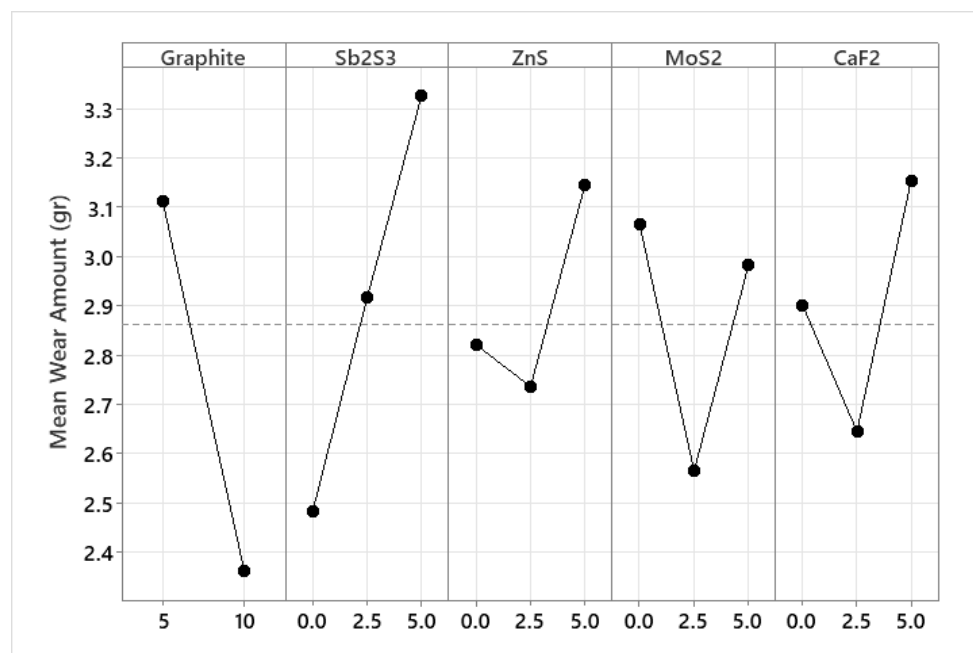


Figure 6. Main effects plot for wear amount.

Regarding the wear amount, graphite was found to be the most critical factor, contributing 20.49% to the model. These results suggest that graphite enhances load-bearing capacity and suppresses abrasive wear by promoting the formation of thermally stable tribofilms. The interactions of Graphite/MoS₂ (19.08%) and Sb₂S₃/MoS₂ (13.65%) further highlight how well-balanced combinations of solid lubricants can significantly improve wear performance. Sb₂S₃ also contributed meaningfully through its interaction with

graphite (11.97%) but did not show a strong individual effect.

Figures 5 through 7 further elaborate on these statistical insights. Figure 5 illustrates CaF₂ content has a pronounced effect on the friction coefficient, where an increase in CaF₂ leads to a noticeable rise in friction levels. This finding aligns with its role in stabilizing the tribofilm under high-temperature conditions. While other lubricants such as MoS₂, Sb₂S₃, and ZnS exhibit

non-linear behavior, this suggests that these lubricants contribute to tribofilm formation in a more complex, non-linear manner, dependent on their interactions with other components rather than their individual concentrations.

Figure 6 shows that an increase in Sb_2S_3 content improves fade resistance, meaning it helps maintain friction stability under high-temperature conditions. This result is consistent with literature findings, which indicate that Sb_2S_3 facilitates tribofilm formation at elevated temperatures, thereby preventing significant friction loss during prolonged braking applications [6]. Conversely, the addition of ZnS and CaF_2 appears to negatively impact fade resistance, reducing the system's ability to sustain friction levels over extended braking cycles. One possible explanation for this trend is that excess CaF_2 may lead to the formation of unstable tribofilm regions, resulting in discontinuous surface interactions. Such disruptions in the friction layer can cause inconsistent contact conditions, which, in turn, lower fade resistance.

Figure 7 shows that increasing graphite content leads to a reduction in wear amount suggesting that graphite contributes to a well-formed, thermally stable tribofilm, reducing direct surface interactions and minimizing abrasive wear. On the other hand, while Sb_2S_3 enhances fade resistance, its effect on wear behavior does not follow the same pattern. Unlike graphite, Sb_2S_3 does not consistently contribute to wear reduction, indicating that its primary function is to stabilize friction rather than directly mitigate wear. This suggests that while Sb_2S_3 strengthens the braking response at high temperatures, its interactions with other solid lubricants must be optimized to prevent excessive material loss.

The tribological performance of friction materials is inherently governed by complex interactions between mechanical, thermal, and chemical phenomena occurring at the pad-disc interface. Among these, the formation and evolution of tribofilms play a pivotal role in determining friction stability, fade resistance, and wear behavior.

The results from the ANOVA analysis and experimental evaluations reinforce the importance of not only selecting the right solid lubricant types but also formulating them in synergistic combinations. The statistical data clearly demonstrate that while individual effects of some lubricants may appear modest, their interaction effects are often substantial and sometimes dominant.

For example, graphite, traditionally recognized for its layered crystal structure and self-lubricating properties, exhibited the most consistent contribution to wear reduction. This aligns with its capacity to form stable, thermally resilient tribofilms that minimize abrasive contact [25]. However, graphite's effect on fade

resistance and friction stability was less significant when considered in isolation. This suggests that graphite's benefit is primarily mechanical, buffering shear forces and suppressing wear rather than thermochemical in nature.

In contrast, Sb_2S_3 and MoS_2 emerged as critical to enhancing fade resistance. Both materials are known for their lubricating efficiency at elevated temperatures, and the ANOVA results confirm their role in preserving friction stability during thermal cycling. Importantly, the presence of these materials appears to facilitate the formation of dense, adherent tribofilms that resist degradation under cyclic thermal stress [26]. The interactions between Sb_2S_3 and graphite, and between Sb_2S_3 and MoS_2 , were particularly influential in both fade and wear responses—highlighting that carefully balanced dual-lubricant strategies are more effective than single-lubricant additions.

The role of CaF_2 is more nuanced. While increasing its content led to a notable rise in the average coefficient of friction (as observed in the main effect plots), its effect on fade resistance was ambiguous. This behavior likely stems from CaF_2 's tendency to contribute to friction-enhancing tribofilms at high temperatures, albeit at the risk of creating discontinuous or thermally unstable surface layers when used in excess [14]. These inconsistent tribofilm regions may be responsible for reduced fade performance in some compositions.

ZnS , while environmentally favorable, demonstrated minimal individual influence on fade or wear behavior in the statistical models. Its contribution appears to be more supportive, potentially enhancing tribofilm adhesion or complementing the effects of stronger lubricants like MoS_2 or Sb_2S_3 [11]. Its granular morphology and moderate thermal reactivity likely make it a passive yet beneficial filler rather than a performance driver.

From a systems-level perspective, the interplay between friction, fade, and wear performance points to a critical trade-off: compositions that resist fade often experience increased wear, particularly when tribofilms are thermally stable but abrasive [17]. However, formulations containing graphite appear to moderate this effect, achieving acceptable fade performance while substantially lowering wear rates. This moderation underscores graphite's versatility as a foundational solid lubricant in multi-component systems.

The observations are further corroborated by Figure 3 and Figure 4, where sample-specific behaviors across thermal cycles provide empirical support for the statistical findings. Sample 21 containing 10 wt% graphite, 2.5 wt% MoS_2 , and 2.5 wt% CaF_2 emerged as the optimal composition, delivering low wear, high fade resistance, and moderate friction coefficient. This

result highlights the effectiveness of combining mechanical lubricants (graphite) with thermally resilient additives (MoS_2 , CaF_2) to achieve balanced tribological performance.

Finally, the inclusion of SEM micrographs (Figure 2) enhances the understanding of the role of solid lubricant morphology. The platelet structure of graphite, the angular grains of Sb_2S_3 , and the layered features of MoS_2 each contribute to distinct tribofilm characteristics. Morphological attributes like particle size, shape, and surface texture influence dispersion, thermal contact, and film formation, all of which are critical to performance.

Together, the study confirms that optimal friction material performance cannot be achieved through the addition of a single solid lubricant. Instead, a multi-objective design approach, accounting for synergy, thermal stability, morphology, and interaction effects is essential. Future research should focus on mapping these interactions in higher resolution, including in-situ tribofilm analysis, to fully characterize the mechanisms underpinning brake pad performance.

IV. CONCLUSIONS

This study experimentally investigated the effects of solid lubricant combinations on the tribological performance of friction materials for heavy-duty brake applications. Graphite, antimony trisulfide (Sb_2S_3), molybdenum disulfide (MoS_2), zinc sulfide (ZnS), and calcium fluoride (CaF_2) were selected as solid lubricants, and their physical and chemical properties were characterized using Scanning Electron Microscopy (SEM), Particle Size Distribution (PSD), Thermogravimetric Analysis (TGA), and X-ray Diffraction (XRD) techniques.

A total of 29 different formulations were prepared by systematically varying the composition of solid lubricants while maintaining a fixed total lubricant content of 15 wt%, ensuring consistency in the base formulation. All samples were produced under identical manufacturing conditions to eliminate processing variations.

The tribological performance of the formulated friction materials was evaluated using the Krauss test machine, following the ECE R90 standard, which is widely used for assessing the braking behavior of commercial vehicle brake systems. The tests measured the relationship between temperature and friction coefficient, fade resistance, recovery performance, and wear rates of the brake pad formulations.

The experimental results revealed that:

1. Calcium fluoride (CaF_2) significantly increased the friction coefficient. Compositions with 5 wt% CaF_2 demonstrated average μ values up to 0.46, compared to lower values (~ 0.31) in samples without CaF_2 . However, excessive CaF_2 led to reduced fade resistance due to tribofilm discontinuities.
2. Antimony trisulfide (Sb_2S_3) was most effective in enhancing fade resistance. Samples with 5 wt% Sb_2S_3 exhibited up to 37% improvement in $\Delta\mu$ compared to Sb_2S_3 -free samples ($\Delta\mu$ improved from ~ 0.05 to 0.03). However, high Sb_2S_3 content also increased wear, with some samples showing wear losses up to 0.019 g.
3. Graphite showed the strongest influence on wear reduction. Increasing graphite from 5% to 10% decreased wear by approximately 35%, from 0.014 g to 0.009 g, without negatively affecting fade resistance or friction stability.
4. Molybdenum disulfide (MoS_2) contributed to both fade and wear improvement when combined with Sb_2S_3 . The synergy between MoS_2 and Sb_2S_3 resulted in more stable tribofilms and enhanced performance, especially in mid-range compositions (2.5% each).

The best-performing sample (Sample 21), comprising 10 wt% graphite, 2.5 wt% MoS_2 and 2.5 wt% CaF_2 , achieved the lowest wear loss (0.009 g), moderate average friction coefficient ($\mu = 0.31$), and one of the best fade resistances ($\Delta\mu = 0.03$), demonstrating a well-balanced tribological profile.

ANOVA analysis confirmed that MoS_2 (18.7%) and Sb_2S_3 (15.6%) had the highest contributions to fade resistance, while graphite (20.5%) was the dominant factor for wear reduction.

Overall, this study highlights the importance of strategic solid lubricant selection in developing high-performance copper-free friction materials for heavy-duty braking applications. The findings suggest that optimized multi-metal sulfide formulations offer a promising approach to enhancing brake pad performance by balancing wear resistance, fade resistance, and friction stability. Future studies should focus on long-term durability testing under real-world braking conditions and further optimization of lubricant compositions to meet evolving environmental regulations and performance demands.

REFERENCES

- [1] Singh, S., Kalel, N., Darpe, A., et al. (2020). Controlling the performance of copper-free brake-pads by varying size of graphite particles. In *SAE Technical Papers*. SAE International.
- [2] Kijanski, J., Otto, J., Stebner, F., et al. (2020). Investigation of influences on brake pad wear. In *SAE Technical Papers*. SAE International.
- [3] Druzhinina, M., & Stefanopoulou, A. G. (2002). Speed control experiments for commercial heavy vehicles with coordinated friction and engine compression brakes. In *Proceedings of the American Control Conference*. IEEE Xplore.
- [4] Antonyraj, I. J., & Singaravelu, D. L. (2019). Tribological characterization of various solid lubricants based copper-free brake friction materials: A comprehensive study. In *Materials Today: Proceedings* (pp. 2650–2656). Elsevier.
- [5] Le Gigan, G., Vernersson, T., Lundén, R., & Skoglund, P. (2015). Disc brakes for heavy vehicles: An experimental study of temperatures and cracks. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 229(5), 684–707. SAGE Publications.
- [6] Martinez, A. M., & Echeberria, J. (2016). Towards a better understanding of the reaction between metal powders and the solid lubricant Sb₂S₃ in a low-metallic brake pad at high temperature. *Wear*, 348–349, 27–42. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2015.11.014>
- [7] Kalel, N., Bhatt, B., Darpe, A., & Bijwe, J. (2020). Eco-friendly brake-pads using ferritic stainless-steel particles of varying sizes: Influence on performance properties. In *SAE Technical Papers*. SAE International.
- [8] Justin Antonyraj, I., Vijay, R., & Lenin Singaravelu, D. (2019). Influence of WS₂/SnS₂ on the tribological performance of copper-free brake pads. *Industrial Lubrication and Tribology*, 71(3), 398–405. <https://doi.org/10.1108/ILT-06-2018-0249>
- [9] Österle, W., & Dmitriev, A. (2016). The role of solid lubricants for brake friction materials. *Lubricants*, 4(1), 5. <https://doi.org/10.3390/lubricants4010005>
- [10] Melcher, B., & Faullant, P. (2000). A comprehensive study of chemical and physical properties of metal sulfides. In *SAE Technical Papers*. SAE International.
- [11] Ertan, R., & Yavuz, N. (2011). The effects of graphite, coke and ZnS on the tribological and surface characteristics of automotive brake friction materials. *Industrial Lubrication and Tribology*, 63(4), 245–253. <https://doi.org/10.1108/00368791111140468>
- [12] Barros, L. Y., Poletto, J. C., Gehlen, G. S., et al. (2023). Transition in wear regime during braking applications: An analysis of the debris and surfaces of the brake pad and disc. *Tribology International*, 189, 108968. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2023.108968>
- [13] Sathickbasha, K., Selvakumar, A. S., Balaji, M. A. S., & Rajan, B. S. (2019). The dual role of metal sulfides as lubricant and abrasive: An interface study in friction composite. *Materials Research Express*, 6(1). <https://doi.org/10.1088/2053-1591/aafd5a>
- [14] Balaji, P., Sathickbasha, K., & Baskara Sethupathi, P. (2024). The significance of low and high temperature solid lubricants for brake friction applications and their tribological investigation. *Tribology International*, 191, 109109. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2023.109109>
- [15] Ouyang, J.-H., Li, Y.-F., Zhang, Y.-Z., et al. (2022). High-temperature solid lubricants and self-lubricating composites: A critical review. *Lubricants*, 10(8), 177. <https://doi.org/10.3390/lubricants10080177>
- [16] Zhang, P., Zhang, L., Wei, D., et al. (2019). Effect of graphite type on the contact plateaus and friction properties of copper-based friction material for high-speed railway train. *Wear*, 432–433. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2019.202927>
- [17] Cho, M. H., Ju, J., Kim, S. J., & Jang, H. (2006). Tribological properties of solid lubricants (graphite, Sb₂S₃, MoS₂) for automotive brake friction materials. *Wear*, 260(7–8), 855–860. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2005.04.003>
- [18] Vijay, R., Singaravelu, L. D., & Filip, P. (2020). Influence of molybdenum disulfide particle size on friction and wear characteristics of non-asbestos-based copper-free brake friction composites. *Surface Review and Letters*, 27(9), 1950085. <https://doi.org/10.1142/S0218625X19500859>
- [19] Vijay, R., Manoharan, S., Nagarajan, S., & Singaravelu, L. D. (2021). Influence of premixed dual metal sulfides on the tribological performance of copper-free brake friction materials. *Industrial Lubrication and Tribology*, 73(2), 266–274. <https://doi.org/10.1108/ILT-03-2020-0116>
- [20] Makhesana, M. A., & Patel, K. M. (2021). Improvement in friction and wear characteristics using CaF₂ as a solid lubricant at different conditions. *Metal Powder Report*, 76(S1), S55–S65. <https://doi.org/10.1016/j.mprp.2020.06.058>
- [21] Washington State Department of Ecology. (n.d.). *Better Brakes Law*. Retrieved May 9, 2025, from <https://ecology.wa.gov/waste-toxics/reducing-toxic-chemicals/washingtons-toxics-in-products-laws/better-brakes-law>

-
- [22] Bilvatej, B., Naveen, J., Karthikeyan, N., et al. (2024). Progress in polymeric and metallic brake pads: A comprehensive review. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, 238(1), 3–25. <https://doi.org/10.1177/13506501231204655>
- [23] European Agency for Safety and Health at Work. (2006). *Regulation (EC) No 1907/2006 - Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals (REACH)*. Retrieved May 8, 2025, from <https://osha.europa.eu/en/legislation/directives/regulation-ec-no-1907-2006-of-the-european-parliament-and-of-the-council>
- [24] United Nations Economic Commission for Europe (UNECE). (2012). *ECE R90: Uniform provisions concerning the approval of replacement brake lining assemblies, drum brake linings and discs and drums for power-driven vehicles and their trailers*.
- [25] Lin, H. Y., Cheng, H. Z., Lee, K. J., et al. (2020). Effect of carbonaceous components on tribological properties of copper-free NAO friction material. *Materials*, 13(5), 1163. <https://doi.org/10.3390/ma13051163>
- [26] Lee, W. K., Rhee, T. H., Kim, H. S., & Jang, H. (2013). Effects of antimony trisulfide (Sb₂S₃) on sliding friction of automotive brake friction materials. *Metals and Materials International*, 19(6), 1101–1107. <https://doi.org/10.1007/s12540-013-5027-x>

Metanol-Dizel Çift Yakıtlı Reaktivite Kontrollü Sıkıştırma ile Ateşlemeli (RCCI) Bir Motorda Farklı Yüklerin Yanma Karakteristiklerine Etkisinin DeneySEL İncelenmesi

Experimental Investigation of the Effect of Different Loads on the Combustion Characteristics in a Methanol-Diesel Dual-Fuel Reactivity Controlled Compression Ignition (RCCI) Engine

Mustafa TEMÜR¹, Cenk SAYIN²

¹*İstanbul Gelişim Üniversitesi, Meslek Yüksek Okulu, Otomotiv Teknolojisi, 34310, İstanbul, Türkiye*

²*Marmara Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 34722, İstanbul, Türkiye*

Öz

Dünyada insan nüfusunun ve taşıt sayısının artmasına bağlı olarak artan emisyon kirliliği, insan sağlığını ve doğayı olumsuz etkilemektedir. Bu kirliletiçi emisyonlar, atmosferde sera gazı ve partiküllerin birikmesine neden olur. Bu da günümüzde, başta iklim değışikliği ve hava kirliliği olmak üzere birçok soruna yol açmaktadır. Dizel ve benzin motorlarının avantajlarını birleştiren RCCI motorlar, daha verimli ve temiz bir yanma sağlayan yenilikçi bir düşük sıcaklıkta yanma konseptidir. Bu konseptte, yüksek reaktiviteli ve düşük reaktiviteli olmak üzere en az iki farklı türde yakıt kullanılmaktadır. Bu çalışmada, düşük sıcak yakıtı olarak, yüksek oktan sayısı ile bilinen bir alkol yakıtı olan metanol ile geleneksel dizel yakıtı kullanılmıştır. Dört silindirli, turboşarjlı, su soğutmalı, common-rail yakıt enjeksiyon sistemine sahip bir dizel motor, emme manifolduna metanol yakıtı püskürtecek yeni bir enjektör eklenmesiyle birlikte RCCI yanma konseptine dönüştürülmüştür. Deneyler 1750 d/d sabit hızda ve dört farklı motor yükünde (40 Nm, 60 Nm, 80 Nm ve 100 Nm) gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada kullanılan metanol, 12,19 ve 26 g/d (M12, M19 ve M26) olmak üzere üç farklı kütledebide motora gönderilmiş, elde edilen sonuçlar dizel yakıtı ile elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Yapılan çalışma ile common-rail yakıt enjeksiyon sistemine sahip metanol-dizel çift yakıtlı bir RCCI motorda, sabit emme havası sıcaklığında (55 °C), farklı metanol enerji oranlarında ve kısmi yüklerde detaylı olarak incelenmesi ve literatüre önemli katkı sağlanması amaçlanmıştır. Yanma karakteristikleri, (silindir basıncı, ısı dağılım oranı, kümülatif ısı dağılımı, basınç artış oranı, tutuşma gecikmesi ve yanma süresi) motor performansı (özgül yakıt tüketimi ve volümetrik verim) ve egzoz emisyon parametreleri (HC, CO₂, O₂, NO_x ve is) incelenmiştir. Deneyler sonucunda, kullanılan metanol oranının artmasıyla birlikte basınç artış oranı değeriinin M26 yakıtında vuruntu limitinde olduğu tespit edilmiştir. Motor yükü arttıkça maksimum silindir basınçlarının ve basınç artış oranlarının arttığı, maksimum ısı dağılım oranının ise azaldığı görülmektedir. Minimum tutuşma gecikmesi M12 yakıtı ile 40 Nm'de, 5,63 krank mili açısında meydana gelirken, maksimum tutuşma gecikmesi M26 yakıtı ile 80 Nm'de 15,12 krank mili açısında meydana gelmiş olup motor yükü arttıkça artan bir eğilim göstermektedir. En yüksek yanma süresi M26 yakıtıyla 100 Nm torkta elde edilirken, en düşük yanma süresi aynı yakıtla 40 Nm'de elde edilmiştir. Genel olarak artan yükte azalma eğilimi gösteren özgül yakıt tüketimi için minimum değeri geleneksel dizel yakıtı için 100 Nm'de 231,11 g/kWh olurken, en yüksek değeri M21 yakıtı ile 40 Nm'de 350,49 g/kWh olmuştur. Metanol oranı arttıkça NO_x ve CO₂ emisyonlarında önemli iyileşmeler gözlenirken, HC ve O₂ emisyonlarında artış görülmüştür. İis emisyonu ise düşük yüklerde azalırken, yüksek yüklerde artma eğilimi göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Metanol, RCCI, Yanma Karakteristiğı, İçten Yanmalı Motorlar

Abstract

The increasing emission pollution caused by the growing human population and the rising number of vehicles worldwide negatively affects both human health and the environment. These pollutant emissions lead to the accumulation of greenhouse gases and particulates in the atmosphere, resulting in various problems, primarily climate change and air pollution. RCCI engines, which combine the advantages of diesel and gasoline engines, represent an innovative low-temperature combustion concept that enables more efficient and cleaner combustion. This concept involves the use of at least two different types of fuels: one with high reactivity and the other with low reactivity. In this study, methanol, an alcohol fuel known for its high octane number, was used as the low-reactivity fuel along with conventional diesel fuel. A four-cylinder, turbocharged, water-cooled diesel engine with a common-rail fuel injection system was modified to the RCCI combustion concept by adding an additional injector to spray methanol fuel into the intake manifold. In this study, a detailed investigation was conducted on a methanol-diesel dual-fuel RCCI engine equipped with a common-rail fuel injection system under constant intake air temperature conditions (55 °C), at various methanol energy ratios and partial load operations, with the aim of making a significant contribution to the literature. The study focuses on combustion characteristics (cylinder pressure, heat release rate, cumulative heat release, pressure rise rate, ignition delay, and combustion duration), engine performance

Sorumlu Yazar: MUSTAFA TEMÜR, Tel: 0212 422 70 00, E-posta: mtemur@gelisim.edu.tr

Gönderilme: 13.02.2025, **Düzenleme:** 11.05.2025, **Kabul:** 20.08.2025

parameters (brake specific fuel consumption and volumetric efficiency), and exhaust emission parameters (HC, CO₂, O₂, NO_x, and soot). Experiments were conducted at a constant speed of 1750 rpm under four different engine loads (40 Nm, 60 Nm, 80 Nm, and 100 Nm). The methanol used in this study was supplied to the engine at three different mass flow rates 12, 19, and 26 g/s (M12, M19, and M26) and the results were compared with those obtained using diesel fuel. As a result of the experiments, it was found that with an increasing proportion of methanol, the pressure rise rate in the M26 fuel reached the knock limit. It was also observed that as the engine load increased, the maximum cylinder pressures and pressure rise rates increased, while the maximum heat release rate decreased. The minimum ignition delay occurred with the M12 fuel at 40 Nm, at 5.63 crank angle degrees, while the maximum ignition delay was observed with the M26 fuel at 80 Nm, at 15.12 crank angle degrees, showing an increasing trend with rising engine load. The longest combustion duration was obtained with the M26 fuel at 100 Nm torque, whereas the shortest combustion duration was also recorded with the same fuel at 40 Nm. In terms of brake specific fuel consumption, which generally exhibited a decreasing trend with increasing load, the lowest value was 231.11 g/kWh at 100 Nm with conventional diesel fuel, while the highest value was 350.49 g/kWh at 40 Nm with the M21 fuel. As the methanol ratio increased, significant improvements were observed in NO_x and CO₂ emissions, while HC and O₂ emissions showed an increasing trend. Soot emissions decreased at low loads but tended to increase under high load conditions.

Keywords: Methanol, RCCI, Combustion Characteristic, Internal Combustion Engines

I. GİRİŞ

Dünyada hızla artan endüstriyel gelişmelerin paralelinde bazı problemler de ortaya çıkmaktadır. Bu endüstriyel gelişmeler içerisinde içten yanmalı motorlar önemli bir yer tutar. İçten yanmalı motorlar, uzun yıllardır taşıtlarda kullanılan yaygın bir motor tipidir. Genellikle fosil kökenli yakıtlar kullanılır. Bu yakıtların yanmasıyla egzozdan çevreye kirletici gazlar yayılır. Bu gazların küresel ısınmaya, hava kirliliğine, çevre ve insan sağlığına olumsuz etkileri olduğu bilinmektedir. Bir diğer problem ise bu fosil kökenli yakıtların rezervlerinin sınırlı olmasıdır. Bu problemlerin çözümü için bilim adamları içten yanmalı motorlarda kullanılabilecek alternatif yakıt arayışlarına yönelmişlerdir.

Fosil kökenli yakıt rezervlerinin azalması sonucunda, petrol kökenli olmayan alternatif yakıtlara olan ilginin artması dikkat çekmektedir. Buna göre motorlarda

yapılacak çok küçük değişikliklerle kömürden elde edilen sentetik benzin veya metanolün yakıt olarak kullanılması mümkündür [1]. Metanol, benzine alternatif olarak düşünülen yakıtlar içinde ümit vaat eden ve üzerinde araştırmalar yapılan bir yakıttır. Saf metanol ve farklı yüzdelerdeki metanol-benzin karışımları son yıllarda motorlar üzerinde kapsamlı bir şekilde test edilmektedir [2,3].

Benzin-metanol karışımlarının yakıt olarak kullanılmasında ortaya dezavantajlar da ortaya çıkmaktadır. Bu sorunlardan biri alkolün su ile reaksiyona girme eğilimidir. Bu olay gerçekleştiğinde metanol yerel olarak benzinden ayrışır ve bu durumda homojen olmayan bir karışım meydana gelir. Bu durum, iki yakıt arasındaki yüksek hava-yakıt oranı farklılıkları sebebiyle motorun düzensiz çalışmasına neden olur. Bununla birlikte, otomotiv firmaları herhangi bir benzin-metanol-etanol bileşimi kullanılabilen motor üzerinde de testler yapmaktadır [4].

Çift yakıtlı bazı dizel motorlarda metanol kullanılmaktadır. Metanol tek başına kullanıldığında dizel motorlar için uygun değildir. Ancak, tutuşmayı iyileştirmek için az miktarda dizel yakıtının kullanılması durumunda metanol iyi sonuçlar vermektedir. Metanol, dizel yakıtından çok daha ucuz olarak üretildiği bazı ülkelerde cazip bir yakıt olarak kullanılmaktadır. Metanol ile gerçekleştirilen ilk deneylerde eski tip büyük vasıta dizel motoru kullanılarak, metanol ile çalışacak şekilde dönüştürülmüştür. Bu deneyler sonucunda dizel yakıtı ile çalışan büyük vasıta dizel motoruna kıyasla zararlı emisyonların hepsinde iyileşmeler görülmüştür [5].

Metanol, etanol, bütanol ve propanol gibi yakıtlar birer alkol yakıtıdır. Alkol yakıtlarının en önemli avantajları, dizel yakıtına göre düşük viskoziteli olmalarıdır. Bu nedenle kolayca enjekte edilebilir, atomize edilebilir ve hava ile karışabilirler. Ayrıca, yanma işleminin daha erken bitmesini sağlayabilen yüksek laminar yanma hızı, motordaki ısı verimliliği artırmaktadır. Yüksek oksijen içeriği ve düşük kükürt içeriği nedeniyle daha az emisyon ortaya çıkmaktadır [6].

Bu çalışmada, emme manifoldundan metanol yakıtı gönderilmek üzere benzin enjektörü ilave edilmiştir.

Alternatif yenilenebilir bir yakıt olan metanolün yanma karakteristiklerine etkisinin incelenmesi çalışmanın ana prensibini oluşturmaktadır. Deneylerde bir dizel motorda, ana püskürtmede dizel yakıtı ve pilot püskürtmede metanol yakıtı kullanılarak RCCI yapılmıştır. Başlangıçta emme manifolduna benzin enjektörü ile metanol, daha sonra sıkıştırma zamanı sonuna doğru dizel yakıtı enjekte edilmiştir. Motor farklı yüklerde çalıştırılmış, silindir basıncı, ısı dağılım oranı, basınç artış oranının farklı motor yük değişimine bağlı olarak incelenmiştir.

Metanolün içten yanmalı motorlarda kullanılmasıyla birlikte yanma karakteristiklerine etki eden parametreler üzerine yapılan araştırmalar devam etmektedir. Emme havasının ısıtılması ve sıkıştırma oranlarının değiştirilmesi gibi farklı yöntemler tercih edilmektedir. Bu çalışmada, emme havası ısıtılarak metanol yakıtı kullanılan bir RCCI motorda farklı motor yükü koşulları ile yanma karakteristiklerine etkisinin incelenmesi amaçlanmıştır.

RCCI motorlar, yüksek ısı verimleri ve düşük azotoksit (NO_x) ile is emisyonları nedeniyle verimli bir yanma konseptidir. RCCI yanma konsepti ile ilgili çok sayıda çift yakıtlı çalışma yapılmıştır. Araştırmalar daha çok deneysel çalışmalar olup, teorik olarak gerçekleşen çalışmalar da bulunmaktadır.

Duraisamy ve arkadaşları yapmış oldukları çalışmada, üç silindri, common-rail direkt enjeksiyonlu, turboşarjlı RCCI yanma konseptine dönüştürülmüş bir dizel motorda metanol/dizel ve metanol/polioksümetilen dimetil ester kullanımının emisyonlar üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Testler 3,4 bar fren ortalama efektif basıncı ve 1500 d/d motor devrinde gerçekleştirilmiştir. Araştırmacılar, metanolün kütlelerinin artmasıyla tutuşma gecikmesinin uzadığını, hem metanol/dizel hem de metanol/polioksümetilen dimetil ester yakıtları için silindir içi basıncın azaldığını gözlemlemişlerdir [7]. Kokabi ve arkadaşları yapmış oldukları çalışmada, düşük reaktiviteli yakıt olarak propan veya hidrojen ya da ikisini bir arada kullanmışlardır. Maksimum tepe basıncı 150 bar ve maksimum basınç artış hızı 10 bar/ $^\circ$ ile sınırlanmıştır. En iyi sonuçlar optimum püskürtme oranı (%3,4 oranında propan ve %6,6 oranında hidrojen enjeksiyonuyla) 0,31 eşdeğerlik oranı, 1,983 bar emme basıncı ve 75 $^\circ$ krank mili açısı (KMA) Üst Ölü Nokta (ÜÖN) enjeksiyon zamanlamasında gerçekleşmiştir [8]. Wategave ve arkadaşları, RCCI bir motorda sıkıştırılmış doğal gaz (CNG) ve Karanja biyodizelinin yakıtlarının yanma üzerine etkilerini incelemişlerdir. Çalışmada, RCCI modunda çalışan bir dizel motorun, düşük ve yüksek reaktif yakıt kombinasyonları ile daha az gürültülü yanma ve işletim sınırları belirlenmiştir. Araştırma kapsamında, tam yük çalışması sırasında hava-yakıt oranı, çevrimsel farklılıklar, yanma gürültüsü ve emisyonların incelenmesi yer almaktadır. Çalışmada, CNG'nin %90'lık enerji payına ulaştığı

durumda motorun 3,5 kW çıkış gücünde vuru limitine eriştiği belirlenmiştir [9]. Duan ve arkadaşları, yüksek sıkıştırma oranlı, direkt enjeksiyonlu bir motorda metanolün enjeksiyon ve ateşleme zamanlamalarının yanma, performans ve emisyonlara etkisini incelemişlerdir. Deneyler 65 ve 87 kPa emme basınçlarında gerçekleştirilmiş; enjeksiyonun geciktirilmesiyle tutuşma gecikmesi azalmış ancak hacimsel ve yanma verimleri düşmüştür. Ateşleme zamanının geciktirilmesi NO_x ve CO emisyonlarını azaltırken, ısı verimliliği ve diğer emisyonlarda azalma gözlemlenmiştir. En iyi performansın -270 $^\circ$ ile -240 $^\circ$ krank mili açılarında enjeksiyonla elde edildiği belirtilmiştir [10]. Panda ve Ramesh, metanol-dizel yakıtlı RCCI motorda emisyonları azaltmak ve ısı verimi artırmak amacıyla deneysel bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. 1500 d/d sabit hızda yapılan testlerde, metanol oranı %56'ya çıkarıldığında ısı verim %38'e ulaşmış, NO_x emisyonu %95, is emisyonu ise %78 oranında azalmıştır. Yüksek metanol oranlarında ve 85 $^\circ\text{C}$ 'lik emme havası sıcaklığında %42 oranında ısı verime ulaşıldığı ifade edilmiştir [11]. Agarwal ve arkadaşları, tek silindri bir dizel motorda tek ve çift kademeli pilot enjeksiyon stratejileriyle püskürtme avansının emisyonlara etkisini incelemiştir. 1500 d/d motor devri ve 3 bar ortalama efektif basınçta, farklı metanol oranlarıyla yapılan testlerde, düşük devirlerde pilot enjeksiyon yapılmıştır. RCCI modunda NO_x emisyonları azalırken, CO ve HC emisyonlarında artış gözlemlenmiştir. Ancak metanol oranı arttıkça HC emisyonları düşme eğilimi göstermiştir [12]. Literatür çalışmaları incelendiğinde, common-rail yakıt enjeksiyon sistemine sahip RCCI araştırmalarında, sabit emme havası sıcaklığında (55 $^\circ\text{C}$), metanol ve dizel yakıtları kullanılan çift kademeli enjeksiyon yanma (silindir basıncı, ısı dağılım oranı, kümülatif ısı dağılımı, basınç artış oranı, tutuşma gecikmesi ve yanma süresi) performans (özgül yakıt tüketimi ve volümetrik verim) ve emisyon parametrelerinin (HC, CO₂, NO_x ve is) yüksek metanol enerji oranlarında (M12, M19 ve M26) araştırılmadığı görülmektedir. Yapılan bu çalışma ile literatürdeki bu eksikliğin giderilmesi amaçlanmaktadır.

II. MATERYAL VE YÖNTEM

Deneyler, Marmara Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü Otomotiv Laboratuvarları'nda gerçekleştirilmiştir. Deney yakıtları olarak kullanılan metanol ve dizelin bazı fiziksel ve kimyasal özellikleri Tablo 1'de belirtilmiştir.

Tablo 1. Dizel ve metanolün bazı fiziksel ve kimyasal özellikleri [13,14]

Yakıt özellikleri	Dizel	Metanol
Kimyasal formülü	$C_{12}H_{24}$	CH_3OH
Yoğunluk (kg/m^3 , 293 K)	847	795
Tutuşma sıcaklığı (K)	483-523	743
Alt ısı değeri (MJ/kg)	42,5	20,1
Gizli buharlaşma ısısı (kJ/kg)	260	1100
Setan sayısı	51	<5
Oktan sayısı	17	111
Laminer yanma hızı (cm/s)	-	523
Stokiyometrik hava/yakıt oranı	14,3	6,5
Viskozite (mm^2/s , 313 K)	2,72	0,58
Kaynama noktası ($^{\circ}C$)	180-360	64,5

Deney düzeneği; test motoru, motor dinamometresi, silindir içi basınç ve yakıt hattı basınç ölçüm sistemleri, sinyal şartlandırıcı, enkoder, veri toplama kartı, hava ve yakıt ölçüm sistemi, gaz besleme sistemi, emme hava ısıtıcısı, sıcaklık kontrol paneli, elektronik kontrol ünitesi ve egzoz gazı analiz cihazından oluşmaktadır. Şekil 1’de ise deney düzeneğinin genel görünümü gösterilmiştir.

**Şekil 1.** Deney düzeneğinin genel görünümü

Deneyler common rail yakıt enjeksiyon sistemine sahip, turboşarjlı, dört silindirli, su soğutmalı bir dizel motorda yapılmıştır. RCCI yanma modu için düşük reaktiviteli yakıt olan metanol, elektronik kontrol ünitesi ve basınç ayar valfi ile kontrol edilerek emme manifoldundan püskürtülmüştür. Deney motoru ise Şekil 2’de gösterilmiştir.

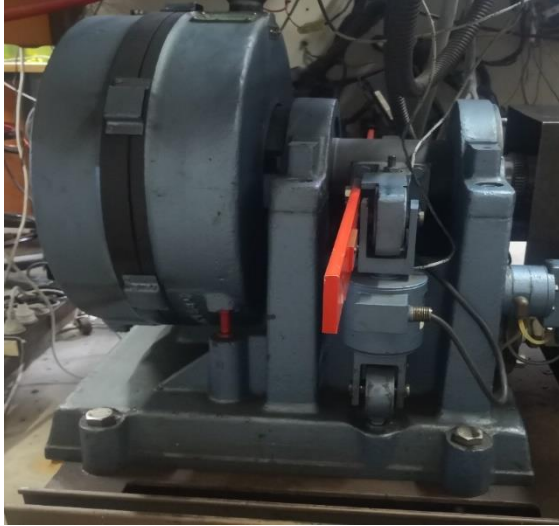
**Şekil 2.** Deney motoru

Deney motorunun teknik özellikleri ise Tablo 2’de belirtilmiştir.

Tablo 2. Deney motorunun özellikleri

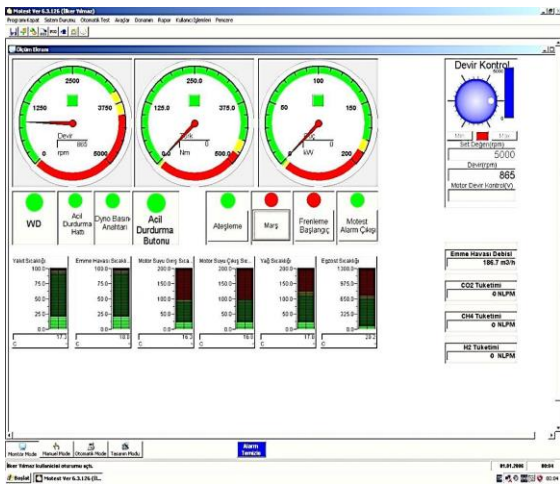
Özellikler	
Motor modeli	Renault-1,5 litre dCi K9K-700
Motor tipi	4 silindirli, turboşarjlı, common-rail
Silindir çapı x kurs	76 x 80,5 mm
Silindir hacmi	1461 cm^3
Sıkıştırma oranı	18,25:1
Valf sayısı	8
Maksimum güç	48 kW-4000 d/d
Maksimum tork	160 Nm-1750 d/d

Deneylerde, motorun yüklenmesi için maksimum torku 475 Nm, maksimum gücü 160 kW ve maksimum devri 8000 d/d olan Eddy Current tipi bir dinamometre (Cussons P8602) kullanılmıştır. Dinamometre, bir ısı değiştiriciyle donatılmıştır. Hem motorun hem de dinamometrenin soğutma işlemi, şehir şebekesinden sağlanan su ile gerçekleştirilmiştir. Kullanılan motor dinamometresi Şekil 3’de sunulmuştur.



Şekil 3. Eddy Current Dinamometre

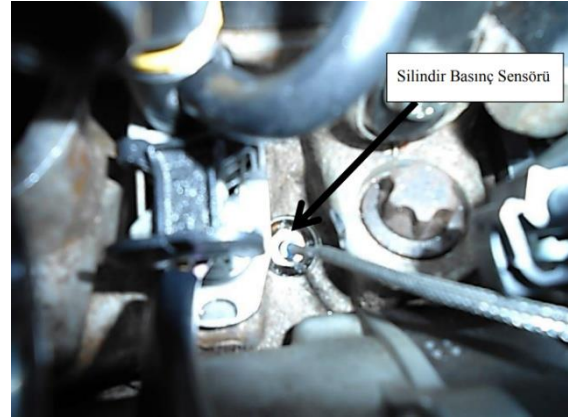
Motor suyu sıcaklığı, ayarlanabilir bir termostat aracılığıyla $80 \pm 5^\circ\text{C}$ aralığında sabitlenmiştir. Test sistemine entegre edilen sensörler sayesinde farklı noktalardan sıcaklık, basınç ve debi verileri alınabilmektedir. Ayrıca, motora ilk çalıştırma, devir artırma ve azaltma gibi işlemler de kontrol sistemi üzerinden gerçekleştirilebilmektedir. Dinamometre kontrol yazılımı olan MOTEST aracılığıyla motor devri, güç, tork, soğutma suyu giriş-çıkış sıcaklıkları, yağ ve yakıt sıcaklıkları, egzoz ve emme havası sıcaklığı ile emme havası debisi gibi birçok parametre izlenebilmekte ve kaydedilebilmektedir. Düşük ve yüksek reaktiviteye sahip yakıtların debi ölçümleri ise hassas terazi ile yapılmıştır. Motor dinamometresi kontrol sistemi ekranı Şekil 4’de gösterilmektedir.



Şekil 4. Dinamometre kontrol ekranı

Silindir içi basınç ölçüm sisteminde; Biltek marka enkoder, Oprant AutoPSI silindir basınç sensörü, National Instruments veri toplama kartı, bir yanma analiz yazılımı ve bilgisayar kullanılmıştır. Basınç sensörü, kızdırma bujisinin bulunduğu yuva kullanılarak silindire monte edilmiştir. Montaj

sırasında sızdırmazlığı sağlamak amacıyla bağlantı noktalarına sıvı conta uygulanmıştır. Şekil 5’de deneylerde kullanılan silindir içi basınç sensörünün yerleşimi gösterilmektedir.



Şekil 5. Silindir içi basınç sensörü

Yakıt hattı basınç sensörü, birinci silindirin yüksek basınç borusu üzerinde yer almaktadır. Sensörden alınan veriler, Febris yanma analiz programı ile işlenmektedir. Kullanılan sensör, Kistler 6533-A11 modelidir. Şekil 6’da yakıt hattı basınç sensörü gösterilmektedir.



Şekil 6. Yakıt hattı basınç sensörü

Sensörlerin ürettiği sinyaller genellikle doğrudan işlenebilir seviyede veya formatta olmayabilir; zayıf, parazitli ya da farklı biçimlerde olabilir. Sinyal şartlandırıcılar, bu sinyalleri düzelterek, ölçüm ve kontrol sistemlerinin daha kolay algılayabileceği, analiz edebileceği ve kullanabileceği bir formata dönüştürür. Deneylerde, KISTLER Piezoresistive Amplifier Type 4618AO model sinyal şartlandırıcı kullanılmıştır. Şekil 7’de sinyal şartlandırıcı gösterilmektedir.

Emme manifolduna giren havanın ısıtılması için, yalıtımlı plastik bir varil içine 2000 W gücünde bir PTC seramik ısıtıcı yerleştirilmiştir. Isıtıcının sıcaklık kontrolü, sıcaklık kontrol paneli aracılığıyla yapılmaktadır. Şekil 11'de PTC seramik ısıtıcı gösterilmektedir.



Şekil 11. PTC Seramik ısıtıcı

Emme havası sıcaklığını artırmak amacıyla PTC seramik ısıtıcı kullanılmıştır. Isıtılan hava, kapalı bir plastik varil aracılığıyla RCCI motorunun emme manifolduna yönlendirilmiştir. Ayrıca, sıcaklık kontrol paneli sayesinde, havanın uygun sıcaklık seviyelerine ulaşması sağlanmaktadır. Sıcaklık kontrol paneli 12'de gösterilmektedir.



Şekil 12. Sıcaklık kontrol paneli

Deneylerde egzoz emisyonlarını ölçmek amacıyla Bosch BEA 460 egzoz emisyon ölçüm cihazı ve Bosch is ölçüm cihazı kullanılmıştır. Daha doğru sonuçlar elde edebilmek için, deneyler öncesinde emisyon test cihazının bakım ve kalibrasyonu yapılmıştır. Emisyon ölçüm sonuçları üç kez tekrarlanarak ortalama değerler alınmıştır. Filtreler her deneye başlamadan önce değiştirilmiştir. Ayrıca, emisyon ve diğer verilerin alınabilmesi için motor soğutma suyunun 80°C'ye ısınması beklenmiştir. Egzoz emisyon cihazı ile HC, NO_x, CO₂ ve is emisyonları ölçülmüştür. Şekil 13'de Bosch BEA 460 egzoz emisyon ölçüm cihazı, Tablo 4'de ise cihazın teknik özellikleri gösterilmektedir.



Şekil 13. Egzoz emisyon cihazı

Tablo 4. Egzoz emisyon cihazı teknik özellikleri

Özellikler	Ölçme Aralığı
Hidrokarbon (HC)	0-10000 ppm 1 ppm
Oksijen (O ₂)	0-22 % hacim 0,01 % hacim
Azotoksit (NO _x)	0-10000 ppm 1 ppm
Karbondiyoksit (CO ₂)	0-18 % hacim 0,01 % hacim
Hava fazlalık katsayısı	0,5-1,8 0,001
Absorbiyon katsayısı (K)	0-10 m ⁻¹ 0,01 m ⁻¹

2.1. Deneysel Veriler ile Hesaplanan Yanma Karakteristikleri

2.1.1. Isı Dağılım Oranının Hesaplanması

Bu çalışmada net ısı dağılım oranı hesaplanmıştır. Bu hesaplama yapılırken krank açısına bağlı olarak silindir basıncı kullanılmıştır. Termodinamiğin I.yasası (kapalı bir sistem için enerjinin korunumu) kullanılarak aşağıdaki denklem elde edilmiştir [15,16].

$$\frac{dQ}{d\theta} = + \frac{\gamma}{\gamma-1} P \frac{dV}{d\theta} + \frac{1}{\gamma-1} V \frac{dP}{d\theta} \quad (1)$$

$$\frac{dQ}{d\theta}: \text{Isı dağılım oranı (J/°KMA)}$$

$$V: \text{Silindir hacmi (m}^3\text{)}$$

$$\gamma: \text{Özgül ısılar oranı}$$

2.1.2. Basınç Artış Oranının Hesaplanması

Tutuşma gecikmesi hesaplamalarında yanma başlangıcı ve püskürtme başlangıcı arasındaki fark kullanılarak basınç artış oranı hesaplanmıştır [17].

$$BAO = \frac{dP}{d\theta} \quad (2)$$

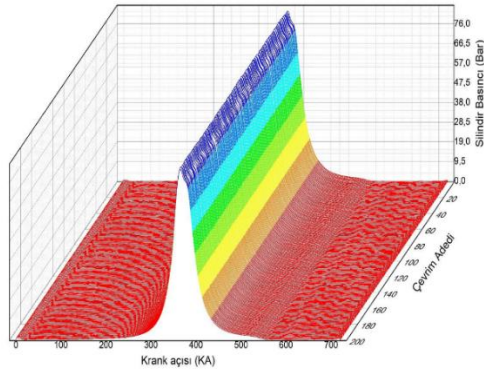
BAO: Basınç artış oranı (bar/°KMA)

P: Silindir basıncı (bar)

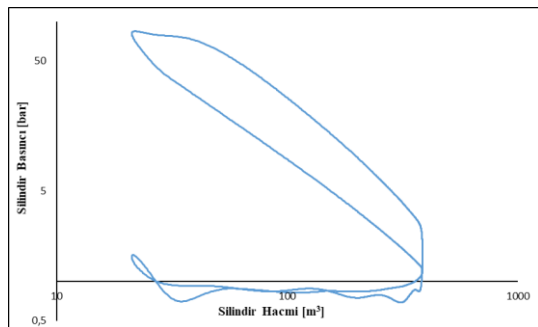
θ : Krank mili açısı (°KMA)

2.1.3. Silindir Gaz Basıncının Belirlenmesi

Deneyler sırasında motor devri 1750 d/d'da sabit tutulmuş ve motor yükü sırasıyla 40, 60, 80 ve 100 Nm olarak değiştirilmiştir. Motor yükü arttıkça, silindir basınçlarında da artış gözlemlenmiştir. Ölçüm sonuçlarının sensörler, yükselticiler ve devreler nedeniyle gürültüye maruz kalmaması amacıyla Savitzky-Golay filtresi uygulanmıştır. Şekil 14'de, 200 çevrimde elde edilen ve her bir çevrimdeki silindir basınçlarının krank açısına göre üç boyutlu dağılımları gösterilmektedir. Sıkıştırma süreci, emme supabının kapanması ile pistonun ÜÖN'ye ulaşması arasında tanımlanmakta olup politropik bir süreçtir. Elde edilen ortalama basıncın doğruluğu, Şekil 15'de yer alan logaritmik basınç-hacim diyagramı (log P – log V) ile kontrol edilmektedir.

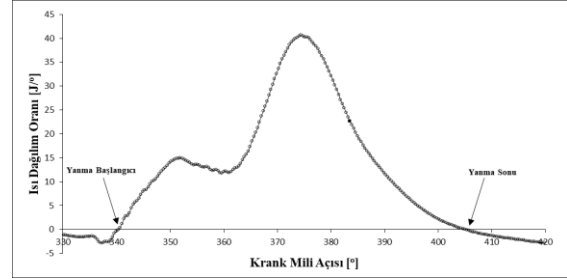


Şekil 14. 200 çevrimde toplanan üç boyutlu silindir basıncı grafiği (40 Nm, M19)



Şekil 15. Logaritmik P-V diyagramı (40 Nm, dizel)

Şekil 2.20'de, ısı dağılım oranının krank açısına bağlı olarak değişimi sunulmuştur. Isı dağılımı grafiği üzerinden yanma başlangıcı ve sonu belirlenebilmiştir. Yanma başlangıcı, her dört yakıt türü için de ısı dağılım oranının 0 J/° değerine en yakın olduğu krank mili açısı olarak kabul edilmiştir. Tutuşma gecikmesi, yakıtın yanma odasına püskürtülmesi ile yanma başlangıcı arasındaki zaman farkının krank açısı cinsinden hesaplanmasıyla belirlenmektedir. Püskürtme başlangıcı, dizel hat basınç eğrisinde ilk ani basınç düşüşünün başladığı nokta olarak kabul edilmiştir [18].



Şekil 16. Isı Dağılım Oranı

2.1.4. Kümülatif Isı Dağılımının Hesaplanması

Bu çalışmada, silindir içinde yanma başlangıcından sonuna kadar meydana gelen toplam ısı dağılımı kümülatif ısı dağılımı olarak tanımlanmıştır. Yakıtın yanmasıyla açığa çıkan enerji olarak da bilinen kümülatif ısı dağılımını hesaplamak için aşağıdaki denklem kullanılmıştır.

$$Q_k = \int_{\theta_s}^{\theta_e} \frac{dQ}{d\theta} d\theta \quad (3)$$

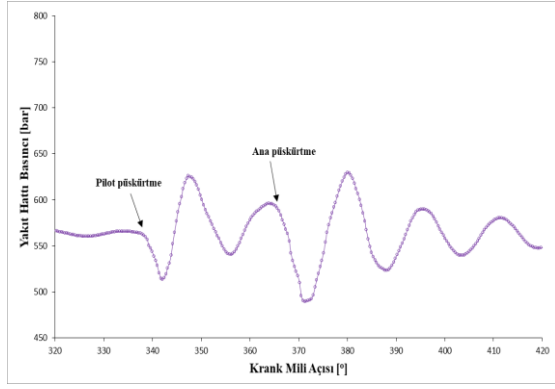
Q_k : Kümülatif ısı dağılımı (J)

θ_e : Yanma sonu (°KMA)

θ_s : Yanma başlangıcı (°KMA)

2.1.5. Yakıt Hattı Basıncının Hesaplanması

Yakıt hattı basıncı, motor yüküne bağlı olarak değişmekte olup motorun çalışma koşullarından önemli ölçüde etkilenmektedir. Bu basınç değeri, birinci silindire yönlendirilen yakıt hattı borusuna monte edilmiş basınç sensörü aracılığıyla izlenmektedir. Elde edilen veriler, enjeksiyon başlangıcının ve tutuşma gecikmesinin tayininde kullanılmaktadır. Yakıt hattında gözlemlenen ilk ani basınç düşüşü, enjeksiyon sürecinin başlangıcını işaret etmektedir. Çalışmada kullanılan motor, common-rail yakıt enjeksiyon sistemine sahip olup, ana enjeksiyondan önce bir pilot enjeksiyon gerçekleştirmektedir. Bu nedenle, Şekil 17'de sunulan basınç-zaman grafiğinde ilk ani düşüş pilot enjeksiyonun, ikinci belirgin düşüş ise ana enjeksiyonun başlangıcına karşılık gelmektedir.



Şekil 17. Yakıt hattı basıncında pilot ve ana püskürtmelerin gösterimi (40 Nm, M26)

2.1.6. Tutuşma Gecikmesinin Hesaplanması

Tutuşma gecikmesi, enjeksiyonun başlaması ile yanmanın başlaması arasındaki zaman aralığı olarak tanımlanır [19]. Denklem 4’de hesaplanmıştır.

$$TG = \theta_s - \theta_p \quad (4)$$

TG : Tutuşma gecikmesi (°KMA)

θ_s : Yanma başlangıcı (°KMA)

θ_p : Püskürtme başlangıcı (°KMA)

2.1.7. Metanol Enerji Oranının Hesaplanması

Metanol enerji oranı, metanol-dizel karışımlarında metanolün içerdiği enerji miktarının, toplam yakıt karışımının enerji içeriğine oranı olarak tanımlanmaktadır.

$$MEO = \frac{LHV_{CH_3OH} \cdot \dot{m}_{CH_3OH}}{LHV_D \cdot \dot{m}_D + LHV_{CH_3OH} \cdot \dot{m}_{CH_3OH}} \quad (5)$$

MEO : Metanol enerji oranı (%)

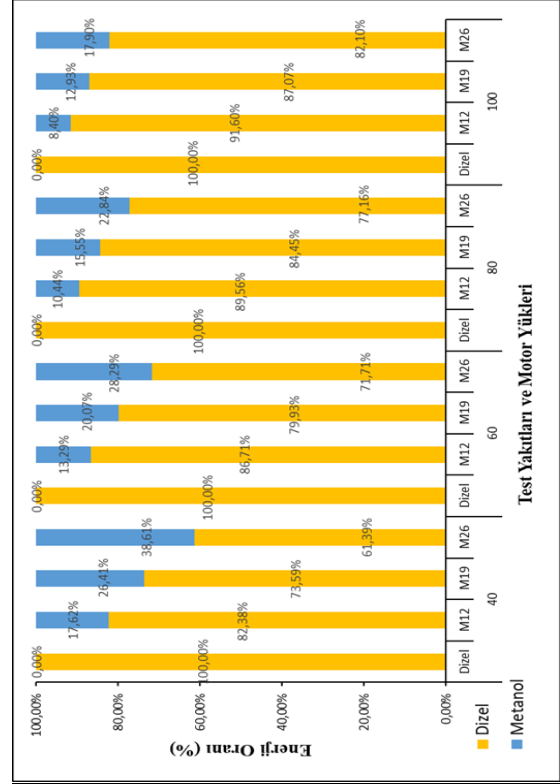
$\dot{m}_D$: Dizel yakıt kütleli akış oranı (g/d)

$\dot{m}_{CH_3OH}$: Metanol yakıt kütleli akış oranı (g/d)

LHV_D : Dizel yakıt alt ısı değeri (J/g)

LHV_{CH_3OH} : Metanol yakıt alt ısı değeri (J/g)

Şekil 18’de deneyde kullanılan yakıtlar için enerji oranlarını gösterilmektedir.



Şekil 18. Metanol ve dizel enerji oranlarının gösterimi

Metanol yakıtı, kütleli bazda enjeksiyon yoluyla silindire beslenmiştir. Aşağıdaki tabloda, dakikada gram cinsinden hesaplanan kütleli metanol debileri gösterilmektedir.

Tablo 5. Yakıtların kütleli değerleri

	Dizel		M12		M19		M26	
	TORK		TORK		TORK		TORK	
40	69,33	0	64	12,47	60,33	19,03	57,33	26,57
60	44,67	0	37,67	12,27	35,67	19,03	32	26,83
80	56,67	0	51	12,63	49	19,17	42,33	26,63
100	36,73	0	28	12,73	25	19,07	20	26,73

2.1.8. Belirsizlik ve Hata Analizi

Bu çalışmada, ölçüm sistemine ait sensörlerin hassasiyet değerleri esas alınarak, her bir girdinin belirsizlik düzeyi belirlenmiştir. Kline ve McClintock yöntemi kullanılarak, bu bireysel belirsizlikler matematiksel olarak birleştirilmiş ve toplam birleşik belirsizlik hesaplanmıştır. Söz konusu yöntem, her bir değişkenin sonuca etkisini kısmi türevler yoluyla dikkate alarak, sensör tabanlı ölçüm hatalarının sistem genelindeki belirsizlik üzerindeki etkisini nicel olarak ortaya koyar. Bu sayede, ölçüm sürecinin güvenilirliği analitik olarak değerlendirilmiştir. Belirsizlikler karelerinin toplamının karekökü alınarak hesaplanır.

$$u_R = \sqrt{u_A^2 + u_B^2 + u_C^2} \quad (6)$$

u_R : Toplam hata oranı

u_A : Hata oranı (%)

u_B : Hata oranı (%)

u_C : Hata oranı (%)

Tablo 6. Belirsizlik ve Hata Analizi

Ölçülen Büyüklük	Birim	Ölçüm Aralığı	Mutlak Hata ($\pm$)	Bağıl Hata (%)
Yakıt Tüketimi	g/s	0-5	0,1 g/s	2,0
Zaman	s	0-500	1 s	0,2
Motor Gücü	kW	0-25	0,25 kW	1,0
Emme Manifoldu Basıncı	bar	0-1,5	0,05 bar	3,3
Silindir İçi Basıncı	bar	0-100	0,1 bar	0,1
Krank Açısı	°KMA	0-720	0,35°	0,05
NO _x Emisyonu	ppm	0-5000	10 ppm	0,2
HC Emisyonu	ppm	0-5000	10 ppm	0,2
CO ₂ Emisyonu	%vol	0-20	0,1 %vol	0,5
O ₂ Emisyonu	%vol	0-21	0,1 %vol	0,5
İs (K Değeri)	m ⁻¹	0-10	0,1	1,0

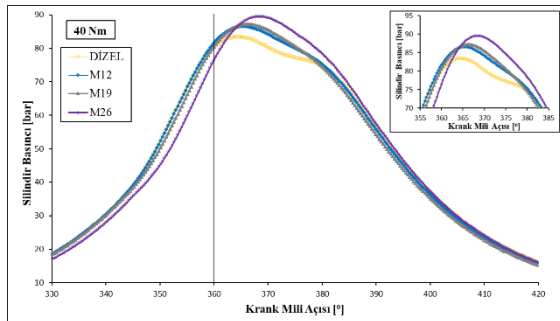
III. BULGULAR ve TARTIŞMA

3.1. Silindir Basınçları

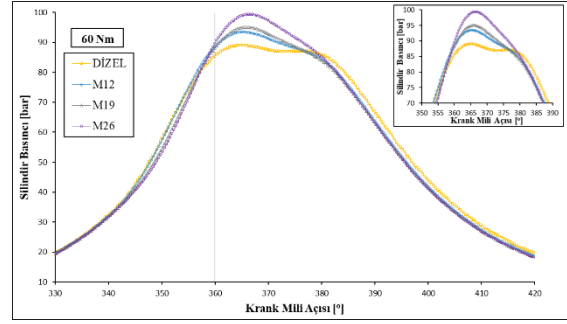
Şekil 19, 20, 21 ve 22’de gösterilen grafikler incelendiğinde, motor yükünün artmasıyla birlikte genelde maksimum silindir basınçlarının arttığı görülmektedir. Özellikle 60 Nm yükte M26 yakıtının kullanılmasıyla maksimum silindir basıncı en yüksek %11,60 oranında artmıştır. Aynı yükte metanolün kütle akış debisi arttıkça maksimum silindir basınçları da artmaktadır. Ana püskürtülen dizel yakıtı metanol eklenmesiyle viskozitenin azalması ve metanolde bulunan doğal oksijen içeriği sayesinde silindir basıncı artmıştır. Bu durum, daha fazla yakıt molekülünün buharlaşmasına ve yanma sürecinin iyileşmesine olanak tanımıştır. Emme havası sıcaklığı metanol yakıtlar için artırılmıştır. Dizel yakıtına kıyasla metanol yakıtlarındaki silindir basınçları bu nedenle artmaktadır. Maksimum silindir basınçları 40 Nm yükte dizel yakıtında 364,57° krank açısında 83,48 bar, M12 yakıtında 365,63° krank açısında 86,56 bar, M19 yakıtında 366,33° krank açısında 87,24 bar, M26 yakıtında 368,44° krank açısında 89,55 bar olarak bulunmuştur. 40 Nm sabit yükte M12, M19 ve M26 yakıtlı çalışmalardan elde edilen maksimum silindir basınç değerleri, dizel yakıtına göre karşılaştırıldığında sırasıyla %3,69, %4,5 ve %7,27 oranında artmıştır. Maksimum silindir basınçları 60 Nm yükte dizel yakıtında 364,92° krank açısında 88,97 bar, M12 yakıtında 365,27° krank açısında 93,45 bar, M19 yakıtında 365,98° krank açısında 95,03 bar, M26 yakıtında 366,33° krank açısında 99,29 bar olarak bulunmuştur. 60 Nm sabit yükte M12, M19 ve M26 yakıtlı çalışmalardan elde edilen maksimum silindir basınç değerleri, dizel’e göre karşılaştırıldığında sırasıyla %5,04, %6,81 ve %11,60 oranında arttığı gözlemlenmiştir. Maksimum silindir basınçları 80 Nm yükte dizel yakıtında 377,58° krank açısında 105,57 bar, M12 yakıtında 366,68° krank açısında 103,27 bar, M19 yakıtında 365,98° krank açısında 105,33 bar, M26 yakıtında 365,63° krank açısında 109,56 bar olarak bulunmuştur. 80 Nm sabit yükte M12 ve M19 yakıtlı çalışmalardan elde edilen maksimum silindir basınç değerleri, dizel’e göre karşılaştırıldığında sırasıyla %2,28 ve %0,23 azalırken, M26 yakıtlı çalışmada %3,78 oranında arttığı tespit edilmiştir. Maksimum silindir basınçları 100 Nm yükte dizel yakıtında 377,23° krank açısında 117,97 bar, M12 yakıtında 375,82° krank açısında 114,86 bar, M19 yakıtında 375,47° krank açısında 116,31 bar, M26 yakıtında 371,25° krank açısında 117,89 bar olarak bulunmuştur. 100 Nm sabit yükte M12, M19 ve M26 yakıtlı çalışmalardan elde edilen maksimum silindir basınç değerleri, dizel’e göre karşılaştırıldığında sırasıyla %2,64, %1,41 ve %0,07 oranında azaldığı hesaplanmıştır.

Metanol yakıtlarında özellikle düşük yüklerde maksimum silindir basınçlarının yüksek olması emme havası sıcaklığına da bağlanabilir. Maksimum silindir basıncı metanol ile dizel yakıtları ile kıyaslandığında, metanol yakıtlarında daha erken gerçekleşmektedir. Bunun nedeni, homojen metanol/hava karışımının yanmasından kaynaklanmaktadır. Düşük yükte metanolün enerji dağılım oranından aldığı pay daha fazla olacağından yani görece daha fazla metanol alındığından silindir içi soğumuş ve basınç düşmüştür. Yük arttıkça sıcaklıklar artmış ve metanolün soğutma etkisi bertaraf edilmiştir [20,21].

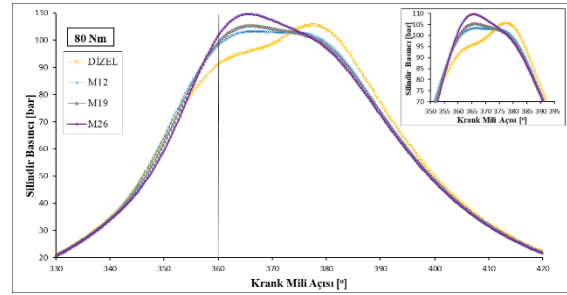
100 Nm’de dizel yakıtında basınç yüksektir. Ana yanmanın M26’da bariz bir şekilde geç başladığını görüyoruz. Bunun nedeni, metanolün yüksek buharlaşma gizli ısısından kaynaklanmaktadır. Manifolddan silindire aldığımız pilot enjeksiyon ortamdan daha fazla ısı çeker. Fazla ısı çekmesi silindir içi sıcaklığını düşürür. Sıcaklığın düşmesiyle yanmanın bir miktar gecikmesine neden olur. Ancak metanol yakıtı tutuştuktan sonra oksijen içeriğinin fazla olması yanma hızını artırmıştır. Common-rail yakıt enjeksiyon sistemi, mekanik enjeksiyon pompalarına göre atomizasyon oranı oldukça iyidir ve daha kontrollüdür. Enjeksiyon basıncı sabit ve yüksek basınçlarda 2300 barlara kadar çıkabilmektedir. Common-rail yakıt enjeksiyon sistemi sayesinde yüksek basınçlarda atomizasyon ve dizel yakıtı ile birlikte yüksek oranlardaki metanol karışımı bu mümkün olabilmektedir. Kontrollü yanma süresinin, özellikle yüksek yüklerde (80 ve 100 Nm) daha fazla arttığını görüyoruz. Hem dizel hem de metanol yakıtlarının yakıt miktarlarının artmasıyla yanma sürelerinin uzadığını grafik eğrilerinden gözlemliyoruz. Burada M26 yakıtında yanma süresi daha kısadır. Bunun, oksijen içeriğinin fazla olması ve metanolün yanma hızının yüksek olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.



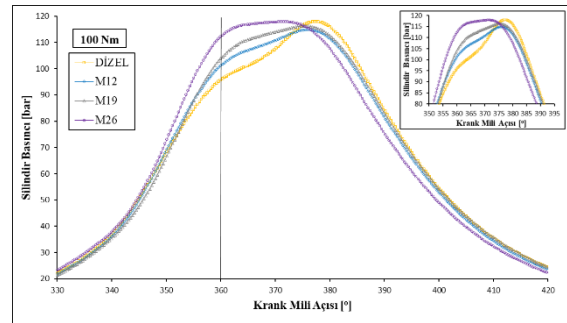
Şekil 19. 40 Nm yükte dizel, M12, M19 ve M26 yakıtları için oluşan silindir basınçları



Şekil 20. 60 Nm yükte dizel, M12, M19 ve M26 yakıtları için oluşan silindir basınçları



Şekil 21. 80 Nm yükte dizel, M12, M19 ve M26 yakıtları için oluşan silindir basınçları



Şekil 22. 100 Nm yükte dizel, M12, M19 ve M26 yakıtları için oluşan silindir basınçları

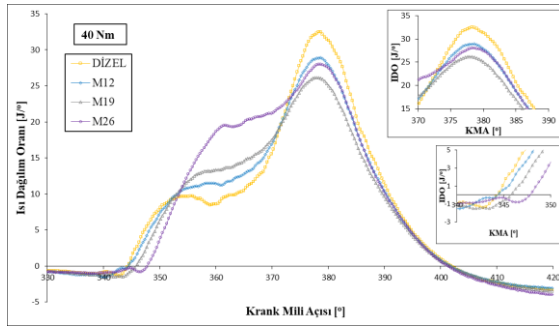
3.2. Isı Dağılım Oranları

Yanma başlangıcı, dört yakıt için de ısı dağılım oranının 0 J/° değerine en yakın olduğu krank açısı olarak kabul edilmiştir. Isı dağılım oranları yaklaşık 340° krank açılarındadır, en erken dizel yakıtta başlamış, sırasıyla M12, M19 ve M26 olarak devam etmiştir. Bunun nedeni, metanolün buharlaşma ısısının, dizel yakıtına kıyasla yüksek olmasıdır.

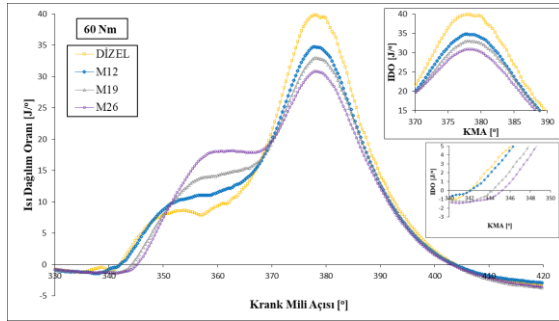
Yakıt ve hava miktarının artmasına bağlı olarak artan silindir içi sıcaklıklar yükselmektedir. Bunun sonucu olarak motor yükü arttıkça ısı dağılım oranı da artmaktadır. Şekil 23, 24, 25 ve 26’daki grafiklerde görülmektedir ki, motor yükü arttıkça, ısı dağılım oranı da artmaktadır.

RCCI motorlarda, düşük reaktiviteli yakıt kullanılması özelliğiyle, geleneksel dizel motorlara kıyasla, ısı

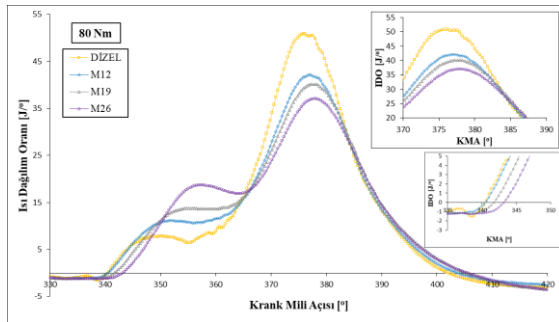
dağılım oranları daha düşüktür [22]. Çünkü sıcaklık ve basınçları dizel yakıtına göre daha düşüktür. Buna bağlı olarak, RCCI motorlarda yanma daha yavaş gerçekleşmektedir. Örneğin, 100 Nm motor yükünde geleneksel dizel yakıtında maksimum ısı dağılım oranı 58,30 J/° iken, M12 yakıtında 32,47 J/° olarak hesaplanmıştır. Metanolün kütle akış debisi arttıkça, ısı dağılım oranı da buna paralel olarak azalmaktadır [23,24]. 100 Nm’de M12, M19 ve M26 yakıtları için maksimum ısı dağılım oranları sırasıyla 50,20 J/°, 49,41 J/° ve 40,70 J/° olarak azalma eğilimindedir. Bu durum, metanolün, dizel yakıtına göre daha düşük setan sayısına sahip olmasına bağlı olarak tutuşma gecikmesi süresinin uzamasına ve sonuç olarak yanma başlangıcının geciktirilmesine neden olmaktadır [25,26].



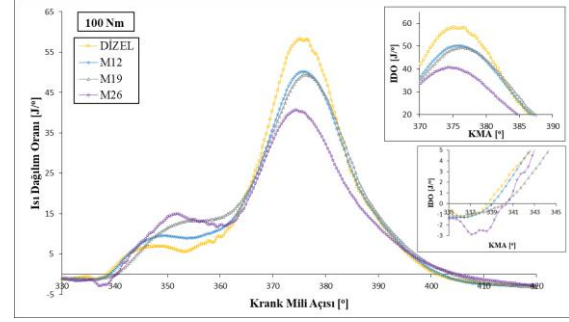
Şekil 23. 40 Nm yükte dizel, M12, M19 ve M26 yakıtları için oluşan ısı dağılım oranları



Şekil 24. 60 Nm yükte dizel, M12, M19 ve M26 yakıtları için oluşan ısı dağılım oranları



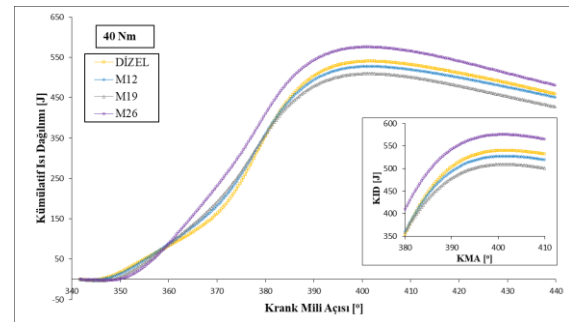
Şekil 25. 80 Nm yükte dizel, M12, M19 ve M26 yakıtları için oluşan ısı dağılım oranları



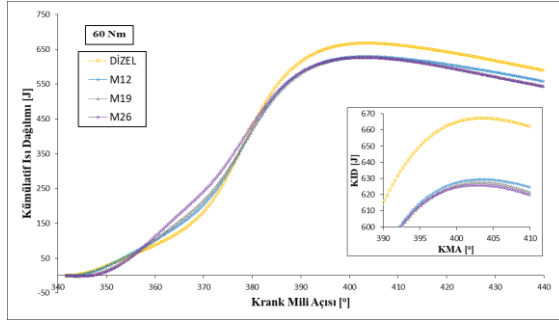
Şekil 26. 100 Nm yükte dizel, M12, M19 ve M26 yakıtları için oluşan ısı dağılım oranları

3.3. Kümülatif ısı Dağılım Oranları

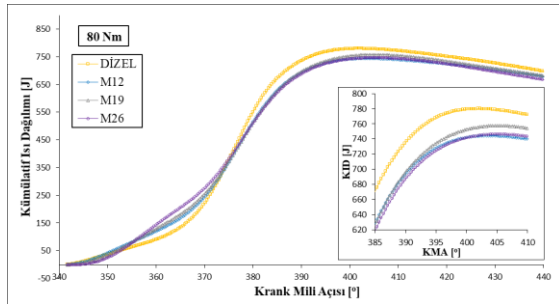
Motor yükü arttıkça kümülatif ısı dağılımında da artış gözlemlenmiştir. Şekil 27, 28, 29 ve 30’da görüldüğü üzere, artan yükte birlikte kümülatif ısı dağılımı da yükselmektedir. Örneğin, M12 yakıtı kullanıldığında 40 Nm’de 527,53 J olan maksimum kümülatif ısı dağılımı, 60 Nm’de 629,37 J, 80 Nm’de 744,35 J ve 100 Nm’de 830,45 J değerlerine ulaşmıştır. Bu artış, motor yükünün yükselmesiyle birlikte silindire daha fazla yakıt enjeksiyonunun yapılması ve buna bağlı olarak yanma süresinin uzamasıyla açıklanabilir [27]. RCCI motorlarda düşük reaktiviteli yakıtların kullanılması, genellikle dizel motorlara kıyasla daha düşük kümülatif ısı dağılımı ile sonuçlanmaktadır. Bu durum, metanolün dizel yakıtına göre daha yüksek gizli buharlaşma ısısına sahip olmasıyla ilişkilendirilmektedir [28]. Ancak Şekil 27’de görüldüğü üzere, 40 Nm yükte M26 yakıtının kümülatif ısı dağılımı dizel yakıtına göre daha yüksek çıkmıştır. Bu durumun, emme havasının ısıtılmasıyla açıklanabileceği düşünülmektedir. Ayrıca metanolün kütle akış debisi arttıkça kümülatif ısı dağılımında genel olarak azalma eğilimi görülmüştür. 60 Nm yükte, M12, M19 ve M26 yakıtları için maksimum kümülatif ısı dağılımı sırasıyla 629,37 J, 627,62 J ve 625,73 J olarak belirlenmiştir. Bu durum, metanolün dizel yakıtına kıyasla daha düşük alt ısı değerine sahip olmasından kaynaklanmaktadır [29].



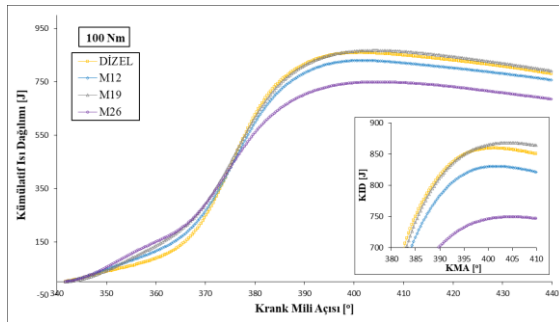
Şekil 27. 40 Nm yükte dizel, M12, M19 ve M26 yakıtları için oluşan ısı dağılım oranları



Şekil 28. 60 Nm yükte dizel, M12, M19 ve M26 yakıtları için oluşan ısı dağılım oranları



Şekil 29. 80 Nm yükte dizel, M12, M19 ve M26 yakıtları için oluşan ısı dağılım oranları



Şekil 30. 100 Nm yükte dizel, M12, M19 ve M26 yakıtları için oluşan ısı dağılım oranları

3.4. Basınç Artış Oranları

Basınç artış oranı, her krank mili açısında silindir içinde oluşan basıncı ifade etmek için kullanılır. $dP/d\theta'$ 'deki maksimum basınç artış oranının değişimi $5 \text{ bar}/^\circ$ 'yi aşmamalıdır; aksi takdirde motorda vuruntu meydana gelebilir ve motorun zarar görmesine neden olabilir [30]. En yüksek basınç artış oranı 100 Nm yükte M26 yakıtının kullanılmasıyla elde edilmiş ve $4,96 \text{ bar}/^\circ$ olarak hesaplanmıştır. Maksimum basınç artış oranları M26 yakıtı için, 40 Nm'de $3,45 \text{ bar}/^\circ$, 60 Nm'de $3,96 \text{ bar}/^\circ$, 80 Nm'de $4,67 \text{ bar}/^\circ$ ve 100 Nm'de $4,96 \text{ bar}/^\circ$ olarak bulunmuştur. 100 Nm ve M26 yakıtında $5 \text{ bar}/^\circ$ değerine yaklaşıldığı için motorun kararlı çalışma bölgesi M26 yakıtı ile sınırlanmıştır.

Motor yükünün artmasıyla birlikte basınç artış oranlarının doğru oranda arttığı görülmektedir. Ayrıca, motor yükü arttıkça, maksimum basınç artış hızının daha erken KMA'larda elde edildiği gözlemlenmiştir.

Motor yükünün artmasıyla birlikte, silindirdeki maksimum basıncın hızlı yükselmesi ve basınç artış oranının artmasının nedeni, yakıtın debisinin artması, başka bir deyişle yakıt miktarıyla ilişkili olduğu söylenebilir [31].

Bu çalışmada, RCCI motorda emme havası sıcaklığının artırılmasıyla tutuşma başlangıcının daha geç KMA'larda başladığı gözlemlenmiştir. Emme havasının sıcaklığının artırılması, daha yüksek basınç artışına neden olur. Bu nedenle dizel motorlara göre basınç artış oranı daha yüksektir [32]. Emme havası sıcaklığının artırılması, buharlaşmayı artıran bir faktördür. Buharlaşmanın daha fazla olması ve silindir içerisine daha fazla yakıt buharının birçok noktada aynı anda tutuşması, basınç artış oranını yükseltir.

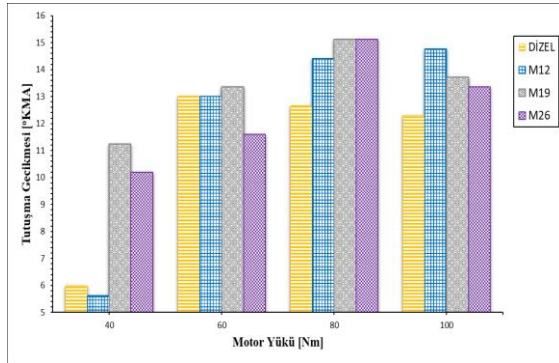
Metanolün kütleli akış debisi arttıkça basınç artış oranı da artmaktadır. Alkol yakıtların düşük setan sayıları nedeniyle tutuşma gecikmesinin daha uzun sürmesi basınç artış oranını artırmaktadır. Daha fazla yakıtın birlikte yanmasıyla ani basınç artışları meydana gelir [33]. Metanolün gizli buharlaşma ısısı, dizel yakıtına göre daha yüksektir. Bu nedenle, ortamdan daha fazla ısı çekmesine neden olur. Bu durum, reaksiyon hızının artmasını sağlamış ve basınç artış oranını artırıcı bir unsur olmuştur.

3.5. Tutuşma Gecikmesi

Tutuşma gecikmesi, yakıtın yanma odasına püskürtülmesinden itibaren, yanmanın başladığı yani ilk alev çekirdeğinin olduğu ana kadar geçen süre olarak tanımlanmaktadır. Şekil 31'de, farklı motor yükleri için elde edilen tutuşma gecikmesi değerleri sunulmuştur. 40 Nm sabit motor yükünde, dizel yakıtı ile tutuşma gecikmesi $5,98^\circ$ krank açısı olarak belirlenirken; M12, M19 ve M26 yakıtları için bu değerler sırasıyla $5,63^\circ$, $11,25^\circ$ ve $10,20^\circ$ krank açısı olarak ölçülmüştür. Dizel ile kıyaslandığında, M12 yakıtı kullanıldığında tutuşma gecikmesi yaklaşık %5,85 oranında azalmış; buna karşılık M19 ve M26 yakıtlarında ise sırasıyla %88,13 ve %70,57 oranında artış göstermiştir.

Alkol yakıtlar, düşük setan sayılarına sahip olmaları nedeniyle tutuşma gecikmesi süresini uzatma eğilimindedir. Tutuşma gecikmesinin artması, yanma olayının daha geç başlamasına neden olmaktadır. Bu sürenin uzaması, bazı durumlarda daha homojen bir hava-yakıt karışımı oluşmasına olanak tanıyarak ısı salınım sürecini etkileyebilmektedir [34]. Motor yükü arttıkça, silindire alınan yakıt miktarı da artmakta, buna bağlı olarak basınç ve sıcaklık yükselmekte ve tutuşma gecikmesi süresi uzayabilmektedir. Artan motor yüklerinde, tutuşma gecikmesini dengeleyebilmek amacıyla emme havasının sıcaklığının artırılması gibi yöntemler uygulanabilmektedir [35,36]. RCCI motorlarda, düşük reaktiviteli yakıtların tercih edilmesi, geleneksel dizel yakıtlara kıyasla tutuşma

gecikmesi süresini daha da uzatmaktadır. Özellikle metanolün kütleli akış debisinin artmasıyla birlikte, tutuşma gecikmesinin genellikle uzadığı gözlemlenmiştir. Bu durum, metanolün düşük setan sayısına sahip olması nedeniyle silindir içerisinde daha fazla yakıtın birikmesine yol açmakta, biriken bu yakıtın ani yanmasıyla birlikte ısı dağılım oranlarının yükselmesine neden olmaktadır [37,38]. Düşük motor yüklerinde (örneğin 40 ve 60 Nm), tutuşma gecikmesinin daha belirgin şekilde arttığı gözlemlenmiştir. Bu artış, metanolün dizel yakıtına kıyasla daha yüksek gizli buharlaşma ısısına ve daha düşük enerji içeriğine sahip olmasından kaynaklanmaktadır [39]. Özellikle 40 Nm motor yükünde, dizel ve metanol yakıtları arasındaki tutuşma gecikmesi farkı en belirgin seviyededir. Dizel yakıt, daha düşük buharlaşma gizli ısısına sahip olduğu için daha kısa sürede tutuşmaktadır. 80 Nm ve üzerindeki yüklerde ise, artan metanol oranıyla birlikte tutuşma gecikmesinde azalma eğilimi görülmektedir. Bu durum, yük artışına bağlı olarak silindirdeki ısı transferinin artması ve buharlaşma etkisinin yoğunlaşmasıyla açıklanabilir.

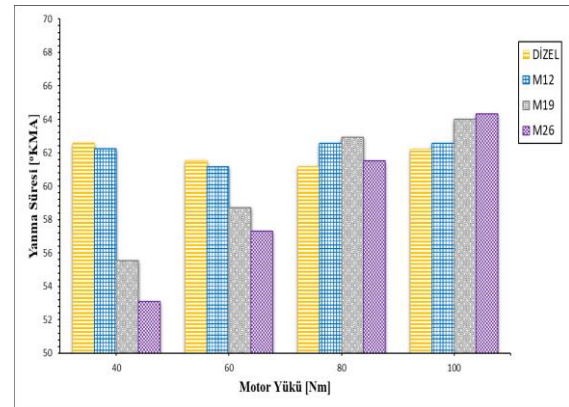


Şekil 31. Farklı yüklerde oluşan dizel, M12, M19 ve M26 yakıtları için tutuşma gecikmesinin değişimi

3.6. Yanma Süreleri

Yanma süresi, yanma başlangıcı ile yanma sonu arasındaki fark ile bulunur [40]. Motor yükü arttıkça, yanma süresinin de genel olarak uzadığı gözlemlenmektedir. Bu durum, artan motor yüküyle birlikte silindire daha fazla yakıt enjeksiyonunun yapılmasından kaynaklanmaktadır. RCCI motorlarda, geleneksel dizel motorlara kıyasla düşük yük seviyelerinde (40 ve 60 Nm) yanma süresi daha kısa olurken, yüksek yük koşullarında (80 ve 100 Nm) belirgin bir artış göstermektedir. Bu durum, metanol gibi oksijen içeriği yüksek olan alkol bazlı yakıtların silindir içerisindeki yanma verimini artırarak daha hızlı yanma sağlamasından kaynaklanmaktadır [11]. Metanolün karışımdaki enerji oranı yükseldikçe, düşük yük koşullarında tutuşma gecikmesi azalmakta, ancak yüksek yüklerde bu gecikme artış göstermektedir. Bunun nedeni, düşük yüklerde yakıtın enerji ihtiyacının daha çok metanol tarafından karşılanması; yüksek

yük seviyelerinde, enerji talebinin karşılanmasında dizel yakıtın baskın hale gelmesidir. Özellikle 100 Nm'lik yüksek motor yükünde, farklı yakıt karışımlarının oluşturduğu yanma süresi farkları oldukça azalmaktadır. Yanma süresine etki eden temel faktörlerden biri oktan sayısıdır. Düşük oktan sayısına sahip yakıtlar, erken krank mili açılarındaki hızlı tutuşarak yanma olayını hızlandırmaktadır. Bununla birlikte, yanmanın büyük bir kısmının genişleme zamanına kayması, silindir hacminin artmasına ve buna bağlı olarak gaz sıcaklığının düşmesine neden olmaktadır. Bu durum, silindir içindeki kimyasal reaksiyon hızlarının yavaşlamasına ve daha uzun süreli bir yanma sürecinin oluşmasına yol açar. Ayrıca, yüksek buharlaşma potansiyeline sahip metanol yakıtı çevreden daha fazla ısı emer; bu da silindir içi gaz sıcaklığının düşmesine ve yanma reaksiyonlarının yavaşlamasına neden olmaktadır. Metanolün daha düşük adyabatik alev sıcaklığına sahip olması, birim kütle başına daha az enerji üretimiyle sonuçlanmakta ve yanma odası sıcaklığını düşürerek yanma süresinin uzamasına neden olmaktadır [41].

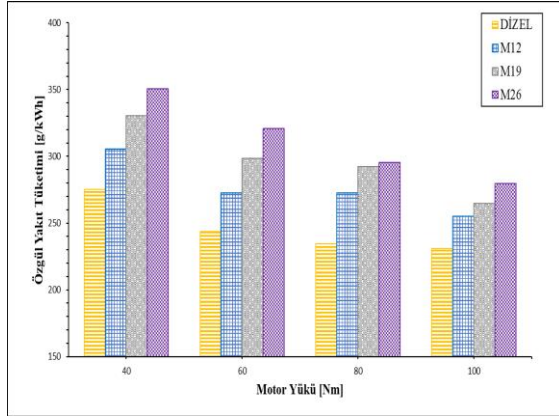


Şekil 32. Farklı yüklerde oluşan dizel, M12, M19 ve M26 yakıtları için yanma sürelerinin değişimi

3.7. Özgül Yakıt Tüketimi

Özgül yakıt tüketimi, motorun ürettiği birim güç başına tükettiği birim yakıt miktarı olarak tanımlanmaktadır. Motor yükündeki artış, özgül yakıt tüketiminde azalmaya neden olmaktadır. Örneğin, M26 yakıtı kullanıldığında 80 Nm motor yükünde özgül yakıt tüketimi 295,54 g/kWh iken, bu değer 100 Nm yükte 279,66 g/kWh'ye düşmüştür. Yüksek motor yüklerinde, silindir içi sıcaklıkların ve türbülans seviyesinin artması, yanma odasında daha iyi yakıt-hava karışımı ve yakıt atomizasyonu sağlar. Bu durum, sürtünme kayıplarının azalmasına ve yanma verimliliğinin yükselmesine katkı sağlayarak motorun daha verimli çalışmasına ve ısı veriminin artmasına neden olmaktadır [42]. RCCI motorlar, geleneksel dizel motorlara kıyasla genellikle daha yüksek özgül yakıt tüketimi değerleri sergilemektedir. Bu bağlamda en yüksek özgül yakıt tüketimi, 40 Nm motor yükünde M21 yakıtı ile 350,49 g/kWh olarak kaydedilmiş; en

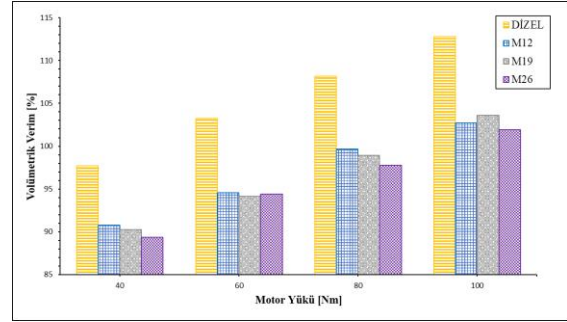
düşük tüketim değeri ise 100 Nm’de dizel yakıt kullanıldığında 231,11 g/kWh olarak belirlenmiştir. Metanolün, dizel yakıtı kıyasla daha yüksek buharlaşma gizli ısıya sahip olması nedeniyle, silindir içi sıcaklık düşmekte ve bu da yanma sürecini olumsuz etkileyerek özgül yakıt tüketimini artırmaktadır. Literatürde, düşük alev sıcaklığı ve uzamış yanma süresinin, özgül yakıt tüketiminde artışa neden olduğu yönünde bulgulara rastlanmaktadır [43].



Şekil 33. Farklı yüklere bağlı meydana gelen özgül yakıt tüketimi değişimleri

3.8. Volümetrik Verim

Motor yükündeki artış, volümetrik verimin yükselmesine neden olmaktadır. Özellikle 100 Nm motor yükünde, geleneksel dizel yakıtı kullanılarak elde edilen volümetrik verim en yüksek seviyeye ulaşmış ve %112,8 olarak hesaplanmıştır. Volümetrik verim üzerinde etkili olan çeşitli faktörler bulunmaktadır. Bu faktörler arasında motor vuruntusu, emme havasının sıcaklığı, emme manifoldunda basınç seviyesi, motor soğutma sisteminin etkinliği, egzoz gazı sıcaklığı ve yanma odası sıcaklığı yer almaktadır [44]. Deneylerde kullanılan motorun turboşarjlı olması, emme havasının yoğunluğunu artırmak ve dolayısıyla motor silindirlerine daha fazla hava alınmasına imkân tanımaktadır. Yük arttıkça, motora giren hava ve yakıt ihtiyacı da yükselmekte, bu durum volümetrik verimi artırmaktadır [45-47]. Metanol yakıtının dizel yakıtı kıyasla daha düşük alt ısı değere sahip olması, aynı miktarda enerji üretimi için daha fazla metanol kullanımını gerektirmektedir. Artan metanol miktarı, yanma odasına alınan saf hava hacmini kısıtlayabilmekte ve bu durum volümetrik verimin düşmesine neden olabilmektedir [48,49].



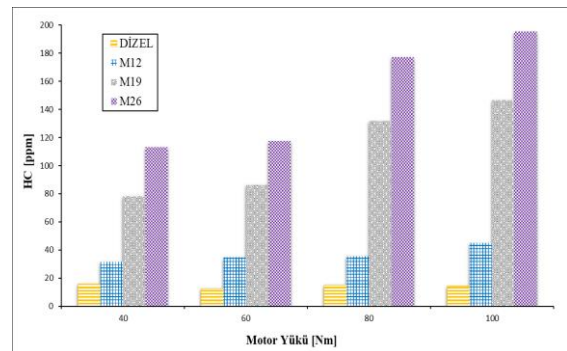
Şekil 34. Farklı yüklere bağlı meydana gelen volümetrik verim değişimleri

3.9. Egzoz Emisyonları

Fosil kaynaklı hidrokarbon yakıtların içten yanmalı motorlarda yanmasıyla çeşitli egzoz emisyonları açığa çıkar. Bu emisyonların azaltılması için kullanılan sistemler, belirli emisyon standartlarını sağlamak zorundadır. Ancak bu çözümler, motor performansını düşürebilir ve maliyetleri artırabilir.

3.10. Hidrokarbon Emisyonları

Geleneksel dizel motorlarda motor yükü arttıkça HC emisyonları azalırken, RCCI motorlarda artmaktadır. Dizel motorlarda HC emisyonlarının azalmasının nedeni, motor yüküyle birlikte silindir içi gaz sıcaklığının artarak yanma veriminin yükselmesidir [50-52]. RCCI motorlarda ise metanolün tutuşma gecikmesi süresini uzatması, yanma süresinin artmasına ve bazı bölgelerde yanmanın tamamlanmamasına neden olur. Bu durum, HC emisyonlarının artmasına yol açar. Ayrıca, metanolün yüksek buharlaşma ısı, karışımın yerel soğumasına neden olarak, silindir içinde sıcaklıkların yanma eşiğinin altına düşmesine ve HC emisyonlarının artmasına sebep olur [53]. Metanolün kütle akış debisi arttıkça HC emisyonları da artar. Metanolün soğutma etkisi, silindir sıcaklığını düşürerek, silindir duvarlarına yakın bölgelerde tutuşmaya ve kısmi yanmaya neden olur. Bu da HC emisyonlarının artmasına yol açar [54,55].

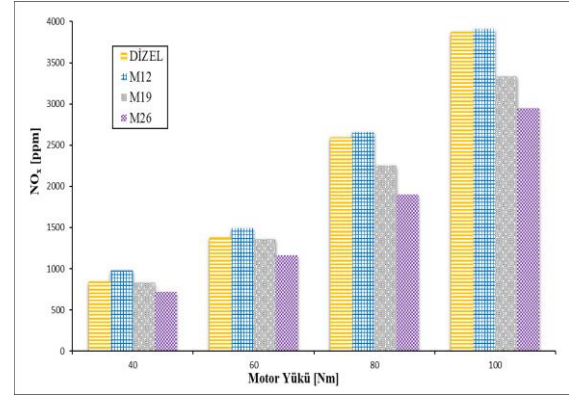


Şekil 35. Farklı motor yüklerindeki yakıtlar için hidrokarbon emisyonları değişimi.

3.11. Azotoksit Emisyonları

Yüksek sıcaklıklarda yanma gerçekleştiğinde, havadaki azotun oksijenle reaksiyona girerek NO_x emisyonlarını oluşturur. NO_x oluşumunu etkileyen başlıca faktörler, yanma odası sıcaklığı ve hava-yakıt oranıdır. Ayrıca, NO_x emisyonlarının miktarını belirleyen bir diğer etken de kimyasal reaksiyon hızlarıdır. Bu reaksiyon hızları, sıcaklığa bağlı olarak değiştiğinden, sıcaklık da NO_x oluşumunu etkileyen önemli bir parametre olarak rol oynar [56]. Motor yükü arttıkça, NO_x emisyonlarında da bir artış gözlemlenir. Bunun başlıca nedeni, motor yükünün artmasıyla birlikte silindirdeki yanma sıcaklığının yükselmesi ve çalışma akışkanının yüksek sıcaklıkta silindirde daha uzun süre kalmasıdır. Bu, NO_x emisyonlarının artmasına yol açmaktadır [57]. Ayrıca, motor yükünün artmasıyla birlikte silindire daha fazla yakıt girmekte, basınç oranı yükselmektedir ve bu da daha yüksek maksimum basınç ve yanma sıcaklığına sebep olmaktadır. Bu etkiler, NO_x emisyonlarının artmasına neden olmaktadır [58]. RCCI motorlarında, dizel motorlara kıyasla emme havası sıcaklığının artırılmasıyla NO_x emisyonları bir miktar artmakla birlikte, metanol kütle akış debisi arttıkça NO_x emisyonlarında bir azalma eğilimi gözlemlenmektedir. Emme havasının ısıtılması, yanmanın daha yüksek sıcaklıklarda gerçekleşmesini sağlar ve daha iyi ısı verim elde edilir. Bu durumda, yüksek sıcaklık tepe noktalarına ulaşılabilir. RCCI motorlar, geleneksel dizel motorlara kıyasla genellikle daha düşük NO_x emisyonlarına sahiptir. Bir çalışmada, RCCI motorunda daha düşük NO_x emisyonu, artan ısı verim ve daha zayıf yanma ile azalan oksijen konsantrasyonunun etkisiyle alev sıcaklıklarının NO_x oluşum eşiğinin altında kalması sonucu daha az NO_x emisyonu üretildiği belirtilmiştir [59].

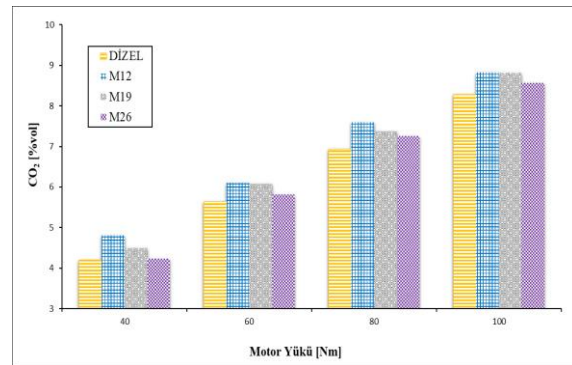
Metanolün kütle akış debisi arttıkça, NO_x emisyonları azalır. Bunun nedeni, metanolün yüksek gizli buharlaşma ısısının karışım sıcaklığını düşürmesidir. Yanma sıcaklığının düşmesi, NO_x oluşumunu sınırlayarak emisyonların azalmasına yol açmaktadır. Ayrıca, metanolün düşük ısı değerleri ve adyabatik alev sıcaklıkları, NO_x emisyonlarını azaltan diğer faktörlerdir [60-62]. Benajes ve arkadaşlarının yaptığı bir çalışmada, daha yüksek bir tutuşma gecikmesinin NO_x emisyonlarını azaltmaya yardımcı olduğu belirtilmiştir. Maksimum adyabatik alev sıcaklıklarının yüksek olduğu durumlarda ise NO_x emisyonlarının arttığı gözlemlenmiştir [63].



Şekil 36. Farklı motor yüklerindeki yakıtlar için azotoksit emisyonları değişimi

3.12. Karbondioksit Emisyonları

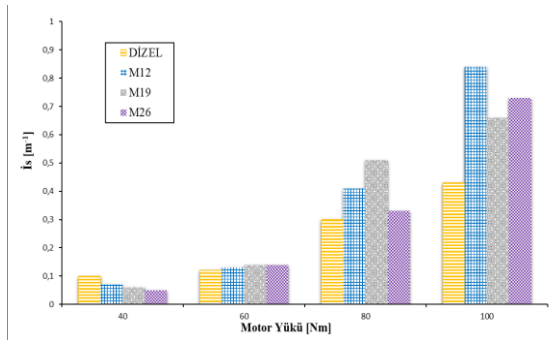
Motor yükü arttıkça, CO_2 emisyonları da artmaktadır. Silindire alınan yakıt miktarının artmasıyla birlikte, CO_2 emisyonları da yükselmektedir. Literatürde, daha yüksek motor yüklerinin daha fazla yakıt tüketimi gerektirdiği belirtilmektedir. Motor yükünün artmasıyla silindirdeki gazların sıcaklıkları da artar, bu da CO_2 emisyonlarının artmasına yol açar [64,65]. RCCI motorları, genellikle geleneksel dizel motorlara göre daha düşük CO_2 emisyonu üretir. Ancak, emme havası sıcaklığının artırılmasıyla CO_2 emisyonlarında, NO_x emisyonlarına benzer bir değişim gözlemlenmektedir. Emme havası sıcaklığının artmasıyla CO_2 emisyonları yükselmekte, metanol kütle akış debisinin artmasıyla ise azalma eğilimi göstermektedir. Metanolün kütle akış debisi arttıkça, CO_2 emisyonları azalır. Literatürde, dizel-metanol karışimli yakıtlarla yapılan çalışmalarda, CO_2 emisyonlarının dizel yakıtı göre daha düşük olduğu bulunmuştur. Bunun temel nedeni, metanolün dizel yakıtı kıyasla daha az karbon atomu içermesidir. Dizel-metanol karışımlarındaki karbon atomu oranı azaldıkça, yanma sonucu ortaya çıkan CO_2 emisyonları da düşmektedir [66].



Şekil 37. Farklı motor yüklerindeki yakıtlar için karbondioksit emisyonları değişimi.

3.13. Is Emisyonları

Dizel motorlarda, difüzyon kontrollü yanma sırasında, hidrojenin karbonlara kıyasla oksijenle daha hızlı reaksiyona girmesi nedeniyle hidrojen yanarken, karbonlar sıcaklık etkisiyle kurumlaşarak yanmanın tamamlanması için gereken süreyi uzatır ve özellikle oksijen yetersiz olduğunda is oluşur. Bu is, katı karbon partikülleridir. İstenmeyen is oluşumu genellikle dizel yanma sürecinin bir parçasıdır. Başlangıçta meydana gelen karbonun büyük bir kısmı yeniden yanarak yok olur. Motor yükü arttıkça, yanma odasına verilen yakıt miktarı da artar; bu durum silindirde yeterli oksijen bulunmaması ve is birikmesine yol açar [67]. Motor yükü arttıkça, is emisyonlarında da bir artış gözlemlenmektedir. Yapılan bir araştırmaya göre, motor yükü yükseldikçe is emisyonlarındaki bu artışın nedenlerinden biri, pilot yakıt miktarının ve dizel yakıtının enerji oranının artmasıdır [68]. RCCI motorlarında, geleneksel dizel yakıtı kıyasla is emisyonları 40 Nm yükte daha düşük seviyelerde kalırken, 80 ve 100 Nm gibi daha yüksek yüklerde belirgin bir artış göstermiştir. Özellikle M12 ve M19 yakıtlarında bu artışın, motor yüküyle birlikte artan yanma sıcaklıklarının, dizel pilot yakıtın lokal bölgelerde yoğunlaşmasına neden olması ve bu bölgelerde oksijenin sınırlı hale gelmesiyle ilişkili olduğu değerlendirilmektedir. Daha yüksek sıcaklıklar, yeterli oksijen bulunmayan bölgelerde is oluşumunu artırabilir [11]. Yüksek motor yüklerinde, artan sıcaklık ve yakıt kütlesi nedeniyle CO₂ emisyonlarında da yükselme gözlemlenmektedir. Benzer şekilde, bu koşullar is oluşumunu da tetikleyebilmektedir. Öte yandan, Şekil 37’de metanolün kütle akış debisinin artması ile CO₂ emisyonlarında düşüşe neden olduğu görülmektedir. Bu düşüş, yanma odasında daha homojen bir karışım oluşmasına ve dolayısıyla daha temiz bir yanma sürecine katkı sağlamaktadır. Bu durum, özellikle düşük motor yüklerinde gözlemlenen is emisyonlarında da azalmaya yol açabilmektedir.



Şekil 38. Farklı motor yüklerindeki yakıtlar için is emisyonları değişimi.

IV. SONUÇLAR

1) Motor yükü arttıkça, maksimum silindir basınçları artmış ve metanolün kütleli akış debisinin yükselmesiyle viskozite azalmış, bu da yanma koşullarını iyileştirmiştir. Düşük yüklerde metanolün ısı çekme etkisi silindir sıcaklığını düşürürken, yüksek yüklerde bu etki ortadan kalkmıştır. Common-rail enjeksiyon sistemi, metanol ve dizel karışımlarında kontrollü yanma ve yüksek verim sağlamıştır. 100 Nm’de M26 yakıtında yanma süresi, diğer karışım yakıtlarına göre daha kısa olmuştur.

2) Motor yükü arttıkça, maksimum yanma sıcaklıkları ve ısı salınım oranı artış göstermiştir. Metanolün yüksek buharlaşma ısı ve düşük setan sayısı, metanol oranı arttıkça yanma başlangıcında gecikmeye neden olmuştur. Özellikle 100 Nm gibi yüksek yük koşullarında, enerji ihtiyacının daha büyük bir kısmının dizel yakıtından karşılanması ve dizelin metanole göre daha yüksek setan sayısına sahip olması nedeniyle, ısı salınım oranında kısmi bir azalma gözlemlenmiştir.

3) Motor yükü ve emme havası sıcaklığındaki artışla birlikte basınç artış oranları yükselmiş ve maksimum basınç artış hızları daha erken KMA’larda gerçekleşmiştir. 100 Nm yükte M26 yakıtı ile 4,96 bar/° değeri, motorun kararlı çalışma bölgesini sınırlamıştır. Metanolün düşük setan sayısı ve yüksek buharlaşma ısı, basınç artış oranlarını artırmış ve yüksek emme havası sıcaklığı ani basınç artışlarına yol açmıştır.

4) Tutuşma gecikmesi, metanolün düşük setan sayısı ve yüksek gizli buharlaşma ısı nedeniyle uzamaktadır. Motor yükü arttıkça bu gecikme daha da uzun sürmektedir. RCCI motorlarında metanol gibi düşük reaktiviteli yakıtlar kullanıldığında, tutuşma gecikmesi artar ve daha homojen bir hava-yakıt karışımı oluşur. Ancak, biriken yakıtın ani yanması ısı dağılım oranlarını artırır.

5) Motor yükü arttıkça, silindire gönderilen yakıt miktarı arttığından yanma süresi de uzamaktadır. Metanolün oksijen içeriği sayesinde yanma süreci hızlanmakta, ancak metanolün düşük oktan sayısı ve hızlı yanma özelliği, silindirdeki gaz sıcaklığını düşürerek yanma süresini uzatmaktadır. Metanolün çevreden daha fazla ısı çekmesi ve düşük adyabatik alev sıcaklığı, yanma süresini artırmaktadır.

6) Motor yükü arttıkça özgül yakıt tüketiminde azalma görülmektedir. Örneğin, M26 yakıtının özgül yakıt tüketimi 80 Nm’de 295,54 g/kWh iken, 100 Nm’de 279,66 g/kWh’ye düşmüştür. Yüksek motor yüklerinde silindirdeki türbülans ve sıcaklık artışı, sürtünme kayıplarını azaltarak yakıt atomizasyonunu iyileştirir ve yanma verimliliğini artırır. Ancak RCCI motorlarında özgül yakıt tüketimi, geleneksel dizel motorlara göre daha yüksektir. En yüksek özgül yakıt tüketimi 40 Nm’de M21 yakıtında 350,49 g/kWh, en düşük özgül yakıt tüketimi ise 100 Nm’de geleneksel

dizel yakıtında 231,11 g/kWh olarak bulunmuştur. Metanolün yüksek buharlaşma gizli ısı, silindir içi sıcaklığı düşürerek özgül yakıt tüketiminin artmasına yol açmaktadır; bu da uzun yanma süresi ve düşük alev sıcaklıklarından kaynaklanmaktadır.

7) Motor yükü arttıkça, volümetrik verim artmıştır. Maksimum volümetrik verim 100 Nm’de dizel yakıtında %112,8 olarak hesaplanmıştır. Turboşarj sistemi, silindirlere giren havanın yoğunluğunu artırarak motor veriminde iyileşme sağlamıştır. Öte yandan, metanolün düşük alt ısı değeri nedeniyle aynı enerji çıktısını elde edebilmek için daha fazla metanol kullanılmasına ihtiyaç duyulur. Bu durum ise volümetrik verimin düşmesine yol açar.

8) Geleneksel dizel motorlarında motor yükü arttıkça HC emisyonları azalırken, RCCI motorlarında artmıştır. Metanolün tutuşma gecikmesi ve yüksek buharlaşma ısı, HC emisyonlarının artmasına yol açar. Metanol kütleli akış debisi arttıkça HC emisyonları daha da yükselmiştir.

9) Motor yükü arttıkça NO_x emisyonları artmıştır. Yüksek motor yükü ve silindirdeki yüksek yanma sıcaklıkları NO_x emisyonlarını artırır. RCCI motorlarında, metanolün kütleli akış debisindeki artış, NO_x emisyonlarının azalmasına neden olmuştur.

10) Motor üzerindeki yük arttıkça, silindire çekilen yakıt miktarı da artar ve bu durum CO₂ emisyonlarını yükseltir. Ancak, RCCI motorları geleneksel dizel motorlara göre daha düşük CO₂ salımı sağlar. Bunun başlıca nedeni, metanolün düşük karbon içeriğine sahip olmasıdır; bu da emisyonların azalmasına neden olur.

11) Artan motor yükü ile birlikte is emisyonları artmıştır. RCCI konseptinde, metanol kullanımıyla birlikte, özellikle 80-100 Nm yüklerinde is emisyonlarında belirgin bir artış görülür. Metanolün heterojen karışım oluşturmaya ve yetersiz buharlaşma, is emisyonlarının artmasına neden olur.

KAYNAKLAR

- [1] Safgönül, B., Ergeneman, M., Arslan, H. E. ve Sorusbay, C. (2008) “İçten Yanmalı Motorlar”, *Birsan Yayinevi*, İstanbul, 38-41, 196-205.
- [2] Methanol/Gasoline Blends and Emissions. (1992) *Automotive Engineering*, vol 10. no.5, pp.17-19 SAE International.
- [3] Valenti, M. (1991) “Insulating Catalytic Converters” *Mechanical Engineering*, vol.113, no 12, pp.42-46, ASME.
- [4] Pulkrabek, W.W. (2016) Çeviri: Yaşar, H. “İçten Yanmalı Motorlar Mühendislik Temelleri”, p.174.
- [5] Southern California Alternative-Fuel Projects (1995) “*Automotive Engineering*”, vol.103, no.3, pp.63-66, SAE International.
- [6] Söyler, H. (2025) “Boost pressure influence on combustion, emission characteristics, and performance of diesel engines with various fuel types”. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, vol.63, 101983.
- [7] Duraisamy, G., Rangasamy, M., Govindan, N. (2020) “A comparative study on methanol/diesel and methanol/PODE dual fuel RCCI combustion in an automotive diesel engine”. *Renewable Energy*, vol. 145, p.542-546.
- [8] Kokabi, H., Najafi, M., Jazayeri, S.F., Jahanian, O. (2023) “Performance optimization of RCCI engines running on landfill gas, propane and hydrogen through the deep neural networks and genetic algorithms.” *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol.56, 103045.
- [9] Wategave, S.P., Banapurmath, N.R., Sawant, M.S., Soudagar, M.E.M., Mujtaba, M.A., Afzal, A., Basha, J.S., Alazwari, A., Safaei, M.R., Elfasakhany, A., Sajjan, A.M. (2021) “Clean combustion and emissions strategy using reactivity controlled compression ignition (RCCI) mode engine powered with CNG-Karanja biodiesel”. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, Vol.124, p.116-131.
- [10] Duan, Q., Kou, H., Li, T., Yin, X., Zeng, K., Wang, L. (2023) “Effects of injection and spark timings on combustion, performance and emissions (regulated and unregulated) characteristics in a direct injection methanol engine”. *Fuel Processing Technology*, vol.247, 107758.
- [11] Panda, K., Ramesh, A. (2022) “Parametric investigations to establish the potential of methanol based RCCI engine and comparison with the conventional dual fuel mode”. *Fuel*, vol.308, 122025.
- [12] Agarwal, A.K., Singh, A.P., Kumar, V. (2023) “Effect of pilot injection strategy on the methanol-mineral diesel fueled reactivity controlled compression ignition combustion engine”. *Fuel*, vol.338, 127115.
- [13] Yin, X., Yue G., Liu, J., Duan, H., Duan Q., Kou, H., Wang, Y., Yang, B., Zeng, K. (2023) “Investigation into the operating range of a dual-direct injection engine fueled with methanol and diesel”. *Energy*, vol.267, 126625.
- [14] Feng, H., Chen, X., Sun, L., Ma, R., Zhang X., Zhu, X., Yang, C. (2023) “The effect of methanol/diesel fuel blends with co-solvent on diesel engine combustion based on experiment and exergy analysis”. *Energy*, In Press, 128792.

- [15] Willems, R., Willems, F., Deen, N., Somers, B. (2021) "Heat release rate shaping for optimal gross indicated efficiency in a heavy-duty RCCI engine fueled with E85 and diesel". *Fuel*, vol.288, 119656.
- [16] Yousefi, A., Guo, H., Dev, S., Liko, B., Lafrance, S. (2022) "Effects of ammonia energy fraction and diesel injection timing on combustion and emissions of an ammonia/diesel dual-fuel engine". *Fuel*, vol.314, 122723.
- [17] Asad, U., Kumar, R., Han, X.Y., Zheng, M. (2011) "Precise instrumentation of a diesel single-cylinder research engine". *Measurement*, 44(7): p. 1261-1278.
- [18] Şanlı, A., (2020) "Metan-hidrojen ön karışımı kullanılan bir dizel motorda sıkıştırma oranı ve yakıt kompozisyon etkisinin deneysel incelenmesi". Doktora Tezi, Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [19] Lakshminarayanan, P.A., Aghav, Y.V. (2010) "Ignition Delay in a Diesel Engine. In: Modelling Diesel Combustion. Mechanical Engineering Series". *Springer*, Dordrecht.
- [20] Ganesan, N., Wiswanathan, K., Karthic, S.V., Ekambaran, P., Wu, W., Dai-Viet, N.V. (2022) "Split injection strategies based RCCI combustion analysis with waste cooking oil biofuel and methanol in an open ECU assisted CRDI engine". *Fuel*, vol.319, 123710.
- [21] Wang S, Viswanathan K, Esakkimuthu S, Azad K. (2021) "Experimental investigation of high alcohol low viscous renewable fuel in DI diesel engine". *Environmental and Energy Management Research*, 28(10), 12026-40.
- [22] Li, J., Yang, W. M., An, H., Zhou, D. Z., Yu, W. B., Wang, J. X., Li, L. (2015) "Numerical investigation on the effect of reactivity gradient in an RCCI engine fueled with gasoline and diesel". *Energy Conversion and Management*, vol.92, pp.342- 352.
- [23] İnal, O.M. (2020) "Deri endüstri atık yağlardan üretilen biyodizelin dizel motor yanma performansı ve emisyonlara etkisinin incelenmesi". Yüksek Lisans Tezi, Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [24] Zhu, J., Wang, Z., Li, R., Liu, S. Li, M. (2024) "Experimental and simulation study of methanol/coal-to-liquid (CTL) reactivity and combustion characteristics of diesel engines in RCCI mode", *Fuel*, Vol. 357, Part A, 129799.
- [25] Emiroğlu, A.O., Şen, M. "Combustion, performance and emission characteristics of various alcohol blends in a single cylinder diesel engine". *Fuel* 2018, vol.212, pp.34-40.
- [26] Karvounis, P., Theotokatos, G., Vlaskos, I., Hatzia Apostolou, A. (2023) "Methanol combustion characteristics in compression ignition engines: A critical Review". *Energies* vol.16, 8069.
- [27] Vargün, M., Yılmaz, İ.T., Sayin, C. (2022) "Investigation of performance, combustion and emission characteristics in a diesel engine fueled with methanol/ethanol/ n-heptane/diesel blends". *Energy*, vol.257, 124750.
- [28] Işık, M.Z. (2016) "Çift yakıtlı reaktivite kontrollü bir dizel motorda biyodizel yakıtların düşük sıcaklıklı yanma performans ve emisyon karakteristiklerinin incelenmesi". Doktora Tezi, Batman Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [29] Chaudhary, N., Subramanian, K.A. (2022) "Experimental investigation of combustion characteristics of a spark ignition engine fueled with methanol-gasoline blends (M15 and M85)". *International Journal of Automotive Science and Technology*, 6(1), 54-60.
- [30] Calam, A., Aydoğan, B., Halis, S. (2020) "The comparison of combustion, engine performance and emission characteristics of ethanol, methanol, fusel oil, butanol, isopropanol and naphtha with n-heptane blends on HCCI engine", *Fuel*, Vol. 266, 117071.
- [31] Gülmez, Y. (2022) "Dizel motorlarda egzoz karşı basıncının motor performansı ve egzoz salımları üzerine etkilerinin analizi". Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [32] Can, Ö. (2012) "Bir di dizel motorda etanol ön karışımli kısmi-HCCI uygulamasının yanma ve emisyonlar üzerine etkilerinin incelenmesi". Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [33] Vargün, M., Özsezen, A. N., Botsalı, H., Sayin, C. (2023) "A study on the impact of fuel injection parameters and boost pressure on combustion characteristics in a diesel engine using alcohol/diesel blends". *Process Safety and Environmental Protection*, Vol.177, pp. 29-41.
- [34] Yeşilyurt, M. K. (2020) "Dizel yakıtına farklı ağır alkoller (1-Bütanol, 1-Pentanol ve 1-Hekzanol) ilave edilmesinin tek silindirli bir dizel motorunun performans, yanma ve egzoz emisyon karakteristiklerine etkileri". *Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi*, Cilt.12, Sayı.2, s.397-426.
- [35] Özden, C. M. (2005) "Homojen karışımli içten yanmalı motorlar". Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Bölümü, Enerji Makineleri Programı, Yüksek Lisans Tezi..

- [36] Türkmen, Ü. (2012) "Homojen dolgu motorlarda yüksek basınçlı püskürtme teknolojisinin deneysel olarak uygulanarak performans ve emisyon açısından konvansiyonel dizel ile karşılaştırılması". Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makina Mühendisliği Bölümü, Yüksek Lisans Tezi.
- [37] Emiroğlu, A. O. (2019) "Effect of fuel injection pressure on the characteristics of single cylinder diesel engine powered by butanol-diesel blend". *Fuel*, vol.256, 115928.
- [38] Tse, H., Leung, C. W., Cheung, C. S. (2015) "Investigation on the combustion characteristics and particulate emissions from a diesel engine fueled with diesel-biodiesel-ethanol blends". *Energy*, vol.83, pp.343-350.
- [39] Duraisamy, G., Rangasamy, M., Govindan, N. (2020) "A comparative study on methanol/diesel and methanol/PODE dual fuel RCCI combustion in an automotive diesel engine". *Renewable Energy*, vol. 145, p.542-546.
- [40] Ibrahim, A. (2016) "Performance and combustion characteristics of a diesel engine fueled by butanol-biodiesel-diesel blends". *Applied Thermal Engineering*, vol.103, pp.651-659.
- [41] Calam, A., Aydoğan, B., Halis, S. (2020) "The comparison of combustion, engine performance and emission characteristics of ethanol, methanol, fusel oil, butanol, isopropanol and naphtha with n-heptane blends on HCCI engine", *Fuel*, Vol. 266, 117071.
- [42] Wei, J., He, C., Lv, G., Zhuang, Y., Qian, Y. İ., Pan, S. (2021) "The combustion, performance and emissions investigation of a dual fuel diesel engine using silicon dioxide nanoparticle additives to methanol". *Energy*, vol.230, 120734.
- [43] Molina, S., García, A., Pastor, J. M., Belarte, E., Balloul, I. (2015) "Operating range extension of RCCI combustion concept from low to full load in a heavy-duty engine". *Applied Energy*, vol.143, pp.211-227.
- [44] Nanthagopal, K., Ashok, B., Saravanan, B., Pathy, M. R., Sahil, G., Ramesh, A., Nabi, M. N., Rasul, M. G. (2019). "Study on decanol and Calophyllum inophyllum biodiesel as ternary blends in CI engine". *Fuel*, vol.239, pp.862-873.
- [45] Ingale, M., Kawale, H., Thakre, A., Shrikhande, N. (2018) "Performance enhancement of engine using turbocharger-A Review". *International Journal of Creative Research Thoughts*, vol.6, pp.2320-2882.
- [46] Reddy, S.S.K., Pandurangadu, V., Hussain, S.P.A. (2013) "Effect of turbocharging on volumetric efficiency in an insulated DI diesel engine for improved performance". *International Journal of Modern Engineering Research*, vol.3, pp.674-677.
- [47] Müller, M. (2009) "Volumetric efficiency and pumping torque estimation and compressor recirculation control of turbocharged engines". *SAE International Journal of Engines*, 2(1), 344-356.
- [48] Rajak, U., Verma, T. N. (2018) "Spirulina microalgae biodiesel-A novel renewable alternative energy source for compression ignition engine". *Journal of Cleaner Production*, vol.201, pp.343-357.
- [49] Wu, F., Xu, B., Liu, Y., Wu, J. (2019) "Performance and emission characteristics of a diesel engine fueled with alcohol-diesel fuel blends containing low ratio of alcohols". *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 38(3), e13035.
- [50] Con, G. J., Kim, J.Y., Yoo, B.O., Song, J.H. (2023) "Effects of engine load and ternary mixture on combustion and emissions from a diesel engine using later injection timing". *Sustainability*, vol.15, no. 2, 1391.
- [51] Wei, L., Cheung, C.S., Ning, Z. (2018) "Effects of biodiesel-ethanol and biodiesel-butanol blends on the combustion, performance and emissions of a diesel engine". *Energy*, vol.155, pp.957-970.
- [52] Zhu, L., Cheung, C.S., Zhang, W.G., Huang, Z. (2011) "Combustion, performance and emission characteristics of a DI diesel engine fueled with ethanol-biodiesel blends". *Fuel*, vol.90, pp.1743-1750.
- [53] Imtenan, S., Varman, M., Masjuki, H.H., Kalam, M.A., Sajjad, H., Arbab, M.I., Fattah, I.M.R. (2014) "Impact of low temperature combustion attaining strategies on diesel engine emissions for diesel and biodiesels". *Energy Conversion and Management* vol.80, pp.329-356.
- [54] Agarwal, A.K., Karare, H., Dhar, A. (2014) "Combustion, performance, emissions and particulate characterization of a methanol-gasoline blend (Gasohol) fueled medium duty spark ignition transportation engine". *Fuel Processing Technology*, 121, 16-24.
- [55] Çelik, B., Özdalyan, B., Alkan, F. (2011) "The use of pure methanol as fuel at high compression ratio in a single cylinder gasoline engine". *Fuel*, vol.90, pp.1591-1598.
- [56] Gonca, G., Hocaoglu, M. F. (2023) "Emission and in-cylinder combustion characteristics of a spark ignition engine operated on binary mixtures of gas and liquid fuels". *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 52, pp.1502-1518.
- [57] Sun, Z., Wang, X., Wang, X., Zhou, J. (2017) "Combustion and emission analysis of heavy-duty vehicle diesel engine". *AIP Conf. Proc.* 1820(1), 050003.

-
- [58] Sayin, C., Uslu, K., Canakci, M. (2008) "Influence of injection timing on the exhaust emissions of a dual-fuel CI engine". *Renewable Energy*, vol.3, pp.1314-1323.
- [59] Kokjohn S, Hanson R, Splitter D, Kaddatz J, Reitz R. (2011) "Fuel reactivity controlled compression ignition (RCCI) combustion in light-and heavy-duty engines". *SAE*, 01-0357.
- [60] Doğan, B., Erol, D., Yaman, H., Kodanlı, E. (2017) "The effect of ethanol-gasoline blends on performance and exhaust emissions of a spark ignition engine through exergy analysis". *Applied Thermal Engineering*, vol.120, pp.433-443.
- [61] Akansu, S.O., Tangöz, S., Kahraman, N., İlhak, M.İ., Açıkgöz, S. (2017) "Experimental study of gasoline-ethanol-hydrogen blends combustion in an SI engine". *International Journal of Hydrogen Energy*, vol.42, pp.25781-25790.
- [62] Hasan, A.O., Al-Rawashdeh, H., Al-Muhtaseb, A.H., Abu-Jrai, A., Ahmad, R., Zeaiter, J. (2018) "Impact of changing combustion chamber geometry on emissions and combustion characteristics of a single cylinder SI (Spark Ignition) engine fueled with ethanol/gasoline blends". *Fuel*, vol.231, pp.197-203.
- [63] Benajes, J., Molina, S., García, A., Belarte, E., Vanvolsem, M. (2014) "An investigation on RCCI combustion in a heavy duty diesel engine using in cylinder blending of diesel and gasoline fuels". *Applied Thermal Engineering*, vol.63, pp.66-76.
- [64] Farouk, E.B., Mohammed, G., Sayeda, A., Hassan, A.H. (2017) "Comparative study of performance and exhaust emissions of a diesel engine fueled with algal, used cooked and Jatropha oils biodiesel mixtures". *International Journal of Mechanical & Mechatronics Engineering*, vol.17, pp.90-100.
- [65] Khalaf, M., Abdel-Fadeel, W., Abdelhady, S., Esmail, M. (2022) "Performance and emissions of a diesel engine fueled with a biofuel extracted from Jatropha seeds". *International Journal of Applied Energy Systems*, vol.4, no.2.
- [66] Cheng, C.H., Cheung, C.S., Chana, T.L., Lee, S.C., Yao, C.D. (2008) "Experimental investigation on the performance, gaseous and particulate emissions of a methanol fumigated diesel engine". *Science of the Total Environment*, vol.389, pp.115-124.
- [67] Pilusa, T.J., Mollagee, M.M., Muzenda, E. (2012) "Reduction of vehicle exhaust emissions from diesel engines using the whale concept filter". *Aerosol and Air Quality Research*, vol.12, pp.994-1006.
- [68] Papagiannakis, R.G., Rakopoulos, C.D., Hountalas, D.T., Rakopoulos, D.C. (2010) "Emission characteristics of high-speed, dual-fuel, compression ignition engine operating in a wide range of natural gas/diesel fuel proportions". *Fuel*, vol.89(7), pp.1397-1406.

Türkiye’deki Farklı Şehirlerde Kurulan Güneş Enerjisi Sistemlerinde Üretim Verimlerinin Analizi

Analysis of Production Efficiencies in Solar Energy Systems Established in Different Cities in Turkey

Adem YURTSEVER¹ , Sinan ATEŞ¹ , Cemal ÖZTÜRK² , Ayşe Elif ATEŞ¹ 

¹ İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü İstanbul/Türkiye

² Lokal Enerji İnşaat San. Tic. LTD. ŞTİ. Gaziantep/Türkiye

Öz

Ülkemiz alternatif enerji kaynakları açısından yüksek güneş enerjisi potansiyeline sahiptir. Özellikle ilk yatırım maliyetleri ve enerji üretim maliyetleri açısından en verimli şekilde kurulması ve işletilmesi gerekmektedir. Bu çalışmada optimum verimliliğin sağlanması ve fizibilite raporlarının doğru hazırlanabilmesi için 4 bölgede ve 8 ayrı ilde kurulan güneş enerjisi santrallerinin üretim değerleri izlenerek birbirleriyle ve bulundukları illerin güneş potansiyelleri ile karşılaştırılmıştır. Bu sayede paylaşılan verilerin sonraki çalışmalara yol gösterici olması amaçlanmaktadır. Ortalama güneş enerjisi potansiyeli açısından en yüksek verim %118 ile Elâzığ’da elde edilmiştir. Sonrasında Şanlıurfa’da %116, Aksaray’da %115, Konya’da %114, Gaziantep’te %113, Kahramanmaraş’ta %113 potansiyelin üzerinde verimler elde edilmiştir. Ancak, Diyarbakır ve Osmaniye’de sırasıyla %78 ve %85 verimler elde edilmiş ve potansiyelin altında kalmıştır. Bu durum fizibilite raporları hazırlanırken seçilecek parametrelerin önemini göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Güneş Enerjisi Sistemleri, Verim Analizi, Enerji Üretimi

Abstract

Our country has high solar energy potential in terms of alternative energy sources. It needs to be established and operated in the most efficient way, especially in terms of initial investment costs and energy production costs. This study, to ensure optimum efficiency and to prepare feasibility reports correctly, the production values of solar energy plants established in 4 regions and 8 different provinces were monitored and compared with each other and the solar potentials of the provinces where they are located. The highest efficiency in terms of average solar energy potential was obtained in Elâzığ with 118%. Afterwards, efficiencies above the potential were obtained in Şanlıurfa 116%, Aksaray 115%, Konya 114%, Gaziantep 113%, Kahramanmaraş 113%. However, efficiencies of 78% and 85% were obtained in Diyarbakır and Osmaniye, respectively, and remained below the potential. This situation shows the importance of the parameters to be selected when preparing feasibility reports.

Keywords: Solar Energy Systems, Efficiency Analysis, Energy Production

1.GİRİŞ

Yenilenebilir enerji kaynakları (YEK), enerji üretiminde giderek artan bir rol oynamaktadır. Bu kaynaklara ilişkin maliyetlerin azalmasıyla birlikte, yenilenebilir enerjinin toplam enerji üretimindeki payı hızla artmaktadır. Çeşitli alanlarda enerji sağlamak amacıyla yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı, atmosfere salınan CO₂ emisyonlarını azaltmakta ve bu sayede sera etkisini sınırlandırarak küresel ısınmayla mücadelede temel bir unsur haline gelmektedir.

Enerji üretiminde güneş radyasyon potansiyeli, en önemli alternatif enerji kaynaklarından biri olarak öne çıkmaktadır. Ekvatora yakın deniz seviyesinde maksimum radyasyon akısı 1.020 W/m² düzeyine ulaşabilmektedir. Orta enlemlerde ise bu değer yaz aylarında yaklaşık 800 W/m², kış aylarında ise 300 W/m² civarında gerçekleşmektedir [1]. Dolayısıyla, enerji üretiminde güneş enerjisi sistemleri (GES) önemli bir paya sahiptir.

Artan nüfusa bağlı olarak üretimdeki büyüme, enerji talebini de beraberinde getirmektedir. Bu durum, enerji tüketimine paralel olarak emisyon seviyelerinin yükselmesine ve dolayısıyla iklim değişikliğine yol açmaktadır. Bu bağlamda, ülkelerin daha çevreci ve sürdürülebilir enerji kaynaklarına yönelimi giderek artmaktadır [2][3]. Türkiye’nin yüksek güneş enerjisi potansiyeline sahip olması, temiz enerji üretimi açısından güneş enerjisini ülkemiz için güçlü bir alternatif haline getirmiştir [4][5]. Tablo 1’de Türkiye’nin toplam enerji kapasitesi ve güneş enerjisinden elde edilen enerji miktarları verilmiştir.

Tablo 1. Türkiye’nin yıllara göre güneş enerjisi kapasitesi ve toplam güç miktarları (MW) [6]

	Güneş Enerjisi kapasitesi	Toplam Kurulu Güç	Oran
2015	248	73.146	0,34%
2016	832	78.497	1,06%
2017	3.420	85.200	4,01%
2018	5.062	88.550	5,72%
2019	5.995	91.266	6,57%
2020	6.667	95.890	6,95%
2021	7.815	99.819	7,83%
2022	9.425	103.809	9,08%

Tabloya bakıldığında, ülke içindeki kurulu güç miktarları 2015 yılında toplam 73.146 MW iken güneş enerjisi kapasitesi 243 MW olarak belirlenmiştir. 2022 yılına gelindiğinde ise toplam kurulu güç 103.809 MW’a yükselirken güneş enerjisi kapasitesi 9.425 MW’a yükselmiştir. 2015 yılında güneş enerjisi kapasitesinin toplam kurulu güce oranı %0,34 iken 2022 yılında bu oran %9,08 olarak hesaplanmıştır. Sonuçlar, Türkiye güneş enerjisi açısından çok elverişli bir coğrafi konumda bulunmasına karşılık, mevcut potansiyelini yeterince değerlendiremediğini göstermektedir. Bu durum, ülkemiz için önemle üzerinde durulması gereken bir konu olarak göze çarpmaktadır [7].

Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı tarafından yayımlanan verilere göre, 2024 yılı haziran ayı itibarıyla Türkiye’nin toplam kurulu gücü 110.518 MW’a ulaşmış olup, bu kapasitenin %13,7’si güneş enerjisine dayalı sistemlerden oluşmaktadır [8]. Yatırım eğilimleri incelendiğinde, güneş enerjisi alanındaki yatırımların artarak devam ettiği görülmektedir. Ancak, tesis kurulum maliyetlerinin yüksek olması nedeniyle, bölgesel düzeyde yapılacak fizibilite çalışmalarında birçok parametrenin birlikte değerlendirilmesi gerekmektedir [9]. Literatürde bu kapsamda yapılan çalışmalarda; arazinin eğimi ve yönü, güneşlenme süresi ve radyasyon miktarı, rüzgâr hızı, hava sıcaklığı, arazi kullanımı, iletim hatlarına uzaklık, nem oranı, hava basıncı, yüzey sıcaklığı ve yükselti gibi çeşitli parametreler dikkate alınmaktadır [10].

Bouzuenda vd. (2014) tarafından yürütülen bir çalışmada, elektrik üretimi amacıyla kurulan fotovoltaik (FV) sistemin, aylık bazda yüksek güneşlenme süresine sahip bir bölgede yer almasına rağmen, yüksek sıcaklıkların panel verimliliğini olumsuz etkilediği ve üretim kayıplarına neden olduğu belirtilmiştir [11]. Ayrıca, yüzey kirlenmesi, fotovoltaik modül bozulması, sıcaklık kaynaklı kayıplar, dahili şebeke ve invertör kayıpları, trafo kaybı ile sistemin genel kullanılabilirliği ve şebekeye bağlantı gibi faktörler de toplam PV performans kayıplarına önemli ölçüde katkı sağlamaktadır [12].

Guo vd. (2015) tarafından yapılan başka bir çalışmada ise, çöl ikliminde yer alan fotovoltaik sistemlerin performansı, özellikle toz birikimine bağlı yüzey kirlenmesinden etkilenmiştir. Katar’da kurulu bir GES üzerinde yapılan bu çalışmada, çevresel toz yükü ve hava koşullarının fotovoltaik modül verimliliği üzerindeki etkileri incelenmiştir. Elde edilen bulgular, yüzey kirlenmesinin enerji üretiminde ciddi kayıplara yol açtığını ortaya koymuştur. Araştırma kapsamında, her iki ayda bir temizlenen FV modüllerinin, yalnızca toz birikimi nedeniyle günlük %0,45 oranında, aylık ise %10 ila %20 arasında verim kaybı yaşayabileceği gösterilmiştir [13].

Bunlara bağlı olarak, bu çalışmada Türkiye’nin farklı şehirlerinde kurulmuş olan 1 MW kapasiteli GES’lerin bir yıllık enerji üretim verileri incelenmiş ve kurulu kapasite üzerinden verim analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu sayede hem bölgesel düzeyde hem de şehir bazında enerji verimlilikleri ortaya konmuştur. Elde edilen bulgular, gelecekte bu bölgelerde kurulması planlanan GES tesisleri için referans alınabilecek ortalama verim değerlerinin belirlenmesine katkı sağlamaktadır.

II. MATERYAL VE METOT

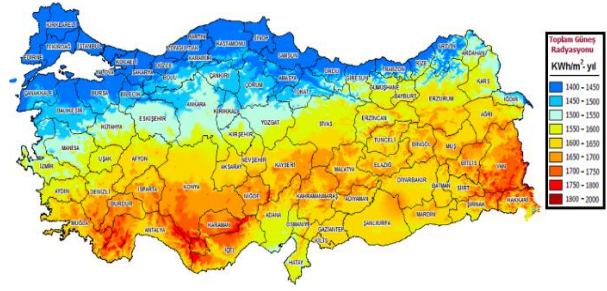
2.1. Türkiye’deki Bölgelerin Güneş Potansiyelleri

Türkiye, dört mevsimin belirgin şekilde yaşandığı ve her bölgesinde farklı enerji kaynaklarının üretilebildiği ender ülkelerden biridir. Ülke, fosil yakıt rezervleri, nükleer enerji üretimi için gerekli hammadde potansiyeli ve yenilenebilir enerji kaynakları açısından dikkate değer bir çeşitliliğe sahiptir. Bu bağlamda, Türkiye’nin güneş enerjisi potansiyelini görsel olarak ortaya koyan güneş enerjisi haritası Şekil 1’de verilmiştir.

Çalışmada sunulan güneş enerjisi potansiyel hesaplamalarında “ESRI Solar Radiation Model” kullanılmıştır. Bu modelleme, çeşitli meteorolojik ve coğrafi parametrelere dayanarak gerçekleştirilmiştir. Hesaplamalar, güneş enerjisinin enerji üretimindeki verimliliğini belirlemek amacıyla yapılmıştır. Güneş potansiyelinin belirlenmesinde; yıllık ortalama güneşlenme süresi ve ışıınım miktarı gibi güneş ışıınımı verileri, bulutluluk, nem, sıcaklık ve rüzgâr hızı gibi meteorolojik değişkenler ile enlem-boylam, rakım gibi coğrafi konum bilgileri dikkate alınmıştır. Ayrıca, zenit ve azimut açıları 32 farklı yönde değerlendirilmiş; açık ve kapalı gökyüzü senaryoları da modele entegre edilmiştir. Bu parametrelerin bütüncül olarak değerlendirilmesi sonucunda, Türkiye genelinde aylık ortalama güneş ışıınımı değerleri hesaplanmış ve 500 m x 500 m çözünürlükte grid formatında haritalandırılmıştır [8].

Bölgelerin güneş enerjisi potansiyellerine bakıldığında, teorik olarak en fazla enerji üretilebilecek bölge 1.460 kWh/m²yıl kapasite ile Güneydoğu Anadolu Bölgesidir. Bu bölgeyi 1.390 kWh/m²yıl ile Akdeniz

Bölgesi takip etmektedir. En düşük potansiyele sahip bölge ise 1.120 kWh/m²yıl ile Karadeniz Bölgesi olduğu belirlenmiştir (Tablo 2). Benzer durum güneşlenme süreleri için de geçerlidir. Yıllık bazda en yüksek güneşlenme süresine sahip bölge 2.993 saat/yıl ile Güneydoğu Anadolu Bölgesi iken, en düşük güneşlenme süresine sahip bölge 1.971 saat/yıl ile Karadeniz Bölgesidir. Bu değerler ortalama değerler olup, bölgenin kendi içerisinde de alansal olarak farklılıklar olabilmektedir. Dolayısıyla güneş enerjisi santralinin (GES) ilgili bölge içerisinde kurulacağı alan da önemli olmaktadır.



Şekil 1. Türkiye’nin güneş enerjisi potansiyeli haritası [14].

Tablo 2. Türkiye’nin yıllık toplam güneş enerjisi potansiyelinin ve güneşlenme sürelerinin bölgelere göre dağılımı [8].

BÖLGE	Güneş Enerjisi Miktarları			Güneşlenme Süreleri		
	Toplam ortalama (kWh/m ² yıl)	En çok (Haziran) (kWh/m ²)	En az (Aralık) (kWh/m ²)	Ortalama (saat/yıl)	En çok (Haziran) (saat)	En az (Aralık) (saat)
Güneydoğu Anadolu	1.460	1.980	729	2.993	407	126
Akdeniz	1.390	1.869	476	2.956	360	101
Doğu Anadolu	1.365	1.863	431	2.664	371	96
İç Anadolu	1.314	1.855	412	2.628	381	98
Ege	1.304	1.723	420	2.738	373	165
Marmara	1.168	1.529	345	2.409	351	87
Karadeniz	1.120	1.315	409	1.971	273	82

2.2. Çalışılan Bölgeler ve Santraller

Çalışma kapsamında, dört farklı coğrafi bölgede yer alan sekiz güneş enerjisi santralinin elektrik üretim kapasiteleri ve verimlilikleri şehir bazında değerlendirilmiştir. Bu doğrultuda, Osmaniye, Kahramanmaraş, Aksaray, Konya, Gaziantep, Şanlıurfa, Diyarbakır ve Elâzığ illerinin kırsal bölgelerinde kurulu bulunan güneş enerjisi santrallerine ait yıllık üretim verileri analizde kullanılmıştır.

Aksaray: Aksaray ilinin yıllık ortalama güneş enerjisi potansiyeli 1.550-1.600 kWh/m² düzeyindedir. Bu değer, bölgenin güneş enerjisi açısından elverişli bir potansiyele sahip olduğunu göstermektedir. Kış aylarında yoğun kar yağışları ve sert hava koşulları gözlemlenmekle birlikte, bu dönemde güneşlenme süresi azalsa da yıllık ortalama güneşlenme süresi Türkiye ortalamasına yakın seviyelerdedir. Türkiye genelinde ortalama günlük güneşlenme süresi yaklaşık 7 saat olarak kabul edilmektedir.

Konya: Arazi alanı bakımından daha geniş bir yüzeye sahip olması, güneş enerjisi yatırımları açısından avantaj sağlamaktadır. Güneş enerjisi potansiyeli açısından oldukça zengin olan şehir, aynı zamanda hammadde temini ve ulaşım açısından da merkezi bir konumda yer almaktadır. Konya ilinin güney kesimleri, yıllık 1.700-1.800 kWh/m² düzeyinde güneş

radyasyonuna maruz kalmakta olup; doğu bölgelerinde bu değer 1.600-1.650 kWh/m²/yıl aralığında gerçekleşmektedir. Bu veriler, güneş enerjisi yatırımları açısından yüksek potansiyele sahip olduğunu ortaya koymaktadır.

Elâzığ: Coğrafi konumu ve yapısı itibarıyla bölgesel olarak avantajlı bir konuma sahiptir. Ortalama rakımı çevre illere kıyasla daha düşüktür (1.250-1.450 m). Güney komşularına göre daha ılıman bir iklime sahip olan Elâzığ’da yıllık ortalama sıcaklık 12,5-13 °C arasında değişmektedir. İl genelinde güneş radyasyonu 1.600-1.700 kWh/m²-yıl düzeyindedir ve bu da güneş enerjisi açısından uygun bir potansiyele işaret etmektedir.

Gaziantep: Günlük ortalama 8,35 saatlik güneşlenme süresiyle yüksek bir potansiyele sahiptir. Bu değer, güneş enerjisi santrali kurulumu için gerekli eşik değerinin üzerindedir. İl genelinde yıllık güneş radyasyonu 1.600-1.650 kWh/m² düzeyinde olup, bu durum Gaziantep’i güneş enerjisi yatırımları için elverişli bir bölge haline getirmektedir.

Şanlıurfa: Bölgesel olarak güneşlenme süresi fazla olan bir illerden bir tanesidir. Güneşten yararlanma konusunda 1. Kuşakta yer alır. Günlük Güneşlenme süresi ortalaması 8-9 saat arasındadır. 1.600-1.650 kWh/m²-yıl eşik değerleri arasında güneş radyasyonuna maruz kalmaktadır.

Diyarbakır: Bölgesindeki diğer illere göre özellikle kış ayları daha zorlu geçmektedir. Doğu Anadolu illeriyle olan komşulukları buna sebep olmaktadır. Buna rağmen bölgesel olarak güneşlenme süresi fazladır. Diyarbakır ilinde yaz aylarında sıcak ve kuru bir hava etkindir. Güneşlenme süresi yaklaşık 8-8,5 saat arasındadır.

Osmaniye: Bölge olarak güneş enerjisi bakımından 1. Kuşakta yer almaktadır. Osmaniye ilinin toplam güneşlenme radyasyonu 1.650-1.700 kWh/m²-yıl arasındadır. Güneşlenme süresi 8-8,5 saat arasındadır.

Güneş enerjisini en verimli şekilde kullanılacak en yüksek değerlere sahip şehirlerden biridir.

Kahramanmaraş: Her ne kadar Akdeniz Bölgesi’nde yer alsın da Güneydoğu Anadolu Bölgesi’nin iklim koşullarından da etkilenmektedir. İl genelinde bağlı arazilerde yıllık güneş radyasyonu 1.650-1.800 kWh/m² düzeyindedir. Bu durum, Kahramanmaraş’ın güneş enerjisinden faydalanma potansiyelinin yüksek olduğunu göstermektedir.

Tablo 3. Türkiye’nin farklı bölgelerinde kırsal alanlara kurulan güneş enerjisi santrallerinin teknik özellikleri

Şehir	Bölge	Kurulduğu Alan	Panel Türü	Panel Sayısı (Adet)	Panel Gücü (Wp)	Net Kurulu Güç (Wp)	İnverter Türü
Aksaray	İç Anadolu	Kırsal	Cam-cam	10.110	117,5	1.187,93	String inverter (Abb 27.6 trio)
Konya	İç Anadolu	Kırsal	Polikristal	4.036	285	1.150,26	String inverter (Huawei 100 kWe)
Osmaniye	Akdeniz	Kırsal	Polikristal	4.182	275	1.150,05	String inverter (Huawei 100 kWe)
K. Maraş	Akdeniz	Kırsal	Polikristal	4.182	275	1.150,05	String inverter (Huawei 100 kWe)
Gaziantep	Güneydoğu Anadolu	Kırsal	Polikristal	4.340	265	1.150,10	String inverter (Huawei 100 kWe)
Diyarbakır	Güneydoğu Anadolu	Kırsal	Polikristal	4.340	265	1.150,10	String inverter (Huawei 100 kWe)
Şanlıurfa	Güneydoğu Anadolu	Kırsal	Polikristal	4.182	275	1.150,05	String inverter (Huawei 100 kWe)
Elâzığ	Doğu Anadolu	Kırsal	Polikristal	4.036	285	1.150,26	String inverter (Huawei 100 kWe)

Çalışmada değerlendirilen toplam sekiz ilde kurulan güneş enerji santrallerine ait teknik özellikleri Tablo 3’te sunulmaktadır. Kurulumlar benzer kapasite hedeflenerek gerçekleştirilmiş olup, santrallerin tamamında string inverter teknolojisi tercih edilmiştir. Aksaray ilindeki kurulumda cam-cam tipi paneller ve ABB 27.6 Trio model inverter kullanılmışken, diğer tüm illerde polikristal paneller ile Huawei marka 100 kWe kapasiteli inverterler tercih edilmiştir. Panel güçleri 117,5 Wp ile 285 Wp arasında değişmekte olup, panel sayıları bu farklılığa göre optimize edilerek yaklaşık 1.150 kWp düzeyinde net kurulu güç elde edilmiştir. Bu yapı, saha koşulları ve proje hedeflerine göre ekipman seçimlerinin çeşitlendiğini; ancak kurulu güç bakımından belirli bir standartta kaldığını göstermektedir.

2.3. Verilerin Toplanması ve Analizi

Çalışmada kullanılan veriler, yaklaşık 1 MW kapasiteli Güneş Enerjisi Santrali (GES) sistemlerinin bir yıllık gerçek üretim verileridir. Bu santraller, üretim miktarlarını günlük ve aylık bazda kaydetmektedir. Çalışmanın yöntemi, bu sistemlerden elde edilen aylık üretim verilerinin detaylı bir şekilde incelenmesine dayanmaktadır. Veriler, 2018 yılına ait olup tam olarak 1 yıllık üretim verisi her bir il için ayrı ayrı analiz

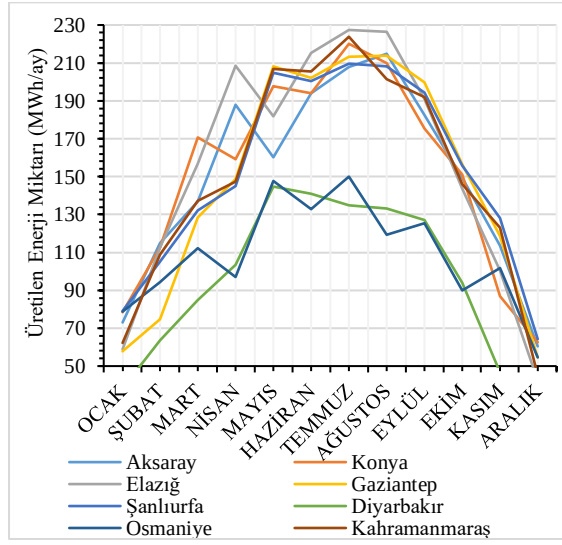
edilmiştir. Analiz sürecinde, santrallerin her birinin üretim miktarları hesaplanarak, elde edilen sonuçlar diğer illerle karşılaştırılmıştır.

Veri analizi, santrallerin üretim verilerinin bölgesel performans farklarını belirlemek amacıyla yapılmış ve istatistiksel kıyaslamalar ile bölgesel enerji verimliliği değerlendirilmiştir. Bu yöntem, Türkiye genelindeki güneş enerjisi üretim potansiyelinin karşılaştırılmasına ve bölgesel enerji stratejilerinin geliştirilmesine önemli katkılar sağlamaktadır. Elde edilen bulgular, güneş enerjisinin farklı coğrafi bölgelerdeki performansını anlamaya yönelik sağlam bir metodolojik yaklaşım sunmakta ve bölgesel enerji planlamasında yönlendirici bir rol oynamaktadır.

III. BULGULAR VE TARTIŞMA

İlk olarak, 8 farklı ilde kurulan güneş enerjisi üretim tesislerinin aylık üretim değerleri şekil 2’de verilmiştir. Üretim değerlerine bakıldığında 8 il arasında en fazla üretim Doğu Anadolu Bölgesinde Elâzığ’da (1.864.660 kWh/yıl) gerçekleşmiştir. Bu sonuç, Güneydoğu Anadolu ve Akdeniz bölgelerindeki diğer illeri geride bırakarak, yalnızca güneş enerjisi potansiyelinin tek başına yeterli olmadığını; sistem verimliliğinde

iklimsel ve yapısal birçok etkenin de belirleyici olduğunu ortaya koymuştur.



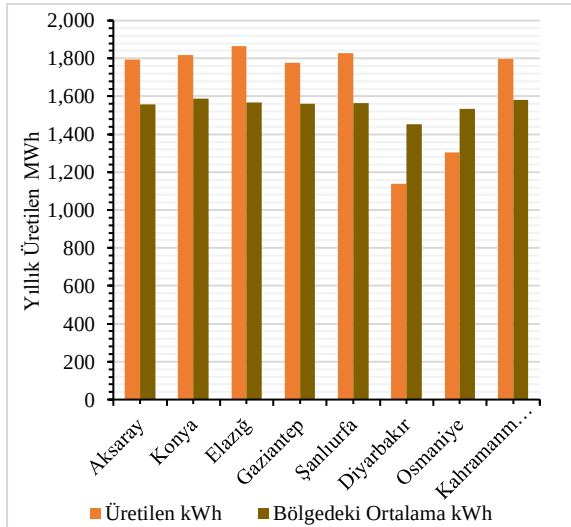
Şekil 2. Tesislerde üretilen güneş enerji miktarlarının aylara göre dağılımı

Santrallerin ilk 4 ay üretimine baktığımız zaman Diyarbakır 289.843, Gaziantep 409.736, Şanlıurfa 461.259, Osmaniye 382.405, Kahramanmaraş 455.477, Konya 520.704, Aksaray 461.259, Elâzığ 536.358 kWh olarak belirlenmiştir. Bu değerlere göre yılın ilk 4 ayında, yani kış aylarında en çok üretim Doğu Anadolu Bölgesinde bulunan ilimiz Elazığ'da olmuştur. Kış aylarının zorlu iklim koşullarıyla bilinen Elâzığ ilinde, yıllık üretim değerinin bu denli yüksek olması (özellikle Güneydoğu Anadolu ve Akdeniz bölgelerindeki illerle kıyaslandığında) beklenen bir durum değildir. Ancak yüksek verimle çalışan santral, bu süreçte diğer yedi üretim tesisinin tamamını geride bırakmıştır. Kış aylarında yağışlı, karlı ve bulutlu hava koşullarının etkili olabileceği göz önüne alındığında, üretim değerlerinin iller arasında belirgin farklılıklar gösterdiği anlaşılmaktadır. Yaz aylarında ise genellikle açık ve sıcak hava koşulları hâkim olduğundan, bu dönemdeki üretim değerleri diğer aylara kıyasla anlamlı şekilde artış göstermektedir. Yaz aylarından Haziran, Temmuz, Ağustos, Eylül aylarının üretim değerleri incelendiğinde, Diyarbakır 536.070, Gaziantep 828.637, Şanlıurfa 812.730, Osmaniye 527.847, Kahramanmaraş 822.374, Aksaray 799.249, Konya 799.344, Elâzığ 859.942 kWh olarak belirlenmiştir. Yaz ayları üretimleri incelendiğinde Elâzığ yine diğer illeri geride bırakmıştır. İç Anadolu Bölgesinde yer alan Aksaray ve Konya illeri birbirine çok yakın değerlerde üretim gerçekleştirmiştir. Aralarındaki fark 95 kWh olarak görülmektedir. Bu mevsim de üretim değerlerinin ve verimin en üst seviyede olması gerekmektedir. Yağmur, kar, bulutlanma çok nadir görüldüğü için üretim olumsuz yönde etkilenmemektedir. Fakat Diyarbakır ve Osmaniye illerinin değerlerinin hem kış aylarında hem de yaz aylarında diğer illere göre çok düşük olduğu görülmektedir. Bunların sebepleri arasında üretim

değerlerinin alındığı dönemdeki hava durumu, santrallerin arıza ve bakım durumları, kesintiler olabilir. İki santralin üretimleri diğer 6 santrale göre yaklaşık 265.000 kWh daha az olmuştur. Değerleri kullanılan 8 ilin yaz ayları üretimleriyle kış ayları üretimleri farkı sırasıyla, Diyarbakır 246.227, Gaziantep 418.901, Şanlıurfa 351.471, Kahramanmaraş 366.897, Osmaniye 145.442, Konya 278.640, Aksaray 286.486, Elâzığ 323.584 kWh olarak belirlenmiştir. Üretim değerleri incelendiğinde en çok fark Gaziantep ilinde görülmektedir. Gaziantep ilinde yaz aylarında diğer illere göre daha fazla üretim olmuştur. Tüm bu üretim değerleri güneşin bölgesel olarak radyasyon potansiyeline, güneş paneline ve diğer kullanılan malzemelere tek başına bağlı olmadığı anlaşılmıştır. Mariano vd. (2021) tarafından yapılan çalışmada, Mevsimsel ısınma ve sıcaklık değişimlerinin, fotovoltaik sistemler tarafından üretilen güç üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu belirtilmiştir [15]. Dolayısıyla özellikle güneydoğu bölgesinde yaz aylarındaki ısınmanın daha yüksek olması nedeniyle Gaziantep ilinde daha yüksek enerji üretilmesi olası bir durumdur. Bununla birlikte, yapılan bir çalışmada da güneş enerjisi santrallerinin verimliliğinin, toz, su damlacıkları, kuş pislikleri ve gölgeleme koşullarının varlığından etkilenebildiği, bu nedenle çevresel faktörlerin önemli olduğu vurgulanmıştır [16]. Her ne kadar Elazığ'ın içinde bulunduğu Doğu Anadolu Bölgesi, çalışılan bölgeler arasında kış aylarında (Aralık) en az güneşlenme süresine sahip (96 saat) olan bölge olsa da hem çevresel faktörlere hem de diğer faktörlere bağlı olarak kış aylarında daha yüksek enerji üretimi gerçekleştirilmiştir. Dolayısıyla bu durum, bu çalışmanın önemini ortaya koymaktadır. Güneşlenme süresi, ortalama sıcaklık vb. gibi faktörlere bağlı olarak kurulan GES'lerde daha düşük verim elde edilebileceği gözlenmiştir. Güneş enerjisi santrallerinin verimliliği teknik, çevresel ve operasyonel faktörlerin birleşiminden etkilenir. Güneş radyasyonu, sıcaklık, izleme sistemleri, entegrasyon stratejileri ve saha seçimi gibi faktörleri göz önünde bulundurarak ve optimize ederek, güneş enerjisi santralleri daha yüksek verimliliklere ulaşabilir, sürdürülebilir ve güvenilir enerji üretimine katkıda bulunabilir [17][18].

3.1. Tesislerin Üretim Değerlerinin, Bölgesel Ortalama Potansiyelleriyle Karşılaştırılması

Güneydoğu Anadolu, İç Anadolu, Akdeniz ve Doğu Anadolu Bölgesinin illerinde kurulumu yapılmış ve şu an aktif olarak üretim yapmaya devam eden güneş enerji santralleri kendi aralarında verim bazında değerlendirilmiştir. Şekil 3'te, yıllık üretilen enerji miktarları ile bölgesel olarak ortalama enerji potansiyelleri karşılaştırılmıştır. Grafikten yer seçiminin üretim verimlerine etkisi olduğu açıkça görülmektedir. Şehirlerin, il sınırları içerisinde bile radyasyon potansiyeli farklılıklarının olduğu şekil 1'de görülmektedir.



Şekil 3. Tesislerin üretim ve bölgesel potansiyelleri bakımından verimlerinin karşılaştırılması

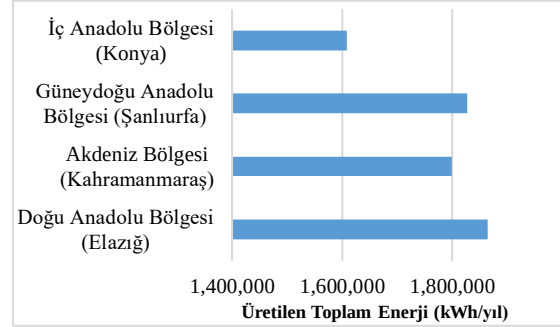
Karşılaştırmasını yaptığımız radyasyon potansiyeli değerleri ortalama olduğu için pik noktalarda yapılacak tesislerden elde edilecek verimler ortalama değerlerin üzerinde olacaktır. Bu nedenle aynı il sınırları içerisinde bile farklı konumlardaki farklı tesislerin üretim miktarları değişecektir. Elâzığ’da verimin beklenenden yüksek çıkması, Diyarbakır ve Osmaniye de verimlerin beklenenden düşük çıkması, sıcaklığın panel verimleri üzerinde sınırlayıcı bir etki yapmasından kaynaklanmış olabilir [19]. Ancak bu durum verimler arasındaki farkın bu kadar açık olmasının tek nedeni değildir.

Karşılaştırma yapılan sekiz il bazında üretim değerleri incelendiğinde, bölgesel olarak en düşük güneş enerjisi potansiyeline sahip olan Doğu Anadolu Bölgesi’ndeki Elâzığ ili, yıllık 1.864.660 kWh üretim değeriyle diğer tüm illeri geride bırakmıştır.

İç Anadolu bölgesindeki üretim yapan iki santral verim olarak diğer bölgelerdeki santrallerin önüne geçmiştir. Güneş enerjisinin bölgesel potansiyeline göre İç Anadolu bölgesi üretim verimi olarak diğer iki bölgeden daha az olması beklenirdi. Ama üretim, sadece güneşin enerji potansiyeline göre olmamaktadır. Santrallerde kullanılan paneller ve bu panellerin doğru yerleştirilmesi, İnverter seçimi, Kablo seçimi, Trafo ve hücrelerin seçimi çok önemlidir. Ama en önemlisi sadece bu ürünleri doğru seçmek değil, seçtikten sonra doğru montaj ve dizayn edilmesidir. Ayrıca santrallerdeki periyodik bakımlar da verim üzerinde etkili olabilmektedir. Ancak bu çalışma sınırları içerisinde bu gibi teknik detaylar değerlendirilmemiş olup, santrallerden bir yıllık bazda üretilen enerji miktarları kıyaslanmıştır. Hantoro vd. (2020) tarafından yapılan çalışmada, izleme ve bakım, optimum performansın sağlanması için olmazsa olmazı olup, düzenli izleme, güneş ışınımının ve tesis koşullarının verimlilik üzerindeki etkilerinin

değerlendirilmesine yardımcı olacağı belirtilmiştir [18].

Bölgelere göre bir yılda üretilen toplam enerji miktarları Şekil 4’te verilmiştir. Doğru kıyaslama için, grafiğin çiziminde ilgili bölgede en yüksek üretimin gerçekleştirildiği il seçilmiştir. Şekle bakıldığında, en yüksek üretimin meydana geldiği bölge Doğu Anadolu Bölgesi iken, en düşük üretim İç Anadolu Bölgesinde gerçekleşmiştir.



Şekil 4. Bölgelere göre üretilen toplam enerjinin kıyaslanması

Üretililecek yıllık güneş enerjisi miktarlarına bakıldığında, Doğu Anadolu Bölgesinde bu değer 1.365 kWh/m²yıl olup, İç Anadolu Bölgesinde 1.314 kWh/m²yıl’dır. En yüksek değer 1.460 kWh/m²yıl ile Güneydoğu Anadolu Bölgesinde olmasına karşılık, bu bölge enerji üretiminde Doğu Anadolu Bölgesinden sonra ikinci sıradadır. Daha önce de tartışıldığı üzere, birçok faktör bu durum üzerinde etkili olabilmektedir. Dolayısıyla bölgesel anlamda, teorik olarak daha fazla güneş üretimi gerçek ölçekte daha fazla enerji üretim anlamına gelmemektedir. Enerji üretimine etki edebilecek diğer faktörlerin de değerlendirilmesi gerektiği söylenebilir.

Güneş enerjisi santrallerinin verimliliği yalnızca kurulum yapılan bölgenin coğrafi ve meteorolojik özelliklerine bağlı kalmamakta, aynı zamanda teknik parametrelerle de doğrudan ilişkilidir. Bu teknik faktörler arasında güneş panellerinin montaj açısı, enerji üretimi üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Panelin uygun olmayan bir açıyla yerleştirilmesi, toplam güç üretiminde yaklaşık %5 oranında sapmaya neden olabilmektedir. Bu görünüşte küçük değişim, özellikle geniş panel dizilerinde önemli enerji kayıplarına yol açabilir. Örneğin, her biri 250 W gücünde olan 10 panelin optimum açıyla konumlandırılması durumunda, panel başına yaklaşık 12,5 W ek üretim sağlanabilir. Bu da toplamda 125 W’lık bir artış anlamına gelmekte olup, büyük ölçekli güneş enerjisi santrallerinde göz ardı edilemeyecek bir katkı sağlamaktadır.

IV. SONUÇLAR

Bu çalışma, Türkiye’nin farklı bölgelerinde kurulu sekiz ayrı güneş enerjisi santraline (GES) ait bir yıllık gerçek üretim verilerinin, bölgesel güneş radyasyonu potansiyelleriyle karşılaştırmalı olarak incelenmesini kapsamaktadır. Değerlendirilen santraller arasında en yüksek yıllık üretim Elâzığ ilinde 1.864.660 kWh ile kaydedilmiş; en düşük üretimler ise sırasıyla Diyarbakır (536.070 kWh/yıl) ve Osmaniye (527.847 kWh/yıl) illerinde gerçekleşmiştir. Elâzığ, güneş enerjisi potansiyeli açısından Türkiye’de üçüncü sırada yer alan Doğu Anadolu Bölgesi’nde konumlanmasına rağmen, en yüksek üretim değerine ulaşarak yalnızca güneş radyasyonu miktarının değil, aynı zamanda sistem tasarımı, sıcaklık koşulları, bakım düzeyi ve ekipman kalitesi gibi teknik faktörlerin de enerji verimliliğinde belirleyici olduğunu ortaya koymuştur.

Öte yandan, yüksek güneşlenme süresi ve radyasyon potansiyeline sahip olmalarına rağmen Diyarbakır ve Osmaniye illerinde elde edilen düşük üretim değerleri, bu illerde sistemsel kayıplar veya işletmeye bağlı aksaklıkların mevcut olabileceğini düşündürmektedir. Bu durum, yalnızca teorik potansiyel verilerine değil, saha performansını etkileyen tüm teknik ve işletmesel koşullara bütüncül yaklaşılması gerektiğini ortaya koymaktadır.

Gelecekte yapılacak çalışmalarda, bu tür sistemsel detayların da ele alındığı kapsamlı analizlerin literatür açısından önemli katkılar sağlayacağı değerlendirilmektedir. Türkiye’de güneş enerjisi yatırımlarının hızla artmakta olduğu gözlemlenmekle birlikte, bu yatırımların ekonomik olarak verimli ve sürdürülebilir olabilmesi için kurulum ve işletme süreçlerinde daha titiz fizibilite çalışmalarına ihtiyaç duyulmaktadır. Güneş panellerinin doğru montajı, uygun açılı optimizasyonu ve teknik parametrelerin dikkatle yönetilmesi, enerji üretim kapasitesinin maksimize edilmesinde kritik rol oynamaktadır. Bu bağlamda, yerel iklim ve çevre koşullarının yanı sıra, teknolojik iyileştirmeler ve sistem optimizasyonları gibi faktörlerin de göz önünde bulundurulması, güneş enerjisi sistemlerinin daha verimli ve güvenilir bir şekilde işletilmesine katkı sağlayacaktır.

ETİK KURUL ONAYI VE ÇIKAR ÇATIŞMASI BEYANI

“Hazırlanan makalede etik kurul izni alınmasına gerek yoktur”

“Hazırlanan makalede herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır”

YAZAR KATKILARI

-A. YURTSEVER, Verilerin analizi ve yorumlanması, Çalışma konsepti ve tasarım, makale yazımı

-S. ATEŞ, Çalışma konsepti ve tasarım, Makale yazımı.

-C. ÖZTÜRK, Veri toplama, Verilerin analizi ve yorumlanması

-A. E. ATEŞ, Taslağın oluşturulması, makale yazımı.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma, Hasan Kalyoncu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü’nde kabul edilmiş olan 621591 nolu “Güneş Enerji Sistemlerinde Verim Analizi ve Enerji Kayıplarının Tespiti” isimli tezden üretilmiştir.

KAYNAKLAR

- [1] Lavrik A., Yakovleva E., Leskov A. (2018). Assessing the Solar Power Plant Efficiency Degradation Resulting from Heating. *Journal of Ecological Engineering*. 19(3), 115-119.
- [2] Acar, C., Beskese, A., & Temur, G. T. (2018). Sustainability analysis of different hydrogen production options using hesitant fuzzy AHP. *International Journal of Hydrogen Energy*, 43(39), 18059-18076.
- [3] Sachs, J., Moya, D., Giarola, S., & Hawkes, A. (2019). Clustered spatially and temporally resolved global heat and cooling energy demand in the residential sector. *Applied Energy*, 250, 48-62.
- [4] Topcu, C., & Yünsel, D. T. (2012). Yenilenebilir enerji raporu. Çukurova Kalkınma Ajansı, Adana
- [5] Uyan, M., (2016). Güneş enerjisi santrali kurulabilecek alanların AHP yöntemi kullanılarak CBS destekli haritalanması. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 23(4): 343-351
- [6] <https://www.teias.gov.tr/turkiye-elektrik-uretim-iletim-istatistikleri>
- [7] Kılıç, F. Ç. 2015. “Güneş Enerjisi, Türkiye’deki Son Durumu ve Üretim Teknolojileri,” *Mühendis ve Makina*, cilt 56, sayı 671, s. 28-40.
- [8] <https://enerji.gov.tr/bilgi-merkezi-enerji-elektrik#:~:text=2023%20y%C4%B1%C4%B1nda%20elektrik%20C3%BCretimimizin%2C%20%36,si%20di%C4%9Fer%20kaynaklardan%20elde%20edilmi%C5%9Ftir>
- [9] Effat, H. A. (2013). Selection of potential sites for solar energy farms in Ismailia Governorate, Egypt using SRTM and multicriteria analysis. *International Journal of Advanced Remote Sensing and GIS*, 2(1), 205-220.
- [10] Sahin, G., Akkus, I., Koc, A., & van Sark, W. (2024). Multi-criteria solar power plant siting problem solution using a GIS-Taguchi loss function based interval type-2 fuzzy approach: The case of Kars Province/Turkey. *Heliyon*, 10(10).

-
- [11] Bouzguenda, M., Al Omair, A., Al Naeem, A., Al-Muthaffar, M., and Wazir, O. B. (2014). Design of an off-grid 2 kW solar PV system. In *Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER), Ninth International Conference*, 1-6.
- [12] Kymakis, E., Kalykakis, S., & Papazoglou, T. M. (2009). Performance analysis of a grid connected photovoltaic park on the island of Crete. *Energy conversion and management*, 50(3), 433-438.
- [13] Guo, B., Javed, W., Figgis, B. W., & Mirza, T. (2015, March). Effect of dust and weather conditions on photovoltaic performance in Doha, Qatar. In *2015 First Workshop on Smart Grid and Renewable Energy (SGRE)* (pp. 1-6). IEEE.
- [14] <https://gepa.enerji.gov.tr/>
- [15] Mariano, J. R. L., Liao, M., & Ay, H. (2021). Performance evaluation of solar PV power plants in Taiwan using data envelopment analysis. *Energies*, 14(15), 4498.
- [16] Mustafa, R. J., Gomaa, M. R., Al-Dhaifallah, M., & Rezk, H. (2020). Environmental impacts on the performance of solar photovoltaic systems. *Sustainability*, 12(2), 608.
- [17] Windarta, J., Saptadi, S., Satrio, D. A., & Silaen, J. S. (2020). Technical Analysis on Household-Scale Rooftop Solar Power Plant Design with On-Grid System in Semarang City. In *E3S Web of Conferences* (Vol. 202, p. 08006). EDP Sciences.
- [18] Hantoro, R., Septyaningrum, E., Cony Setiadi, I., Fahmi Izdiharrudin, M., Damien Uwitije, P., Akbar, A., ... & Sinatra, L. (2020). *Design and Implementation of Real-Time Monitoring System for Solar Power Plant in Surabaya, Indonesia*.
- [19] Haydaroglu, C., & Gümüş, B. (2016). Dicle Üniversitesi güneş enerjisi santralının PVsyst ile simülasyonu ve performans parametrelerinin değerlendirilmesi. *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, 7(3), 491-500.

Maprotiline as a Repositioned Drug Candidate for the Treatment of Non-Functioning Pituitary Neuroendocrine Tumors: a Network-Based Omics-Oriented Approach

İşlevsiz Hipofiz Nöroendokrin Tümörlerinin Tedavisinde Yeniden Konumlandırılmış Bir İlaç Adayı Olarak Maprotilin: Ağ Tabanlı Omik Odaklı Bir Yaklaşım

Büşra AYDIN ¹ 

¹Konya Gıda ve Tarım Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Biyomühendislik Bölümü, Konya, Türkiye

Abstract

Non-functioning pituitary neuroendocrine tumors pose a great challenge not only for the clinic but also for patients since it has an insidious progression. Even though effortful studies and state-of-the-art techniques are improving our knowledge about this disease, no therapeutic modality is currently approved for the treatment. This study aimed to determine significantly altered genes that showed aberrantly expressed patterns in NF-PitNET using high-throughput RNA-sequencing transcriptome data. To uncover essential elements in disease pathogenesis, biological networks in protein, transcription factor, and microRNA levels were constructed and topologically analyzed. by drug prioritization for NF-PitNETs via a repositioning approach. The hub elements of AGO2, BCL2L2, BIRC5, BRCC3, CDC42, CUL3, E2F2, ESR1, ESR2, GIGYF1, JUN, KRAS, MDM2, NFKB1, PLEKHA4, RELA, RNF40, and ZNF460 were proposed as systems biomarkers of NF-PitNET. A signature-based drug repositioning using hub elements as treatment targets unraveled repositioned drug candidates including valdecoxib, penfluridol, maprotiline, mitoxantrone, vorinostat, homoharringtonine, norethynodrel, strophantine octahydrate, bufalin, and digoxin. The efficiency of maprotiline was confirmed *in silico* via molecular docking and resulted in higher binding affinities with hub elements compared to their inhibitors. Maprotiline was proposed as a promising repositioned therapeutic for the management of NF-PitNETs.

Keywords: transcriptomics, RNA-seq, biological networks, drug repositioning, non-functioning pituitary neuroendocrine tumors

I. INTRODUCTION

Pituitary adenomas, lately alternatively called pituitary neuroendocrine tumors (PitNETs) [1], are reported as the second most encountered type of intracranial neoplasms in the clinic [2]. Non-functioning pituitary neuroendocrine tumors (NF-PitNETs) account for approximately 30% of PitNETs [3]. These tumors are accepted as clinically challenging tumors since the manifestation of the symptoms can be detected only in the late phases of tumor growth. It is generally not possible to detect these neoplasms until the mass effect and local compression on intracranial nerves and brain tissue end up with headache and visual abnormalities [4].

The transsphenoidal resection is the first-line treatment strategy for NF-PitNETs to decrease the mass effect [5]. Considering the increasing prevalence of NF-PitNETs, no medical treatment is currently recommended for them [6]. Despite drug treatment modalities for the functioning PitNETs subtypes being well set, pharmacological interventions for NF-PitNETs are still in the experimental and exploratory stages (NIH, clinicaltrials.gov).

Striving efforts have been performed to decode underlying molecular mechanisms of NF-PitNETs, several diagnostic and prognostic biomarkers (genes, proteins, microRNAs (miRNAs), long noncoding RNAs (lncRNAs)) and therapeutic targets have been reported [8–13]. Even though advances in genetic and molecular profiling techniques have improved our understanding of these tumors, leading to the development of targeted therapies and potential precision medicine approaches, effective pharmacological therapy for NF-PitNETs is an urgent need for the clinic.

Corresponding Author: BÜŞRA AYDIN, Tel: 0507 442 86 42, E-mail: busra.aydin@gidatarim.edu.tr

Submitted: 09.07.2025, **Revised:** 10.08.2025, **Accepted:** 20.08.2025

Drug repositioning (DR, or repurposing) is a promising approach that allows scientists to reutilize known drugs, small molecules, and chemical compounds with the purpose of the treatment of new indications in a time- and cost-effective manner [14]. This time- and cost-efficiency originated from the utilization of already established formulations and manufacturing techniques, available information on clinical trials, pharmacokinetic features, marketing data, and known side effects. In this work, a systems biomedicine-oriented study was performed to construct protein-, miRNA- and TF- mediated biological networks from transcriptome-level NF-PitNET RNA sequencing (RNA-seq) data. The utilization of these networks and topological analysis resulted in essential elements of networks eventuated with disease-specific signatures which were further employed for elucidation of repositioned drug candidates for the management and treatment of NF-PitNETs. The repositioned drug candidates were extensively confirmed via *in silico* molecular docking simulations. Maprotiline was reported as the potential repositioned drug candidate for the treatment of NF-PitNETs.

II. MATERIALS and METHOD

2.1. Data Retrieval and Sample Features

The framework that was followed during this study is presented in Figure 1. To determine transcriptomic changes in NF-PitNETs, the transcriptome level dataset GSE136781 which contained tumor and normal pituitary tissue samples was retrieved from the Gene Expression Omnibus (GEO) database [15]. The dataset was generated using RNA-sequencing technology and includes 42 freshly frozen samples from patients with NF-PitNETs and 4 formalin-fixed paraffin-embedded normal pituitary tissues used as the control group [16]. After the resection of tumors, tissues were examined histopathologically. For diagnosis and classification WHO 2004 criteria [17] were followed which were applicable at the years of tissue collection. For the detection of cavernous sinus invasion, the Knosp classification was used [18].

2.2. Data Processing and Differential Gene Expression Analysis

The count data of the GSE136781 dataset was retrieved from the GEO database. Each gene was normalized across all samples using an internal normalization method, with the geometric mean calculated using the “DESeq2” package [19] (version 1.40.01) in Bioconductor (release 3.17). Differentially expressed genes (DEGs) were identified using the “DESeq2” package combined with volcano plot filtering. The Benjamini–Hochberg procedure was performed to

check the false discovery rate, with statistical significance defined as an adjusted p-value < 0.05. The regulatory direction of each DEG (up- or downregulation) was determined using a fold change threshold of $|\log_2FC| \geq 1.0$.

2.3. Functional Enrichment Analysis

To find out the biological processes and pathways that DEGs are functioning were elucidated via pathway and functional enrichment analyses through GeneCodis4 [20] and Metascape [21]. The functional annotations that were significantly associated with the DEGs were identified.

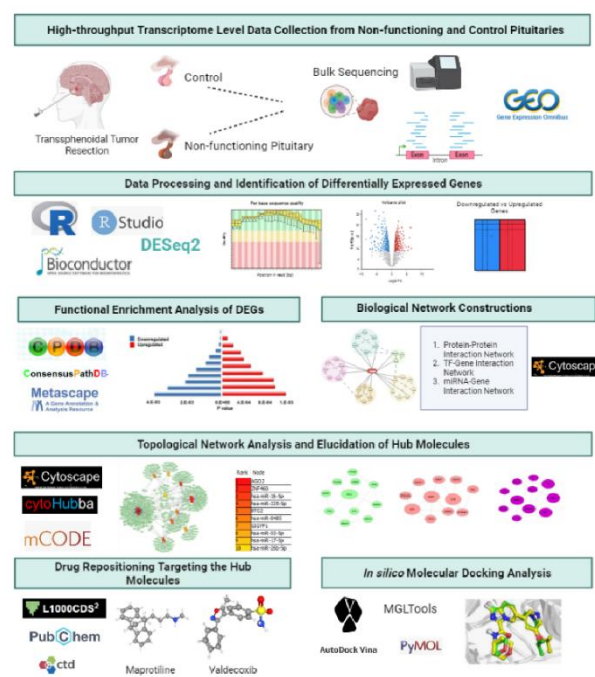


Figure 1. The study design that was followed throughout this work.

DEGs were separated as down- and up-regulated genes, as functional enrichment analysis is sensitive to the sign of the fold change. When up- and downregulated genes are mixed, enrichment scores can be diluted, leading to missed associations. To prevent this limitation and facilitate more precise biological interpretation, DEGs were analyzed according to their direction of regulation.

The significance of enriched pathways and biological processes was adjusted to $p < 0.01$. The annotation sources were selected as KEGG Pathway [22], GO Biological Processes [23], and Reactome [24].

2.4. The Construction of Biological Networks

Biological networks that were constructed around DEGs include three layers in which protein-protein interactions (PPIs), transcription factor (TF)-target gene regulatory interactions, and microRNA (miRNA)-

target gene interactions can be identified. The biological interaction data that covers all of these three layers were retrieved from BioGrid [25], MirTarbase [26], and TRRUST [27] databases for PPI, TF-gene interaction and miRNA-gene interaction networks. Each network was rendered using Cytoscape (version 3.7.2) [28] and quantitatively assessed through its integrated “Network Analyzer” module. Topological characteristics were further interrogated by applying both local and global network metrics via the “CytoHubba” plug-in [29]. Nodes exhibiting the highest degree and/or betweenness centrality values were designated as hub molecules, thereby representing putative key regulators and prospective therapeutic targets for subsequent drug repositioning analyses.

2.5. Drug Repositioning Analysis Around Hub Elements

A signature-based drug repositioning analysis was carried out using the Library of Integrated Network-based Cellular Signatures (LINCS) – L1000 data [30]. This online search tool provides a publicly available data utilization and allows users to prioritize candidate drugs and/or small molecules associated with input queries (genes or proteins). The top-scored hub elements of each network were determined according to degree and betweenness centrality metrics, and they were considered as differential expression vectors for the search of repositioned drugs through the L1000CDS2 search engine [31]. The reverse scenario search mode was employed to identify repositioned drug candidates with the potential to counteract the gene expression signatures characteristic of tumor tissues. The top 50 repositioned compounds, ranked according to their computed scores, were subsequently subjected to in-depth evaluation through a comprehensive literature survey and interrogation of publicly accessible repositories, including PubChem [32] and the Comparative Toxicogenomics Database (CTD) [33], to elucidate their mechanisms of action and associated pathological conditions.

2.6. Molecular Docking Analysis of Hub Elements and Repositioned Drug Candidates

To carry out molecular docking analysis the 3D structures of the hub molecules were searched in Protein Data Bank (PDB) [34]. The hub elements with no structural information were excluded from this analysis. The remaining hub elements were collected from the PDB databases using the accession codes of 5VM9, 6TN7, 1O0L, 3UED, 6R8F, 7ONI, 1N4M, 2JJ3, 4P42, 3LXX, 7X12, 2DKP. As a ligand of these hub genes, the 3D structure of top-scored, FDA-approved repositioned drug candidates –valdecixib and maprotiline- were retrieved from the PubChem database [32]. As a reference set of ligands, known

inhibitors for each hub element were identified through a comprehensive survey of the literature and interrogation of the Comparative Toxicogenomics Database (CTD) [33], and subsequently compared with the repositioned drug candidates. The molecular structures of these inhibitors were retrieved from the PubChem database [32]. Binding residue information for each hub element was obtained from the Protein Data Bank in Europe (PDBe), whereas, for hub elements lacking experimentally defined binding sites, putative binding residues were predicted using the 3DLigandSite server [35].

Molecular docking analyses for hub molecules and proposed repositioned drug candidates were performed using the Autodock Vina software (1.5.7) [36][37]. For macromolecular preparation prior to docking simulations, all crystallographic water molecules were removed, and polar hydrogen atoms were added to the macromolecular structures. Molecular docking was performed in triplicate for each ligand to ensure reproducibility. The binding affinities of drug candidate–target complexes were expressed in kcal/mol, with interaction strength assessed according to these calculated values. Previously identified inhibitors for each hub element, as described above, were employed as positive controls; the statistical significance of the docking results was thus evaluated relative to the binding affinities obtained for these reference inhibitors.

III. RESULTS

3.1. Identification of DEGs and Their Functional Enrichment Analyses

The genes that have altered expression profiles between two phenotypes namely NF-PitNETs vs. control groups were searched via the methods explained in the relevant section. A total of 5156 genes were identified as differentially expressed among these two groups. A statistical confidence threshold of adjusted $p < 0.05$ was applied. In addition to the adjusted p -value criterion, genes exhibiting a minimum two-fold change—either upregulation or downregulation—in their mean expression levels were retained for designation as DEGs and for determination of their regulatory direction. This screening yielded 5156 DEGs, of which 2252 were down-regulated and 2904 were up-regulated.

The next step after the elucidation of DEGs was the identification of their function via functional enrichment analysis. The elucidation of the significantly altered pathways and biological processes associated with the DEGs was carried out to construct the molecular mechanisms lying behind NF-PitNET

pathogenesis. The functional annotations of downregulated genes were significantly enriched in biological processes that could be generally associated with RNA function and immune system processes, including RNA processing, natural killer cell

activation, T cell activation, B cell proliferation ($p < 0.05$) (Figure 2A). The pathway enrichment analysis of downregulated genes resulted surprisingly in coronavirus disease, alcoholism, and ribosome ($p < 0.05$) (Figure 2A).

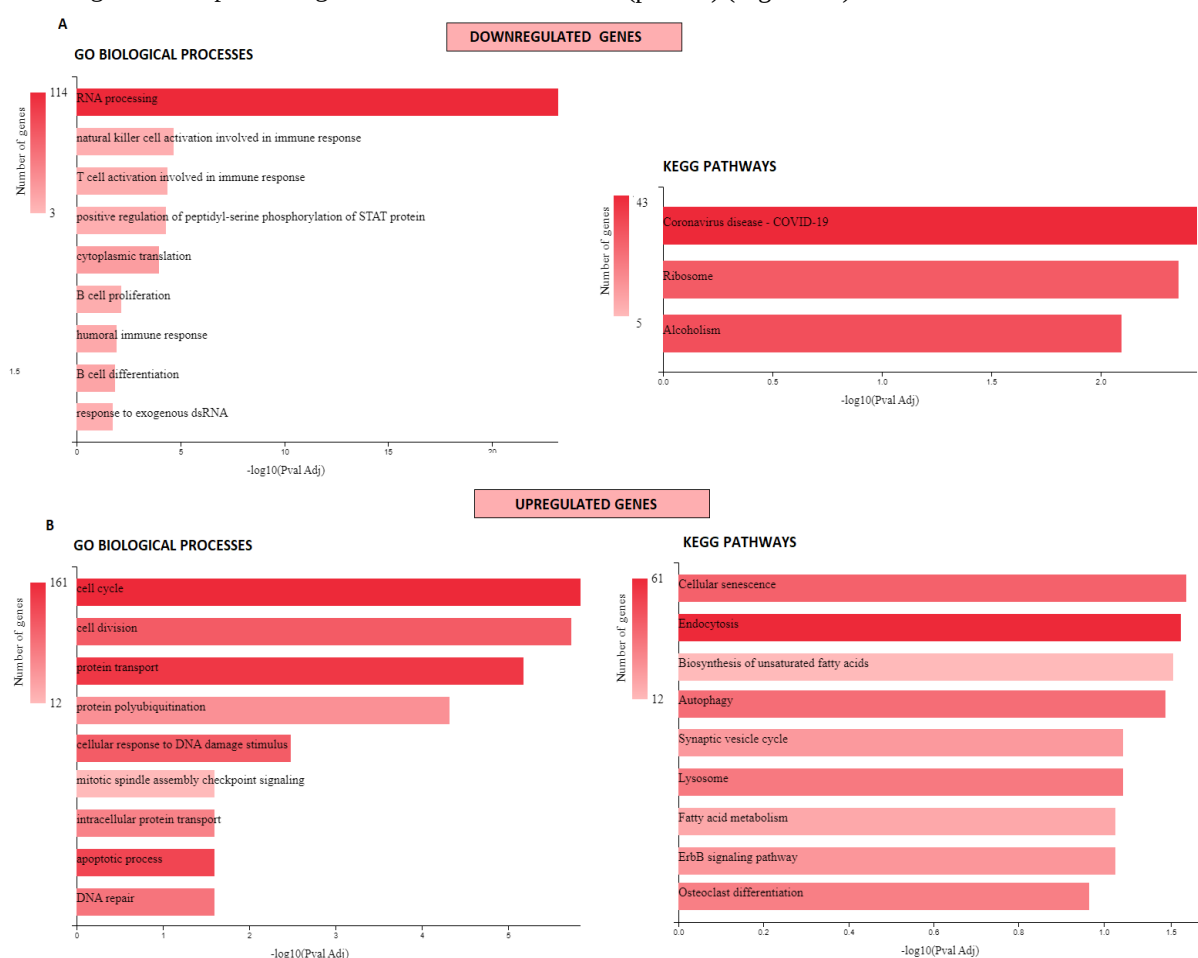


Figure 2. The functional enrichment analysis of DEGs. GO biological processes and KEGG pathways that were enriched for A) downregulated DEGs and B) upregulated DEGs.

The GO biological terms that were associated with upregulated genes mostly enriched in cell cycle and protein metabolism related processes such as cell division, mitotic spindle assembly checkpoint signaling, DNA repair, protein transport, and protein ubiquitination ($p < 0.05$). Considering downregulated genes and their related pathways cellular senescence, endocytosis, biosynthesis of unsaturated fatty acids, autophagy, ErB signaling pathway, lysosome, and osteoclast differentiation were found as significant KEGG pathways ($p < 0.05$) (Figure 2B).

3.2. Biological Network Constructions Unveil Hub Elements

To decode the driving molecules of NF-PitNET pathogenesis, resultant DEGs were searched for their physical and regulatory neighbors including PPI, TF, and miRNA level interactions. The insights gathered from these three biological levels leads to the

uncovering of biological molecules that have considerable potential as interacting elements between DEGs which allows us to understand the the molecular and cellular pathomechanisms driving the disease, thereby informing the development of targeted management strategies.

The construction PPI network of NF-PitNET resulted in a huge network composed of 17484 nodes and 274019 edges (Figure 3). Since it was hard to catch meaningful insights from that network we analyzed topologically important hub molecules. The degree and betweenness centrality metrics were applied and ended up with BIRC5, BRCC3, CDC42, CUL3, ESR1, ESR2, KRAS, MDM2, PLEKHA4, and RNF40 as hub elements.

The TF- target DEGs regulatory network was also constructed to determine the elements that could be responsible to regulate DEGs expression. This network consisted of 992 nodes and 2248 edges. The topological analysis resulted in CDKN1A, SP1, NFKB1, AR, E2F2, JUN, RELA, BCL2L2, ESR2, and BRCC3 hub elements and showed in Figure 4.

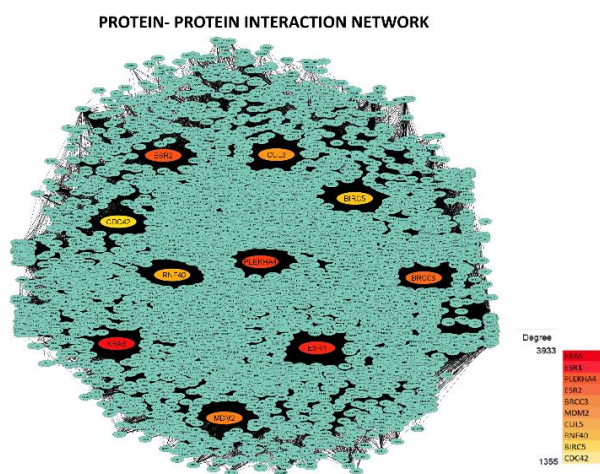


Figure 3. PPI network of NF-PitNET. The colors for hub elements are sliding through darker to lighter considering higher degree values to lower ones.

The miRNA- target DEGs regulatory network was evaluated for the same purpose. This network was composed of 6199 nodes and 137016 edges (Figure 5). The hubs were determined as AGO3, GIGYF1, hsa-miR-106b-5p, hsa-miR-16-5p, hsa-miR-17-5p, hsa-miR-20a-5p, hsa-miR-26b-5p, hsa-miR-335-5p, hsa-miR-93-5p, ZNF461.

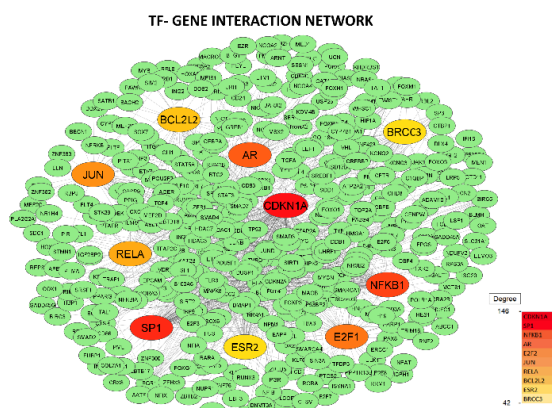


Figure 4. TF- target DEGs regulatory network of NF-PitNET revealed hub genes. The darker colors are representing hub elements with higher topological feature values whereas lighter colors represent lower ones.

These hub elements surrounding the DEGs showed us biological interactions that might have crucial roles in disease pathogenesis. Therefore, they were selected as target molecules to uncover possible drugs that inhibit their function. Considering this aim, two criteria were applied to continue with drug repositioning i) the selected element should be a hub element and ii) it should also be a DEGs. Since hub molecules also include some elements that were coming from the biological interaction database might not be in our DEG list. Applying these filters ended up with 18 molecules that possess features of a hub molecule and DEGs including AGO3, BCL2L2, BIRC5, BRCC3, CDC42, CUL3, E2F2, ESR1, ESR2, GIGYF1, JUN, KRAS, MDM2, NFKB1, PLEKHA4, RELA, RNF40, ZNF461. These molecules were further employed in drug repositioning analysis with their logFC values as their signatures.

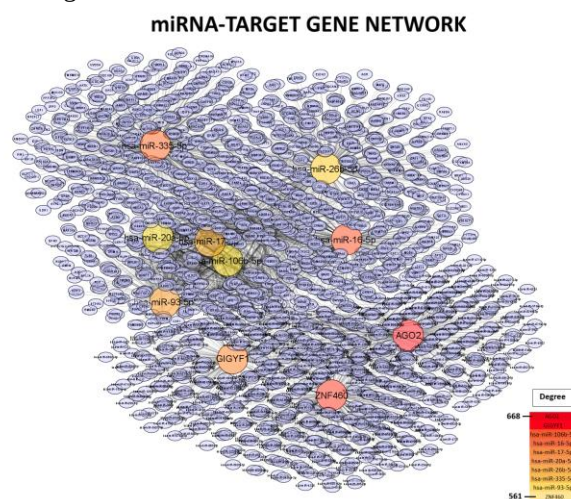


Figure 5. miRNA- target DEGs regulatory network of NF-PitNETs have 10 essential hub elements with significant topological features.

3.3. Unraveling of Signature-based Candidate Repositioned Drugs for NF-PitNET

The hub elements of above mentioned three networks were analyzed through L1000CDS2 (<http://amp.pharm.mssm.edu/L1000CDS2/>), which was used to search for overlap of gene expression signatures against the LINCS data to determine and prioritize drugs which have potential to antagonize or replicate the target gene expression signature [31]. A drug repositioning strategy based on gene expression signatures was implemented with the option of reversing the scenario to search for these hub elements for NF-PitNETs in order to identify possible drugs. This approach enabled the prioritization and identification of drug candidates with the potential to modulate gene expression profiles from a diseased to a healthy state. The observed small molecules/ drugs are predicted

to have good therapeutic potential because the examined hub proteins have been extracted from three layers of biological interaction data around disease-specific DEGs. As a result of drug repositioning analysis, 50 repositioned drug candidates were elucidated. The resultant small molecules were composed of drugs with different categories, functions, and approval statuses including FDA-approved and investigational ones. There were also some duplicate and unknown drugs that were excluded since there is no

information that could be gathered either in the literature or in drug databases. Considering the major aim of this work, we continued with just FDA-approved drugs. Following the exclusion of unknown, duplicate, and investigational compounds from the initial drug list, the query of hub elements yielded only 10 repositioned drug candidates, which were subsequently interrogated in PubChem, CTD, and DrugBank (Table 1).

Table 1. FDA- approved, non- cancer repositioned drug candidates for NF-PitNETs.

Drug	PubChem CID.	Chemical taxonomy	Mechanism/Mode of Action	Novelty	FDA Approval
Valdecoxib	119607	a member of the class of isoxazoles	a selective COX2-inhibitor with antirheumatic activity	Novel	Approved
Penfluridol	33630	a diarylmethane	antipsychotic agent, a mitochondrial oxidative phosphorylation inhibitor via SIRT1	Novel	Approved
Maprotiline	71478	a member of anthracenes	a tetracyclic antidepressant, blocking the reuptake of norepinephrine	Novel	Approved
Mitoxantrone	4212	an anthracene dione antibiotic with antineoplastic activity	inhibits topoisomerase II activity, thereby suppressing DNA repair mechanisms	Novel	Approved
Digoxin	2724385	a cardenolide glycoside, a steroid saponin	a cardiotonic drug with Na/K transporter ATPase inhibitor activity	Novel	Approved
Vorinostat	5311	a dicarboxylic acid diamide	a histone deacetylase inhibitor with antineoplastic activity	Associated with PitNETs	Approved
Homoharringtonine	285033	a cephalotaxine-derived alkaloid ester	a protein synthesis inhibitor, an apoptosis inducer with antineoplastic activity	Novel	Approved
Norethynodrel	6231	a synthetic progestational hormone	a contraceptive, inhibiting the preovulatory rise of the luteinizing hormone	Novel	Approved
Strophantine Octahydrate	6364534	a cardioactive glycoside	inhibitor of the Na/K exchange ATPase	Novel	Approved
Bufalin	9547215	a 14beta-hydroxy steroid	an antineoplastic/ a cardiotonic/ an anti-inflammatory agent	Novel	Approved

The obtained repositioned drugs were identified as anti-neoplastic agents, cardiotonic drugs, anti-psychotic agents, antibiotics, and anti-inflammation drugs. Table 1 summarizes each drug's mechanism of action, chemical class, approval status, and relevance to NF-PitNETs. Among these 10 drugs, only vorinostat was associated with the PitNETs previously in the literature [38].

The main objective of the selection of drug repositioning approach for this study was to uncover new drug candidates that already have finished their clinical trials since this might take less time when compared with a de novo drug design strategy. The secondary aim of this work was to identify non-antineoplastic agents for NF-PitNETs to reduce the adverse effects linked to conventional treatments.

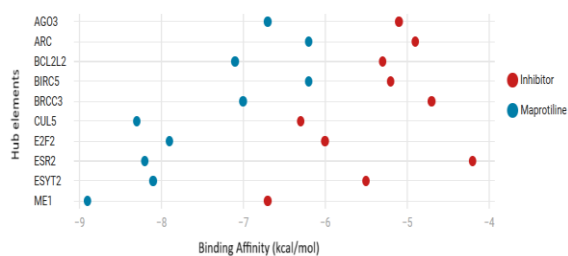


Figure 6. Molecular docking analysis elucidated the binding affinities for hub molecules and ligands (the positive controls- inhibitors of the hubs, and a repositioned drug maprotiline) that were predicted through the molecular docking simulations. The inhibitor and repositioned drug were represented with different colors.

Therefore, among 10 repositioned candidates, valdecoxib- an antirheumatic agent selected as a top-scored, non-cancer, and FDA-approved potential drug candidate. Since it has been withdrawn from the market considering serious side effects, the second top-scored drug, maprotiline- tetracyclic antidepressant- was selected for further molecular docking analysis with hub elements.

3.4. Molecular Docking Analysis Elucidated Maprotiline Hcl as a Potential Candidate for NF-PitNETs

The maprotiline was subsequently examined by utilizing molecular docking to elucidate how they interacted with hub elements in the context of NF-PitNET. To search the interactions of maprotiline with NF-PitNET-specific hub elements, the molecular docking simulations were carried out for all 10 hub elements namely E2F2, BCL2L2, PLEKHA5, ESR2, BIRC5, ESYT2, AGO3, BRCC3, ARC, CUL5, ME1 (since four of them -CDC42EP5, KRBA1, NFKBIL1, RNF40- lack 3D structure information), against their inhibitors and repositioned drug candidate maprotiline. The decabromobiphenyl ether (AGO3), bis(4-hydroxyphenyl) sulfone (ARC), bisphenol A (BCL2L2), resveratrol (BIRC5), bisphenol A (BRCC3, PLEKHA5), dronabinol (ESYT2), benzo(a)pyrene (CUL5), atrazine (E2F2), afimoxifene (ESR2), perfluorooctanoic acid (ME1) found as inhibitors of the hub elements. The binding affinities were estimated via docking analysis (Figure 6). While conducting docking analysis the structure of PLEKHA5 ended up with too many errors therefore it was excluded. Among the hub elements, maprotiline showed significant binding affinities with 80 % ($n=8$ out of 10 hubs) of the hub elements when compared to their binding affinities with inhibitors. The lower binding affinity values of maprotiline against hub inhibitors indicated that this repositioned drug candidate might have the potential to bind the hub elements more than their inhibitors. This

result will carry the promise of target hub elements via maprotiline. Thus, maprotiline was proposed as a novel repositioned therapeutic option for the clinical management of the NF-PitNETs.

IV. DISCUSSION

NF-PitNETs present a significant challenge for early diagnosis, often resulting in delayed detection [4,39]. There is an unfulfilled need for the development of new strategies for the treatment of NF-PitNETs. In this search, NF-PitNETs were examined via the integration of transcriptome-level data and their biological interactions to unveil a new drug candidate maprotiline which has been proposed as a potential therapeutic for NF-PitNETs by depending on *in silico* validations.

It is becoming increasingly clear that the state-of-the-art developments in omics science and systems biomedicine-oriented approaches lead to uncovering disease biomarkers to improve the management of diagnosis and therapy in varied human diseases including PitNETs [11,12,38,40]. Effortful studies have highlighted the complexity of NF-PitNETs in relation to the varied manifestations of disease, such as gender differences and ectopic tumor growth [39,41]. Despite the availability of these studies, there are no approved treatment modalities for NF-PitNETs. There is an urgent need for the development of new therapeutics for NF-PitNETs. As a main objective of this study, it was aimed to elucidate an FDA-approved potential drug or drug candidates that targeted hub elements to minimize the time that is required for the determination of formulations, manufacturing techniques, pharmacokinetic features, information on clinical trials, and side effects.

On the other hand, it is very well-established that many chemotherapeutics have decreased the quality of patients' lives since they cause notorious side effects [42]. Therefore, DR might be an outstanding approach to finding new drugs that might have shown fewer side effects. As the second scope of this study, it is aimed to find out repositioned drug candidates from non-cancer drugs that can treat patients without impairing their life quality. With these aims, the construction of the NF-PitNET-specific biological networks around DEGs allowed us to determine hub elements of this disease which were indispensable elements of the NF-PitNET that cover all three levels (protein, miRNA and TF). Given that hub elements constitute the most central and influential nodes within the network, as defined by both local and global topological parameters, their selective targeting represents a highly effective strategy for modulating the broader constellation of disease-associated molecules in their immediate interactome. Drug repositioning guided by hub elements identified

compounds capable of reversing disease-associated gene expression profiles. The selection of FDA-approved and non-cancer drugs might have carried a great promise to treat the disease without showing notorious side effects.

According to molecular docking confirmations, maprotiline- a tetracyclic antidepressant- displayed statistically significant binding scores with hub elements (Figure 6). Maprotiline is primarily utilized in the treatment of major depressive disorders. Beyond its antidepressant properties, studies have explored its anti-inflammatory and anti-cancer effects. It was reported that maprotiline inhibited the expression of inflammatory mediators such as COX-2 and iNOS in both human macrophages and a rat model of inflammation [43]. Recent studies have demonstrated that maprotiline can inhibit the expression of programmed death-ligand 1 (PD-L1) in melanoma cells, thereby enhancing the antitumor immune response. Specifically, maprotiline treatment led to decreased PD-L1 expression and increased infiltration of CD4+ and CD8+ T cells in tumor tissues of melanoma-bearing mice [44]. Additionally, maprotiline has been identified as a potential PD-L1 modifier for colorectal and lung cancers. A network medicine-based strategy revealed that maprotiline could inhibit PD-L1 expression by targeting speckle-type POZ protein, suggesting its repurposing as an anticancer agent [45]. Furthermore, maprotiline has been reported to induce autophagy in cancer cells, contributing to its anticancer properties [46]. Studies have shown that maprotiline can modulate autophagy pathways, leading to the suppression of tumor growth. However, current literature does not provide evidence linking maprotiline to pituitary disorders. In this study, maprotiline is reported as a candidate repositioned drug based on omics-level data integration and gene expression-based network constructions; therefore this drug may represent a novel therapeutic candidate for NF-PitNETs.

Since NF-PitNETs are brain-localized tumors, drug permeability across the blood-brain barrier (BBB) is another crucial issue. Pharmacokinetic studies have demonstrated the presence of maprotiline and its metabolites in brain tissue following systemic administration, confirming its central nervous system [47, 48]. Maprotiline is a lipophilic, low-molecular-weight compound (molecular weight ~277 Da) with high plasma protein binding ability. These physicochemical features generally favor passive BBB diffusion, a property shared by many tricyclic antidepressants [49]. Together, these studies suggest that maprotiline can effectively cross the BBB, supporting its potential suitability for NF-PitNET

therapy. It should be also noted the necessity of validating BBB permeability in disease-specific *in vivo* models, as BBB integrity can be altered in pituitary tumor pathophysiology.

The major limitation of this study originated from the features of the samples evaluated, which are not age- and sex-matched. Furthermore, the mode of action of maprotiline should be investigated in detail to determine the pathways affected. Also, further molecular-level studies should be carried out for recapitulation of the observed results in repositioned drugs with *in vitro* cell culture assays will highlight to see the power of predictions. To deal with this limitation, we conducted *in silico* molecular docking simulations to obtain the possible effects of repositioned drugs on hub proteins. Another drawback of this study was the low sample size since there is a data scarcity for the PitNETs. Despite the necessary sample size to achieve statistical significance was provided, it might have been better to have larger, and age-/ sex-matched samples.

In this study, we made a comprehensive integration of transcriptome data analysis and biological interaction network analysis to unravel systems-level molecular disease signatures and to elucidate repositioned drug candidates for the treatment of NF-PitNET. To the best of our knowledge, maprotiline is proposed as a repositioned drug candidate for the treatment of NF-PitNET for the first time. For a clear understanding of the effect of maprotiline on NF-PitNET considering molecular, genetic, and epigenetic alterations, it would be a crucial extension of this work to learn whether the results of the *in silico* studies can be recapitulated by *in vitro* and *in vivo* studies. The large unmet need for the treatment of NF-PitNETs should be addressed by future studies using efficient methodologies, with a particular emphasis on drug repositioning.

V. CONCLUSION

In this work, a systems biomedicine-driven, transcriptome-level omics analysis of NF-PitNETs was conducted, yielding comprehensive insights into the underlying TFs, genes, proteins, and miRNAs as DEGs-associated biomolecules. The NF-PitNET-specific DEGs represented the set of genes that might have crucial roles in disease mechanisms. The construction of biological networks around DEGs allows us to understand interactions that carry possible relations, considering disease pathogenesis. In light of the unmet therapeutic needs in the management of NF-PitNETs, using these important hub elements for identifying repositioned drugs has carried great potential. With this aim, a signature-driven drug repositioning analysis was conducted based on

presented hub elements and we confirmed our findings with computational analysis via molecular docking. Molecular docking analysis revealed that maprotiline—a tetracyclic antidepressant—exhibited higher binding affinities for the hub elements than their respective reference inhibitors. To conclude, maprotiline is proposed as a candidate repositioned therapeutic for the treatment of NF-PitNETs. Based on the available literature, this work provides the first evidence supporting the repositioning of maprotiline as a potential therapeutic candidate for the management of NF-PitNETs.

ACKNOWLEDGEMENTS

The author would like to thank BioRender.com, Figure 1 was created using trial version of the web-based tool.

CONFLICT of INTEREST

The author declares that the research was conducted in the absence of any commercial or financial relationships that could be construed as a potential conflict of interest.

Funding: This research did not receive any specific grants from any funding agency in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

REFERENCES

- [1] Asa, S.L., Casar-Borota, O., Chanson, P., Delgrange, E., Earls, P., Ezzat, S., et al. (2017). From pituitary adenoma to pituitary neuroendocrine tumor (PitNET): an International Pituitary Pathology Club proposal. *Endocrine-Related Cancer*, 24, C5–8.
- [2] Ostrom, Q.T., Gittleman, H., Truitt, G., Boscia, A., Kruchko, C., Barnholtz-Sloan, J.S. (2018). CBTRUS statistical report: primary brain and other central nervous system tumors diagnosed in the United States in 2011–2015. *Neuro-Oncology*, 20, iv1–86.
- [3] Daly, A.F., Beckers, A. (2020). The Epidemiology of Pituitary Adenomas. *Endocrinology and Metabolism Clinics of North America*, 49, 347–55.
- [4] Vargas, G., Gonzalez, B., Ramirez, C., Ferreira, A., Espinosa, E., Mendoza, V., et al. (2015). Clinical characteristics and treatment outcome of 485 patients with nonfunctioning pituitary macroadenomas. *International Journal of Endocrinology*, 2015.
- [5] Penn, D.L., Burke, W.T., Laws, E.R. (2018). Management of non-functioning pituitary adenomas: surgery. *Pituitary*, 21, 145–53.
- [6] Ilie, M.D., Raverot, G. (2020). Treatment options for gonadotroph tumors: current state and perspectives. *Journal of Clinical Endocrinology & Metabolism*, 105, e3507–18.
- [7] ClinicalTrials.gov [Internet]. National Library of Medicine (US); (accessed 2025 April 10).
- [8] Aydin, B., Arga, K.Y. (2019). Co-expression network analysis elucidated a core module in association with prognosis of non-functioning non-invasive human pituitary adenoma. *Frontiers in Endocrinology (Lausanne)*, 10, 361.
- [9] Gadelha, M.R., Kasuki, L., Dénes, J., Trivellin, G., Korbonits, M. (2013). MicroRNAs: Suggested role in pituitary adenoma pathogenesis. *Journal of Endocrinological Investigation*, 36, 889–95.
- [10] Gossing, W., Frohme, M., Radke, L. (2020). Biomarkers for Liquid Biopsies of Pituitary Neuroendocrine Tumors. *Biomedicines*, 8. <https://doi.org/10.3390/biomedicines8060148>.
- [11] Aydin, B., Caliskan, A., Arga, K.Y. (2021). Overview of omics biomarkers in pituitary neuroendocrine tumors to design future diagnosis and treatment strategies. *EPMA Journal*, 12, 383–401.
- [12] Aydin, B., Yildirim, E., Erdogan, O., Arga, K.Y., Yilmaz, B.K., Bozkurt, S.U., et al. (2022). Past, Present, and Future of Therapies for Pituitary Neuroendocrine Tumors: Need for Omics and Drug Repositioning Guidance. *Omi A Journal of Integrative Biology*, 26, 115–29.
- [13] Beylerli, O., Beeraka, N.M., Gareev, I., Pavlov, V., Yang, G., Liang, Y., et al. (2020). MiRNAs as Noninvasive Biomarkers and Therapeutic Agents of Pituitary Adenomas. *International Journal of Molecular Sciences*, 21, 7287.
- [14] Zhang, Z., Zhou, L., Xie, N., Nice, E.C., Zhang, T., Cui, Y., et al. (2020). Overcoming cancer therapeutic bottleneck by drug repurposing. *Signal Transduction and Targeted Therapy*, 5, 113.
- [15] Barrett, T., Wilhite, S.E., Ledoux, P., Evangelista, C., Kim, I.F., Tomashevsky, M., et al. (2012). NCBI GEO: archive for functional genomics data sets—update. *Nucleic Acids Research*, 41, D991–5.
- [16] Kober, P., Boresowicz, J., Rusetska, N., Maksymowicz, M., Paziewska, A., Dąbrowska, M., et al. (2019). The role of aberrant DNA methylation in misregulation of gene expression in gonadotroph nonfunctioning pituitary tumors. *Cancers (Basel)*, 11, 1650.
- [17] DeLellis, R.A. (2004). Pathology and genetics of tumours of endocrine organs. Vol. 8. IARC.

- [18] Knosp, E., Steiner, E., Kitz, K., Matula, C. (1993). Pituitary adenomas with invasion of the cavernous sinus space: a magnetic resonance imaging classification compared with surgical findings. *Neurosurgery*, 33, 610–8.
- [19] Love, M.I., Huber, W., Anders, S. (2014). Moderated estimation of fold change and dispersion for RNA-seq data with DESeq2. *Genome Biology*, 15, 1–21.
- [20] García-Moreno, A., López-Domínguez, R., Ramírez-Mena, A., Pascual-Montano, A., Aparicio-Puerta, E., Hackenberg, M., et al. (2021). GeneCodis 4: Expanding the modular enrichment analysis to regulatory elements. *BioRxiv*, 2004–21.
- [21] Zhou, Y., Zhou, B., Pache, L., Chang, M., Khodabakhshi, A.H., Tanaseichuk, O., et al. (2019). Metascape provides a biologist-oriented resource for the analysis of systems-level datasets. *Nature Communications*, 10, 1523. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-09234-6>.
- [22] Kanehisa, M., Araki, M., Goto, S., Hattori, M., Hirakawa, M., Itoh, M., et al. (2007). KEGG for linking genomes to life and the environment. *Nucleic Acids Research*, 36, D480–4.
- [23] The Gene Ontology Resource: 20 years and still GOing strong. (2019). *Nucleic Acids Research*, 47, D330–8. <https://doi.org/10.1093/nar/gky1055>.
- [24] Fabregat, A., Sidiropoulos, K., Garapati, P., Gillespie, M., Hausmann, K., Haw, R., et al. (2016). The Reactome pathway Knowledgebase. *Nucleic Acids Research*, 44, D481–7. <https://doi.org/10.1093/nar/gkv1351>.
- [25] Oughtred, R., Stark, C., Breitkreutz, B.-J., Rust, J., Boucher, L., Chang, C., et al. (2019). The BioGRID interaction database: 2019 update. *Nucleic Acids Research*, 47, D529–41.
- [26] Huang, H.-Y., Lin, Y.-C.D., Li, J., Huang, K.-Y., Shrestha, S., Hong, H.-C., et al. (2020). miRTarBase 2020: updates to the experimentally validated microRNA–target interaction database. *Nucleic Acids Research*, 48, D148–54.
- [27] Han, H., Cho, J.-W., Lee, S., Yun, A., Kim, H., Bae, D., et al. (2018). TRRUST v2: an expanded reference database of human and mouse transcriptional regulatory interactions. *Nucleic Acids Research*, 46, D380–6.
- [28] Saito, R., Smoot, M.E., Ono, K., Ruscheinski, J., Wang, P.-L., Lotia, S., et al. (2012). A travel guide to Cytoscape plugins. *Nature Methods*, 9, 1069–76.
- [29] Chin, C.-H., Chen, S.-H., Wu, H.-H., Ho, C.-W., Ko, M.-T., Lin, C.-Y. (2014). cytoHubba: identifying hub objects and sub-networks from complex interactome. *BMC Systems Biology*, 8 Suppl 4, S11. <https://doi.org/10.1186/1752-0509-8-S4-S11>.
- [30] Campillos, M., Kuhn, M., Gavin, A.-C., Jensen, L.J., Bork, P. (2008). Drug target identification using side-effect similarity. *Science*, 321, 263–6.
- [31] Duan, Q., Reid, S.P., Clark, N.R., Wang, Z., Fernandez, N.F., Rouillard, A.D., et al. (2016). L1000CDS2: LINCS L1000 characteristic direction signatures search engine. *NPJ Systems Biology and Applications*, 2, 16015. <https://doi.org/10.1038/npsba.2016.15>.
- [32] Kim, S., Chen, J., Cheng, T., Gindulyte, A., He, J., He, S., et al. (2019). PubChem 2019 update: improved access to chemical data. *Nucleic Acids Research*, 47, D1102–9. <https://doi.org/10.1093/nar/gky1033>.
- [33] Davis, A.P., Grondin, C.J., Johnson, R.J., Sciaky, D., Wieggers, J., Wieggers, T.C., et al. (2021). Comparative Toxicogenomics Database (CTD): update 2021. *Nucleic Acids Research*, 49, D1138–43. <https://doi.org/10.1093/nar/gkaa891>.
- [34] Berman, H., Henrick, K., Nakamura, H. (2003). Announcing the worldwide protein data bank. *Nature Structural & Molecular Biology*, 10, 980.
- [35] McGreig, J.E., Uri, H., Antczak, M., Sternberg, M.J.E., Michaelis, M., Wass, M.N. (2022). 3DLigandSite: structure-based prediction of protein–ligand binding sites. *Nucleic Acids Research*, 50, W13–20.
- [36] Gutmanas, A., Alhroub, Y., Battle, G.M., Berrisford, J.M., Bochet, E., Conroy, M.J., et al. (2014). PDBE: protein data bank in Europe. *Nucleic Acids Research*, 42, D285–91.
- [37] Trott, O., Olson, A.J. (2010). AutoDock Vina: improving the speed and accuracy of docking with a new scoring function, efficient optimization, and multithreading. *Journal of Computational Chemistry*, 31, 455–61.
- [38] Aydin, B., Arslan, S., Bayraklı, F., Karademir, B., Arga, K.Y. (2022). MicroRNA-Mediated Drug Repurposing Unveiled Potential Candidate Drugs for Prolactinoma Treatment. *Neuroendocrinology*, 112, 161–73.
- [39] Campana, C., Nista, F., Castelletti, L., Caputo, M., Lavezzi, E., Marzullo, P., et al. (2022). Clinical and radiological presentation of parasellar ectopic pituitary adenomas: case series and systematic review of the literature. *Journal of Endocrinological Investigation*, 45, 1465–81.

- [40] Islam, T., Rahman, M.R., Aydin, B., Beklen, H., Arga, K.Y., Shahjaman, M. (2020). Integrative transcriptomics analysis of lung epithelial cells and identification of repurposable drug candidates for COVID-19. *European Journal of Pharmacology*, 887. <https://doi.org/10.1016/j.ejphar.2020.173594>.
- [41] Di Somma, C., Scarano, E., de Alteriis, G., Barrea, L., Riccio, E., Arianna, R., et al. (2021). Is there any gender difference in epidemiology, clinical presentation and co-morbidities of non-functioning pituitary adenomas? A prospective survey of a National Referral Center and review of the literature. *Journal of Endocrinological Investigation*, 44, 957–68.
- [42] Van Leeuwaarde, R.S., Pieterman, C.R.C., May, A.M., Dekkers, O.M., Van der Horst-Schrivers, A.N., Hermus, A.R., et al. (2021). Health-related quality of life in patients with multiple endocrine neoplasia type 1. *Neuroendocrinology*, 111, 288–96.
- [43] Rafiee, L., Hajhashemi, V., & Javanmard, S.H. (2019). Maprotiline inhibits COX2 and iNOS gene expression in lipopolysaccharide-stimulated U937 macrophages and carrageenan-induced paw edema in rats. *Central European Journal of Biology*, 44(1), 15-22.
- [44] Liang, L., Li, Y., Jiao, Y., Zhang, C., Shao, M., Jiang, H., Wu, Z., Chen, H., Guo, J., Jia, H., & Zhao, T. (2024). Maprotiline prompts an antitumour effect by inhibiting PD-L1 expression in mice with melanoma. *Current Topics in Molecular Pharmacology*, 17(1), e18761429259562. <https://doi.org/10.2174/18761429259562230925055749>
- [45] Zhou, Y., Zhang, Y., Wang, Y., Xu, Y., Wang, J., & Zhang, Y. (2024). Network medicine-based strategy identifies maprotiline as a repurposable drug by inhibiting PD-L1 expression via targeting SPOP in cancer. *Advanced Science*, 11(1), 210285. <https://doi.org/10.1002/advs.202410285>
- [46] Zhu, Y., Bu, S., Curbo, S., & Johansson, M. (2023). Antidepressants as autophagy modulators for cancer therapy. *Molecules*, 28(22), 7594. <https://doi.org/10.3390/molecules28227594>.
- [47] Wishart, D.S., Feunang, Y.D., Guo, A.C., Lo, E.J., Marcu, A., Grant, J.R., et al. (2018). DrugBank 5.0: a major update to the DrugBank database for 2018. *Nucleic Acids Research*, 46(D1), D1074–D1082. <https://doi.org/10.1093/nar/gkx1037>.
- [48] Kästner, U., Hecht, K., Klinger, W. (1980). Distribution of maprotiline in brain regions of the rat. *Neuropharmacology*, 19(9), 797-801. [https://doi.org/10.1016/0028-3908\(80\)90106-8](https://doi.org/10.1016/0028-3908(80)90106-8).
- [49] Pardridge, W.M. (2005). The blood–brain barrier: bottleneck in brain drug development. *NeuroRx*, 2(1), 3-14. <https://doi.org/10.1602/neurorx.2.1.3>.