

23RD



INTERNATIONAL SCIENTIFIC
RESEARCH CONGRESS

SCIENCE AND ENGINEERING

05 - 06 JULY

2025

Full Text Book

Tam Metin Kitabı

www.ubaksymposium.org

Publishing Director / Yayın Yönetmeni

Muhammet ÖZCAN

Editor/ Editör

Prof. Dr. Bahri Bayram

Bu kitapta yayınlanan Bildiri Tam metinleri “Bookcites Kitap Atıf Dizini” tarafından taranmaktadır

**Cover Design / Kapak Tasarımı**

Bülent POLAT

Interior Design / İç Tasarım

Mahmut Sami TEMİZ

First Edition / Birinci Basım / ©

15 Temmuz 2025 - Ankara

ISBN: 978-625-5909-32-9**Asos Yayınevi****1st Edition** 15 July 2025**Address / Adres:** Çaydaçıra Mah. Hacı Ömer Bilginoğlu Cad. No:67/2-4/Merkez/Elazığ**E-Mail:** asos@asosyayinlari.com**Web:** www.asosyayinlari.com**Instagram:** <https://www.instagram.com/asosyayinevi/>**Facebook:** <https://www.facebook.com/asosyayinevi/>**Twitter:** <https://twitter.com/Asosyayinevi>**Ankara 2025**

B O R A D S / K U R U L L A R**Supporting Institutions / Destekleyen Kurumlar**

Atatürk Üniversitesi

Chairman of the Organizing Committee / Düzenleme Kurulu Başkanı

Prof. Dr. Bahri BAYRAM, Atatürk Üniversitesi

Congress Organizing Committee / Düzenleme Kurulu

Prof. Dr. Taşkın POLAT, Atatürk Üniversitesi

Asst.Prof.Dr. Burhanettin Ozdemir, Prince Sultan University

Prof. Dr. Irshad HUSSAİN, The Islamia University of Bahawalpur

Prof. Dr. Erdoğan ÖZTÜRK, Atatürk Üniversitesi

Prof. Dr. Marziyeh EBRAHİMİ, University of Tabriz

Prof. Dr. M. Kerim GÜLLAP, Atatürk Üniversitesi

Prof. Dr. Yerlan ANDEASBAYEV, Zhetysu State University, Kazakhstan

Prof. Dr. Adem KAYA, Atatürk Üniversitesi

Doç. Dr. Emel ÖZ, Atatürk Üniversitesi

Congress Scientific Committee / Bilim Kurulu

Doç. Dr. Mehmet Kadri AKYÜZ, Dicle Üniversitesi

Dr. Mammadova Ana, Baku Slav University

Prof.Dr. Recep AYDIN, Atatürk Üniversitesi

Prof. Dr. Yerlan ANDEASBAYEV, Zhetysu State University, Kazakhstan

Doç. Dr. Mahir Murat CENGİZ, Atatürk Üniversitesi

Doç. Dr. Huseyin COLAK, Northeastern Illinois University

Prof. Dr. Bülent ÇELİK, Gazi Üniversitesi

Doç. Dr. Abdülkerim DİLER, Atatürk Üniversitesi

Prof. Dr. Marziyeh EBRAHİMİ, University of Tabriz

Dr. Öğretim Üyesi Ayşe DEMİRHAN, Gazi Üniversitesi

Prof. Dr. M. Kerim GÜLLAP, Atatürk Üniversitesi

Prof. Dr. Irshad HUSSAİN, The Islamia University of Bahawalpur

Asst. Prof. Dr. Ateeq Ur Rehman Irshad, Prince Sultan University

Doç. Dr. Rita ISMAİLOVA, Kyrgyz-Turkish Manas University

Prof. Dr. Jose Miguel Molina JORDA, Universidad de Alicante

Prof. Dr. Yusuf Kağan KADIOĞLU, Ankara Üniversitesi,

Prof. Dr. Ersin KAYAHAN, Kocaeli Üniversitesi

Prof. Dr Daniela KERTİKOVA, Institute of Forage Crops, Pleven

Dr. Naseem Ahmad KHAN, The Islamia University of Bahawalpur

Doç. Dr. Şule KISAKÜREK, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi

Prof. Dr. Davoud KIANIFARD, University of Tabriz

Prof. Dr. İlkey KOCA, Ondokuz Mayıs Üniversitesi

Prof. Dr Todor KERTİKOV, Institute of Forage Crops, Pleven

Prof. Dr. Vahit KONAR, Amasya Üniversitesi

Doç. Dr. Matanat MEHRABOVA, Azerbaijan National Academy of Sciences, Baku

Prof. Dr. Efendi NASİBOĞLU, Dokuz Eylül Üniversitesi

Prof. Dr. Prof.Dr. Stephen Newton, Yerevan State University

Asst. Prof.Dr. Burhanettin Ozdemir, Prince Sultan University

Dr. Öğretim Üyesi Veysel Fatih ÖZDEMİR, Atatürk Üniversitesi

Prof. Dr. Hüseyin POLAT, Aksaray Üniversitesi

Prof. Dr. Oleg SYNYUK, Khmelnytsky National University, Ukraine

Prof. Dr. Akbar TAGHİZADEH, University of Tebriz

Prof. Dr. Taha TAŞKIRAN, Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi

Prof. Dr. Erkin TOKPANOV, Zhetysu State University, Kazakhstan

Prof. Dr. Nurzat Totubaeva Kyrgyz – Turkish Manas University



23th UBAK, 05 - 06 July 2025, Ankara



Doç. Dr. Selda Kapan ULUSOY, Gazi Üniversitesi
Prof. Dr. Viliana VASİLEVA, Institute of Forage Crops, Pleven
Doç. Dr. Pelin Köse YAMAN, Dokuz Eylül Üniversitesi

Sekretary / Sekreterya

Yasin ŞAHİN

Doç. Dr. Mahir Murat CENGİZ, Atatürk Üniversitesi
Prof. Dr. Adem KAYA, Atatürk Üniversitesi



TAM METİNLER PROCEEDINGS

İÇİNDEKİLER

Diadema Setosum Yağı ile Zenginleştirilmiş Kolajen Hidrojellerin Candida Tropicalis'e Karşı Antifungal Etkisinin İncelenmesi	7
Biyoloji Öğretmen Adaylarının Üstün Yetenekli Öğrencilere Yönelik Görüşlerinin İncelenmesi	14
Metoprololün Farmakolojik Özellikleri, Terapötik Endikasyonları ve Klinik Uygulanabilirliğinin Değerlendirilmesi	26
Regülasyon ve Performans İlişkisi: Elektrik Dağıtım Sektörü Özelinde Değerlendirme	35
Elektrik Dağıtım Sistemlerinde Güvenliği Artırmaya Yönelik Ark Hatası Önleyici Cihazın Geliştirilmesi ve Saha Uygulaması	44
Elektrik Dağıtım Sektöründe Sık Arızalanan İot Cihazlarının Arıza Tiplerinin Sınıflandırılması ve Önlenmesine Yönelik Yaklaşım	54
Havai Hatlarda Kısmi Deşarj Tespiti İçin Yeni Bir Yaklaşım	61
Elektrik Dağıtım Sektöründe Redresörlerin Uzaktan Takibi ve Akü Durum Analizi	73
Alan Yönlendirmeli Kontrol ile Kalıcı Mıknatıslı Senkron Motorun İncelenmesi	82
Yapay Zeka Destekli Sürü İHA'larda Lider Seçimi ve Formasyon kontrolü	93
İnsansız Hava Araçlarında Sürü Kontrol Yöntemlerinin Performans Analizi	102
Sürdürülebilirlik Odaklı Tedarik Zinciri ve Ürün Yaşam Döngüsü (Plm) Entegrasyonu: Döngüsel Ekonomi Perspektifinden Bir Yaklaşım	110
Helisel Kazıklarda Çekme Yüklerinin Sonlu Elemanlar Limit Analizi Yöntemiyle Belirlenmesi	118
Çapı En Fazla İki Olan Bazı Grafların G^{xy+} Transformasyonlarında Yarı Toplam Baskınlık Sayısı	128
Bitkisel ve Hayvansal Ürünlerin Karbon Ayak İzi Karşılaştırılması: Sürdürülebilir Beslenme İçin Yol Haritası	133
Gıda Sektöründe Karbon Ayak İzini Azaltma Stratejileri: Üreticide Tüketicie Yeşil Dönüşüm	141
Makine Öğrenmesi Tabanlı Yaklaşımlarla Sms Spam Tespiti: Tf-Idf ve Bert Karşılaştırması	151
Yoğunlaştırılmış Güneş Enerjisi ve Stirling Motor Kullanılarak Piezoelektrik Malzemeler ile Elektrik Enerjisini Üreten Sistem	161
Makine Öğrenmesi ile Ağ Anomalisi Tespiti: Çok Sınıflı ve İkili Sınıflandırma Yaklaşımlarının Karşılaştırılması	168
Şeker Pancarı Verimi ile Ndvı Değerleri Arasındaki İlişkinin Belirlenmesi	178
Gelişmekte Olan Ülkeler İçin Senkromodalite Konseptinin Uygulanabilirliği ve Sürdürülebilirliği	186
Kentsel Sokak Dönüşümünde Konsensüs Oluşturma: Yaşanabilir Şehirler İçin Katılımcı Planlama	192
Konya İlinde Hane Halklarının Bal ve Diğer Arı Ürünleri Tüketimi Üzerine Bir Araştırma ...	198
Atık Puzolanların Zemin Parkesinde Kullanılma Olanaklarının Araştırılması	205
Pom Malzemenin Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynağı	211
Lotka-volterra ve Seir Modellerinin Çözümünde Yapay Sinir Ağı Yönteminin Örtük Euler Yöntemi ile Karşılaştırmalı Analizi	223

Makale id= 2

Sözlü Sunum

| 7

ORCID ID: 0000-0003-4317-3000

Diadema Setosum Yağı ile Zenginleştirilmiş Kolajen Hidrojellerin Candida Tropicalis'e Karşı Antifungal Etkisinin İncelenmesi

Araştırmacı Bahircan Varolun¹, Araştırmacı Ayşegül Demircan¹, Doç.Dr. Elif Erdoğan Eliuz¹, Prof.Dr. Deniz Ayas¹

¹Mersin Üniversitesi Su Ürünleri Fakültesi

*Corresponding author: Elif Ayşe Erdoğan Eliuz

Özet: *Candida tropicalis*, özellikle bağışıklık sistemi baskılanmış bireylerde fırsatçı enfeksiyonlara yol açabilen, klinik açıdan önemli bir mantar türüdür. Hem mukozal hem de sistemik enfeksiyonlara neden olabilmesi ve antifungal tedavilere karşı direnç geliştirme potansiyeli, bu mikroorganizmayı ciddi bir sağlık tehdidi haline getirmektedir. Bu nedenle, doğal kaynaklı, etkili ve biyoyumlu antifungal ajanlara olan ihtiyaç her geçen gün artmaktadır. Bu çalışma, *Diadema setosum* (*D. setosum*) deniz kestanesi gonadlarından hekzan ile ekstrakte edilen yağın, kolajen bazlı bir hidrojel sistemine entegre edilerek, *Candida tropicalis* üzerindeki antifungal etkisinin değerlendirilmesini amaçlamıştır. Elde edilen yağ ekstraktının yağ asidi profili gaz kromatografisi-kütle spektrometrisi (GC-MS) ile analiz edilmiştir. Geliştirilen deniz kestanesi yağı ile zenginleştirilmiş kolajen hidrojel (DsCOL) formülasyonunun şişme davranışı, zeta potansiyeli ve kararlılığı incelenmiştir. Antifungal testler sonucunda, DsCOL hidrojelinin *Candida tropicalis* üzerinde anlamlı inhibisyon etkisi gösterdiği belirlenmiştir. Bu bulgular, DsCOL hidrojelinin antifungal etkinliği ve biyoyumluluğu sayesinde, potansiyel bir biyoaktif jel olarak yara örtüleri ve biyomedikal uygulamalarda değerlendirilebileceğini göstermektedir. Anahtar kelimeler: Kolajen, *Diadema setosum*, lipid ekstraktı, hidrojel, *Candida tropicalis*

Anahtar Kelimeler: Kolajen, *Diadema Setosum*, Lipid Ekstraktı, Hidrojel, *Candida Tropicalis*

Investigation of the Antifungal Effect of Collagen Hydrogels Enriched With *Diadema Setosum* Oil Against *Candida Tropicalis*

Abstract: *Candida tropicalis* is a clinically significant fungal species that can cause opportunistic infections, particularly in immunocompromised individuals. Its ability to lead to both mucosal and systemic infections and to develop resistance to antifungal therapies makes it a serious health threat. Therefore, there is a growing need for effective, biocompatible antifungal agents derived from natural sources. This study aimed to investigate the antifungal effect of oil extracted with hexane from the gonads of *Diadema setosum* (*D. setosum*), a long-spined sea urchin, incorporated into a collagen-based hydrogel system, against *Candida tropicalis*. The fatty acid composition of the extracted oil was analyzed using gas chromatography–mass spectrometry (GC-MS). The developed collagen hydrogel enriched with sea urchin oil (DsCOL) was evaluated for its swelling behavior, zeta potential, and stability. Antifungal tests revealed that the DsCOL hydrogel exhibited significant inhibitory effects against *Candida tropicalis*. These findings suggest that DsCOL hydrogel, due to its antifungal activity and biocompatibility, could serve as a potential bioactive gel for use in wound dressings and other biomedical applications.

Keywords: Collagen, *Diadema Setosum*, Lipid Extract, Hydrogel, *Candida Tropicalis*

1.Introduction

Candida tropicalis is a fungal species in the Ascomycota division, recognized for its rapid spread and high mortality rates, particularly among immunocompromised individuals (Boran et al., 2024). Recently, it has emerged as a significant non-albicans *Candida* species found in blood coolers, associated with nosocomial infections (Pfaller et al., 2011). This indicates that *C. tropicalis* may account for 50% of *Candida* infections, although some strains of *C. glabrata* are also documented. Notably, during the COVID-19 pandemic, the strains of *C. tropicalis* and *C. parapsilosis* remained unchanged (Pienthong et al., 2023). *C. tropicalis* is characterized by its high virulence and drug resistance, particularly due to its ability to adhere to surfaces and form biofilms. These biofilms contribute to resistance against antifungal treatments, resulting in persistent infections (Silva et al., 2012; Tseng et al., 2020). Furthermore, resistance to antifungals like fluconazole highlights the need for developing new treatment alternatives (Boran et al., 2023).

Hydrogels are semi-liquid, soft, or slightly rigid structures made up of cross-linked hydrophilic polymer networks. Their properties and structure can vary based on the attachment points within their three-dimensional frameworks (Ahmed, 2015). Physical hydrogels feature reversible, non-covalent bonds, including hydrogen bonds, van der Waals forces, hydrophobic interactions, and ionic interactions; an example of this category is calcium alginate gels (Mohammadinejad et al., 2019).

Recently, there has been a growing interest in natural polymer-based hydrogels. Biodegradable and biocompatible materials such as gelatin, collagen, alginate, and agarose are emerging as viable alternatives to synthetic hydrogels (Boran et al., 2023). Collagen, a crucial polymer that comprises hydroxyproline and various functional groups, accounts for 25% of the body's proteins (Sun et al., 2017; Zhang et al., 2018). Its biocompatibility, low antigenic structure, and hemostatic properties make it widely used in wound dressings (Owczarzy et al., 2020; Sahiner et al., 2018). Additionally, when combined with chitosan, collagen enhances hemostasis and provides better permeability control.

Protein-based hydrogels are also favored for transporting food additives and bioactive components due to their Generally Recognized As Safe (GRAS) status, encapsulation capacity, and safety as food carriers (Chen et al., 2006; Reddy et al., 2015; Sarrigiannidis et al., 2021). In the medical field, these hydrogels have diverse applications ranging from tissue engineering and drug delivery systems to wound dressings and biosensors (Caló et al., 2015).

This study presents, for the first time, the anti-candidal activity and time-dependent death dynamics of a collagen-based *D. setosum* hydrogel against *Candida tropicalis*. Additionally, the stability, zeta potential, and swelling performance of this hydrogel were investigated.

2. Materials

2.1. Preparation of *D. setosum* Gonad Extraction and Oil Analysis

Sea urchins (*D. setosum*) were collected from the coasts of Aydıncık/Mersin between May and August 2024. The samples were transported to the laboratory under a cold chain at -20°C. Dissection was performed to remove the gonads, which were then subjected to the Soxhlet extraction process using 200 mL of hexane as the solvent. A 10-gram sample was placed in the Soxhlet apparatus, and the hexane was subsequently removed using a rotary evaporator. The remaining oil was utilized for further experiments, and GC/FID analysis was conducted following the methodology described by Erdogan Eliuz et al. (2024). In brief, a 7890A GC 5975C MSD (Agilent) instrument equipped with an HP-5MS column (30 m x 250 µm x 0.25 µm) was employed. The temperature was initially set at 50°C and gradually increased to 250°C and then to 300°C in a few minutes. The identified components were analyzed by comparing them with data from the NIST 2008 (National Institute of Standards and Technology) and National Standards Institute databases.

2.2. Preparation of *D. setosum*-based collagen hydrogel (DsCOL)

Before beginning the study, a 30% collagen solution was prepared in a tube, followed by homogenization using a homogenizer. The collagen solution was then boiled for 10 minutes with a heated magnetic stirrer. Next, 1 mL of *D. setosum* gonad oil was added to a tube containing 1 mL of the collagen solution. The mixture was blended for 15 minutes using the homogenizer and heater. During this process, 100 µL of 25% glutaraldehyde was incorporated into the sample to facilitate cross-linking.

The final product *D. setosum* gonad oil based collagen hydrogel (DsCOL) was allowed to mature in the refrigerator at 10°C.

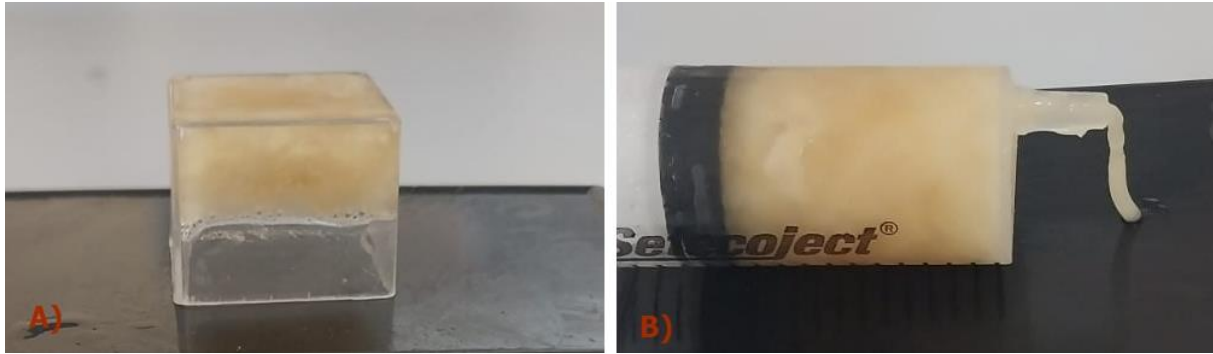


Figure 1. DsCOL hydrogel at 10°C on the 10th day (A); at 25°C on the 10th day (B)

2.3. Swelling Measurements, Zeta Potential, and Stability of DsCOL

The 1 gram of DsCOL was fully dried in a lyophilizer, then weighed on a precision balance and completely immersed in 50 ml of distilled water. The sample was left at room temperature for 3 hours and then hung for 10 minutes to remove excess water. Equilibrium swelling (ES) was calculated using Equation 1.

$$ES(\%) = (W2 - W1) / W1 * 100 \text{ (Equation 1)}$$

In this equation, W1 and W2 represent the weights of the dry and swollen gel, respectively.

A zeta sizer device was used for zeta measurement and the 10-day gel form of DsCOL was visually evaluated.

2.4. Antimicrobial activity of *D. setosum* extract and DsCOL on *Candida tropicalis*

Agar well diffusion was employed to test the antifungal activity of *D. setosum* and DsCOL. Prior to the experiment, *Candida tropicalis* (ATCC 750) was cultured in 5 mL of tryptic soy broth for 24 hours. Following this incubation, 0.5 McFarland standards were prepared. Using the well diffusion method, six 6-mm wells were drilled into the surface of Mueller Hinton Agar plates, and the 0.5 McFarland microbial cultures were evenly spread across the agar. Subsequently, 50 µL of either *D. setosum* oil or DsCOL was added to each well. The plates were then incubated at 35°C for 24 hours to allow the formation of inhibition zones, which were measured using a caliper.

2.5. Time related dynamics of mortality of the pathogens on exposure to DsCOL

Five microliters of bacterial inoculum (McFarland 0.5) was transferred into tubes containing 50 microliters of Dhyd and vortexed for 5 minutes. A negative control was also prepared using DsCOL following the same procedure. All samples, at three different concentrations, were incubated at 35°C for 15 minutes in a shaking incubator. After incubation, the ELISA plates were removed and placed into sterile glass tubes containing 1 milliliter of saline, then shaken for 5 minutes in the shaking incubator to facilitate the transfer of yeasts into the saline. Following a 10⁻² serial dilution of the samples, 5 microliters from each tube were inoculated onto MHA plates and incubated at 35°C for 24 hours. After one day, colonies were counted visually, and logarithmic reduction and percent inhibition were calculated using equations (1,2).

$$\text{Percent Reduction \%} = \left[\frac{OD_x}{OD_c} \right] * 100 = \frac{(A-B) * 100}{A} \quad \text{Eq.1.}$$

$$\text{Logarithmic decrement} = \text{Log}_{10} \frac{A}{B} = \text{Log}_{10}(A) - \text{Log}_{10}(B)$$

Eq. 2.

Statistical analysis

The analyses and significance were tested using One-way ANOVA with post-hoc Tukey HSD Test (p -value < 0.05).

3. Result and Discussion

3.1. *D. setosum* components and some properties of DsCOL

The dominant components of *D. setosum* were identified through GC analysis as follows: C18:1 cis-9-oleic acid (9.30%), C18:2 n-6 linoleic acid (8.5%), C18:1 trans-9-elaidic acid (5.2%), C18:2 trans-linolelaidic acid (3.9%), C16:0 palmitic acid (3.8%), C20:5n3 EPA (3.0%), and C17:0 margaric acid (0.9%). These results align with findings from several studies in the literature. For instance, Muhammad et al. (2020) reported through GC-MS analysis of gonad extract the presence of n-hexadecanoic acid (39.66%), 9-octadecenoic acid (Z)-methyl ester (23.1%), and tetradecanoic acid (21.01%).

In this study, we developed a collagen hydrogel incorporating *D. setosum* lipids. The zeta potential and conductivity of DsCOL were measured at -15.2 ± 0.04 mV (Figure 2) and 0,0580 mS/cm, respectively ($p < 0.05$). The maximum particle size and PDI recorded were 2610 d.nm and 1 (Figure 3).

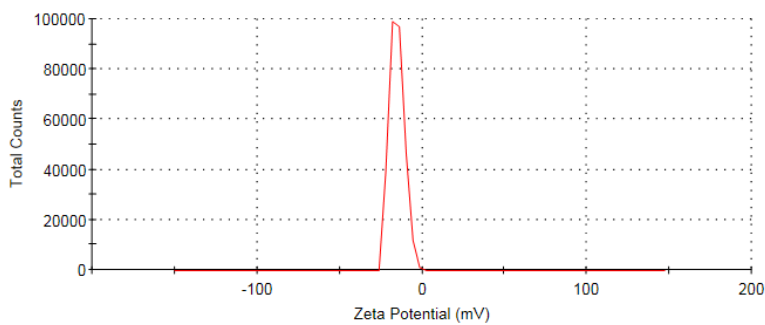


Figure 2. Zeta potential of DsCOL hydrogel.

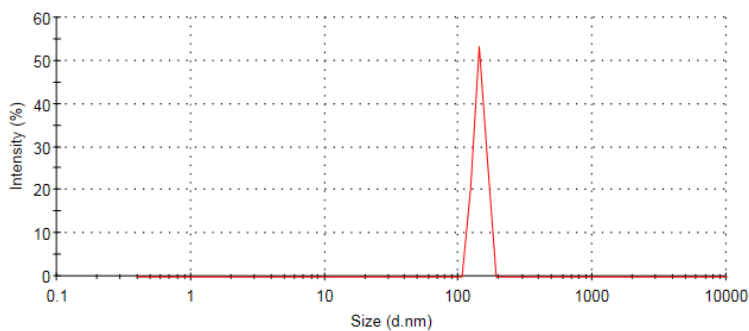


Figure 3. The size distribution of DsCOL hydrogel.

According to literature that zeta potentials between -30 mV and $+30$ mV are considered stable (Erdogan Eliuz et al., 2022). The water retention capacity of DsCOL hydrogel is a key indicator of stability in gel systems, offering insights into how the gel structure disintegrates under various stress conditions (De Vries et al., 2015). In our study, the water retention capacity (WHC) of DsCOL was measured at 140.0%, 178.7%, and 128.0% (Figure 4).

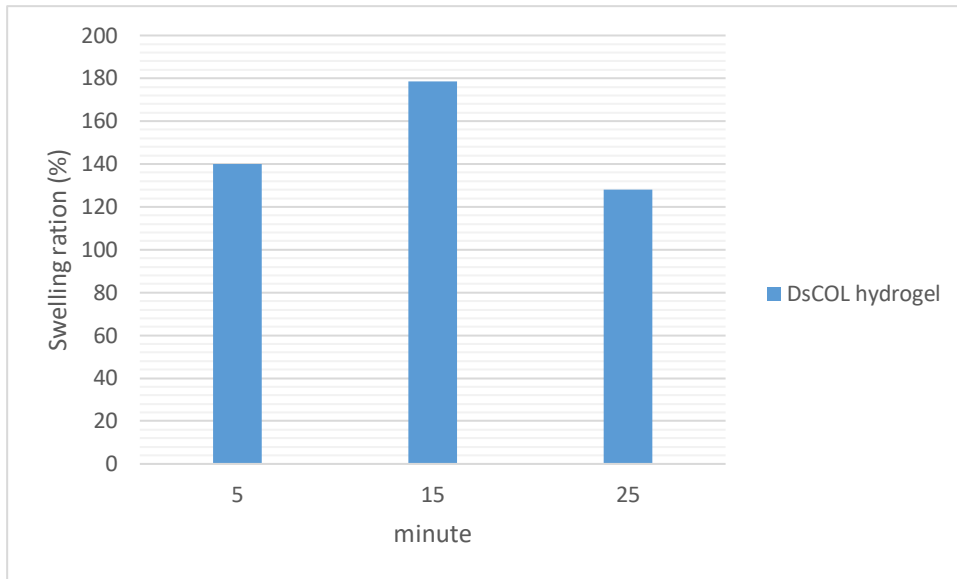


Figure 4. Swelling ration of DsCOL hydrogel

While some dissolution occurred in the aqueous environment over the 15-hour period, complete disintegration did not take place. The swelling ratio indicates the expansion of biopolymers that absorb water. In gels, crosslinkers facilitate the diffusion of water in the transition regions (Begam et al., 2003; Cates, 2010).

3.2. Anticandidal activity of DsCOL hydrogel

Figure 4 illustrated the antifungal activity of *D. setosum* oil and DsCOL hydrogel. The extract and the hydrogel demonstrated inhibitory effects against *C. tropicalis*. The inhibition zones on *C. tropicalis* was measured 38.2 ± 4.5 mm and 8.8 ± 2.1 mm (Figure 5) for *D. setosum* oil and DsCOL hydrogel, respectively ($p < 0.05$).

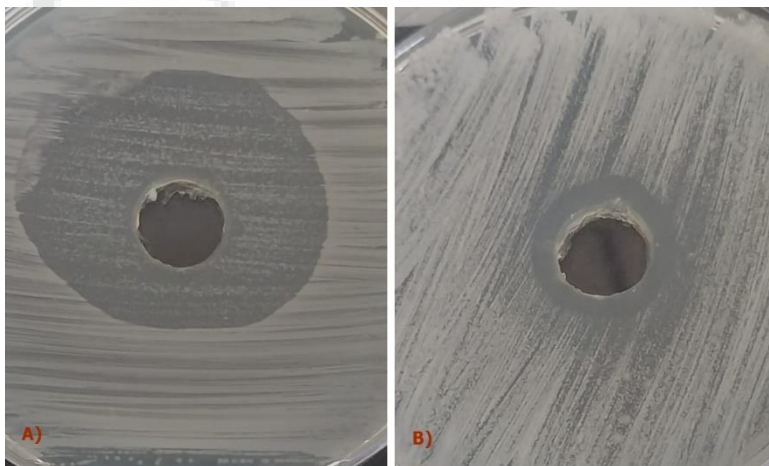


Figure 5. IZ of *D. setosum* oil (A); DsCOL hydrogel (B)

The inhibitions of *C. tropicalis* were %33.8; %67.1 and %89.5 at the day of 5, 15 and 25 after treatment with DsCOL hydrogel. In our study, DsCOL hydrogels inhibited *C. tropicalis* by 33%, 67.1% and 89.5% at 5, 15 and 25 minutes, respectively (Figure 6).

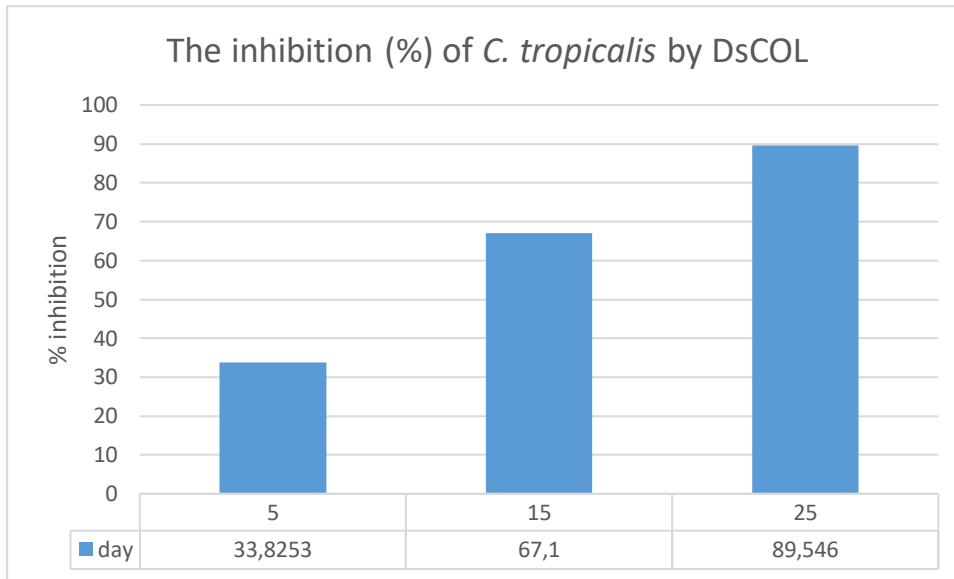


Figure 6. The inhibition of *C. tropicalis* by DsCOL

Hydrogel formulations that incorporate methylcellulose (Serra et al., 2020), Ginja cherry extract (Campos et al., 2014), thyme (*Origanum vulgare*) (Otoni et al., 2014), and essential oils from *Jania rubens* algae (Boren et al., 2023) have been developed due to their excellent water absorption capabilities and antimicrobial properties. Notably, methylcellulose and *Jania rubens* hydrogels are recommended for oral mucosa and/or vaginal applications because of their ability to adhere effectively to mucosal surfaces (Gafitanu et al., 2017; Boran et al., 2023). This study presents the novel finding that *D. setosum* hydrogel rapidly inhibits fungal growth in the presence of *Candida*.

Conclusion

This study tested the antifungal activity of *D. setosum* extract and its collagen-based hydrogel against *Candida tropicalis*. The results showed a significant inhibition of *Candida tropicalis*, along with stable bioactive properties of the hydrogel over time. Consequently, this suggests that the collagen-based *D. setosum* hydrogel has potential for use in treating infections, particularly those associated with vaginal diseases.

Acknowledgements: This study funded by Mersin University Research Fund (Project No: 2023-2-TP2-4954).

References

- Ahmed, E. M. (2015). Hydrogel: Preparation, characterization, and applications: A review. *Journal of Advanced Research*, 6, 105–121.
- Boran, M., Eliuz, E. E., & Ayas, D. (2024). The Anti-candidal and Absorbion Performance of PVA/PVP-Based *Jania rubens* Hydrogel on *Candida tropicalis* and Some Physicochemical Properties of the Hydrogel. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 196(12), 8848–8865.
- Caló, E., & Khutoryanskiy, V. V. (2015). Biomedical applications of hydrogels: A review of patents and commercial products. *European Polymer Journal*, 65, 252–267.
- Campos, D., Piccirillo, C., Pullar, R. C., Castro, M. L., & Pintado, M. M. E. (2014). Characterization and antimicrobial properties of food packaging methylcellulose films containing stem extract of Ginja cherry. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 94, 2097–2103.
- Chen, L., Remondetto, G. E., & Subirade, M. (2006). Food protein-based materials as nutraceutical delivery systems. *Trends in Food Science & Technology*, 17, 272–283.

- Eliuz, E. E., Yabalak, E., & Ayas, D. (2024). Inhibition performance of almond shell hydrochar-based fish oil emulsion gel on *Klebsiella pneumonia* inoculated fish skin and its characteristics. *International Journal of Biological Macromolecules*, 264, 130529.
- Gafitanu, C. A., Filip, D., Cernatescu, C., Rusu, D., Tuchilus, C. G., Macocinschi, D., & Zaltariov, M. (2017). Design preparation and evaluation of HPMC-based PAA or SA freeze-dried scaffolds for vaginal delivery of fluconazole. *Pharmaceutical Research*, 34, 2185–2196.
- Mohammadinejad, R., Maleki, H., Larraneta, E., Fajardo, A. R., Nik, A. B., Shavandi, A., Sheikhi, A., Ghorbanpour, M., Farokhi, M., Govindh, P., Cabane, E., Azizi, S., Aref, A. R., Mozafari, M., Mehrali, M., Thomas, S., Mano, J. F., Mishra, Y. K., & Thakur, V. K. (2019). Status and future scope of plant-based green hydrogels in biomedical engineering. *Applied Materials Today*, 16, 213–246.
- Owczarzy, A., Kurasiński, R., Kulig, K., Rogóż, W., Szkudlarek, A., & Maciążek-Jurczyk, M. (2020). Collagen – structure, properties and application. *Engineering Biomaterials*, 23, 156.
- Otoni, C. G., Pontes, S. F. O., Medeiros, E. A. A., & Soares, N. F. (2014). Edible films from methylcellulose and nanoemulsions of clove bud (*Syzygium aromaticum*) and oregano (*Origanum vulgare*) essential oils as shelf life extenders for sliced bread. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 62, 5214–5219.
- Pfaller, M. A., Diekema, D. J., Andes, D., Arendrup, M. C., Brown, S. D., Lockhart, S. R., ... & Perlin, D. S. (2011). Clinical breakpoints for the echinocandins and *Candida* revisited: Integration of molecular, clinical, and microbiological data to arrive at species-specific interpretive criteria. *Drug Resistance Updates*, 14(3), 164–176.
- Pienthong, T., Visuttichaikit, S., Apisarnthanarak, P., Jantarathaneewat, K., Weber, D. J., & Apisarnthanarak, A. (2023). Increase in the incidence of *Candida parapsilosis* and *Candida tropicalis* bloodstream infections during the coronavirus disease 2019 (COVID-19) pandemic. *Antimicrobial Stewardship & Healthcare Epidemiology*, 3(1), e2.
- Reddy, N., Reddy, R., & Jiang, Q. (2015). Crosslinking biopolymers for biomedical applications. *Trends in Biotechnology*, 33, 362–369.
- Sahiner, M., Sagbas, S., Turan, A., Erdugan, H., & Sahiner, N. (2018). Yara kaplama malzemesi olarak kollajen esaslı hidrojel filmleri. *Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 4, 103–116.
- Sarrigiannidis, S. O., Rey, J. M., Dobre, O., González-García, C., Dalby, M. J., & Salmeron-Sanchez, M. (2021). A tough act to follow: Collagen hydrogel modifications to improve mechanical and growth factor loading capabilities. *Materials Today Bio*, 10, 100098.
- Serra, E., Saubade, F., Ligorio, C., Whitehead, K., Sloan, A., Williams, D. W., Hidalgo-Bastida, A., Verran, J., & Malic, S. (2020). Methylcellulose hydrogel with *Melissa officinalis* essential oil as a potential treatment for oral candidiasis. *Microorganisms*, 8, 1–13.
- Silva, S., Negri, M., Henriques, M., Oliveira, R., Williams, D. W., & Azeredo, J. (2012). *Candida glabrata*, *Candida parapsilosis* and *Candida tropicalis*: Biology, epidemiology, pathogenicity and antifungal resistance. *FEMS Microbiology Reviews*, 36(2), 288–305.
- Sun, L., Li, B., Song, W., Si, L., & Hou, H. (2017). Characterization of Pacific cod (*Gadus macrocephalus*) skin collagen and fabrication of collagen sponge as a good biocompatible biomedical material. *Process Biochemistry*, 63, 229–235.
- Tseng, Y. K., Chen, Y. C., Hou, C. J., Deng, F. S., Liang, S. H., Hoo, S. Y., Hsu, C. C., Ke, C. L., & Lin, C. H. (2020). Evaluation of biofilm formation in *Candida tropicalis* using a silicone-based platform with synthetic urine medium. *Microorganisms*, 8(5), 1–14.
- Zhang, J., Tan, W., Wang, G., Yin, X., Li, Q., Dong, F., & Guo, Z. (2018). Synthesis, characterization, and the antioxidant activity of *N,N,N*-trimethyl chitosan salts. *International Journal of Biological Macromolecules*, 118, 9–14.

Makale id= 5

Sözlü Sunum

ORCID ID: 0009-0005-6365-4495

| 14

Biyoloji Öğretmen Adaylarının Üstün Yetenekli Öğrencilere Yönelik Görüşlerinin İncelenmesi**Araştırmacı Canan Yılmaz¹, Prof.Dr. Mehmet Yılmaz¹**¹Gazi Üniversitesi Gazi Eğitim Fakültesi, Biyoloji Eğitimi Anabilim Dalı, Ankara, Türkiye.

*Corresponding author: Canan Yılmaz

Özet: Bu araştırmanın amacı, biyoloji öğretmen adaylarının üstün yetenekli öğrencilere yönelik görüşlerini incelemek ve bu görüşleri, tanılama süreçleri ile öğretimsel yaklaşımlar bağlamında değerlendirmektir. Nitel araştırma desenlerinden durum çalışması modeli kullanılarak yürütülen bu çalışmanın çalışma grubunu, 2025-2026 eğitim-öğretim yılında bir devlet üniversitesinde biyoloji eğitimi lisans programında öğrenim gören 25 öğretmen adayı oluşturmaktadır. Araştırmanın verileri, araştırmacı tarafından geliştirilen yarı yapılandırılmış görüşme formu aracılığıyla toplanmış, elde edilen veriler içerik analizi yöntemiyle analiz edilmiştir. Araştırma bulguları doğrultusunda öğretmen adaylarının üstün yetenekli öğrencilere ilişkin tanımlarında zihinsel kapasite, hızlı öğrenme, farklı bakış açısı ve belirli alanlarda gösterdikleri özel yeteneklerin öne çıktığı görülmüştür. Eğitim ihtiyaçlarına yönelik olarak, zenginleştirilmiş ve bireyselleştirilmiş öğretim yaklaşımlarına, gelişmiş materyal kullanımına ve öğrenci merkezli esnek öğretim yöntemlerine duyulan ihtiyaç vurgulanmıştır. Bununla birlikte öğretmen adayları, öğretim sürecinde karşılaşılabilecekleri temel zorluklar arasında bilgi eksikliği, materyal yetersizliği, sınıf içi dengeyi kurma güçlüğü ve öğrencinin hızına uyum sağlayamama gibi faktörleri belirtmiştir. Mesleki gelişim açısından ise adaylar; derinlemesine alan bilgisi, farklılaştırılmış öğretim planlama becerisi, proje rehberliği, gözlem ve tanılama yetkinlikleri ile akademik kaynaklara erişim gibi unsurlarda kendilerini geliştirme gereksinimi hissettiklerini ifade etmişlerdir. Sonuç olarak, biyoloji öğretmen adaylarının üstün yetenekli öğrencilere yönelik farkındalıklarının geliştirilmesi, öğretmen yetiştirme programlarının içeriğinde bu öğrencilere yönelik daha bütüncül ve uygulamalı bir yaklaşım benimsenmesi gerektiği önerilmektedir. Bu bağlamda elde edilen bulguların, öğretmen adaylarının hizmet öncesi eğitimlerinin iyileştirilmesine katkı sunacağı ve üstün yetenekli bireylerin eğitim süreçlerine nitelik kazandıracağı düşünülmektedir.

Anahtar Kelimeler: Üstün Yeteneklilik, Biyoloji Öğretmen Adayları, Öğretmen Adayı Görüşleri

A Study On the Views of Pre-Service Biology Teachers Regarding Gifted Students

Abstract: The aim of this study is to examine pre-service biology teachers' views on gifted students and to evaluate these views within the context of identification processes and instructional approaches. The study was conducted using the case study model, one of the qualitative research designs. The study group consisted of 25 pre-service teachers enrolled in a biology education undergraduate program at a public university in Turkey during the 2024–2025 academic year. Data were collected through a semi-structured interview form developed by the researcher and analyzed using content analysis. The findings revealed that participants primarily defined gifted students in terms of high cognitive capacity, rapid learning, unique perspectives, and domain-specific talents. In terms of educational needs, participants emphasized the importance of enriched and individualized teaching strategies, the use of advanced instructional materials, and student-centered flexible teaching methods. Regarding potential challenges in the instructional process, participants cited limited subject-matter knowledge, insufficient materials, difficulties in balancing classroom dynamics, and adapting to the pace of gifted learners. For their own professional development, they highlighted the need to improve in-depth subject knowledge, differentiated instruction planning, project-based guidance, observation and identification skills, as well as access to academic resources. In conclusion, the findings suggest that raising awareness among pre-service biology teachers about gifted learners is essential. It is recommended that teacher training programs adopt a more comprehensive and practice-oriented approach to address the specific educational needs of gifted students. The results of this study

are expected to contribute to the enhancement of pre-service teacher education and the improvement of educational practices for gifted individuals.

Keywords: Giftedness, Pre-Service Biology Teachers, Pre-Service Teachers' Opinions On

GİRİŞ

Üstün zekâ ve üstün yetenek kavramları, tarih boyunca hem bilim insanlarının hem de eğitimcilerin dikkatini çeken önemli olgular arasında yer almıştır. Bu bireyler; yüksek öğrenme kapasitesi, yaratıcı düşünme becerileri ve çeşitli alanlarda sergiledikleri olağanüstü başarılarla toplumların bilimsel, kültürel ve teknolojik gelişiminde önemli roller üstlenmektedir. Üstün yetenekli bireyler yalnızca bireysel başarılarıyla değil, aynı zamanda toplumsal kalkınma açısından da stratejik bir değer taşımaktadır (Kulaksızoğlu, Bilgili & Şirin, 2004). Bu bağlamda, üstün yetenekli bireylerin erken dönemde tanınması, uygun eğitim ortamlarında desteklenmeleri ve potansiyellerini en üst düzeyde kullanabilmeleri için yapılandırılmış eğitim süreçlerine dahil edilmeleri büyük önem arz etmektedir (Baykoç Dönmez, 2009).

Millî Eğitim Bakanlığı (MEB), üstün yetenekli bireyleri; akranlarına kıyasla daha hızlı öğrenen, yaratıcılık, liderlik, sanat ve akademik yetenek alanlarında yüksek performans gösteren bireyler olarak tanımlamaktadır (MEB, 2019). Bu tanım doğrultusunda Türkiye’de üstün yetenekli öğrencilerin eğitim ihtiyaçları; destek eğitim odaları, Bilim ve Sanat Merkezleri (BİLSEM) gibi özel kurumlar aracılığıyla karşılanmaktadır (Bolat, 2020). Ancak bu sürecin ilk adımı olan tanılama ve yönlendirme aşaması çoğunlukla sınıf öğretmenlerinin gözlem ve değerlendirmelerine dayandığından, öğretmenlerin üstün yetenekli bireylere ilişkin bilgi düzeyi, algı ve tutumları bu öğrencilerin eğitime erişiminde belirleyici olmaktadır (Seyhan, 2015; Davis & Rimm, 2004).

Geçmişten günümüze yapılan çalışmalar, öğretmenlerin üstün yetenekli öğrencilere yönelik farkındalıklarının ve pedagojik yeterliklerinin, bu öğrencilerin eğitsel başarıları üzerinde doğrudan etkili olduğunu göstermektedir (Çapan, 2010; Aydın & Şentürk, 2020). Nitekim öğretmenlerin sahip oldukları tutumlar, yalnızca öğrencilerin tanınmasında değil, aynı zamanda onlara sunulacak farklılaştırılmış eğitim yaklaşımlarının niteliğinde de belirleyici bir role sahiptir (Heacox, 2012; Tomlinson, 1999).

Fen bilimleri eğitimi, üstün yetenekli öğrencilerin doğal eğilim ve ilgi alanlarıyla örtüşmesi nedeniyle bu bireylerin potansiyelini açığa çıkarma konusunda ayrı bir önem arz etmektedir. Özellikle biyoloji eğitimi, analitik düşünme, gözlem yapma, deneysel süreçleri yönetme ve bilimsel sorgulama gibi temel becerilerin gelişimini desteklemesi bakımından üstün yetenekli öğrenciler için zengin bir öğrenme alanı sunmaktadır (Subotnik, Olszewski-Kubilius & Worrell, 2011). Bu nedenle, biyoloji öğretmen adaylarının üstün yetenekli öğrencilere yönelik algı, bilgi düzeyi ve pedagojik yaklaşımları hem bu öğrencilerin eğitim süreçlerini hem de öğretim kalitesini doğrudan etkilemektedir.

Biyoloji öğretmen adaylarının, özellikle fen bilimleri temelli öğrenme ortamlarında, üstün yetenekli öğrencilere yönelik görüş ve yaklaşımlarının ortaya konması; hem öğretmen yetiştirme programlarının gelişimi açısından hem de üstün yetenekli öğrencilerin bu alanlardaki gelişimlerinin desteklenmesi açısından önem arz etmektedir. Literatürde sınıf öğretmenlerinin tutum ve algılarına yönelik çeşitli çalışmalar yer almakla birlikte (Akar & Şengil-Akar, 2012; Ekinci, Sümer, Bozan & Çete, 2018; Şahin, 2013), fen bilimleri öğretmen adaylarının görüşlerine odaklanan çalışmaların sayısı oldukça sınırlıdır. Bu nedenle, biyoloji öğretmen adaylarının üstün yetenekli öğrencilere ilişkin görüşlerinin incelenmesi, hem alan yazındaki boşluğun giderilmesine katkı sağlayacak hem de öğretmen yetiştirme programlarına yönelik öneriler geliştirilmesine olanak tanıyacaktır.

Bu araştırmanın amacı, biyoloji öğretmen adaylarının üstün yetenekli öğrencilere yönelik görüşlerini ortaya koymak ve bu görüşlerin tanılama, yönlendirme ve öğretim süreçlerine yansımalarını incelemektir. Böylece öğretmen adaylarının mevcut yeterlik düzeylerinin belirlenmesi ve ihtiyaç duyulan alanlara ilişkin geliştirme çalışmalarının planlanması hedeflenmektedir.

Araştırmanın Problemi

Biyoloji öğretmen adaylarının üstün yetenekli öğrencilere ilişkin bilgi düzeyleri, algıları ve tutumları; bu öğrencilerin eğitim süreçlerinde karşılaştıkları ihtiyaçların anlaşılması ve uygun öğretim

stratejilerinin geliştirilmesi açısından kritik öneme sahiptir. Ancak mevcut literatür, fen eğitimi alanında öğrenim gören öğretmen adaylarının üstün yetenekli bireyleri tanıma, değerlendirme ve onlara yönelik öğretim uygulamaları geliştirme konusundaki yeterliliklerine dair sınırlı sayıda çalışmanın bulunduğu ortaya koymaktadır. Bu durum, biyoloji öğretmen adaylarının üstün yetenekli öğrencilere yönelik görüşlerinin sistematik bir biçimde incelenmesini gerekli kılmaktadır.

Araştırmanın Alt Problemleri

- Biyoloji öğretmen adayları, üstün yetenekli öğrencileri nasıl tanımlamaktadır?
- Bu öğrencilerin özelliklerine ilişkin ne tür bilgilere sahiptirler?
- Üstün yetenekli öğrenciler için nasıl öğretim yaklaşımlarının uygulanması gerektiğini düşünmektedirler?
- Kendi eğitim süreçlerinin bu konuda yeterli olup olmadığını nasıl değerlendirmektedirler?
- Üstün yetenekli öğrencilere yönelik farklılaştırılmış öğretim uygulamaları hakkında bilgi düzeyleri nedir?
- Tanılama ve yönlendirme sürecinde öğretmenlerin rolüne ilişkin ne düşünüyorlar?

Araştırmanın Amacı

Biyoloji öğretmenlerinin sınıf ortamında üstün yetenekli öğrencilerin farkına varmaları ve tanılama sürecinde öğrencileri desteklemeleri bağlamında, bu çalışmanın amacı, biyoloji öğretmeni adaylarının üstün yetenekli öğrencilere ilişkin görüşlerini derinlemesine analiz etmek ve bu görüşlerin eğitim sürecine etkilerini ortaya koymaktır. Araştırma sonucunda elde edilecek bulguların, hem üstün yetenekli bireylerin daha nitelikli bir şekilde tanılanmasına hem de öğretmen adaylarının hizmet öncesi eğitimlerinin zenginleştirilmesine katkı sunması beklenmektedir. Ayrıca bu çalışma ile hem öğretmen eğitimi literatürüne katkı sağlanacak hem de eğitim politikalarının şekillenmesinde temel olarak yer alacaktır.

YÖNTEM

Araştırmanın bu bölümünde; araştırmanın modeli, araştırmanın çalışma grubu, araştırmanın veri toplama aracına ve araştırmanın veri analizinde kullanılan tekniklere yönelik bilgiler yer almaktadır.

Araştırmanın modeli

Bu çalışmada biyoloji öğretmen adaylarının üstün yetenekli öğrencilere yönelik görüşlerini derinlemesine inceleyebilmek amacıyla nitel araştırma desenlerinden olan durum çalışması modeli tercih edilmiştir. Durum çalışması, araştırma konusunun bütünsel olarak ve derinlemesine analiz edilmesini sağlayan yöntemdir (Creswell, 2007). Bu bağlamda durum çalışması ile araştırılmak istenen konu belirli bir sistem içerisinde olayların ve durumların daha ayrıntılı ve kapsamlı bir şekilde incelenmesini sağlamaktadır. Ayrıca yapılan araştırmalara göre durum çalışmalarının en büyük avantajı, ele alınan olay ya da durumların çok yönlü olarak incelenmesi mümkündür (Yılmaz, Çimen, Karakaya & Üçüncü, 2018). Bu modelin tercih edilme sebebi, öğretmen adaylarının bireysel yorumlarının ve deneyimlerinin daha detaylı bir şekilde incelenmesini sağlamasıdır.

Araştırmanın Çalışma Grubu

Araştırmanın çalışma grubunu, 2025-2026 eğitim- öğretim yılında Türkiye’de bir devlet üniversitesinin eğitim fakültesinde biyoloji eğitimi lisans programında öğrenim görmekte olan 25 öğretmen adayı oluşturmaktadır.

Tablo 1: Çalışma Grubuna Ait Demografik Bilgiler

Değişken	N	f (%)
Cinsiyet	Kadın	22 %88
	Erkek	3 %12

Değişken	N	f (%)
Sınıf Düzeyi	3. Sınıf	%44
	4. Sınıf	%56

Veri Toplama Araçları

Araştırma verileri, araştırmacı tarafından geliştirilen yarı yapılandırılmış görüşme formu aracılığıyla toplanmıştır. Görüşme formu, literatür taraması doğrultusunda hazırlanmış ve içerik geçerliliğini sağlamak amacıyla iki alan uzmanı tarafından değerlendirilmiştir. Form, katılımcıların üstün yetenekli öğrenciler hakkındaki tanımları, bu öğrencilerin özelliklerine dair algıları, öğretim süreçlerinde nasıl bir yaklaşım benimsedikleri ve bu alandaki eğitim ihtiyaçlarına ilişkin düşüncelerini ortaya koyacak şekilde yapılandırılmıştır. Görüşme formu beş adet sorudan oluşmaktadır.

Verilerin Analizi

Bu araştırmada elde edilen veriler, nitel araştırma yöntemlerinde sıklıkla tercih edilen içerik analizi yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. İçerik analizi yöntemi nitel ve nicel araştırmalarda belirli temaların oluşturulması bağlamında tercih edilen bir yöntemdir. Yapılan araştırmalarda içerik analizinin temel amacının toplanan verileri açıklayabilecek kavramlara ve ilişkilere ulaşmak olduğu görülmektedir (Selçuk, Palancı, Kandemir & Dündar, 2014). İçerik analizinde, veriler arasındaki benzerlikleri saptayarak ortak tema ve kavramlar etrafında toparlayarak anlamlı sistematik ve anlaşılır şekilde sunmaktır (Yıldırım & Şimşek, 2006). Bu bağlamda içerik analizi yöntemi özellikle temalar arasındaki bağları incelemektedir (Yıldırım & Şimşek, 2011, s.227).

İçerik analizi yönteminde önceden belirlenen kategoriler yerine, verilerden elde edilen anlam içeriğini temel alan kodlamalar gerçekleştirilir. Her veri, iki bağımsız araştırmacı tarafından detaylı bir şekilde okunarak bir anlam çerçevesi ortaya çıkarılmıştır. Kodlama işlemleri sırasında alt temalar, temalar ve ana kategoriler olarak sınıflandırma yapılmıştır. Kodlamalar arası tutarlılığın sağlandığını göstermek amacıyla, Miles ve Huberman'ın (2015) önerdiği güvenilirlik formülü kullanılmıştır:

$$\text{Güvenilirlik} = \text{Görüş Birliği} / \text{Toplam Görüş Sayısı}$$

Bu hesaplama sonucunda, iki araştırmacı arasında elde edilen güvenilirlik oranı %91 olarak bulunmuş, bu da analiz sürecinin oldukça yüksek bir tutarlılık taşıdığını göstermektedir.

BULGULAR

Araştırma amacı doğrultusunda uygulanan veri toplama aracından elde edilen bulgulara aşağıda yer verilmiştir. Araştırma kapsamında öncelikle öğretmen adaylarına; 'Sizce üstün yetenekli öğrenci kimdir? Bu öğrencileri tanımlarken hangi özellikleri dikkate alırsınız ve bu konudaki bilgi düzeyinizi nasıl değerlendirirsiniz?' sorusu yöneltilmiş elde edilen bulgulara Tablo 2'de yer verilmiştir.

Tablo 2: Öğretmen Adaylarının Üstün Yetenekli Öğrenci Tanımına, Tanımlamada Kullandıkları Özelliklere ve Konuya Yönelik Bilgi Düzeylerine İlişkin Görüşleri

Temalar	Kodlar	Frekans (f)	Yüzde (%)
Zihinsel Kapasite ve Bilişsel Üstünlük	Hızlı öğrenme ve kavrama	10	%40
	Zekâ düzeyinin yüksek olması	8	%32
Yaratıcılık ve Farklı Düşünme	Farklı bakış açılara sahip olma	7	%28
	Özgün fikir üretme	4	%16
İlgi ve Merak	Yoğun ilgi ve keşfetme isteği	6	%24
	Belirli alanlara yoğunlaşma	5	%20
Alanlara Özgü Yetenekler	Sanatsal, akademik, liderlik, yaratıcı potansiyel	6	%24
Tanı ve Belirleme Süreci	Gözleme dayalı tanımlama	3	%12
	Zekâ testine referans	1	%4

Temalar		Kodlar	Frekans (f)	Yüzde (%)
Bilgi Değerlendirmesi	Düzeyi	Orta düzeyde bilgi	10	%40
		Düşük bilgi, eksiklik farkındalığı	6	%24
		Eğitim/derse dayalı bilgi	2	%8

Tablo 2 incelendiğinde öğretmen adaylarının üstün yetenekli öğrenci tanımına, tanımlamada kullandıkları özelliklere ve konuya yönelik bilgi düzeylerine ilişkin görüşleri; “Zihinsel Kapasite ve Bilişsel Üstünlük”, “Yaratıcılık ve Farklı Düşünme”, “İlgi ve Merak”, “Alanlara Özgü Yetenekler”, “Tanı ve Belirleme Süreci”, “Bilgi Düzeyi Değerlendirmesi” olmak üzere 6 tema altında incelendiği görülmektedir. Zihinsel kapasite ve bilişsel üstünlük teması altında öğretmen adaylarının verdikleri cevapların çoğunluğunun %40 (f=40)’nın zeka düzeyinin yüksek olduğu; yaratıcılık ve farklı düşünme teması altında öğretmen adaylarının verdikleri cevapların çoğunluğunun %28 (f=7)’nin farklı bakış açılarına sahip olma olduğu; ilgi ve merak teması altında öğretmen adaylarının çoğunluğunun %24 (f=6)’nın yoğun ilgi ve keşfetme isteği olduğu; alanlara özgü yetenekler teması altında öğretmen adaylarının verdikleri cevapların %24 (f=6)’nın sanatsal, akademik, liderlik, yaratıcı potansiyel olduğu; tanı ve belirleme süreci teması altında öğretmen adalarının verdikleri cevapların çoğunluğunun %12 (f=3)’sinin gözleme dayalı tanımlama; bilgi düzeyi değerlendirme teması altında öğretmen adaylarının çoğunluğunun %40 (f=10)’nın Orta düzeyde bilgi olduğu saptanmaktadır.

Araştırma kapsamında öğretmen adaylarına ‘Üstün yetenekli öğrencilerin eğitim ihtiyaçları nelerdir? Bu öğrencilere sınıf içinde nasıl bir öğretim yaklaşımı ve materyal kullanımı gerektiğini düşünüyorsunuz?’ sorusu yöneltilmiş elde edilen bulgulara Tablo 3’de yer verilmiştir.

Tablo 3: Öğretmen Adaylarının Üstün Yetenekli Öğrencilerin Eğitim İhtiyaçlarına, Sınıf İçi Öğretim Yaklaşımlarına ve Materyal Kullanımına Yönelik Görüşleri

Tema	Kod	Frekans (f)	Yüzde (%)
Öğretim Yöntemleri ve Yaklaşımları	Zenginleştirilmiş içerik ve hızlandırma	9	%36
	Bireyselleştirilmiş / farklılaştırılmış öğretim	8	%32
	Öğrenci merkezli ve esnek öğretim	6	%24
	Proje ve araştırma temelli öğretim	5	%20
Materyal Kullanımı	Gelişmiş ve çeşitli materyaller	10	%40
	İlgi alanına göre materyal seçimi	5	%20
	Daha ileri düzey / dijital materyaller	4	%16
	Deneysel / psikomotor araç-gereç kullanımı	3	%12
Bilişsel ve Akademik Gereksinimler	Derinlemesine ve analitik düşünme imkânı	7	%28
	Hızlı ve üst düzeyde öğrenme	6	%24
	Özgün / yaratıcı düşünmeye dayalı öğrenme	4	%16
Sosyal ve Etik Yaklaşımlar	Ayrıcalık algısından kaçınma	3	%12
	Sınıf içi denge / eşitlik yaklaşımı	2	%8
Öğretmenin Rolü ve Hazırlığı	Zihinsel gelişimi destekleyici yöntem bilgisi	3	%12
	Rehberlik ve yönlendirme yetkinliği	2	%8

Tablo 3 incelendiğinde öğretmen adaylarının üstün yetenekli öğrencilerin eğitim ihtiyaçlarına, sınıf içi öğretim yaklaşımlarına ve materyal kullanımına yönelik görüşleri; “Öğretim Yöntemleri ve Yaklaşımları”, “Materyal Kullanımı”, “Bilişsel ve Akademik Gereksinimler”, “Sosyal ve Etik Yaklaşımlar”, “Öğretmenin Rolü ve Hazırlığı” olmak üzere 5 tema altında toplandığı görülmektedir. Öğretim yöntemleri ve yaklaşımları teması altında öğretmen adaylarının verdikleri cevapların çoğunluğunun %36(f=9)’sının zenginleştirilmiş içerik ve hızlandırma olduğu; materyal kullanımı teması altında öğretmen adaylarının verdikleri cevapların çoğunluğunun %40 (f=10) Gelişmiş ve çeşitli materyaller olduğu; bilişsel ve akademik gereksinimler teması altında öğretmen adaylarının verdikleri cevapların çoğunluğunun %28 (f=4)’nin derinlemesine ve analitik düşünme imkânı olduğu; sosyal ve

etik yaklaşımlar teması altında öğretmen adaylarının verdikleri cevapların çoğunluğunun %12 (f=3)'sinin ayrıcalık algısından kaçınma olduğu; öğretmenin rolü ve hazırlığı teması altında öğretmen adaylarının verdikleri cevaplar incelendiğinde %12 (f=3)'sinin Zihinsel gelişimi destekleyici yöntem bilgisi olduğu saptanmaktadır.

Araştırma kapsamında öğretmen adaylarına 'Bu öğrencilere yönelik öğretim sürecinde karşılaştığınız veya karşılaşılabileceğinizi düşündüğünüz zorluklar nelerdir?' sorusu yöneltilmiş elde edilen bulgulara Tablo 4'de yer verilmiştir.

Tablo 4: Öğretmen Adaylarının Üstün Yetenekli Öğrencilere Yönelik Öğretim Sürecinde Karşılaştıkları veya Karşılaşılabileceklerini Düşündükleri Zorluklara İlişkin Görüşleri

Temalar		Kodlar	Frekans (f)	Yüzde (%)
Öğrenme Hızından Kaynaklı Sorunlar		Hızlı öğrenme nedeniyle sıkılma	9	%36
		Akranlarıyla denge kurmakta zorlanma	6	%24
		Dersi sabote etme ihtimali	4	%16
Öğretmen Yeterlikleriyle İlgili Sorunlar		Bilgi eksikliği	7	%28
		Program hazırlamada zorlanma	6	%24
		Üstün yetenekliyi fark etmede güçlük	5	%20
		Öğrenci beklentisini karşılama kaygısı	3	%12
		Güncel içeriklere ulaşma zorluğu	2	%8
Materyal ve Kaynak Yetersizliği		Uygun materyal hazırlama zorluğu	4	%16
		Akademik kaynak eksikliği	3	%12
Sosyal Uyum Problemleri		Akranlarla uyum sorunu	5	%20
		Zorbalık / dışlanma riski	2	%8
		Ayrıcalık algısı oluşması	2	%8
Sınıf Yönetimi Zorlukları		Sürekli soru sorma, yüksek merak	3	%12
		Yanlış bilgiye yönelme riski	2	%8
Belirsizlik ve Kararsızlık		Ne yapacağını bilememe	3	%12
		Kararsızlık ifade etme	1	%4

Tablo 4 incelendiğinde öğretmen adaylarının üstün yetenekli öğrencilere yönelik öğretim sürecinde karşılaştıkları veya karşılaşılabileceklerini düşündükleri zorluklara ilişkin görüşleri; "Öğrenme Hızından Kaynaklı Sorunlar", "Öğretmen Yeterlikleriyle İlgili Sorunlar", "Materyal ve Kaynak Yetersizliği", "Sosyal Uyum Problemleri", "Sosyal Uyum Problemleri", "Sınıf Yönetimi Zorlukları", "Belirsizlik ve Kararsızlık" olmak üzere 7 tema altında toplanmaktadır. Öğrenme hızından kaynaklı sorunlar teması altında verilerin cevapların çoğunluğunun %36 (F=9) hızlı öğrenme nedeniyle sıkılma olduğu; öğretmen yeterlikleriyle ilgili sorunlar teması altında verilen cevapların çoğunluğunun %28(f=7)'nin bilgi eksikliği olduğu; materyal ve kaynak yetersizliği temasına verilen cevapların çoğunluğunun %16 (f=4) uygun materyal hazırlama zorluğu olduğu, sosyal uyum problemleri temasına verilen cevapların çoğunluğunun %20 (f=5)'sinin akranlarla uyum sorunu olduğu; sınıf yönetimi zorlukları teması altında verilerin cevapların çoğunluğunun %12 (f=3)'sinin sürekli soru sorma, yüksek merak olduğu; belirsizlik ve kararsızlık temasına verilen cevapların %12 (f=3)'sinin ne yapacağını bilememe olduğu saptanmaktadır.

Araştırma kapsamında öğretmen adaylarına 'Kendi mesleki gelişiminiz açısından, üstün yetenekli öğrencilerle çalışmak için ihtiyaç duyduğunuz bilgi, beceri ve kaynaklar nelerdir?' sorusu yöneltilmiş elde edilen bulgulara Tablo 5'de yer verilmiştir.

Tablo 5: Öğretmen Adaylarının Üstün Yetenekli Öğrencilerle Çalışmaya Yönelik Mesleki Gelişim İhtiyaçlarına (Bilgi, Beceriler ve Kaynaklar) İlişkin Görüşleri

Temalar	Kodlar	Frekans (f)	Yüzde (%)
Alan Bilgisi ve Akademik Donanım	Derinlemesine alan bilgisi	9	%36
	Güncel literatürü takip (dünya kaynakları)	4	%16
	Disiplinler arası bilgi / STEM yaklaşımı	3	%12
	İngilizce yeterliliği	2	%8
Pedagojik Yeterlik ve Uygulama Becerileri	Farklılaştırılmış öğretim planlama	7	%28
	Laboratuvar ve deneysel öğretim becerisi	6	%24
	Proje yürütme ve rehberlik	5	%20
	Yaratıcılık ve esneklik	4	%16
Öğrenci Tanıma ve Gözlem Becerisi	Üstün yetenekli öğrencileri fark etme ve tanılama	6	%24
	İleri düzey soru sorma / eleştirel düşünmeye rehberlik	3	%12
	Öğrenciye uygun yaklaşım	2	%8
Kaynak ve Materyal Kullanımı	Akademik kaynaklara erişim	6	%24
	Dijital içerikler / görsel materyaller	2	%8
	Erişilebilir kaynak ihtiyacı	2	%8

Tablo 5 incelendiğinde öğretmen adaylarının üstün yetenekli öğrencilerle çalışmaya yönelik mesleki gelişim ihtiyaçlarına (bilgi, beceriler ve kaynaklar) ilişkin görüşleri; “Alan Bilgisi ve Akademik Donanım”, “Pedagojik Yeterlik ve Uygulama Becerileri”, “Öğrenci Tanıma ve Gözlem Becerisi”, “Kaynak ve Materyal Kullanımı” olmak üzere 4 tema altında incelenmektedir. Öğretmen adaylarının alan bilgisi ve akademik donanım temasına verdikleri cevapların çoğunluğunun %36 (f=4)’sının derinlemesine alan bilgisi olduğu; pedagojik yeterlik ve uygulama becerileri temasına verilen cevapların çoğunluğunun %28 (f=7)’nin farklılaştırılmış öğretim planlama olduğu; öğrenci tanıma ve gözlem becerisi temasına verilen cevapların çoğunluğunun %24(f=6)’nün üstün yetenekli öğrencileri fark etme ve tanılama olduğu; kaynak ve materyal kullanımı temasına verilen cevapların çoğunluğunun %24(f=6) akademik kaynaklara erişim olduğu saptanmıştır.

Araştırma kapsamında öğretmen adaylarına ‘Üstün yetenekli öğrencilerle çalışmanın öğretmenlik kariyerinize nasıl bir katkı sağlayacağını düşünüyorsunuz? Bu öğrencilerin tanılanmasında öğretmenin rolü ve sorumluluğu sizce nedir?’ sorusu yöneltilmiş elde edilen bulgulara Tablo 6’de yer verilmiştir.

Tablo 6: Öğretmen Adaylarının Üstün Yetenekli Öğrencilerle Çalışmanın Mesleki Gelişimlerine Katkısı ile Tanılama Sürecindeki Öğretmen Rolüne İlişkin Görüşleri

Temalar	Kodlar	Frekans (f)	Yüzde (%)
Mesleki Gelişime Katkı	Pedagojik gelişim	7	%28
	Akademik gelişim	6	%24
	Kendini yenileme ve motivasyon	5	%20
	Yaratıcılık ve bakış açısı geliştirme	4	%16
	Kariyer yönelimi ve ilham	3	%12
Tanılamada Öğretmenin Rolü	Öğrenciyi fark etme / gözlem yeteneği	7	%28
	Yönlendirme ve rehberlik	5	%20
	Psikososyal destek / rol model olma	4	%16
	Öğrenci merkezli yaklaşım	3	%12
Öğretmen-Öğrenci Etkileşimi	Karşılıklı öğrenme ve gelişim	4	%16
	Mesleki tatmin / duygusal katkı	3	%12

Tablo 6 incelendiğinde öğretmen adaylarının üstün yetenekli öğrencilerle çalışmanın mesleki gelişimlerine katkısı ile tanılama sürecindeki öğretmen rolüne ilişkin görüşleri; “Mesleki Gelişime Katkı”, “Tanılamada Öğretmenin Rolü” ve “Öğretmen-Öğrenci Etkileşimi” olmak üzere üç tema altında toplandığı görülmektedir. Öğretmen adaylarının mesleki gelişime katkı temasına yönelik verdikleri cevapların çoğunluğunun %28(f=7)’sinin pedagojik gelişim olduğu; tanılamada öğretmenin rolü temasına verilen cevapların çoğunluğunun %28(f=7)’nin öğrenciyi fark etme/gözlem yeteneği olduğu; öğretmen-öğrenci etkileşimi temasına verilen cevapların çoğunluğunun %16 (f=4)’sının karşılıklı öğrenme ve gelişim olduğu saptanmaktadır.

TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu araştırma, biyoloji öğretmen adaylarının üstün yetenekli öğrencilere ilişkin algılarını ve bu öğrencilere yönelik öğretimsel yeterliliklerine dair görüşlerini ortaya koymayı amaçlamıştır. Elde edilen bulgular, biyoloji öğretmen adaylarının üstün yetenekli öğrencilere dair birçok olumlu özelliği tanımladıklarını ve bu öğrenci grubuna ilişkin çeşitli farkındalıklar geliştirdiklerini göstermektedir.

Öğretmen adaylarının, üstün yetenekli öğrencileri “aşırı meraklı”, “keşfetmeyi seven”, “derslere yoğun ilgi duyan” bireyler olarak tanımlamaları, özellikle fen bilimleri bağlamında bu öğrencilerin araştırma yapma, sorgulama ve keşfetme eğilimlerinin güçlü olduğuna işaret etmektedir. Feldhusen (1986) & Renzulli (2003), üstün yetenekli bireylerin yüksek motivasyon düzeylerine ve içsel öğrenme arzularına sahip olduklarını vurgulamışlardır. Bu yönüyle, biyoloji öğretmen adaylarının üstün yetenekli öğrencilerin bu içsel motivasyonlarını fark etmiş olmaları, onların fen öğreniminde aktif roller üstlenebilecek öğrencilere yönelik potansiyel bir duyarlılık geliştirdiklerini göstermektedir.

Araştırma bulguları, öğretmen adaylarının üstün yetenekli öğrencilerin “problemleri hızlı çözmeye”, “hızlı düşünme” ve “öğrenmeye açıklık” gibi özelliklerini de sıklıkla vurguladıklarını göstermektedir. Bu özellikler, Cutts & Moseley (2004) tarafından da üstün yetenekliliğin önemli göstergeleri arasında sayılmıştır. Fen eğitimi özelinde, bu öğrencilerin özellikle problem çözme ve bilimsel muhakeme süreçlerinde öne çıktıkları bilinmektedir. Dolayısıyla biyoloji öğretmen adaylarının bu özellikleri gözlemlemiş olmaları, bu öğrenci grubunun eğitsel gereksinimlerini daha iyi anlayabilmeleri açısından önemlidir.

Öğretmen adaylarının üstün yetenekli öğrencileri “yaratıcı”, “farklı bakış açıları geliştiren”, “pratik zekâlı” ve “hazır cevap” olarak tanımlamaları da dikkat çekicidir. Fen bilimleri bağlamında bu tür yaratıcı düşünme ve alternatif çözüm üretme becerileri, bilimsel süreç becerilerinin önemli bir parçasıdır. Literatürde de (Clark, 2002; Yıldız, Baltacı & Güven, 2011) üstün yetenekli bireylerin yaratıcı düşünme becerilerinin gelişmiş olduğu sıkça vurgulanmaktadır. Ayrıca bu öğrencilerin sıra dışı ve özgün fikirler üretmeleri, onların hem bilişsel hem de sosyal açıdan liderlik potansiyellerine sahip olduklarını göstermektedir.

Araştırma kapsamında biyoloji öğretmen adayları, üstün yetenekli öğrencilerin “birden fazla alanda ilgi ve yetenek sahibi olduklarını” ve “çok yönlü bireyler” olarak tanımlandıklarını belirtmişlerdir. Bu ifade, Mönks & Katzko’nun (2005); Gagné’nin (2004) çoklu alanlarda üstün yetenekliliğe ilişkin tanımlamalarıyla örtüşmektedir. Biyoloji gibi disiplinler arası bilgi ve beceri gerektiren bir alanda, bu çok yönlülüğün öğretmenler tarafından fark edilmesi, bu öğrencilere yönelik farklılaştırılmış ve zenginleştirilmiş öğretim ortamları hazırlamada önemli bir avantaj sağlayabilir.

Kişilik özellikleri bakımından ise, biyoloji öğretmen adayları üstün yetenekli öğrencilerin “olgun”, “özgüvenli”, “sorumluluk sahibi”, “dürüst” ve “hedef odaklı” bireyler olduklarını ifade etmişlerdir. Bu tür sosyal-duygusal niteliklerin her üstün yetenekli bireyde eşit düzeyde bulunamayabileceği unutulmamalıdır. Ancak Akarsu’nun (2004) da belirttiği gibi, üstün yetenekli bireyler genel olarak sosyal, kişilik ve zihinsel gelişimlerinde akranlarına göre farklılık gösterebilirler. Bu farklılıkların öğretmenler tarafından doğru şekilde gözlemlenmesi ve desteklenmesi, üstün yetenekli öğrencilerin bütüncül gelişimlerinin sağlanması açısından önemlidir.

Araştırmada öne çıkan bir diğer bulgu ise biyoloji öğretmen adaylarının üstün yetenekli öğrencilerin etik değerlere bağlı, sosyal sorumluluk sahibi ve toplum yararına hareket eden bireyler olduğu yönündeki görüşleridir. Bu değerlendirmeler, Clark (2002); Davaslıgil (1990)’in üstün yetenekli öğrencilerin sosyal-duygusal ve etik özelliklerine ilişkin bulgularıyla benzerlik göstermektedir.

Öğretmen adaylarının, bu öğrencilerin liderlik özellikleri, yüksek özgüven ve gelişmiş toplumsal duyarlılık gibi ileri düzey sosyal becerilere sahip olduklarını ifade etmeleri, öğretmen rollerinin yalnızca bilgi aktarıcı değil, aynı zamanda rehberlik ve mentörlük boyutunu da içermesi gerektiğini göstermektedir.

Elde edilen veriler, biyoloji öğretmen adaylarının üstün yetenekli öğrencilere yönelik öz yeterlilik düzeylerinde gelişime açık alanlar bulunduğunu ortaya koymuştur. Özellikle mentörlük ve akademik rehberlik konularında öğretmen adaylarına yönelik yapılandırılmış eğitim programlarının uygulanması gerekmektedir. Bu durum, Şahin & Kargın (2013) ile Erişen & ark. (2015)'in öğretmen eğitimi ile öğretmenlerin farkındalık düzeyleri arasında anlamlı bir ilişki olduğunu ortaya koyan çalışmalarıyla desteklenmektedir.

Araştırma bulguları genel olarak değerlendirildiğinde, öğretmenlerin üstün zekâlı öğrencilerin tanınması, eğitimi ve özelliklerine yönelik olumlu tutumlara sahip oldukları görülmektedir. Bu bulgu, Ekinci, Sümer, Bozan & Çete (2018) tarafından yapılan çalışmada elde edilen sonuçlarla paralellik göstermektedir. Öğretmenlerin üstün zekâlı öğrencilerin erken yaşlarda tanınmasının gerekliliğine olan inançları, bu öğrencilerin özgün ihtiyaçlarının belirlenmesi ve buna uygun eğitim olanaklarının sağlanması açısından kritik bir öneme sahiptir (Bildiren & Çitil 2019).

Ayrıca öğretmenlerin, üstün zekâlı öğrencilerin öğrenme süreçlerinde kararlılık gösterdikleri ve amaca ulaşmada yüksek motivasyona sahip olduklarına dair algıları, bu öğrencilerin eğitiminde etkili stratejilerin kullanılmasına olanak tanıyabilir (Bakan & Onat, 2019). Öğretmenlerin bu bilinçle öğrencilere zorlayıcı görevler sunmaları, üstün zekâlı bireylerin potansiyellerini gerçekleştirmelerini destekleyebilir. Araştırma bulguları, öğretmenlerin üstün zekâlı öğrencileri akranlarına göre daha kolay ve hızlı öğrendiklerine inandıklarını da ortaya koymaktadır. Bu durum, öğretmenlerin üstün zekâlı bireyleri ileri düzeyde gelişim gösteren ve çok yönlü bireyler olarak algıladıkları yönünde yorumlanabilir (Eraslan Çapan, 2010; Akar & Şengil-Akar, 2012).

Üstün zekâlı bireylerin toplumda az sayıda bulunmalarına yönelik algı da dikkat çekicidir. Bu bulgu, Bolat & Yanpar-Yelken (2020); Ataman (1982); MEB (2010) tarafından ifade edilen üstün zekâlı bireylerin toplumda yaklaşık %2 oranında yer aldığı bilgisini desteklemektedir. Bu bağlamda öğretmenlerin, bu öğrencilerin niteliksel olarak özel eğitim gerektiren bireyler olduğunun farkında olmaları, onları doğru yönlendirmeleri açısından önem arz etmektedir. Öğretmenlerin üstün zekâlı öğrencilerin yaratıcı bireyler oldukları yönündeki algıları da literatürle tutarlıdır (Sak, 2014; Bolat, 2022). Yaratıcılık, üstün yetenekliliğin temel bileşenlerinden biri olarak değerlendirildiğinden, bu özelliğin öğretmenler tarafından fark edilmesi, uygun öğretim ortamlarının oluşturulmasına katkı sunabilir.

Ayrıca, öğretmen adaylarının üstün yeteneklilerin eğitimi konusundaki tutumlarının öğrenim gördükleri bölümlere göre farklılık gösterdiği görülmektedir. Özellikle PDR bölümü öğrencilerinin “Üstün Yeteneklilerin İhtiyaçları ve Destek” boyutunda en olumlu tutuma sahip olmaları (Tortop & Kunt, 2012), eğitimin niteliği ile öğretmen tutumu arasındaki ilişkiye işaret etmektedir. Bu durum, öğretmen adaylarının lisans eğitiminde aldıkları eğitimin üstün yetenekli bireylere yönelik farkındalık kazandırmada etkili olduğunu düşündürmektedir. Nitekim bu bulgu, Curtis (2005); Rao & Lim (1999) gibi araştırmalarda vurgulanan, öğretmen tutumlarının öğretim süreçlerini ve öğrenci çıktılarının kalitesini doğrudan etkilediği görüşüyle örtüşmektedir.

Bununla birlikte bazı araştırmalarda öğretmen adaylarının üstün yeteneklilere yönelik bilgi düzeylerinin yeterli olmadığı da ifade edilmektedir (Akar & Şengil-Akar, 2012; Gökdere & Ayvaci, 2014). Özellikle lisansın ilk yıllarındaki öğrencilerin üstün yetenekliler hakkındaki algılarında olumsuz nitelermelere yer verdikleri (Dağlıoğlu, 2017), bu alanda bilgi eksikliğinin etkili olduğunu göstermektedir. Bu da lisans eğitiminde bu konuya dair daha sistematik ve uygulamaya dayalı içeriklerin eklenmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.

Sonuç olarak, biyoloji öğretmen adaylarının üstün yetenekli öğrencilere dair görüşleri büyük ölçüde olumlu olmakla birlikte, bu öğrenci grubunun tanınması, özelliklerinin anlaşılması ve onlara uygun öğretim stratejilerinin belirlenmesi konusunda bazı bilgi eksiklikleri taşıdıkları da görülmektedir. Bu durum, öğretmen yetiştirme programlarında üstün yeteneklilere yönelik içeriklerin daha sistemli, uygulamalı ve disiplin temelli olarak sunulması gerektiğini ortaya koymaktadır. Biyoloji eğitimi

özelinde, üstün yetenekli öğrencilerin bilimsel süreç becerilerini geliştirebilecekleri, sorgulama ve araştırma temelli zenginleştirilmiş öğrenme ortamlarının tasarlanması büyük önem taşımaktadır.

Araştırma bulguları doğrultusunda, öğretmen adaylarının üstün yetenekli bireylerin eğitimine daha hazırlıklı hale gelmeleri için lisans programlarına bu alana özgü kuramsal ve uygulamalı derslerin entegre edilmesi önerilmektedir.

KAYNAKÇA

- Akar, İ. & Şengil-Akar, Ş. (2012). İlköğretim okullarında görev yapmakta olan öğretmenlerin üstün yetenek kavramı hakkındaki görüşleri. *Kastamonu Eğitim Dergisi*, 20(2), 423–436.
- Akarsu, F. (2004). İstanbul Bilim ve Sanat Merkezi (BİLSEM) için bir öğrenme modeli. *Türkiye Üstün Yetenekli Çocuklar Kongresi Seçilmiş Makaleler Kitabı*, 63(1), 357–368. İstanbul: Çocuk Vakfı Yayınları.
- Ataman, A. (1982). Üstün zekâlı çocuklara ana-babaları ve öğretmenleri nasıl yardımcı olabilir. *Ankara University Journal of Faculty of Educational Sciences*, 15(1), 335–344.
- Aydın, S. & Şentürk, Ş. (2020). Okul öncesi öğretmenlerinin özel yetenekli çocuklara yönelik algıları. *Türkiye Sosyal Araştırmalar Dergisi*, 24(2), 413–432.
- Bakan, M. & Onat, R. (2019). Özel Yeteneklilerin Özellikleri ve Gelişimleri. O. Kılıç ve M. Çitil (Ed.) *Özel yetenekli öğrencim var: İçinde*. Ankara: MEB.
- Baykoç Dönmez, N. (2009). *Üstün ve özel yetenekli çocuklar ve eğitimleri*. Ankara: Eğiten Kitap Yayınları.
- Bildiren, A. & Çitil, M. (2019). Özel yetenekli çocukların tanılanması. In O. Kılıç & M. Çitil (Eds.), *Özel yetenekli öğrencim var* (pp. xx–xx). Ankara: MEB.
- Bolat, H. & Yanpar Yelken, T. (2020). Özel yetenekli lise öğrencilerinin aile ve okula yönelik demokratik ortam algılarının belirlenmesi. *Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi Eğitim Fakültesi Dergisi*, 20(1), 252–268.
- Bolat, H. (2020b). Üstün zekâlı ve yetenekli öğrencilerin Bilim ve Sanat Merkezindeki ve okuldaki sosyal bilgiler dersine yönelik metaforik algıları. *Anemon Muş Alparslan Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 8(4), 1135–1144.
- Bolat, H. (2022). Üstün zekâlı öğrenciler. In A. Babaroğlu (Ed.), *Erken çocukluk eğitime giriş* (pp. xx–xx). İzge Yayıncılık.
- Clark, B. (2002). *Growing up gifted: Developing the potential of children at home and at school* (6th ed.). Upper Saddle River, NJ: Merrill Prentice Hall.
- Creswell, J. W. (2007). *Qualitative inquiry and research design: Choosing among five approaches* (2nd ed.). Thousand Oaks, CA: Sage Publications.
- Curts, J. (2005). *Preservice teachers' attitudes toward gifted students and gifted education* (Doctoral dissertation, Teachers College, Columbia University). Retrieved from <http://www.proquest.um.com>
- Cutts, D. & Moseley, C. (2004). Children's search for gender cues: Cognitive perspectives on gender development. *Current Directions in Psychological Science*, 13(2), 67–70.
- Çapan, B. E. (2010). Öğretmen adaylarının üstün yetenekli öğrencilere ilişkin metaforik algıları. *Uluslararası Sosyal Araştırmalar Dergisi*, 3(12), 140–154.
- Çitil, A. & Ataman, A. (2018). İlköğretim çağındaki üstün yetenekli öğrencilerin davranışsal özelliklerinin eğitim ortamlarına yansımaları ve ortaya çıkabilecek sorunlar. *GÜJGEF*, 38(11), 185–231.
- Dağlıoğlu, H. E., Turupcu Doğan, A. & Basit, O. (2017). Kapsayıcı Okul Öncesi Eğitim Ortamlarında Öğretmenler Çocukların Bireysel Yeteneklerini Belirlemek ve Geliştirmek İçin Neler Yapıyor?. *Gazi Üniversitesi Eğitim Fakültesi Dergisi*, 37(3).

- Davaslıgil, Ü. (1990). Üstün yetenekli çocukların gelişim özellikleri. *Hacettepe Üniversitesi Eğitim Fakültesi Dergisi*, (5), 95–100.
- Davis, G. A. & Rimm, S. B. (2004). *Education of the gifted and talented* (5th ed.). Boston: Allyn and Bacon.
- Ekinci, A., Sümer, S., Bozan, S., & Çete, U. (2018). Sınıf öğretmenlerinin özel yetenekli öğrencilere ilişkin algıları: metaforik bir çalışma. *Mustafa Kemal Üniversitesi Eğitim Fakültesi Dergisi*, 2(3), 1–20. <https://dergipark.org.tr/en/pub/mkuefder/issue/42370/489701>
- Eraslan Çapan, B. (2010). Öğretmen adaylarının üstün yetenekli öğrencilere ilişkin metaforik algıları. *Uluslararası Sosyal Araştırmalar Dergisi*, 3(12), 140–154.
- Erişen, Y., Yavuz-Birben, F., Yalın, H. İ., & Ocak, G. (2015). Üstün yetenekli öğrencilerin eğitime yönelik öğretmenlerin farkındalık düzeyleri. *Eğitim ve Bilim*, 40(181), 1–12.
- Feldhusen, J. (1986). A conception of giftedness. In R. J. Sternberg & J. E. Davidson (Eds.), *Conceptions of giftedness* (pp. 53–92). New York: Cambridge University Press.
- Gagné, F. (2004). Transforming gifts into talents: The DMGT as a developmental theory. *High Ability Studies*, 15(2), 119–147.
- Gökdere, M. & Ayvacı, H. Ş. (2004). Sınıf öğretmenlerinin üstün yetenekli çocuklar ve özellikleri ile ilgili bilgi seviyelerinin belirlenmesi. *Ondokuz Mayıs Üniversitesi Eğitim Fakültesi Dergisi*, 18, 17–26.
- Heacox, D. (2012). *Differentiating instruction in the regular classroom: How to reach and teach all learners* (Updated anniversary ed.). Minneapolis, MN: Free Spirit Publishing.
- Kulaksızoğlu, A., Bilgili, A. E., & Şirin, M. R. (Eds.). (2004). Önsöz. In *I. Türkiye üstün yetenekli çocuklar kongresi bildirileri kitabı*. İstanbul: Çocuk Vakfı Yayınları.
- MEB. (2010). *Bilim ve Sanat Merkezleri süreçleri iç denetim raporu*. MEB İç Denetim Birimi Başkanlığı.
- MEB. (2019). *Bilim ve Sanat Merkezleri Yönergesi*. https://orgm.meb.gov.tr/meb_iys_dosyalar/201
- Miles, M. B. & Huberman, A. M. (1994). *Qualitative data analysis: An expanded sourcebook*. Thousand Oaks, CA: SAGE Publications.
- Mönks, F. J. & Katzko, M. W. (2005). Giftedness and gifted education. In R. J. Sternberg & J. E. Davidson (Eds.), *Conceptions of giftedness* (2nd ed., pp. 187–200). Cambridge University Press.
- Rao, S. & Lim, L. (1999). Beliefs and attitudes of pre-service teachers towards teaching children with disabilities. *123rd Annual Conference of the American Association on Mental Retardation*, New Orleans, LA.
- Renzulli, J. S. (2003). Conception of giftedness and its relationship to the development of social capital. In N. Colangelo & G. A. Davis (Eds.), *Handbook of gifted education* (pp. 75–88). Boston: Allyn & Bacon.
- Sak, U. (2014). *Yaratıcılık gelişimi ve geliştirilmesi*. Ankara: Vize Yayıncılık.
- Selçuk, Z., Palancı, M., Kandemir, M., & Dündar, H. (2014). Eğitim ve Bilim dergisinde yayınlanan araştırmaların eğilimleri: İçerik analizi. *Eğitim ve Bilim*, 39(173), 430–453.
- Seyhan, B. (2015). Okul öncesi öğretmenlerinin üstün yetenekli çocuklara yönelik algıları ile tutumları arasındaki ilişkinin incelenmesi [Yüksek lisans tezi, Gazi Üniversitesi]. YÖK Tez Merkezi.
- Subotnik, R. F., Olszewski-Kubilius, P., & Worrell, F. C. (2011). Rethinking giftedness and gifted education: A proposed direction forward based on psychological science. *Psychological Science in the Public Interest*, 12(1), 3–54.
- Şahin, F. & Kargın, T. (2013). Üstün yetenekli öğrencilerin eğitime yönelik öğretmen tutumları. *Eğitim ve Bilim*, 38(168), 257–267.

- Şahin, F. (2013). Sınıf öğretmenlerine yönelik üstün yetenekli öğrencileri belirleme bilgi testinin geliştirilmesi: Geçerlik ve güvenilirlik çalışması. *Asya Öğretim Dergisi*, 1(1), 20–29.
- Tomlinson, C. A. (1999). *The differentiated classroom: Responding to the needs of all learners*. Alexandria, VA: ASCD.
- Tortop, H. S. & Kunt, K. (2012). Investigation of primary school teachers' attitudes towards gifted education. *Online Submission*, 5(2), 441–451.
- Yıldırım, A. & Şimşek, H. (2006). *Sosyal bilimlerde nitel araştırma yöntemleri* (5. baskı). Ankara: Seçkin Yayıncılık.
- Yıldırım, A. & Şimşek, H. (2011). *Sosyal bilimlerde nitel araştırma yöntemleri* (8. baskı). Ankara: Seçkin Yayıncılık.
- Yıldız, C., Baltacı, S., & Güven, B. (2011). Üstün yetenekli öğrencilerin öğrenme süreçleri. *Journal of Gifted Education Research*, 1(1), 24–36.
- Yılmaz, M., Çimen, O., Karakaya, F., & Üçüncü, M. (2018). Öğretmen adaylarının problem çözme stratejileri hakkındaki görüşlerinin incelenmesi. *Eğitimde Kuram ve Uygulama*, 14(1), 1–16.

Makale id= 22

Sözlü Sunum

ORCID ID: 0009-0004-0954-7552

| 26

Metoprololün Farmakolojik Özellikleri, Terapötik Endikasyonları ve Klinik Uygulanabilirliğinin DeğerlendirilmesiAraştırmacı Gizay Ölçücüoğlu¹, Dr. Öğretim Üyesi Hesna Ural Ulucan²¹Kırıkkale Üniversitesi²Ufuk Üniversitesi

*Corresponding author: Gizay Ölçücüoğlu

Özet: Metoprolol, kardiyovasküler hastalıkların tedavisinde yaygın olarak kullanılan, selektif bir β_1 -adrenerjik reseptör antagonistidir. Klinik olarak özellikle hipertansiyon, anjina pectoris, kalp yetmezliği ve aritmi tedavisinde tercih edilmektedir. Beta-1 reseptörlerine olan yüksek özgülüğü sayesinde kalp hızını ve miyokardiyal oksijen tüketimini azaltarak kardiyak yükü hafifletir. Farmakokinetik olarak oral yolla alındığında hızla emilir; karaciğerde ilk geçiş metabolizmasına uğrar ve yaklaşık 3-4 saatlik bir yarı ömre sahiptir. Son yıllarda yapılan çalışmalar, metoprololün klasik hemodinamik etkilerinin ötesinde, nötrofil migrasyonunu azaltarak inflamasyonu baskıladığını ve miyokard enfarktüsü boyutunu küçülttüğünü göstermektedir. Bu bulgular, metoprololün nörohormonal, metabolik ve immünomodülatör etkileriyle kardiyoprotektif bir profil sunduğunu ortaya koymaktadır. Ancak, insan kardiyomiyositleri üzerindeki doğrudan anti-inflamatuar etkileri halen netlik kazanmamıştır. Öte yandan, çevresel açıdan metoprololün atık sularında kalıcılığı dikkat çekmektedir. Biyolojik olarak dirençli yapısı nedeniyle sucul ortamlarda birikmekte ve potansiyel ekotoksikolojik riskler oluşturmaktadır. Bu durum, halk sağlığı ve çevre açısından değerlendirilmesi gereken önemli bir konudur.

Anahtar Kelimeler: Metoprolol, Beta Blokerler, Kardiyovasküler Hastalıklar, Hipertansiyon, ilaç Salınımı, anjina Pectoris, Kalp Yetmezliği, Miyokard Enfarktüsü, Farmakokinetik, Biyoyuyluluk, Beta 1 Selektivite, Kardiyak Fonksiyonlar, Tedaviye Uyum, Uzun Etkili Formülasyonlar, Solunum Yolu Hastalıkları, Kardiyovasküler Tedavi Ajanları.

Evaluation of the Pharmacological Properties, Therapeutic Indications, and Clinical Applicability of Metoprolol

Abstract: Metoprolol is a selective β_1 -adrenergic receptor antagonist widely used in the treatment of cardiovascular diseases. Clinically, it is primarily preferred for the management of hypertension, angina pectoris, heart failure, and arrhythmias. Due to its high affinity for beta-1 receptors, it reduces heart rate and myocardial oxygen consumption, thereby alleviating cardiac workload. Pharmacokinetically, it is rapidly absorbed following oral administration, undergoes first-pass metabolism in the liver, and has a half-life of approximately 3–4 hours. Recent studies have demonstrated that, beyond its classical hemodynamic effects, metoprolol suppresses inflammation by reducing neutrophil migration and consequently decreases myocardial infarct size. These findings suggest that metoprolol provides a cardioprotective profile through its neurohormonal, metabolic, and immunomodulatory effects. However, its direct anti-inflammatory actions on human cardiomyocytes remain unclear. From an environmental perspective, the persistence of metoprolol in wastewater is of concern. Its chemically stable structure renders it resistant to conventional microbial degradation, leading to accumulation in aquatic environments and posing potential ecotoxicological risks. This issue warrants serious attention in the context of public health and environmental safety.

Keywords: Metoprolol, Beta-Blockers, Cardiovascular Diseases, Hypertension, Drug Release, Angina Pectoris, Heart Failure, Myocardial Infarction, Pharmacokinetics, Biocompatibility, Beta-1 Selectivity, Cardiac Functions, Treatment Adherence, Long-Acting Formulations, Respiratory Diseases, Cardiovascular Therapeutic Agents.

GİRİŞ

Beta-adrenerjik reseptör blokerleri, iskemik kalp hastalığı, kalp yetmezliği ve aritmi gibi kardiyovasküler bozuklukların tedavisinde sıklıkla reçete edilen farmasötik ajanlardır [1]. Klinik kılavuzlar, tüm β -blokerlerin benzer etki mekanizmalarına sahip olduğunu öne sürmekle birlikte, güncel prelinik çalışmalar bu ajanların sadece kalp hızı ve kontraktilite üzerine değil, aynı zamanda nörohormonal, metabolik ve immünomodülatör sistemler üzerinde de etkili olabilecek daha karmaşık biyolojik mekanizmaları içerebileceğini göstermektedir [2].

Bu bağlamda metoprolol, miyokard enfarktüsü sırasında nötrofil migrasyonunu belirgin şekilde azaltarak enfarkt boyutunu küçültebilmekte; ayrıca nötrofil-trombosit etkileşimlerini inhibe ederek iskemik süreçte inflamatuvar yanıtın sınırlandırılmasına katkı sağlamaktadır [3]. Bununla birlikte, hematopoietik kompartmana etkilerinin ötesinde, metoprololün insan kardiyomiyositleri üzerinde doğrudan anti-inflamatuvar bir etkisinin olup olmadığı halen tam olarak aydınlatılamamıştır [4].

Özellikle lenfositik miyokardit ve kalp yetmezliği gibi spesifik tedavi protokollerinin sınırlı olduğu durumlarda, metoprolol gibi β -blokerlerin potansiyel terapötik rolleri dikkat çekicidir [5]. Ancak bu moleküllerin yalnızca klinik etkileri değil, aynı zamanda çevresel etkileri de önem arz etmektedir. Artan miktarda farmasötik β -blokerin, özellikle de metoprololün, endüstriyel ve evsel atık sular yoluyla su ekosistemlerine karışması, çevresel sürdürülebilirlik açısından ciddi kaygılar doğurmaktadır [6]. Bu ilaçlar, kimyasal yapılarının yüksek stabilitesi nedeniyle, geleneksel atık su arıtma süreçlerine karşı direnç göstermekte ve bu da kalıcı çevresel kirleticiler olarak birikmelerine neden olmaktadır [7].

Nitekim metoprolol, Avrupa genelinde yüzey ve atık sularda en sık tespit edilen ilk 20 ilaç arasında yer almakta, bu durum da hem çevre hem de halk sağlığı açısından potansiyel riskleri gündeme getirmektedir [8].

Küresel olarak en yaygın ölüm nedenlerinden biri olan kardiyovasküler hastalıklar, bulaşıcı olmayan hastalıklar arasında ön sırada yer almakta ve koroner arter hastalığı, serebrovasküler olaylar, periferik arter hastalığı, romatizmal kalp hastalığı, derin ven trombozu ve pulmoner emboli gibi klinik tabloları kapsamaktadır. Bu hastalıkların tedavisinde; β -blokerler, anjiyotensin dönüştürücü enzim (ACE) inhibitörleri, anjiyotensin reseptör blokerleri (ARB'ler) ve mineralokortikoid reseptör antagonistleri gibi ilaç sınıfları geniş bir şekilde kullanılmaktadır [9].

TARTIŞMA

Hem hayvanlarda hem de insanlarda yapılan çalışmalar metoprololün betamimetik aktiviteden yoksun bir β -seçici adrenerjik reseptör antagonisti olduğunu göstermiştir. İzoprenalinin kardiyak uyarıcı etkisi, izoprenalinin vazodilatör ve bronkodilatör etkilerini yalnızca hafifçe etkileyen dozlarda metoprolol tarafından belirgin şekilde inhibe edilir.[10]

Metoprolol, eksojen veya nöronal olarak salınan noradrenaline karşı kardiyak yanıtı belirgin şekilde inhibe eder. Bu etki muhtemelen bileşiğin akut genel hemodinamik etkilerinin ana belirleyicisidir. Metoprolol, adrenalinin periferik vazodilatör etkisinin çok zayıf bir inhibitörü olması nedeniyle propranololden farklıdır. Bu nedenle iki bloker, endojen adrenalinin kardiyovasküler kontrole katkıda bulunduğu durumlarda farklı hemodinamik etkiler yaratabilir.[11]

Metoprolol, genetik olarak hipertansiyonu olan sıçanlarda önleyici antihipertansif etkiye sahiptir. Bu etki, mekanizması tartışılan bozulmuş vazokonstriktör lif kontrolü ile ilişkilidir. Toksikolojik ve genel farmakolojik çalışmaların sonuçları, metoprololün oldukça spesifik bir β -bloker olduğunu göstermektedir.[12]

Farmakokinetik çalışmalar metoprololün oral uygulamadan sonra tamamen emildiğini göstermektedir. İnsanda ilk geçiş eliminasyonu yaklaşık %55'tir ve terapötik doz aralığında dozdan bağımsızdır. Metoprolol insan kan plazmasından 3-4 saatlik yarılanma ömrüyle elimine edilir. [13]

Metoprolol, intrinsik sempatomimetik aktivitesi olmayan, lipofilik β 1 seçici bir antagonisttir. Kronik kalp yetmezliği olan hastalarda metoprolol, kalp fonksiyonunu, sol ventriküler yeniden yapılanmayı ve fiziksel egzersiz kapasitesini iyileştirir ve kalp yetmezliği semptomlarını azaltır.[14]

Metoprolol, gelişen miyokard enfarktüsünün seyri sırasında ve akut iskemik atak geçiren hastalarda çok sayıda hastada değerlendirilmiştir. β -blokerlerle erken müdahale, yaklaşan miyokard enfarktüsü şüphesi olan hastaların tedavisinde tartışmalı bir terapötik yaklaşımdır. [15]

DEZAVANTAJ-AVANTAJ

Bir antagonist olan metoprolol, doza ve zamana bağlı olarak termal gecikmeyi ve mekanik eşikleri önemli ölçüde azalttı.

Ancak bir agonist olan dobutamin, doza ve zamana bağlı gecikmeyi ve eşikleri arttırdı.[16]

Yaşlanmayla beraber mezenterik sistem kan akımı, gastrointestinal motilite ve gastrik asiditenin azalması sonucu emilimde azalma olabilir. Bu değişikliklere ek olarak beklenen ilaç yanıtlarında farklılıklar görülebilir. Örnek olarak beta reseptör duyarlılığı azaldığı için beta bloker tedavisine verilen yanıtta azalma izlenebilir. Aynı zamanda baroreseptör reflekslerde azalma olduğu için hipotansiyona eğilim fazladır. Vücutta olan bu değişikliklerle beraber yaşlı popülasyonda kullanılan ilaç sayısının fazla olması, görme fonksiyonlarında bozulma, unutkanlık gibi mental değişiklikler nedeniyle ilaç yan etkilerine maruz kalma ve ilaçlar arasında etkileşim riskinin yüksek olduğu bilinmektedir.[17]

İdiyopatik dilate kardiyomyopati hastalarda metoprolol tedavisi klinik kötüleşmeyi önledi, semptomlarda ve kalp fonksiyonunda iyileşme sağladı ve iyi tolere edildi.[18]

Koroner kalp hastalığı ve felçten kaynaklanan ölümlerin daha az olması nedeniyle toplam mortalite, metoprolol için tiazid diüretiklere göre önemli ölçüde daha düşüktü. Toplam mortalite de metoprolol tedavisine randomize edilen sigara içenlerde anlamlı derecede düşüktü. Metoprolol ile tedavi edilen hastalarda gösterilen faydanın klinik uygulama açısından önemli sonuçları olduğu görülmektedir.[19]

Erken müdahale denemelerinde, uzun süreli tedaviyi içeren orta derecede büyük bir denemede toplam ölüm oranında bir azalma elde edildi, ancak halihazırda beta-blokerler veya belirli kalsiyum antagonistleri ile tedavi edilen hastaları hariç tutan ve tedavinin yalnızca kısa süreli olduğu diğer bir çalışmada ölüm oranı önemli ölçüde azaldı. Metoprolol ile elde edilen genel sonuçlar, tüm hastalarda erken müdahale tedavisinin kısa vadeli mortalitede klinik açıdan önemli bir iyileşme sağladığını göstermemiştir. [20]

METOPROLOL MEKANİZMASI

Metoprolol, kalp hücrelerinin yüzeyinde, özellikle sinoatrial düğüm,

atrioventriküler düğümde ve ventriküler miyokarda bulunan β -1 adrenerjik reseptörlere bağlanır.[21]

Metoprolol, aynı reseptörler için rekabet ederek katekolamin reseptör aktivasyonunu bloke eder; bu, siklik adenosin monofosfat ve protein kinaz A'nın (PKA) aracılık ettiği hücre içi sinyal yollarını azaltır.[22]

Metoprolol, kalp hızını belirleyen spontan depolarizasyon fazı olan nodal aksiyon potansiyelinde faz 4'ün eğimini azaltır. Metoprolol, bu aşamada sodyum akışını azaltarak, kalp pili hücrelerinin ateşlenme hızını yavaşlatır ve kalp atış hızını düşürür.[23]

Metoprolol, potasyum akışının dinlenme membran potansiyelini geri kazandırdığı faz olan nodal aksiyon potansiyelinde faz 3'ün depolarizasyonunu uzatır. Metoprolol bu fazı geciktirerek kalp hücrelerinin refrakter periyodunu artırır, uyarılabilirliğini ve iletim hızını azaltır.[24]

Metoprolol L tipi kalsiyum kanallarından kalsiyum akışını engelleyerek ventriküler miyokardın kontraktilesini de azaltır. Metoprolol, sarkomerlerin kalsiyum kullanılabilirliğini azaltarak kasılma kuvvetini azaltır ve kalp debisini düşürür. [25]

Metoprolol bu mekanizmalar sayesinde kalbin iş yükünü ve oksijen ihtiyacını azaltır ve kan basıncını düşürür; bu, hipertansiyon, anjina, kalp yetmezliği ve aritmiler gibi çeşitli kardiyovasküler durumların semptomlarını hafifletir. Metoprolol, membran stabilize edici veya içsel sempatomimetik aktivite göstermez. Metoprololün normal kişilere uygulanması kalp atış hızını ve kalp debisini azaltır; bu ilacın dozu ve konsantrasyonu ile alkalıdır. [26]

Farmakodinamik Çalışmalar:

Metoprolol, intrinsik sempatomimetik aktiviteye sahip olmayan yerleşik bir β_1 -seçici adrenoseptör antagonistidir . Bu nedenle, propranolol ile karşılaştırıldığında izoprenalin aracılı taşikardi üzerinde zayıf bir önleyici etkiye sahiptir ve egzersiz sırasında kalp atış hızını, intrinsik sempatomimetik aktiviteye sahip β -blokerlere göre daha fazla azaltır. Hipertansif kişilerde metoprolol sistolik kan basıncını hızla düşürür, ancak diyastolik basıncın maksimum düzeyde azaltılması birkaç haftalık tedavi gerektirir. [27]

Antihipertansif etkinin büyüklüğünü öngören faktörler ve uzun vadeli hemodinamik değişikliklerin doğası tartışma konusudur. Kalp işinin azalması yoluyla miyokardın oksijen ihtiyacının azalması iskemik kalp hastalığında önemli bir etkidir. [28]

Hastalara intravenöz uygulama, dinlenme ve egzersiz sırasında kan basıncında, kalp hızında ve kalp debisinde doza bağlı azalmalara neden olur. Ön duvar hipokinezisi olan hastalarda metoprolol (ancak pindolol değil) ejeksiyon fraksiyonunu azalttı. Her iki ilaç da hipokinetik segment kısalmasını arttırdı, ancak yalnızca metoprolol karşı taraftaki hipokinetik olmayan segmentlerin kısalmasını azalttı. Miyokard enfarktüsünde metoprololün etki mekanizması yalnızca kısmen anlaşılmıştır. Paroksizmal taşikardisi olan hastalarda bolus metoprolol enjeksiyonu sinüs düğümü iyileşme süresini ve döngü uzunluğunu, sağ atriyumdan His demetine iletim süresini ve AV düğüm refrakterliğini arttırdı.[29]

Metoprololün plazma katekolamin konsantrasyonları üzerindeki etkileri tutarsızdır ve bu nedenle önemi belirsizdir. Buna karşılık metoprolol, sağlıklı veya hipertansif kişilerde plazma renin aktivitesini propranolole benzer ölçüde azaltır. Kan şekeri homeostazisinin metoprololden büyük ölçüde etkilenmediği görülmektedir. Sağlıklı deneklerde tek doz metoprololden sonra insülinin neden olduğu hipogliseminin geç iyileşme evresinde gecikme gözlenmiştir ancak sürekli metoprolol infüzyonunun herhangi bir etkisi olmamıştır. İnsüline bağımlı diyabetiklerde iyileşme de gecikti ancak insülin sonrası hipogliseminin boyutu etkilenmedi.[30]

Metoprolol normal kişilerde renal veya hepatik kan akışını etkilemiyor gibi görünmektedir. Portal hipertansiyon azalır, ancak bu azalma, hepatik kan akışını azaltan propranololden sonra olduğundan daha az olur. Metoprololün trombosit agregasyonunun yanı sıra eritrosit viskozitesini ve endotel dokusuna yapışmasını da engellediğine dair kanıtlar birikmektedir. Subjektif efor ve kapasite açısından fiziksel performans üzerindeki zararlı etkiler, metoprololden sonra propranolole göre daha az oranda ortaya çıkar.[31]

Farmakokinetik Çalışmalar: Oral olarak uygulanan metoprolol neredeyse tamamen emilir, ancak ilk geçiş metabolizması sistemik yararlanımını yaklaşık %50 azaltır. Metoprololün yavaş salimli formülasyonları, günde bir kez uygulama sırasında 24 saat boyunca etkili plazma konsantrasyonlarını korur. Ancak bu preparatın herhangi bir klinik avantajını değerlendirmek için hastalarda yapılacak çalışmalara ihtiyaç vardır. Lipofiliklik ve plazma proteinlerine düşük derecede bağlanma, geniş dağılım ve merkezi sinir sistemine nüfuz etmeyi kolaylaştırır.[32]

Yaşın metoprolol farmakokinetiği üzerinde çok az etkisi var gibi görünmektedir, ancak hamilelik sırasında oral uygulamadan sonra klerens artabilir. Atenolol gibi metoprolol da anne sütüne serbestçe geçer ancak tahmini tüketimin bebeği etkilemesi pek olası değildir.[33]

Değişmemiş metoprolol, böbrek yetmezliği sırasında önemli ölçüde birikmez ve aktif metabolitlerin plazma konsantrasyonlarındaki herhangi bir artışın farmakolojik aktiviteye katkıda bulunması olası değildir. Buna karşılık, siroz sırasında sistemik kullanılabilirlik artar ve buna karşılık gelen yarılanma ömründe artış ve toplam vücut klerensinde azalma eğilimi görülür.[34]

Metoprololün farmakolojik ve terapötik etkileri genellikle doza bağlıdır. Bununla birlikte, plazma konsantrasyonlarını β -blokör etkilerle (örn. egzersiz kalp atış hızının azaltılması) ilişkilendirmek mümkün olsa da, plazma metoprolol konsantrasyonları ile terapötik etkiler arasındaki ilişkileri gösterme girişimleri genellikle başarısız olmuştur.[35]

Terapötik Çalışmalar: Birçok kısa ve birkaç uzun vadeli çalışma, hafif ila orta dereceli hipertansiyonda metoprololün terapötik etkinliğini ve iyi tolere edilebilirliğini doğrulamıştır. Tatmin edici kan basıncı

kontrolü genellikle 100 ila 200 mg'lık tek veya bölünmüş günlük dozajlarla sağlanır. Geleneksel ve yavaş salimli formülasyonlar birbirleriyle ve atenolol ile olumlu şekilde karşılaştırılabilir.[36]

Çok sayıda hastada metoprolol ve gerekirse ek diüretik tedavisi ile kan basıncı kontrolü 1 yıla kadar iyi bir şekilde sağlandı. Yaşlı ve hamile hipertansiflerin tedavisinde metoprololün rolünü belirlemek için daha ileri çalışmalara ihtiyaç vardır. Astım veya diyabet hastalarında hipertansiyonun tedavisinde metoprolol, seçici olmayan bir β -blokere tercih edilir. Ancak şunu unutmamak gerekir ki, hipertansiyon ve astım hastalarına metoprolol uygulandığında bronkospazm riski azalsa da bu risk ortadan kalkmamaktadır.[37]

Stabil egzersiz anjinası olan hastalarda yapılan klinik çalışmalar, anjinal frekansta ve gliseril trinitrat tüketiminde azalmalar ve iş performansı ve egzersiz sırasında anjinal ağrının başlangıcına kadar geçen süre gibi objektif parametrelerde iyileşmeler ile değerlendirilen metoprololün kısa vadeli etkinliğini doğrulamıştır.[38]

Metoprolol, gelişen miyokard enfarktüsünün seyri sırasında ve akut iskemik atak geçiren hastalarda çok sayıda hastada değerlendirilmiştir. β -blokerlerle erken müdahale, yaklaşan miyokard enfarktüsü şüphesi olan hastaların tedavisinde tartışmalı bir terapötik yaklaşımdır. Metoprolol ile yapılan çalışmalar, bu kardiyoselektif β -bloker ile akut intravenöz uygulamanın, ilk tedavi edildiğinde tanımlanması zor olabilecek bazı 'yüksek riskli' hasta grupları dışında, kısa vadeli mortalitede klinik açıdan önemli bir iyileşme sağladığını kesin olarak göstermemiştir. Bununla birlikte, metoprolol iyi tolere edilmiştir ve göğüs ağrısının ve analjezik tedavisi ihtiyacının azaltılması, bazı taşiaritmilerin görülme sıklığının azalması ve enfarktüs tehdidinin akut bir olaya dönüştüğü hasta sayısında azalma açısından kesin terapötik fayda sağlamaktadır.[39]

Eğer bir β_1 seçici adrenoseptör antagonist ile acil müdahaleye yanıt vermesi muhtemel olan hastaları belirlemenin bazı yolları bulunabilirse, o zaman metoprolol akılcı bir seçim olacaktır ve ulaşılması zor bir hastalığın terapötik yönetiminde önemli bir rol oynayabilir. hasta grubunu tedavi edin. Enfarktüs sonrası hastalarda oral olarak uygulanan metoprolol toplam mortaliteyi azalttı.[40]

Metoprolol, ani kalp ölümü sıklığını, anjina pektorisli veya koroner arter baypas ameliyatı gerektiren hasta sayısını, kronik ventriküler aritmilerin görülme sıklığını ve karmaşıklığını, hastanede geçirilen süreyi ve ölümcül olmayan gelişen hasta sayısını önemli ölçüde azalttı. [41]

Metoprololün kardiyak aritmiler (tedavi ve önleme), idiyopatik dilate kardiyomyopati, hipotansif kardiyomegali, ilişkili taşikardi ile kalp yetmezliği ve ameliyat sırasında kontrollü hipotansiyonu indüklemek için sodyum nitroprussid'e ek olarak kullanılması gibi diğer terapötik alanlardaki klinik değerlendirmeleri ön nitelikte olmuştur.[42]

KONTRENDİKASYON: Kardiyovasküler terapötiklerde yaygın olarak kullanılan önemli bir β -adrenerejik antagonist olan metoprolol, yüksek risk potansiyeli sunar. Şiddetli bradikardi, Hasta sinüs sendromu, İkinci veya üçüncü derece kalp bloğu , Dekompanse kalp yetmezliği Ayrıca, ilacın aniden kesilmesi anjina ve miyokard enfarktüsü dahil olmak üzere yoksunluk sendromlarına yol açabileceğinden, uyumsuzluk öyküsü olan hastalarda dikkatli olunmalıdır. [43]

TOKSİSİTE: Metoprolol doz aşımı kalbi, kan basıncını, solunumu ve sinir sistemini etkileyebilir ve yaşamı tehdit eden komplikasyonlara neden olabilir. Metoprolol doz aşımının belirti ve semptomları, alınan miktara, geçen süreye ve diğer ilaçların varlığına veya tıbbi durumlara bağlı olarak değişebilir.[44]

Tedavi, alınan metoprolol miktarına, eşlik eden hastalıklara, yaşa ve alınan diğer maddelere bağlı olarak değişecektir. Tedavi seçenekleri arasında hacim resüsitasyonu, aktif kömür, tüm bağırsak irrigasyonu, nazogastrik lavaj, atropin, glukagon, kalsiyum glukonat/kalsiyum klorür, yüksek doz insülin, vazopresörler, intralipid, transkütanöz veya transvenöz kalp pili yer alır. Kardiyak durum ve mevcut sıvı dengesi hacim resüsitasyonunu yönlendirecektir. [45]

Hastanın bilinç değişikliği varsa aspirasyon ihtimaline karşı dikkatli olunmalıdır. Uzatılmış salınlı preparatlar veya büyük miktarda alım için tüm bağırsağın sulanması dikkate alınmalıdır. Nazogastrik lavaj, büyük miktardaki yutmalar dışında genellikle etkisizdir.[46]

İntralipid IV lipit emülsiyon tedavisi, ilacı miyositten çıkararak bir lipit havuzu görevi görebilir. Aynı zamanda bir substrat olarak serbest yağ asitlerini de sağlayabilir. Bu ilaç bazı laboratuvar izlemelerini etkileyebilir.[47]

Transkütanöz veya transvenöz kalp pili kullanmayı düşünün. Dirençli vakalarda ekstrakorporeal membran oksijenasyonu düşünülmelidir.[48]

Geriatrik: Metoprololün farmakokinetiği ve farmakodinamiği, kalp debisinin azalması, hepatik kan akışının azalması, böbrek fonksiyonunun azalması, vücut yağının artması ve plazma proteinlerine bağlanmasının azalması gibi fizyolojik faktörlere bağlı olarak yaşla birlikte değişebilir. [49]

Yaşlı yetişkinlerde, genç yetişkinlerle karşılaştırıldığında duyarlılık artmış ve metoprolol klerensi azalmış olabilir. Bu nedenle metoprolol yaşlı hastalarda dikkatli ve daha düşük dozlarda kullanılmalıdır; Bu hastalar metoprolol kullanıyorsa kan basıncı, kalp hızı, kalp fonksiyonu, bilişsel fonksiyon ve yan etkiler açısından yakından izlenmelidir. [50]

Klinik Kullanım Alanları:

Metoprolol, selektif bir β_1 -adrenerjik reseptör antagonisti olarak kardiyovasküler sistem üzerinde geniş bir etki yelpazesine sahiptir ve çeşitli klinik durumlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. En sık tercih edildiği başlıca endikasyonlar şunlardır:

Hipertansiyon: Metoprolol, kan basıncını düşürerek kardiyovasküler olay riskini azaltır. Tek başına ya da diğer antihipertansiflerle kombinasyon halinde kullanılabilir.[51]

Anjina Pektoris: Kardiyak iş yükünü ve miyokard oksijen tüketimini azaltarak anjinal semptomları hafifletir.

Kalp Yetmezliği: Özellikle metoprolol süksinat formu, sistolik kalp yetmezliği (HFrEF) olan hastalarda mortalite ve morbiditeyi azaltmak amacıyla kullanılır. Kullanım öncesinde stabilite ve uygun doz titrasyonu önemlidir.

Miyokard Enfarktüsü (MI) Sonrası Koruma: Akut MI sonrası, rekürren iskemi, ventriküler aritmi ve ölüm riskini azaltmak amacıyla önerilir.[52]

Aritmiler: Supraventriküler taşikardiler (SVT), atriyal fibrilasyon ve ventriküler ekstrasistol gibi ritim bozukluklarında semptomları azaltmak ve ritmi kontrol altına almak için kullanılır.[53]

Migren Profilaksisi: Metoprolol, migren ataklarının sıklığını ve şiddetini azaltmak amacıyla profilaktik olarak tercih edilen beta blokerlerden biridir.

Anksiyete ve Esansiyel Tremor (Off-label): Performansa bağlı anksiyete (örneğin sınav stresi, sahne korkusu) gibi durumlarda, çarpıntı ve titreme semptomlarının baskılanmasında etkili olabilir. Esansiyel tremorda da fayda sağlayabilir.[54]

SONUÇ:

Bu derlemede, metoprololün selektif β_1 -adrenerjik reseptör blokajı yoluyla kardiyovasküler sistemde hem hemodinamik hem de nörohormonal düzeyde yararlı etkiler gösterdiği detaylı biçimde tartışılmıştır. Hipertansiyon, anjina pektoris, sistolik kalp yetmezliği ve miyokard enfarktüsü sonrası koruma gibi başlıca endikasyonlarda metoprololün klinik etkinliği, çok sayıda randomize kontrollü çalışma ve meta-analizler ışığında net olarak ortaya konmuştur. Ayrıca, atriyal ve ventriküler aritmi kontrolünde, migren profilaksisinde ve performans anksiyetesi ile esansiyel tremor gibi off-label kullanımlarda elde edilen bulgular, ilacın terapötik yelpazesinin genişliğini göstermektedir.

KAYNAKÇA

- [1] Joseph, P., Swedberg, K., Leong, D. P., & Yusuf, S. (2019). The evolution of β -blockers in coronary artery disease and heart failure (Part 1/5). *Journal of the American College of Cardiology*, 74(5), 672–682.
- [2] Ricci, F., di Credico, A., Gaggi, G., Iannetti, G., Ghinassi, B., Gallina, S., Olshansky, B., & di Baldassarre, A. (2023). Metoprolol disrupts inflammatory response of human cardiomyocytes

- via β -arrestin2 biased agonism and NF- κ B signaling modulation. *Biomedicine & Pharmacotherapy*, 168.
- [3] García-Prieto, J., et al. (2017). Neutrophil stunning by metoprolol reduces infarct size. *Nature Communications*, 8.
- [4] Ippolito, M., & Benovic, J. L. (2021). Biased agonism at β -adrenergic receptors. *Cellular Signalling*, 80.
- [5] Coppola, S., Froio, S., & Chiumello, D. (2015). β -blockers in critically ill patients: From physiology to clinical evidence. *Critical Care*, 19(1).
- [6] Comerford, M. B., & Besterman, E. M. M. (1976). An eighteen months' study of the clinical response to metoprolol... *Postgraduate Medical Journal*, 52, 481–486.
- [7] Loubatières, A., et al. (1971). Beta-adrenerjik bloke edici ve uyarıcı ajanların insülin sekresyonu üzerindeki etkisi... *Diabetologia*, 7(3), 127–132.
- [8] Johnsson, G., et al. (1975). Astımlılarda intravenöz propranolol ve metoprololün etkileri... *European Journal of Clinical Pharmacology*, 8, 175–180.
- [9] Gulsun, T., & Sahin, S. (2024). Development of a RP-HPLC method... *Journal of Chromatography B*, 1241(1).
- [10] Androshchuk, V., et al. (2021). Koroner BT anjiyografi öncesinde beta blokajı hızlandırmak... *Clinical Radiology*, 76(3).
- [11] De Thaye, E., et al. (2017). Modifiye salımlı metoprolol formülasyonlarının farmakokinetik analizi... *European Journal of Pharmaceutical Sciences*.
- [12] Bešić, Z., et al. (2017). Metoprolol ve Ranitidin'in HRP ile modifiye edilmiş GC elektrot üzerindeki etkisi. *CMBEBIH*.
- [13] Borer, J. S., et al. (2016). Angina Pektorisli Hastalarda Metoprolol'ün Değerlendirilmesi. *International Journal of Medical Research*.
- [14] Garg, R., et al. (1995). ACE inhibitörlerinin kalp yetmezliğinde etkileri. *JAMA*, 273(18), 1450–1456.
- [15] Yusuf, S., et al. (1983). Beta blokajının enfarktüs üzerindeki etkileri. *Circulation*, 67(6 Pt 2), 132–41.
- [16] Volz-Zang, C., et al. (1994). Esmolol: Farmakodinamik ve farmakokinetik özellikler. *European Journal of Clinical Pharmacology*, 46, 399–404.
- [17] Fliser, D., et al. (1999). Renal handling of drugs in elderly. *European Journal of Clinical Pharmacology*, 55, 205–211.
- [18] Waagstein, F., et al. (1993). Metoprolol in idiopathic dilated cardiomyopathy. *The Lancet*, 342(8885), 1441–1446.
- [19] Wikstrand, J., et al. (1988). MAPHY çalışması. *JAMA*, 259(13), 1976–1982.
- [20] Koch-Weser, J. (1979). Metoprolol. *New England Journal of Medicine*, 301(13), 698–703.
- [21] Benfield, P., et al. (1986). Metoprolol: Farmakodinami ve terapötik etkiler. *Drugs*, 31(5), 376–429.
- [22] Papadopoulos, D. P., & Papademetriou, V. (2009). Metoprolol süksinat kombinasyonu. *Angiology*, 60(5), 608–613.
- [23] Olsson, G. (1988). Stockholm Metoprolol Denemesi. *American Heart Journal*, 116, 334–338.
- [24] Prakash, A., & Markham, A. (2000). Metoprolol in chronic heart failure. *Drugs*, 60(3), 647–678.
- [25] Sleight, P. (1986). Beta blokajı kullanımı. *Annual Review of Medicine*, 37, 415–425.
- [26] Wikstrand, J., et al. (1991). MAPHY çalışması: morbidite sonuçları. *Hypertension*, 17(4), 579–586.

- [27] Yusuf, S., et al. (1985). Miyokard enfarktüsünde beta blokajı. *Progress in Cardiovascular Diseases*, 27(5), 335–371.
- [28] Woods, P. B., & Robinson, M. L. (1981). Lipo çözünürlük çalışması. *Journal of Pharmacy and Pharmacology*, 33(1), 172–173.
- [29] Witchitz, S., et al. (1984). Metoprolol salım karşılaştırması. *Pharmatherapeutica*, 3, 566–572.
- [30] Winther, K., et al. (1986). Metoprolol ve trombosit agregasyonu. *European Journal of Clinical Pharmacology*, 29, 561–564.
- [31] Wilcox, R. G., et al. (1984). Egzersize fizyolojik yanıt. *British Journal of Clinical Pharmacology*, 17(3), 273–281.
- [32] Bax, N. D., et al. (1984). Beta blokerlerin warfarin etkisi. *British Journal of Clinical Pharmacology*, 17(5), 553–557.
- [33] Bell, F. P. (1985). Antihipertansif ajanların ACAT etkileri. *Journal of Cardiovascular Pharmacology*, 7(3), 437–442.
- [34] Bengtsson, C. (1981). 7 yıllık metoprolol çalışması. *Clinical Research Annuals*, 13, 7–15.
- [35] Calvert, R. T., et al. (1982). Metoprolol doz rejimi. *Journal of Pharmacy and Pharmacology*, 34(Suppl 12), 32P.
- [36] Cove-Smith, J. R., & Kirk, C. A. (1985). CNS side effects. *European Journal of Clinical Pharmacology*, 28, 69–72.
- [37] Dafgård, T., et al. (1981). Sabit kombinasyon karşılaştırması. *Clinical Research Annuals*, 13, 37–44.
- [38] Dorow, P., et al. (1984). Beta blokerlerin mukosilyer klirens etkisi. *International Journal of Clinical Pharmacology, Therapy and Toxicology*, 22(2), 108–111.
- [39] Eggertsen, R., & Hansson, L. (1982). Nifedipin ve metoprolol karşılaştırması. *European Journal of Clinical Pharmacology*, 21, 389–390.
- [40] Engelmeier, R. S., et al. (1985). Metoprolol ile egzersiz toleransı. *Circulation*, 72(3), 536–546.
- [41] Fager, G., et al. (1983). Lipoproteinler üzerine etkiler. *Artery*, 11(4), 283–296.
- [42] Gangji, D., et al. (1984). Nifedipin ve beta bloker etkileşimi. *British Journal of Clinical Pharmacology*, 17, 29–35.
- [43] Ripley, T. L., & Saseen, J. J. (2014). Beta bloker çeşitliliği. *The Annals of Pharmacotherapy*, 48(6), 723–733.
- [44] Shore, E. T., et al. (1981). Metoprolol overdose. *Annals of Emergency Medicine*, 10(10), 524–527.
- [45] Graudins, A., et al. (2016). Beta bloker doz aşımı. *British Journal of Clinical Pharmacology*, 81(3), 453–461.
- [46] Stellpflug, S. J., et al. (2010). Intentional overdose treatment. *Clinical Toxicology*, 48(3), 227–229.
- [47] Walter, E., et al. (2018). Cardiotoxic overdose management. *Journal of the Intensive Care Society*, 19(1), 50–55.
- [48] Chenoweth, J. A., et al. (2017). Metoprolol overdose with ECLS. *The American Journal of Emergency Medicine*, 35(10), 1581.
- [49] Eugene, A. R. (2016). Gender based dosing of metoprolol. *International Journal of Clinical Pharmacology & Toxicology*, 5(3), 209–215.
- [50] Chen, J., et al. (2022). CYP2D6 genotype and metoprolol. *Frontiers in Pharmacology*, 13.
- [51] Bristow, M. R., et al. (1996). Carvedilol in heart failure. *Circulation*, 94(11), 2807–2816.

- [52] Calzetti, S., et al. (1981). Metoprolol in essential tremor. *Journal of Neurology, Neurosurgery & Psychiatry*, 44(9), 814–819.
- [53] Frishman, W. H. (2021). Beta-blockers: Class update. *American Journal of Therapeutics*, 28(5), e603–e614.
- [54] Tyrer, P. (1984). Beta-blockers in anxiety. *The Lancet*, 324(8410), 104–107.



Makale id= 13

Sözlü Sunum

ORCID ID: 0000-0003-1796-2460 / 0000-0001-9647-9404

| 35

Regülasyon ve Performans İlişkisi: Elektrik Dağıtım Sektörü Üzerinde Değerlendirme**Araştırmacı Oğuz Kaan Atar¹ , Araştırmacı Bilgehan Kasım¹**¹Yeşilirmak Elektrik Dağıtım Anonim Şirketi

*Corresponding author: Oğuz Kaan Atar

Özet: Elektrik dağıtım sektörü, uzun yıllar boyunca kamuya ait bir yapı içerisinde faaliyet gösterse de son birkaç on yılda, serbest piyasa ekonomisine geçiş süreci doğrultusunda köklü bir dönüşüm yaşamıştır. Bu dönüşüm süreci, sektörel işleyişte ve düzenleyici çerçevede de önemli değişiklikleri beraberinde getirmiştir. Özelleştirme uygulamaları bu sürecin merkezinde yer almış; kamuya ait elektrik dağıtım şirketleri özel sektöre devredilerek, rekabet ortamının oluşturulması ve verimliliğin artırılması hedeflenmiştir. Bu değişimle birlikte, enerji piyasasını düzenlemek ve tüketici haklarını korumak amacıyla çeşitli yasal düzenlemeler hayata geçirilmiştir. Tarifelendirme sistemleri yeniden yapılandırılarak, maliyet bazlı fiyatlandırma esas alınmış ve hizmet kalitesinin artırılması için performans kriterleri tanımlanmıştır. Elektrik kesintilerinin sıklığı ve süresi, müşteri memnuniyeti, kayıp-kaçak oranları gibi performans göstergeleri hem düzenleyici otoriteler hem de kamuoyu tarafından yakından izlenir hale gelmiştir. Bu çalışma, sektöre dair elde edilen veriler ışığında, kamu kontrolünden piyasa mekanizmalarına geçişin elektrik dağıtım sektörü üzerindeki etkilerini detaylı bir şekilde analiz etmektedir. Dönüşüm sürecinin etkileri, performans ölçütleriyle karşılaştırmalı olarak ele alınmakta ve sektördeki yapısal değişimlerin genel işleyiş üzerindeki yansımaları incelenmektedir.

Anahtar Kelimeler: Elektrik Dağıtım Sektörü, Regülasyon, Performans, Epdk, Müşteri Memnuniyeti

Regulation and Performance: A Sector-Specific Assessment of Electricity Distribution

Abstract: Although the electricity distribution sector operated under public ownership for many years, it has undergone a profound transformation over the past few decades in line with the transition to a free market economy. This transformation has brought significant changes not only in the sector's operational structure but also in its regulatory framework. Privatization has been at the core of this process; publicly owned electricity distribution companies were transferred to the private sector to foster competition and increase efficiency. Alongside these changes, various legal regulations have been implemented to regulate the energy market and protect consumer rights. Tariff systems were restructured based on cost-reflective pricing, and performance criteria were introduced to enhance service quality. Performance indicators such as the frequency and duration of power outages, customer satisfaction, and loss-theft rates have become closely monitored by both regulatory authorities and the public. This study analyzes the impact of the transition from public control to market mechanisms on the electricity distribution sector, based on available data. The effects of this transformation are examined through comparative performance indicators, and the broader implications of structural changes on the overall functioning of the sector are explored in detail.

Keywords: Electricity Distribution Sector, Regulation, Performance, Epdk, Customer Satisfaction

1. INTRODUCTION

The electricity distribution sector, as the final stage of the energy value chain, plays a critical role in delivering reliable and high-quality power. Due to high fixed costs and infrastructure requirements, it functions as a natural monopoly, limiting the feasibility of perfect competition in Turkey. Consequently, regulatory mechanisms have been introduced to promote efficiency and service quality (Joskow, 2008).

Historically, the sector operated as a public monopoly under the Turkish Electricity Authority (TEK) until 1984. Institutional unbundling began in 1994, dividing TEK into generation (TEAŞ), transmission, and distribution (TEDAŞ), though ownership remained public. A significant reform was initiated with the 2001 Electricity Market Law (No. 4628), establishing the Energy Market Regulatory Authority (EMRA) and laying the foundation for liberalization. Between 2004 and 2013, all distribution regions were privatized, and operations transitioned to licensed private companies.

Table 7. Chronological Evolution of Regulatory Frameworks in Turkey’s Electricity Distribution Sector

Year	Evolution
1984	TEK (Turkish Electricity Authority) was responsible for carrying out all electricity-related activities.
1994	TEK was unbundled into TEAŞ and TEDAŞ, thereby separating transmission, generation, and distribution activities.
2001	With the enactment of the Electricity Market Law No. 4628, the Energy Market Regulatory Authority (EMRA) was established, marking the beginning of the liberalization process.
2004–2013	Twenty-one distribution regions under TEDAŞ were privatized.
2013	Regulatory mechanisms were transformed into performance-based systems
2021	Amendments to the Electricity Market Law strengthened quality measurement criteria in distribution activities.

Following privatization, regulation in Turkey’s electricity distribution sector shifted from a narrow focus on pricing to a broader performance-based approach, including investment quality, service continuity, and customer satisfaction. Incentive- and penalty-based tariff mechanisms have improved efficiency and encouraged long-term investment (Yıldız, 2016; Çetin & Oguz, 2007). Declining electricity losses, rising investments, and better service quality indicate the positive impact of effective regulation (EPDK, 2023). Since the early 2000s, the sector has transitioned from public to private ownership within a strong regulatory framework, yielding gains in efficiency, service, and consumer protection. In this natural monopoly context, regulatory authorities play a vital role not only in correcting market failures but also in supporting sustainable infrastructure. Turkey’s experience offers valuable lessons for developing countries in balancing regulation with private sector participation.

1.1. Legal and Institutional Regulatory Mechanisms

The effective functioning of the electricity distribution sector depends not only on the transfer of ownership to the private sector, but also on the establishment of a comprehensive legal and institutional framework. In Turkey, this framework is shaped through regulatory mechanisms defined by the Energy Market Regulatory Authority (EMRA). These mechanisms encompass tariff setting, service quality standards, investment obligations, and monitoring-enforcement systems.

1.1.1. Tariff Methodology and Revenue Cap Implementation

The "Revenue Cap" model, applied by EMRA, is the main tool for regulating distribution companies' revenues in Turkey. It sets a maximum allowable income for each five-year tariff period, based on costs and performance. The cap considers operating expenses, depreciation, return on capital, and investment needs. This approach encourages efficiency and prevents excessive profits (Joskow, 2008). Since 2011, its effective implementation has improved financial predictability for companies (EPDK, 2023).

1.1.2. Service Quality Regulation in Electricity Distribution

In electricity distribution, regulation encompasses not only pricing but also service quality as a fundamental component. Under the Regulation on Quality in Electricity Distribution issued by the Energy Market Regulatory Authority (EMRA), service continuity and quality are measured through various technical indicators. The most commonly used indicators in this context include:

- A. **SAIDI** (System Average Interruption Duration Index): It refers to the average outage duration experienced by a customer within a given period.
- B. **SAIFI** (System Average Interruption Frequency Index): It indicates the average number of outages experienced by a customer within a given period.

These indicators function as performance benchmarks, with incentives for companies below thresholds and penalties for those exceeding them. This encourages competition in both cost-efficiency and service quality (Yıldız, 2016).

1.1.3. Investment Obligations

EMRA's investment obligations for each tariff period are essential for sustaining and developing distribution infrastructure. Companies are required to make region-specific investments aimed at reducing losses, improving security, and enhancing service quality, subject to EMRA's approval. These obligations promote long-term system reliability over short-term profit (Çetin & Oğuz, 2007).

1.1.4. Regulatory Oversight and Sanctioning Mechanisms

An effective regulatory framework requires not only rule-setting but also active oversight and enforcement. In Turkey, EMRA audits distribution companies and imposes sanctions—ranging from fines to license revocation—for non-compliance. Underperformance may also lead to a reduced revenue cap in the next tariff period, encouraging both compliance and continuous improvement (EPDK, 2023).

2. METHOD

This study employs a qualitative approach to assess the impact of regulation on Turkey's electricity distribution sector. Common in the analysis of complex issues like public policy and institutional change, this method allows for the examination of both numerical data and the content of policy documents, regulations, and sectoral practices (Yin, 2018).

3. EXAMPLES OF REGULATORY CHANGES AND THEIR IMPACT ON PERFORMANCE

3.1. Service Quality Indicators (SAIDI/SAIFI)

Initially, service quality indicators were used only for monitoring, without sanctions or incentives. This changed with the 2013 Regulation on Service Quality in Electricity Distribution and Retail Sales, which introduced performance targets based on SAIDI and SAIFI. Companies failing to meet these targets face penalties, while high performers may receive incentives (EPDK, 2023). Article 7 defines continuity of supply as meeting demand with minimal interruptions at acceptable economic costs, while Article 8 mandates recording all outages (Resmî Gazete, 2006). These provisions have enabled systematic performance tracking; for instance, in 2023, EMRA fined 19 companies a total of 280.5 million TL for non-compliance.

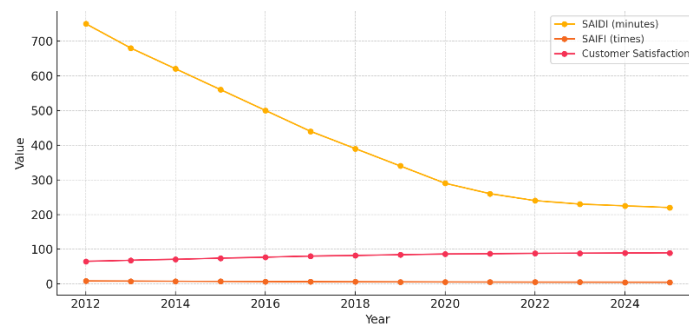


Figure 1. Performance Indicators of Turkey's Electricity Distribution Sector (EPDK, 2023)

Figure 1 illustrates annual trends in SAIDI, SAIFI, and customer satisfaction in Turkey's electricity distribution sector from 2012 to 2025. SAIDI and SAIFI have steadily declined, while customer satisfaction has increased. Data for 2012–2023 are from the Electricity Market Development Report; 2024–2025 figures are trend-based estimates.

3.2. Regulation of Tariffs Through Electricity Loss and Theft Ratios

Loss and theft rates (non-technical losses) in the electricity distribution sector are of critical importance for both technical efficiency and financial sustainability. In the pre-regulation period, a uniform loss-theft target was applied across all distribution regions, with standard thresholds set regardless of regional socio-economic and technical differences. This approach led to structural inequities, particularly for distribution companies operating in regions with high loss-theft rates, and rendered performance measurement misleading.

To address this issue, regulatory frameworks were gradually developed and can be summarized as follows:

- In 2006, for the first time, EMRA set specific targets for electricity loss and theft rates, integrating these targets into the tariff-setting process. This regulation aimed to incentivize the reduction of losses by placing distribution companies' performance under systematic monitoring.
- The 2011 regulatory revision introduced region-specific loss-theft targets, setting differentiated thresholds for areas with historically high (e.g., Dicle, Van) and low (e.g., Trakya) loss rates. This enabled fairer performance evaluations by accounting for regional socio-economic conditions.
- The 2016 regulation introduced positive incentives for companies that reduced loss-theft rates below targets, encouraging efficiency through both rewards and penalties.

These regulatory measures have led to notable declines in loss-theft rates and enabled fairer assessment of regional performance. The differentiated incentive structure has been especially effective for companies in challenging regions (EPDK, 2023).

Table 8. Evolution of Electricity Loss and Theft Rates (TEDAŞ, 2023)

Year	National Average (%)	Dicle Region (%)
2012	21	75
2013	19,5	70
2014	18	65
2015	16,5	60
2016	15	55
2017	13,5	50
2018	12,5	47
2019	11,5	45
2020	11	44
2021	10,8	43,5
2022	10,7	43,2
2023	10,6	43
2024*	10,4	42,5
2025*	10,2	42

According to reports by Türkiye Elektrik Dağıtım A.Ş. (TEDAŞ), an additional revenue advantage of approximately 1–2% has been achieved since 2017. The data used is derived from the 2023 Annual Report on Turkey's Electricity Distribution Sector published by TEDAŞ.

3.3. Revenue Cap Tariffs and Investment Commitment Structures

Before regulation, uncertainty in revenue cap calculations hindered long-term investment planning. This was addressed with the formal adoption of the Revenue Cap Methodology in 2011, which set maximum allowable revenues based on investment needs, operating costs, and reasonable profit. In 2016, the Regulatory Asset Base (RAB) model was added to provide a clearer basis for return calculations, enhancing transparency and investment incentives (EPDK, 2023). As a result, annual investments rose from TRY 1.9 billion in 2011 to TRY 6.0 billion in 2023 (TEDAŞ, 2023). Investment compliance exceeded 95% in many regions, while project delays dropped from 18% to 3%, indicating improved predictability, regulatory impact, and operational capacity.

3.4. Consumer Services Regulation in the Electricity Distribution Sector

In electricity distribution, consumer focus includes not only supply continuity but also service quality in areas like subscriptions, metering, and complaint handling. Before regulation, the absence of standards caused significant issues, particularly in complaint resolution and service timelines. The 2014 Regulation on Consumer Services addressed these gaps by defining distribution companies' obligations and introducing mandatory quality standards (EPDK, 2014). The key provisions introduced under this regulation include:

- The resolution period for consumer complaints was limited to a maximum of 15 days; companies are held accountable if this period is exceeded.
- All distribution companies were required to establish call centers, and providing 24/7 service via the ALO 186 hotline was made mandatory.
- Applications and inquiries made through e-Devlet, mobile applications, and web-based platforms were supported, thereby enhancing digital accessibility.

As a result of these regulatory measures, significant performance improvements have been achieved in the area of consumer services.

- The average complaint resolution time decreased from 21 days in 2013 to 6 days by 2023.
- The average response time for incoming calls to customer service centers declined from 52 seconds to 12 seconds over the same period.
- These improvements were also reflected in customer satisfaction scores; the overall satisfaction rating increased from 65 points in 2013 to 85 points by 2023.

These indicators show that service quality regulation goes beyond administration, serving as a transformative tool that improves the consumer experience. Grounded in transparency, digitalization, and measurable targets, it has significantly advanced consumer rights in Turkey's energy market.

3.5. Remote Meter Reading (AMR) and SCADA Incentives

Before regulation, manual meter reading caused errors, high labor costs, and delays. To resolve this, AMR investments began receiving return-on-investment incentives in 2016 through the revenue cap model, accelerating adoption (EPDK, 2023). By 2020, around 80% of SCADA and remote monitoring investments were also supported, enhancing capabilities in network monitoring, fault detection, and theft analysis.

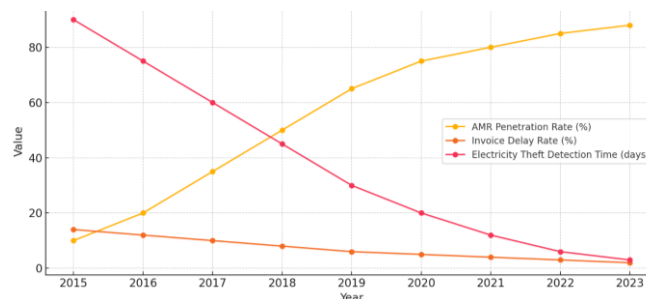


Figure 2. Technological Transformation Indicators (2015–2023) (EPDK, 2023)

The automatic meter reading (AMR) penetration rate increased from approximately 10% in 2015 to 85% by 2023. During the same period, the invoice delay rate declined from 13% to 2%. Under manual systems, electricity theft detection time was around three months; however, with the adoption of remote monitoring technologies, it has been reduced to as little as two days.

3.6. Regulatory Compliance Audits and Mandatory Independent Oversight

Regulatory effectiveness in energy markets depends on both the legal framework and its implementation. Until 2019, EMRA-led audits faced capacity and consistency issues, limiting comparability across companies. To address this, independent audit firms were authorized in 2019 to assess compliance and assign “Regulatory Compliance Scores” (EPDK, 2023). This reform strengthened internal controls, promoted transparent governance, and standardized audit procedures, enabling more reliable performance comparisons and improvements in compliance and governance indicators.

- The audit compliance rate rose from approximately 78% prior to implementation to 97% by 2023.
- The number of companies earning off-tariff revenues dropped from 7 in 2019 to just 2 by 2023.
- Systems supporting corporate governance infrastructure—such as ERP (Enterprise Resource Planning) and CRM (Customer Relationship Management) software—have rapidly expanded, resulting in the standardization of internal processes.

These developments have not only enhanced regulatory compliance but also contributed to increased digitalization and institutionalization, thereby reinforcing the structural transformation of the sector.

4. BENCHMARKING

Assessing the impact of regulation in electricity distribution requires more than national analysis; cross-country comparisons are essential for meaningful insights (Joskow, 2008; World Bank, 2021). Table 3 presents key indicators—such as loss-theft rates and SAIDI—for Turkey, Poland, Mexico, and Germany, highlighting how regulation affects technical efficiency and service quality.

Table 9. Key Indicators Following Liberalization in Electricity Distribution

Country	Liberalization Year	Loss-Theft Ratio (%)	SAIDI (m)
Turkey	2001	22.5 → 10.6	1050 → 220
Poland	1997	14.1 → 8.4	410 → 190
Mexico	2013	19.0 → 15.2	680 → 480
Germany	1998	6.5 → 4.1	150 → 14

As shown in the table, Turkey significantly reduced electricity losses from 22.5% to 10.6% after liberalization, outperforming countries like Poland and Mexico. SAIDI also improved markedly—from 1,050 minutes in 2001 to 220 minutes in 2023—approaching levels seen in other transition economies. However, Germany remains a benchmark with just 14 minutes of average outages, achieved through advanced digitalization and efficient infrastructure (IEA, 2020). While Turkey has made rapid progress through regulatory tools like the revenue cap model, investment incentives, and AMR/SCADA systems, further improvements are needed to reach the reliability levels of mature markets.

5. COST-BENEFIT ANALYSIS

The liberalization of Turkey’s electricity distribution sector has driven structural change and generated significant economic value. Between 2013 and 2023, policies like the revenue cap model, service quality standards, loss-theft targets, and digital investments led to measurable gains in financial efficiency and social benefit.

Table 10. Economic Gains from Regulatory Reforms in the Post-Liberalization Period

Item	Estimated Value (TRY)
Total infrastructure investment (distribution network, AMR, SCADA, etc.)	~35 billion TRY
Energy savings from reduction in loss-theft rates	~11 billion TRY
Economic value of reduced electricity outage durations	~4 billion TRY
Increased collection rates and improved customer trust	~3 billion TRY
Total Direct Economic Benefit	~18 billion TRY

Around 50% of electricity distribution investments over the past decade in Turkey generated direct economic returns, while the rest yielded indirect social benefits such as improved service quality, reliability, and customer satisfaction. This reflects Joskow’s (2008) “multi-dimensional benefit space of regulation,” which balances efficiency with social welfare. Loss-theft reductions—from 15% in 2013 to 10.6% in 2023—produced annual savings of 200–300 million TRY (EPDK, 2023; TEDAŞ, 2023). Reduced outage durations also added value by minimizing production losses, estimated by the IEA (2020) at 3–5 USD per capita per hour. Additionally, digital tools like e-Government and CRM systems improved billing-collection rates and enhanced financial sustainability.

6. EMERGING TRENDS IN GLOBAL ENERGY REGULATION

Today, regulatory frameworks in the energy sector are no longer limited to market oversight and cost control; they also encompass multi-dimensional objectives such as combating climate change, promoting social responsibility, enabling digital transformation, and supporting local energy initiatives. In this context, regulations targeting the electricity distribution sector are undergoing a structural transformation globally and are being reshaped by emerging policy directions (IEA, 2023; World Bank, 2022).

6.1. Decarbonization Strategies and Integration of Renewable Energy into Distribution Networks

Many countries have initiated comprehensive transformations in their energy sectors as part of their commitment to achieving carbon neutrality by 2050. As a component of these targets, electricity distribution systems are being restructured to accommodate the integration of renewable energy sources. Regulatory frameworks increasingly encourage distribution companies to integrate photovoltaic (solar), wind, and other distributed generation sources into the grid. In this context, grid codes, connection procedures, and feed-in tariffs are being revised, and the distribution network is evolving from a centralized architecture toward a more flexible and decentralized system (IRENA, 2022).

6.2. ESG-Compliant Regulatory Models

In recent years, energy regulations have increasingly been grounded in holistic policy approaches that incorporate Environmental, Social, and Governance (ESG) criteria. In this context, distribution companies are now expected not only to achieve economic efficiency but also to promote environmental sustainability, social inclusiveness, and transparent corporate governance structures. Particularly within European Union countries, energy regulation is being reshaped by ESG-based legislative frameworks such as the European Green Deal and the Sustainable Finance Taxonomy (European Commission, 2021). In Turkey as well, EMRA has begun taking steps—as of 2024—toward making ESG-oriented reporting standards mandatory for licensed companies (EPDK, 2024).

6.3. AI-Driven Digitalization

The widespread adoption of digital technologies in electricity distribution has necessitated the expansion of regulatory frameworks to cover new domains such as technical infrastructure and data security. In particular, artificial intelligence (AI) algorithms integrated into SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) systems have enabled the development of advanced applications, including fault prediction, load management, loss analysis, and customer demand forecasting. Regulations now promote the secure, transparent, and compliant use of such technologies, while also establishing new standards related to cybersecurity and data ownership (IEA Digitalization Report, 2022).

6.4. Microgrids, Local Energy Initiatives, and Participatory Regulation

With the rise of concepts such as energy democracy and local energy production, microgrids, energy communities, and cooperatives have increasingly come onto the agenda of regulatory frameworks. Traditionally focused on large-scale corporate actors, regulatory systems are now compelled to include individuals, local governments, and community-based energy initiatives. In particular, legal frameworks such as “Citizen Energy Communities” in Europe support local autonomy in energy production and consumption (IRENA, 2021; EU Directive 2019/944). Supporting these structures in areas such as tariff design, grid connection rights, and network usage fees plays a critical role in the next-generation design of distribution regulations.

| 42

7. FUTURE OUTLOOK

The structural, technological, and institutional progress in Turkey’s electricity distribution sector over the past decade supports a cautiously optimistic outlook. If the current regulatory framework, along with digitalization, investment incentives, and quality standards, is maintained, Turkey could reach near-European performance levels by 2030. By 2023, SAIDI dropped to 220 minutes/year and is projected to reach 120 minutes/year—close to the EU average—through continued SCADA/AI deployment and grid modernization (CEER, 2022; IEA, 2023). Loss-theft rates fell from 22.5% in 2006 to 10.6% in 2023 and could decline below 8% with the expansion of AMI systems and targeted incentives (World Bank, 2022). Annual infrastructure investment reached TRY 6 billion in 2023 and is expected to stabilize at TRY 8–10 billion by 2030, supporting grid capacity, energy efficiency, and renewable integration (EPDK, 2023; IRENA, 2022). Institutional capacity will likely improve through standardized audits, ESG-aligned governance, and expanded use of CRM, ERP, and AI-based systems. These trends position Turkey to align with European standards in electricity distribution by 2030. However, reaching this goal depends not only on the continuation of current policies but also on:

- Enhancing the competitiveness and transparency of the investment environment,
- Restructuring regulation with a focus on climate and digital transformation,
- More effectively supporting local energy production and microgrid initiatives.

Within this framework, Turkey is expected to undergo a transformation over the next decade that encompasses not only infrastructure development but also advances in energy governance and societal participation.

8. CONCLUSION AND ASSESSMENT

This study has examined the structural transformation of Turkey’s electricity distribution sector following liberalization and regulatory reforms since the early 2000s. Findings show that post-2011 regulatory tools—such as the revenue cap model, service quality standards, investment incentives, and independent audits—have significantly improved sector performance. Regulation has gone beyond price-setting, positively impacting service quality, investment sustainability, digital infrastructure, and customer satisfaction. Notable outcomes include the reduction of SAIDI and SAIFI, expanded AMI/SCADA use, and a drop in electricity losses from 22.5% to 10.6%. Customer satisfaction reached 85 points, and over 50% of the TRY 35 billion invested between 2013–2023 yielded direct economic returns. High compliance rates (over 95%) and reduced project delays (3%) reflect the success of the revenue cap and RAB models. The introduction of regulatory compliance scores and standardized audits has strengthened governance and accountability. Compared to countries like Poland and Mexico, Turkey has demonstrated strong regulatory progress. While still trailing mature markets like Germany, projections suggest SAIDI may reach 120 minutes/year and loss rates fall below 8% by 2030, with annual investments stabilizing at TRY 8–10 billion. However, realizing these projections will depend on three key strategic factors:

1. Ensuring a competitive, transparent, and predictable investment environment,
2. Aligning regulatory frameworks with digitalization, climate goals, and ESG principles,
3. Supporting local energy initiatives, microgrids, and community-based models more effectively.

Turkey's electricity distribution sector has undergone a successful transition from public monopoly to private participation under a strong regulatory framework, achieving notable technical and institutional progress. This experience offers a valuable model for other developing countries. Looking ahead, regulation should integrate goals of efficiency, sustainability, digitalization, and social inclusion. Establishing a resilient and EU-comparable distribution system by 2030 is a realistic strategic objective.

9. ACKNOWLEDGEMENT

The authors would like to express their sincere gratitude to Yeşilirmak Electricity Distribution Inc. (Yeşilirmak Elektrik Dağıtım A.Ş.) for its valuable contributions to the realization of this study.

10. REFERENCES

- Çetin, T., & Oguz, F. (2007). The Politics of Regulation in the Turkish Electricity Market. *Energy Policy*, 35(3), 1539–1549. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2006.04.007>
- EPDK. (2023). *Elektrik Piyasası Gelişim Raporu*. Ankara: Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu.
- Joskow, P. L. (2008). Incentive Regulation and Its Application to Electricity Networks. *Review of Network Economics*, 7(4), 547–560. <https://doi.org/10.2202/1446-9022.1178>
- Yıldız, Ö. (2016). Elektrik Dağıtım Sektöründe Performans Göstergeleri ve Regülasyon. *Enerji Ekonomisi ve Politikası Dergisi*, 2(1), 45–60.
- Yin, R. K. (2018). *Vaka Çalışması Araştırması ve Uygulamaları: Tasarım ve Yöntemler* (6. Baskı). SAGE Yayınları.
- Resmî Gazete (2006, Sayı: 26287) Elektrik Piyasasında Dağıtım Sisteminde Sunulan Elektrik Enerjisinin Tedarik Sürekliliği, Ticari ve Teknik Kalitesi Hakkında Yönetmelik
- TEDAŞ (2023). *2023 Yılı Türkiye Elektrik Dağıtım Sektör Raporu*. Türkiye Elektrik Dağıtım A.Ş.
- EPDK (2014). Elektrik Piyasasında Dağıtım ve Perakende Satış Faaliyetlerine İlişkin Tüketici Hizmetleri Yönetmeliği. Resmî Gazete, 28.05.2014, Sayı: 29013.
- World Bank (2021). *Regulatory Indicators for Sustainable Energy (RISE)*. <https://rise.worldbank.org>
- IEA (2020). *Electricity Market Report*. International Energy Agency.
- EPDK (2024). *ESG Odaklı Enerji Regülasyonu Taslak Raporu*. Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu.
- European Commission (2021). *EU Taxonomy and Sustainable Finance Framework*.
- IEA (2022). *Digitalization and Energy: Status Report*. International Energy Agency.
- IEA (2023). *World Energy Outlook*. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023>
- IRENA (2021). *Innovation Landscape for Smart Electrification*. International Renewable Energy Agency.
- IRENA (2022). *Renewables Integration in Electricity Networks*.
- World Bank (2022). *Regulatory Indicators for Sustainable Energy (RISE)*. <https://rise.worldbank.org>

Makale id= 14

Sözlü Sunum

ORCID ID: 0000-0001-9647-9404 / 0000-0003-1796-2460 / 0000-0002-2728-706X

| 44

Elektrik Dağıtım Sistemlerinde Güvenliği Artırmaya Yönelik Ark Hatası Önleyici Cihazın Geliştirilmesi ve Saha UygulamasıAraştırmacı Bilgehan Kasım¹, Araştırmacı Oğuz Kaan Atar¹, Araştırmacı Caner Özen¹¹Yeşilirmak Elektrik Dağıtım Anonim Şirketi

*Corresponding author: Oğuz Kaan Atar

Özet: Elektrik dağıtım sistemlerinde meydana gelen ark hataları gerek personel güvenliği gerekse enerji sürekliliği açısından ciddi riskler barındırmaktadır. Bu tür arızalar hem ekipmanlarda kalıcı hasara hem de can güvenliğini tehdit eden olaylara yol açabilmektedir. Bu riskleri azaltmak amacıyla daha önce yalnızca laboratuvar ortamında ve simülasyonlar aracılığıyla test edilen ark hatası önleyici cihaz üzerinde önemli geliştirmeler yapılmıştır. Bu çalışma kapsamında, cihazın elektronik donanımı optimize edilmiş; daha güvenilir ve kompakt bir yapı için baskı devre kartı (PCB) tasarımı gerçekleştirilmiş ve üretimi tamamlanmıştır. Ayrıca cihaz, endüstriyel saha koşullarına uygun özel bir muhafaza ile donatılmıştır. Geliştirilen prototip, bir elektrik dağıtım merkezindeki hücre içerisine monte edilerek gerçek saha koşullarında test edilmiştir. Ortam ışık sensörü ile yapılan izlemelerde, cihazın elektrik arki kaynaklı ani ışık değişimlerini başarılı şekilde ve gerçek zamanlı olarak algıladığı doğrulanmıştır. Önceden tanımlanmış eşik seviyeleri aşıldığında, sistem operatörlerine uyarı sinyali ileten yapı sayesinde erken müdahale imkânı sağlanmıştır. Saha uygulamaları sonucunda cihazın stabil çalıştığı, çevresel etkilerden minimum düzeyde etkilendiği ve erken uyarı sistemi olarak güvenilir bir performans sergilediği gözlemlenmiştir. Elde edilen bulgular, cihazın elektrik dağıtım sistemlerinde iş sağlığı ve güvenliğini artırmaya yönelik somut, uygulanabilir ve yenilikçi bir çözüm sunduğunu ortaya koymaktadır.

Anahtar Kelimeler: Elektrik Arki, Erken Tespit, Ortam Işık Sensörü, Pcb Tasarımı, Saha Uygulaması, Dağıtım Merkezi, İş Güvenliği, Sistem Sürekliliği, Gömülü Sistem, Uyarı Mekanizması

Development and Field Implementation of An Arc Fault Prevention Device to Enhance Safety in Electrical Distribution Systems

Abstract: Arc faults occurring in electrical distribution systems pose significant risks in terms of both personnel safety and energy continuity. Such faults can lead to permanent damage to equipment as well as incidents that threaten human safety. To mitigate these risks, significant improvements have been made to the arc fault prevention device, which had previously only been tested in laboratory and simulation environments. Within the scope of this study, the device's electronic hardware was optimized, and a printed circuit board (PCB) was designed and manufactured to achieve a more reliable and compact structure. In addition, the device was equipped with a custom-designed enclosure suitable for industrial field conditions. The developed prototype was installed inside a cell at an electrical distribution center and tested under real-world conditions. Monitoring through the ambient light sensor confirmed that the device successfully detected sudden light changes caused by arc faults in real time. The system was designed to issue warning signals to operators when predefined threshold levels were exceeded, enabling early intervention. Field application results showed that the device operated stably, was minimally affected by environmental factors, and performed reliably as an early warning system. The findings demonstrate that the developed device offers a concrete, practical, and innovative solution to enhance occupational health and safety in electrical distribution systems.

Keywords: Electric Arc, Early Detection, Ambient Light Sensor, Pcb Design, Field Implementation, Distribution Center, Occupational Safety, System Continuity, Embedded System, Warning Mechanism

INTRODUCTION

Electrical distribution systems are critical infrastructures that ensure the safe, uninterrupted, and high-quality delivery of energy to end-users. The reliability of these systems is of great importance in terms of preventing economic losses as well as ensuring the safety of life and property. However, faults that occasionally occur in these systems can negatively affect energy continuity and lead to serious problems. One of these faults is the electric arc. An electric arc can be defined as an electrical discharge that occurs between two conductors, carrying high temperature and intense energy. Especially at medium voltage levels, arcs can both reduce the lifespan of equipment and cause hazardous situations such as fires.

In previous study, the effects of electric arcs on distribution systems were examined in detail, and a system design for detecting this fault was proposed. In this context, a method based on detecting sudden increases in light using ambient light sensors was developed, the system was assembled on a perforated circuit board, and its performance was evaluated through simulation tests under various scenarios. The simulation results revealed that the developed system has a potential effect in detecting electric arcs (Atar, Özen, & Kasim, 2024).

However, it was observed that in order for the system to be used safely and for a long duration in the field, especially in a real distribution center, the existing prototype needed to be transformed into a more robust, compact, and reliable hardware. Therefore, integrating the system into a specially designed electronic hardware instead of a perforated circuit board became necessary to enhance both functionality and reliability. Additionally, it was aimed to design the enclosure of this new hardware to be suitable for environmental conditions and the distribution center environment.

This paper presents a detailed overview of the final hardware design of the developed system, the engineering approach of the enclosure structure, the testing of the system under medium voltage electric arc conditions in a laboratory environment, and finally, the installation process of the system in a distribution center. This study is considered a significant step towards making electrical distribution systems safer and has the potential to pioneer similar fault detection systems in the future (Atar, Özen, & Kasim, 2024).

METHOD

This section will present the main structure of the hardware, the hardware design, and the integration of the embedded software under separate subheadings.

Main Structure of the Hardware

The developed arc detection system is based on a sensor structure that detects sudden changes in ambient light. Therefore, at the core of the system is a microcontroller unit capable of processing data from the sensor quickly and reliably. During the microcontroller selection process, criteria such as the ability to process both analog and digital signals, communication capabilities with various peripheral units, and energy efficiency were taken into consideration. Accordingly, it was decided to use the STM32F103C8T6 microcontroller with a 32-bit Arm Cortex-M3 architecture, which had been successfully used in previous studies. This microcontroller was preferred due to its sufficient number of general-purpose input/output pins (GPIOs), analog input channels, and serial communication interfaces (STMicroelectronics, n.d.).

The power requirements of the system were determined by taking into account the typical power infrastructure of distribution centers. Based on the commonly used 24V DC voltage level in industrial applications, the system was designed to be powered by this voltage. However, since the components used in the system operate at different voltage levels, a multi-stage voltage regulation mechanism was required. Specifically, the MAX485 chip used in the communication module operates at 5V DC, while the STM32F103C8T6 microcontroller operates at 3.3V DC. To accommodate these differences, a two-stage voltage step-down mechanism was implemented (STMicroelectronics, 2023).

In the first stage, the 24V DC input voltage is stepped down to 5V DC using the LM2576T-5 regulator. This component is a switch-mode voltage regulator, which minimizes energy loss thanks to its high efficiency. In the second stage, the 5V DC is further reduced to 3.3V DC using a low-dropout linear

regulator from the RT9193 series. This approach ensures that both the microcontroller and the communication module are supplied with stable and safe voltage levels (Thakur et al., 2023).

The system was also designed to support the MODBUS RTU communication protocol to allow integration with the existing IoT infrastructure in distribution centers. For this purpose, the RS485 communication standard was chosen, and the MAX485 chip was integrated into the system to provide the physical layer of the protocol. This structure enables the system to function in terms of remote monitoring and data transmission capabilities (Han, Wang, Guo, & Wang, 2025).

During the hardware design phase, not only the processor and communication modules were considered, but also application-specific input/output units. The system includes various digital input and output pins, analog inputs, and relay control outputs. This allows the system to monitor environmental conditions and, when necessary, trigger warning systems or protective equipment. The overall connection layout of the hardware and the relationship between components is presented in Figure 1.

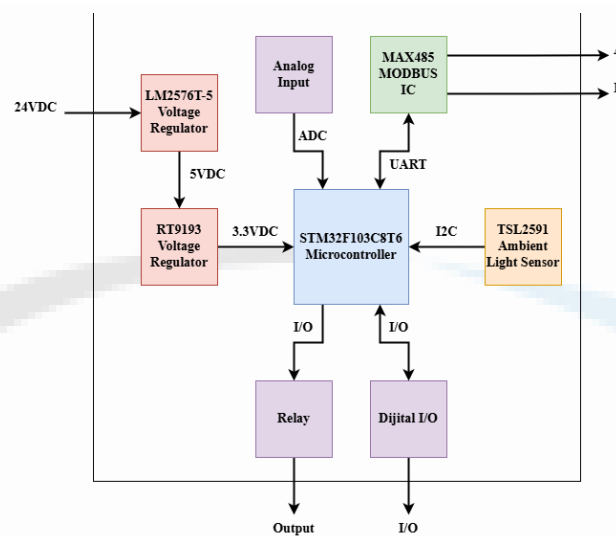


Figure 1. Block Diagram of the Hardware

Hardware Design

During the hardware design process, the KiCad software was preferred for drawing circuit schematics and generating the PCB. KiCad is an open-source and completely free electronic design automation (EDA) software. Thanks to its advantages such as enabling accurate multi-layer PCB designs, a wide component library, an advanced schematic editor, and 3D modeling support, it is widely used in both academic and industrial applications. Considering these features, the use of KiCad was deemed appropriate for the electronic design processes of the system.

All hardware components detailed in the previous section were modeled at the schematic level as the first step of the design process. In the schematic drawing phase, all functional modules of the system were addressed as separate circuit blocks, and the connections between components were configured in accordance with design principles.

The relevant schematic designs are presented in the following figures:

- Figure 2 shows the schematic diagram of the microcontroller circuit, which is the main processing unit of the system. This diagram includes details such as the microcontroller's power supply lines, programming pins, and connections to peripheral units.
- Figure 3 illustrates the multi-stage voltage regulation structure that meets the energy requirements of the system. This section schematically presents the conversion process from 24VDC to 5VDC and 3.3VDC using LM2576T-5 and RT9193 voltage regulators.

- Figure 4 contains the schematic design of the RS485-based communication circuit that enables the hardware to communicate via the MODBUS protocol. This circuit includes details such as data exchange and direction control between the MAX485 chip and the microcontroller.
- Figure 5 presents the relay output circuit used to trigger external devices. This section also includes intermediate components (transistors, diodes, etc.) that allow the microcontroller outputs to drive the relays.

Following the completion of these schematic drawings, the process moved on to component placement and PCB routing. The schematic design process serves as a foundation for electrical safety and system stability, and it provides direct infrastructure for the subsequent PCB layout phase.

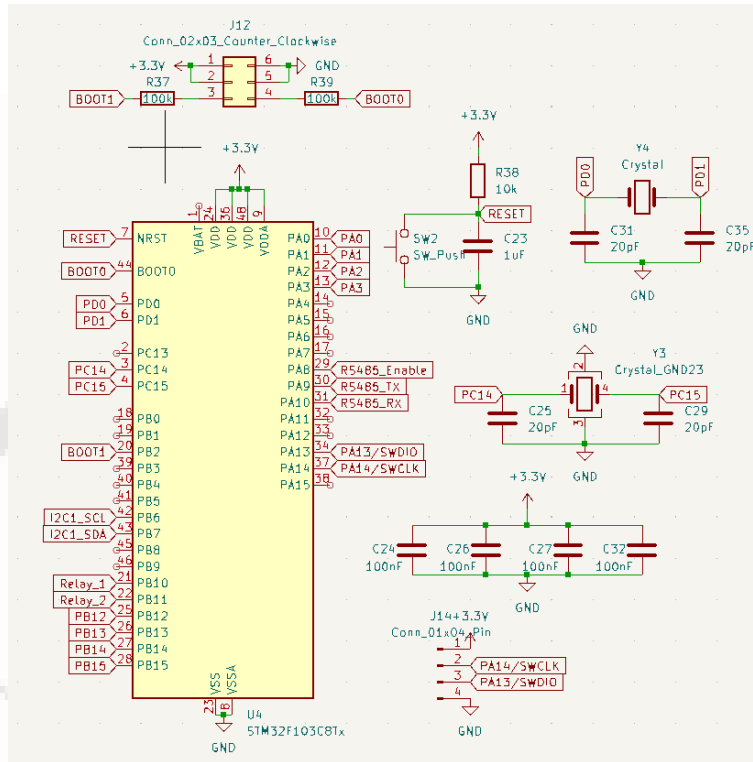


Figure 2. Microcontroller Circuit Schematic

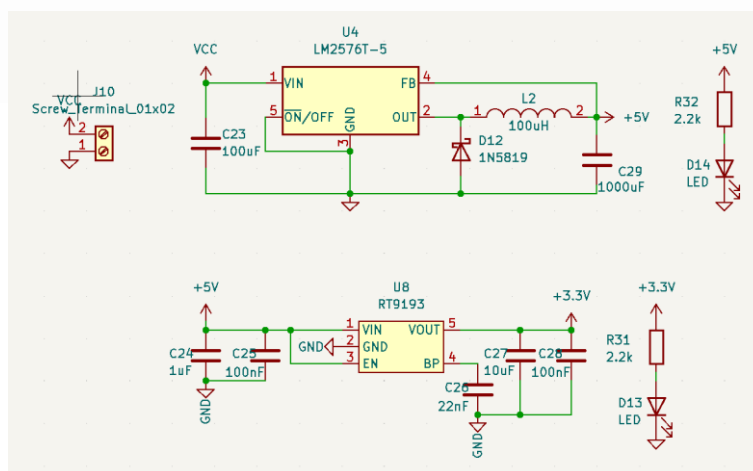


Figure 3. Power Supply Circuit of the System

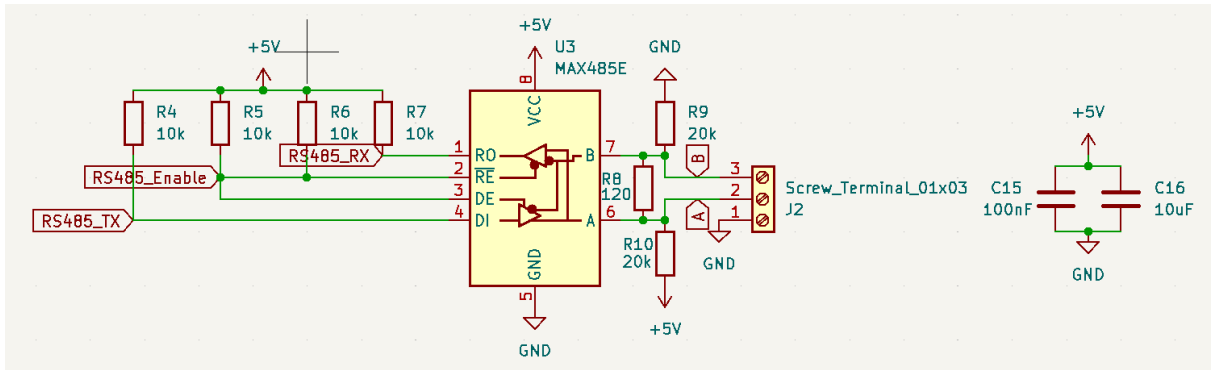


Figure 4. MODBUS Communication Circuit

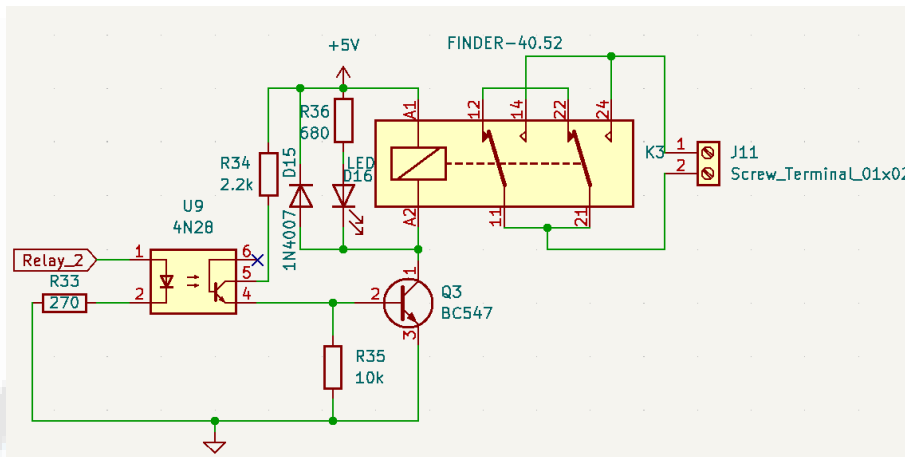


Figure 5. Relay Output Circuit

After the schematic design phase, the physical PCB layout and design were carried out. Considering that the environment in which the system would operate could involve high electromagnetic interference (EMI) and that electromagnetic compatibility (EMC) requirements must be met, a multi-layer PCB structure was selected. As a result of the design decisions, the system was configured as a 4-layer PCB. This structure offers advantages in ensuring signal integrity, reducing noise, and especially enabling stable transmission of high-frequency signals. The 4-layer PCB structure designed for low EMI/EMC and its layer arrangement are shown in Figure 6. Additionally, the 3D rendering of the system, completed with component placement, is provided in Figure 7 as a reference for mechanical assembly and enclosure integration. The manufactured hardware is presented in Figure 8.



Figure 6. 4-Layer PCB Structure for Low EMI/EMC

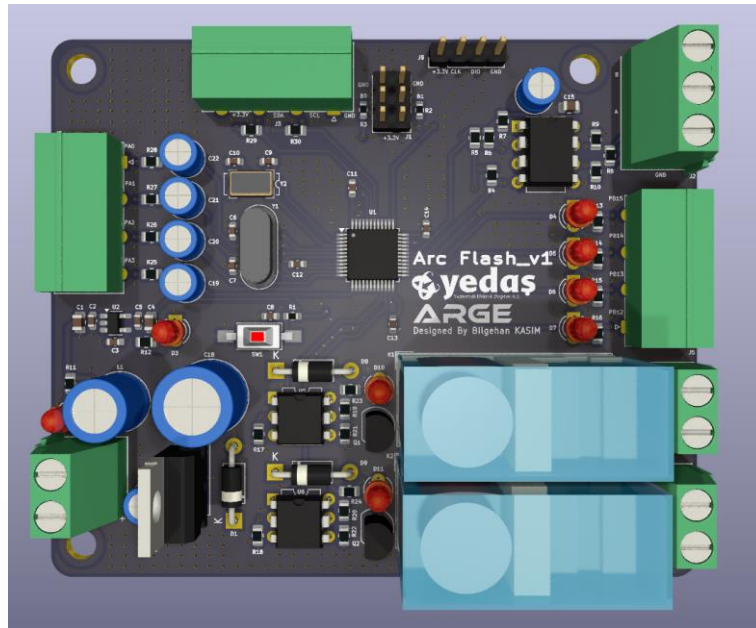


Figure 7. 3D View of the Designed Hardware



Figure 8. Manufactured Hardware

Embedded Software Integration

In the developed system, the existing embedded software previously used with the same microcontroller was directly integrated into the new hardware. By preserving the core functionalities, the software development process was significantly accelerated. The key innovation in this study is the system's ability to communicate via the MODBUS RTU protocol. For this purpose, a custom MODBUS communication library was developed specifically for the microcontroller. This library enables data exchange with IoT devices through the RS485 interface, allowing the system to be monitored remotely. The developed library is presented in Figure 9.

```
void sendData(uint8_t addr, uint8_t function, uint8_t length, uint16_t data[10]) {
    uint16_t crc;
    message[0] = addr;
    message[1] = function;

    message[2] = length;

    message[3] = (data[0] >> 8) & 0xFF; //1
    message[4] = data[0];

    message[5] = (data[1] >> 8) & 0xFF; //2
    message[6] = data[1];

    message[7] = (data[2] >> 8) & 0xFF; //3
    message[8] = data[2];

    message[9] = (data[3] >> 8) & 0xFF; //4
    message[10] = data[3];

    message[11] = (data[4] >> 8) & 0xFF; //5
    message[12] = data[4];

    message[13] = (data[5] >> 8) & 0xFF; //6
    message[14] = data[5];

    message[15] = (data[6] >> 8) & 0xFF; //7
    message[16] = data[6];

    message[17] = (data[7] >> 8) & 0xFF; //8
    message[18] = data[7];

    message[19] = (data[8] >> 8) & 0xFF; //9
    message[20] = data[8];

    message[21] = (data[9] >> 8) & 0xFF; //10
    message[22] = data[9];

    crc = crc16(message, 23);

    message[23] = crc & 0xFF;
    message[24] = (crc >> 8) & 0xFF;
    HAL_UART_Transmit(&huart1, message, 25, 1);
}
```

Figure 9. MODBUS Library

RESEARCH FINDINGS AND DISCUSSION

Before proceeding with the field implementation of the developed system, a verification process was carried out in a laboratory environment using a VLF (Very Low Frequency) test device available at YEDAŞ. In these tests, voltages up to approximately 30 kVAC were applied using the device, and various electric arcs were intentionally generated under controlled conditions at that level. The test scenarios were designed to simulate conditions similar to potential arc faults that might occur in medium voltage distribution systems. During these tests, it was observed whether the system could detect sudden changes in light as designed and whether it could transmit accurate data through the communication module. The hardware successfully detected all arc events, demonstrating that the system functions reliably. Additionally, the data obtained from the communication module was verified, confirming the system's operational effectiveness in both detection and data transmission. The laboratory test setups and application visuals are presented in Figure 10.



Figure 10. High Voltage Arc Tests in Laboratory Environment

Following the successful laboratory tests, it was decided to evaluate the system under real field conditions. For this purpose, a distribution center located in the YEDAŞ region, which posed a potential risk of electric arc formation, was selected as a pilot site. Before integration into the center, a custom enclosure was designed to protect the device in accordance with environmental conditions and the structural characteristics of the distribution cell. During the installation process, the system was configured into two main components: the ambient light sensor was placed in a position where it could directly observe the arc inside the cell, while the microcontroller and control unit were integrated into the control panel section of the cell. This placement ensured direct access of the sensor to light variations and secure housing of the control circuitry. Furthermore, to enable integration with the existing IoT infrastructure of the distribution center, the necessary communication connections were established via MODBUS, allowing the system to be remotely monitored. Visuals and layout details of the device's installation process are shown in Figure 11.



Figure 11. Field Installation of the Hardware

After the installation of the hardware in the distribution center was completed, data collection from the system began regularly. During the periodic monitoring process, signals indicating electric arcs were recorded by the ambient light sensor. The output signals and their corresponding timestamps are provided in Table 1. Field inspections conducted based on these signals revealed physical evidence of arc faults in the cell where the device was installed. Observations confirmed that actual faults had occurred at the exact times detected by the sensor. This demonstrates that the developed system was able to successfully detect arc faults not only in laboratory conditions but also in real field environments.

Table 1. Detected Arc Fault Signals

Number of Detected Arcs	Date
86	07.05.2025
48	13.05.2025

CONCLUSION

This study addressed the design, production, testing, and field implementation processes of a hardware system developed for the detection of electric arcs in electrical distribution systems. The developed system produced successful results in both laboratory and real-world field tests, reliably detecting electric arcs by identifying sudden changes in ambient light. The system also offers advantages in terms of remote monitoring and data sharing, particularly due to its ability to integrate with the IoT infrastructure present in distribution centers. However, field observations revealed that some electrical leakages could only be detected acoustically and did not generate any visible light. Such faults cannot be detected by the current system. Therefore, in future studies, a microphone-based sound detection module will be integrated into the system to enable not only visual but also acoustic-based arc detection. This enhancement will broaden the scope of the system and provide a more sensitive fault monitoring capability.

ACKNOWLEDGMENT

The authors would like to express their sincere gratitude to Yeşilirmak Elektrik Dağıtım A.Ş. for their significant contributions to the realization of this study. The support and collaboration provided by the company played a critical role in the success of this research on early detection of electric arcs. In particular, the interest shown and the resources provided during the research and development processes were of great value at every stage of the study.

REFERENCES

- Atar, O. K., Özen, C., & Kasım, B. (2024, October 12–13). Elektrik dağıtım sistemlerinde ark kaynaklı devre kesici hatalarını engellemeye yönelik cihaz tasarımı ve simülasyon çalışması. 21. Uluslararası Bilimsel Araştırmalar Kongresi (UBAK), Ankara, Türkiye.
- Tong, W., Tong, C., & Jin, X. (2019). Design of fault arc detection device based on STM32. *High Power Laser and Particle Beams*, 31(3), 035002. <https://doi.org/10.11884/HPLPB201931.180320>
- STMicroelectronics. (n.d.). How to detect direct current arc faults with Edge AI. Retrieved June 24, 2025, from https://www.st.com/content/st_com/en/st-edge-ai-suite/case-studies/direct-current-arc-faults-detection.html
- STMicroelectronics. (2023). AI-based smart solar Arc Fault Circuit Interrupter solution. Retrieved June 24, 2025, from https://www.st.com/content/dam/specialevents-assets/industrial-summit-23/pdfs/power-energy/PE2-06_AI%20based%20smart%20solar%20AFCI%20solution_EN.pdf
- Thakur, K., Dwivedi, D., Babu, K. V. S. M., Parimi, A. M., Yemula, P. K., Chakraborty, P., & Pal, M. (2023). Advancements in arc fault detection for electrical distribution systems: A comprehensive review from artificial intelligence perspective. arXiv preprint arXiv:2311.16804.
- Han, C., Wang, Z., Guo, F., & Wang, M. (2025). Detection method and hardware deployment for series arc faults in residential power circuits. *Journal of Power Electronics*.
- Thakur, K., Dwivedi, D., Babu, K. V. S. M., Parimi, A. M., Panigrahi, P. K., Yemula, P. K., Chakraborty, P., & Pal, M. (2025).

Rapid detection of high-impedance arc faults in medium voltage electrical distribution systems. arXiv preprint arXiv:2502.05846.

Babu, K. V. S. M., Dwivedi, D., Valdes, M. E., Chakraborty, P., Panigrahi, P. K., & Pal, M. (2024). Detection of high-impedance low-current arc faults at electrical substations. arXiv preprint arXiv:2410.10151.

Kim, J., & Lehman, B. (2019).

Series AC arc fault detection using only voltage waveforms. Proceedings of the IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC).

Zhang, R., & Chu, R. (2020).

Arc faults in AC and DC electrical networks: Challenges, detection, and mitigation. Applied Sciences, 10(12), 4205.



Makale id= 15

Sözlü Sunum

ORCID ID: 0000-0001-9647-9404 / 0009-0003-6708-0973

| 54

Elektrik Dağıtım Sektöründe Sık Arızalanan İot Cihazlarının Arıza Tiplerinin Sınıflandırılması ve Önlenmesine Yönelik YaklaşımAraştırmacı Bilgehan Kasım¹, Araştırmacı Umut Kaymak², Araştırmacı Oğuz Kaan Atar¹¹Yeşilirmak Elektrik Dağıtım Anonim Şirketi²Samsun Üniversitesi

*Corresponding author: Bilgehan Kasım

Özet: Elektrik dağıtım sistemleri, enerji altyapısının en kritik bileşenlerinden biri olup, sürekli izlenmesi ve kontrol edilmesi gereken karmaşık yapılardır. Bu kapsamda, son yıllarda Nesnelerin İnterneti (Internet of Things - IoT) teknolojileri bu sistemlerde önemli bir yer edinmiştir. IoT cihazları, elektrik dağıtım sistemlerinin çeşitli noktalarında konumlandırılarak; gerilim, akım, sıcaklık, enerji tüketimi gibi parametrelerin izlenmesini, verilerin merkezi birime iletilmesini ve gerektiğinde uzaktan kontrol işlemlerinin gerçekleştirilmesini mümkün kılmaktadır. Bu teknolojiler sayesinde sistem verimliliği artmakta, arıza süresi azalmaktadır ve daha hızlı müdahale imkânı sağlanmaktadır. Ancak, elektrik dağıtım sistemlerinin çoğunlukla dış saha koşullarında çalıştığı göz önüne alındığında, bu ortamlarda kullanılan IoT cihazları ciddi çevresel ve elektriksel zorluklara maruz kalmaktadır. Topraklama eksiklikleri, yüksek gerilim darbeleri, havai hatların birbirine teması, yıldırım etkisi, nem ve sıcaklık gibi çevresel faktörler bu cihazların arızalanmasına neden olabilmektedir. Söz konusu arızalar hem veri akışını kesintiye uğratmakta hem de sistemin genel güvenilirliğini düşürmektedir. Bu çalışmada, elektrik dağıtım sistemlerinde yaygın olarak kullanılan IoT cihazlarında meydana gelen arızalar detaylı şekilde incelenmiş, sık arızalanan cihaz tipleri belirlenmiş ve bu arızalar belirli kategorilere ayrılarak sınıflandırılmıştır. Ayrıca, bu cihazların onarım süreçlerine yönelik analizler yapılmış ve bazı arızaların giderilerek cihazların tekrar kullanılabilir hale getirilmesi yönünde çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Bu doğrultuda, arızalı cihazların tamir edilmesinin teknik ve ekonomik açıdan fizibilitesi değerlendirilmiştir. Çalışmanın son bölümünde ise, tespit edilen arızaların önlenmesine yönelik çeşitli koruma devreleri tasarlanmıştır. Bu koruma devreleri, özellikle ani gerilim yükselmelerine ve ters bağlantılara karşı cihazları koruyacak şekilde planlanmıştır. Tasarlanan devrelerin işlevselliği LTSpice simülasyon programı kullanılarak test edilmiş ve elde edilen simülasyon sonuçları değerlendirilmiştir. Bu sayede, IoT cihazlarının dayanıklılığını artırmaya ve arıza oranlarını azaltmaya yönelik uygulanabilir çözümler sunulmuştur. Bu çalışma, elektrik dağıtım sistemlerinde kullanılan IoT cihazlarının güvenilirliğini artırma ve arıza yönetimi konusunda önemli katkılar sunmakta olup, gelecekte yapılacak donanımsal ve yazılımsal iyileştirmelere de temel oluşturacak niteliktedir.

Anahtar Kelimeler: İot, Elektrik Dağıtım Sistemleri, Arıza Analizi, Cihaz Onarımı, Saha Koşulları, Koruma Devresi, Ltspice, Simülasyon, Topraklama Eksikliği, Gerilim Darbesi, Cihaz Güvenilirliği, Nesnelerin İnterneti, Enerji İzleme, Bakım Maliyeti, Yeniden Kullanılabilirlik

Classification and Prevention Approach for Common Failure Types of Iot Devices in the Electric Distribution Sector

Abstract: Electric power distribution systems are among the most critical components of the energy infrastructure and are complex structures that require continuous monitoring and control. In this context, the Internet of Things (IoT) technologies have gained significant importance in recent years. IoT devices are deployed at various points within power distribution systems to monitor parameters such as voltage, current, temperature, and energy consumption, transmit data to a central unit, and enable remote control when necessary. These technologies contribute to increased system efficiency, reduced fault durations, and faster response capabilities. However, considering that most power distribution systems operate in outdoor field environments, IoT devices used in these areas are exposed to significant environmental and electrical challenges. Factors such as lack of grounding,

voltage surges, contact between overhead lines, lightning strikes, humidity, and temperature fluctuations can lead to malfunctions in these devices. These failures interrupt data flow and reduce the overall reliability of the system. In this study, failures in commonly used IoT devices within power distribution systems were examined in detail. Frequently failing device types were identified, and the faults were categorized into specific classes. Furthermore, repair processes for these devices were analyzed, and efforts were made to restore the functionality of certain faulty devices. The technical and economic feasibility of repairing and reusing defective devices was evaluated. In the final part of the study, various protection circuit designs were developed to prevent the identified failures. These circuits were specifically designed to protect the devices against sudden voltage surges and reverse connections. The functionality of the designed circuits was tested using the LTSpice simulation program, and the simulation results were analyzed. As a result, practical solutions were proposed to enhance the durability of IoT devices and reduce failure rates. This study provides valuable insights into improving the reliability and fault management of IoT devices used in electrical power distribution systems and serves as a foundation for future hardware and software improvements.

Keywords: *IoT, Power Distribution Systems, Fault Analysis, Device Reliability, Environmental Challenges, Grounding Issues, Voltage Surge Protection, Device Repair, Feasibility Study, Protection Circuits, Ltspice Simulation, Remote Monitoring, Fault Prevention, Energy Infrastructure, Smart Grid*

INTRODUCTION

Electric distribution systems form the backbone of modern energy infrastructure and are critically important for ensuring uninterrupted power supply across all segments of society. Increasing energy demand has brought about greater complexity and management challenges in distribution networks. In this context, the need for digitalization and automation has made it essential for electric distribution systems to become more efficient, reliable, and monitorable. In recent years, IoT technologies have emerged as a significant transformative tool in response to this need within the energy sector. By being integrated into various components of electric distribution systems, IoT technologies enable real-time monitoring and control of critical parameters such as voltage, current, temperature, and energy consumption. This increases system performance, accelerates fault detection, and facilitates remote intervention. However, the fact that these technologies predominantly operate in outdoor field conditions makes IoT devices vulnerable to environmental and electrical impacts. Factors such as grounding failures, lightning strikes, high voltage surges, humidity, excessive temperatures, and mechanical stress can cause these devices to malfunction, thereby disrupting the overall functioning of the system. In this study, the faults encountered by IoT devices commonly used in electric distribution systems are examined in detail, the causes and types of faults are classified, repair processes are analyzed, and protective solutions are developed. The aim of the study is to enhance the durability of these devices in the field, reduce failure rates, and provide economically sustainable solution proposals to support the overall efficiency of distribution systems.

METHOD

Causes of Electrical Surges

IoT devices used in electric distribution systems are typically deployed in locations such as distribution centers, field distribution panels, and measurement points. In these environments, devices are exposed to high-energy electrical surges caused by sudden voltage spikes and transient operating conditions. The sources of such disturbances are primarily the following physical and operational factors:

- **Atmospheric discharges (Lightning effects):** Sudden atmospheric discharge events, especially lightning strikes, cause sharp voltage surges in distribution lines. These discharges may directly contact the line or induce transients via electromagnetic coupling. The resulting transient voltages often exhibit a 1.2/50 μ s waveform profile and can reach magnitudes of several kilovolts to tens of kilovolts. These high-energy pulses may exceed the isolation limits of devices, causing hardware damage (IEC, 2010).
- **Switching transients:** During switching operations in substations or distribution transformers—especially when inductive loads are connected or disconnected—temporary high-frequency voltage oscillations occur. These oscillations are characterized as fast transients according to the IEC 61000-4-4 standard, typically in the 5/50 ns time range with amplitudes in

the hundreds of volts. Such disturbances can negatively affect the power supplies and communication interfaces of IoT devices (IEC, 2012).

- **Inadequate grounding and potential differences:** If IoT devices in the field are not effectively referenced to ground, sudden voltage surges can be transmitted directly to the device body or input terminals. This may result in insulation breakdowns or electromagnetic compatibility (EMC) issues within the internal circuits.
- **Inter-line arcing and temporary short circuits:** Overhead lines may come into contact due to wind, ice loading, or external factors, resulting in temporary arcing. These events lead to sudden current spikes and corresponding voltage fluctuations. Additionally, short circuits caused by interactions between live lines and environmental elements (such as tree branches or birds) can generate transients with high dV/dt rates in the system.

Electrical surges originating from these sources can damage sensitive areas of IoT devices, such as power input circuits, low-voltage communication ports (e.g., UART, RS-485, Ethernet), and sensor interfaces. They may cause insulation breakdown, damage to semiconductor components, and disruption in data transmission. Therefore, the design and integration of protection circuits based on electromechanical and semiconductor components are critically important for ensuring system safety and extending device lifespan (International Electrotechnical Commission [IEC], 2012).

IoT Systems Electrical Protection Circuit Design

To prevent the damage caused by electrical transient events to IoT devices, various passive and active protection components based on electromagnetic compatibility and overvoltage protection principles have been utilized. Protection circuits have been designed to serve as safety barriers at different vulnerable points of the devices, applied to both power input lines and communication and sensor interfaces. The main protection components used and their functions are technically explained below:

- **Varistor (MOV – Metal Oxide Varistor):** MOVs are semiconductor components with a nonlinear resistance characteristic. When the voltage exceeds a certain threshold (clamping voltage), their resistance drops rapidly, diverting the excess energy to the ground line. Their typical response time can be as low as a few nanoseconds. These components are especially used in AC or DC power lines, connected in parallel to the input terminals, providing protection against voltage surges caused by lightning or switching transients (Agarwal & Lang, 2005).
- **Gas Discharge Tubes (GDT):** GDTs are robust components with gas-filled electrodes that provide resistance against high-energy surges. When the voltage exceeds a certain threshold, the gas inside becomes ionized and the tube becomes conductive. When used in combination with MOVs, a two-stage protection scheme is achieved: the GDT suppresses most of the high-energy surge, while the MOV rapidly clamps the remaining energy. However, since GDTs have response times in the range of hundreds of nanoseconds, secondary protection is often necessary for fast transients (Horowitz & Hill, 2015).
- **TVS Diodes (Transient Voltage Suppression Diodes):** TVS diodes are known for their very low response times. They are preferred for low-voltage-tolerant data lines (RS-485, UART, Ethernet, I2C, etc.). With low clamping voltage ratings, they provide effective protection against ESD (Electrostatic Discharge) and EFT (Electrical Fast Transients) events (Stojmenovic, 2014).
- **Fuses and PTC Thermistors:** In addition to traditional fuses, Positive Temperature Coefficient (PTC) thermistors have been employed for overcurrent protection. PTCs increase their resistance during overcurrent events, limiting the circuit, and then automatically return to normal when the current stabilizes. This feature allows them to function as resettable fuses (Gungor & Hancke, 2011).
- **Reverse Polarity Protection:** To prevent damage caused by incorrect polarity in the supply lines of IoT devices, diode-based and low-loss MOSFET-based protection topologies have been applied. Schottky diodes are used for their low forward voltage drop, while P-channel MOSFETs are employed to enable series switching control during reverse polarity conditions (Zanella et al., 2014).

To mitigate several of the existing problems, both a reverse polarity protection circuit and an overvoltage protection circuit were designed to be used at the power and signal inputs of IoT devices. The schematic diagrams of these circuits are shown in Figure 1 and Figure 2.

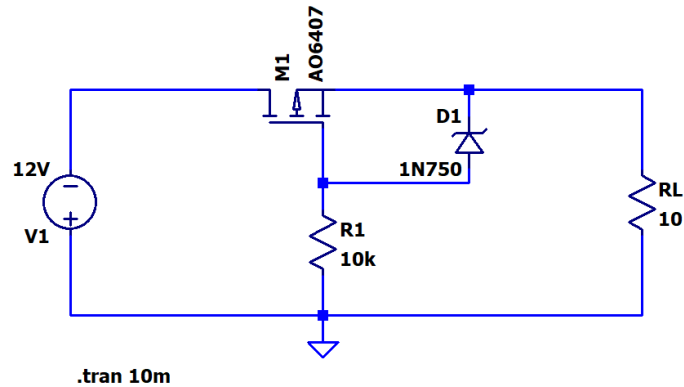


Figure 1. Reverse Polarity Protection Circuit

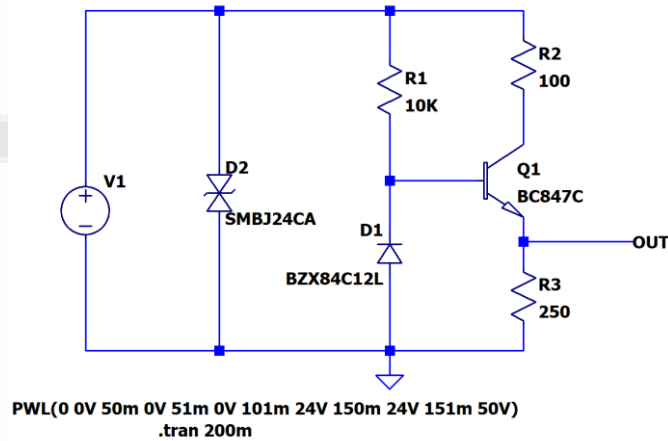


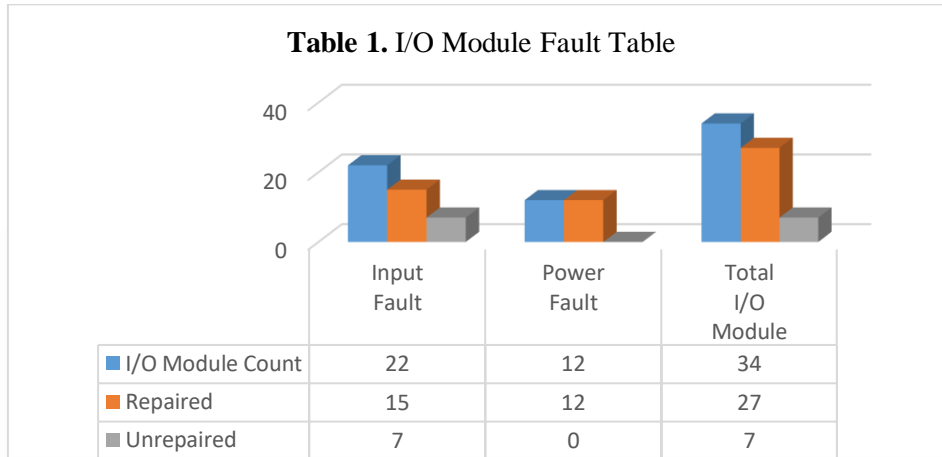
Figure 2. Overvoltage Protection Circuit

In Figure 1, the circuit is designed to prevent damage to the device in the case of reverse polarity. A P-channel MOSFET with a low RDS value is used in the circuit. Under correct polarity, the MOSFET conducts and allows power to reach the load. In reverse polarity, the gate-source voltage becomes positive, causing the MOSFET to switch off, thereby blocking current flow. Additionally, a Zener diode connected to the gate terminal of the MOSFET provides isolation against sudden voltage changes. In Figure 2, the circuit aims to protect the load by disconnecting it during overvoltage conditions. The SMBJ24CA-type TVS diode grounds sudden voltage spikes exceeding 24V, forming the first line of defense. Additionally, a voltage divider created with a 12V Zener diode and resistors applies a controlled reference voltage to the base of a transistor. When the input voltage exceeds a certain threshold, the transistor switches on, redirecting the output current to ground and disabling the output line. This two-stage structure ensures rapid response to sudden voltage spikes and complete isolation under sustained high voltages, thereby securing the load.

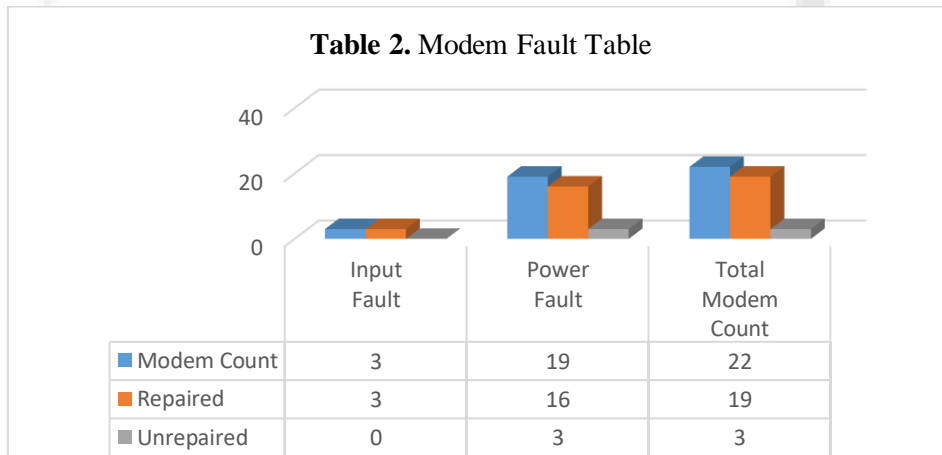
RESEARCH FINDINGS AND DISCUSSION

In this study, an analysis was conducted on the faults encountered by IoT devices used in electric distribution systems under field conditions, and the efficiency of repair activities carried out on these devices was evaluated. The investigation focused on two main product groups: I/O boards and modem boards. As a result of the tests and repairs, 27 out of 34 I/O boards were successfully repaired and

restored to working condition. Accordingly, the maintenance and repair efficiency for the I/O group was calculated to be 79.41%. It was observed that 7 unrepaired boards had physical damage, particularly due to PCB burns, which made recovery impossible. Common failure types in I/O boards included power supply issues and resistor failures, especially on the IN10 and IN12 input channels. These issues were mostly resolved by replacing TVS diodes, changing input resistors, and inspecting and revising the components on the PCB. Table 1 presents the fault distribution within the I/O modules.



Similarly, in the modem board repair process, a total of 22 modem devices were examined, and 19 were successfully repaired, resulting in an efficiency rate of 86.36%. The 3 unrepaired devices had damaged power input ICs, which rendered them non-functional and beyond recovery (Table 2). Common faults identified in modem boards included power circuit failures, integrated circuit (IC) malfunctions on control boards, and I/O signal errors. These issues were largely resolved by replacing faulty components and reconfiguring circuit paths.



In total, 56 devices across both product groups were tested, with 46 successfully repaired. This demonstrates that hardware-level recovery and maintenance activities provide significant technical and economic benefits for IoT devices. It was observed that a substantial portion of the field failures stemmed from electrical effects such as incorrect power connections (reverse polarity) and sudden high-voltage surges. Therefore, integrating the designed reverse polarity protection circuit and overvoltage protection circuit into the system is expected to significantly reduce device failures. The functionality of these protection circuits was evaluated through simulations carried out in LTSpice. Figures 3 and 4 assess the reverse polarity protection system. Figure 3 shows the load current under correct polarity,

while Figure 4 shows the load current under reverse polarity. Figure 5 displays the input and load voltage of the overvoltage protection circuit.

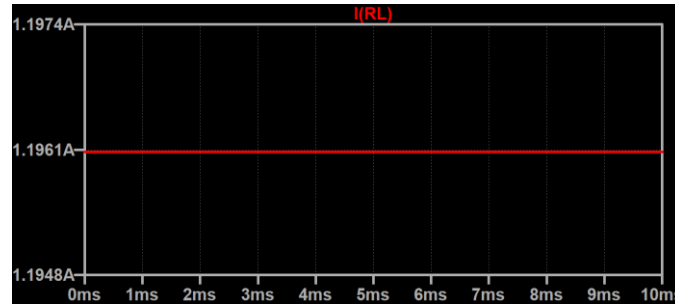


Figure 3. Load Current of Reverse Polarity Circuit (Correct Polarity)

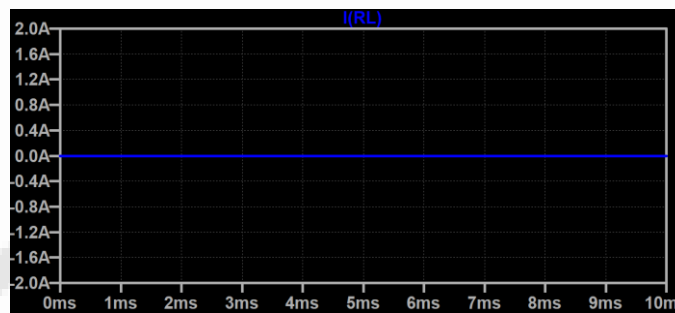


Figure 4. Load Current of Reverse Polarity Circuit (Reverse Polarity)

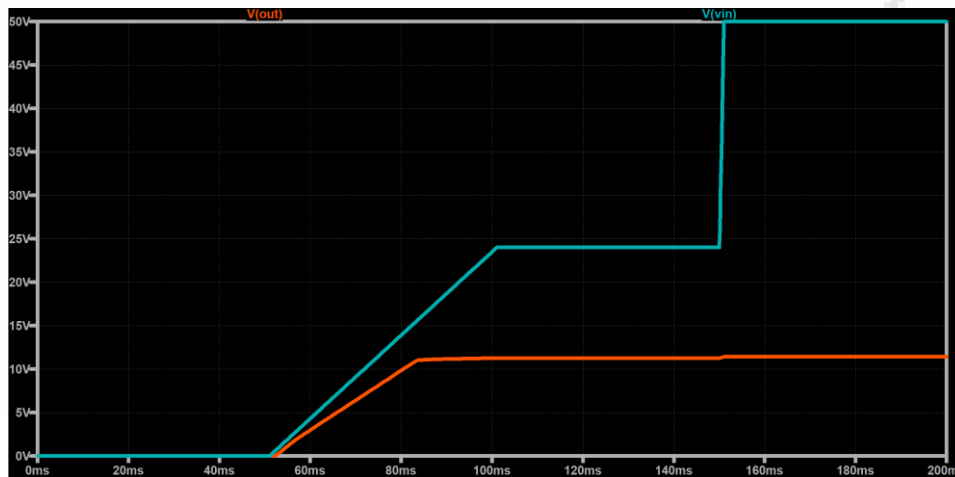


Figure 5. Input and Load Voltage of Overvoltage Protection Circuit

As seen from the simulation results, the reverse polarity protection circuit maintains the load current at 0 A during reverse connection. The overvoltage protection circuit, on the other hand, keeps the output voltage stabilized at 12 V regardless of how much the input exceeds this value.

CONCLUSION

In this study, common failure types encountered by IoT devices in electric distribution systems under field conditions were analyzed, the root causes of these failures were identified, and effective solutions for prevention were developed. Electrical effects frequently observed in field environments—particularly reverse polarity connections and sudden voltage surges—significantly reduce the reliability

and lifespan of the devices. Accordingly, the reverse polarity and overvoltage protection circuits developed in this study were tested using LTSpice simulations, and their functionality was successfully demonstrated. As a result of the maintenance and repair activities conducted, 46 out of the 56 tested devices were successfully repaired and restored to operational status. This indicates that the implementation of hardware-level protection and repair strategies in IoT devices provides high technical and economic efficiency. Furthermore, it is anticipated that the field implementation of the developed protection circuits will considerably reduce the failure rates of such devices. The findings obtained offer valuable contributions to enhancing the reliability of IoT-based electric distribution systems and to reducing maintenance costs. In this context, the study also establishes a solid foundation for future hardware and software improvements, contributing to the sustainability of digital transformation in energy infrastructure.

ACKNOWLEDGMENT

The authors would like to express their sincere gratitude to Yeşilirmak Elektrik Dağıtım A.Ş. for their significant contributions to the realization of this study. The support and collaboration provided by the company played a critical role in the success of this research on early detection of electric arcs. In particular, the interest shown and the resources provided during the research and development processes were of great value at every stage of the study.

REFERENCES

- International Electrotechnical Commission. (2012). IEC 61000-4-4: Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-4: Testing and measurement techniques – Electrical fast transient/burst immunity test. IEC.
- International Electrotechnical Commission. (2010). IEC 61000-4-5: Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-5: Testing and measurement techniques - Surge immunity test. IEC.
- Agarwal, A., & Lang, J. (2005). *Foundations of Analog and Digital Electronic Circuits*. Morgan Kaufmann.
- Horowitz, P., & Hill, W. (2015). *The Art of Electronics* (3rd ed.). Cambridge University Press.
- Stojmenovic, I. (Ed.). (2014). *Handbook of Internet of Things (IoT) and Big Data*. Wiley.
- Gungor, V. C., & Hancke, G. P. (2011). Industrial wireless sensor networks: Challenges, design principles, and technical approaches. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 56(10), 4258–4265. <https://doi.org/10.1109/TIE.2009.2015754>
- Zanella, A., Bui, N., Castellani, A., Vangelista, L., & Zorzi, M. (2014). Internet of Things for smart cities. *IEEE Internet of Things Journal*, 1(1), 22–32. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2014.2306328>

Makale id= 16

Sözlü Sunum

ORCID ID: 0000-0003-1796-2460 / 0000-0001-9647-9404

| 61

Havai Hatlarda Kısmi Deşarj Tespiti İçin Yeni Bir Yaklaşım**Araştırmacı Oğuz Kaan Atar¹, Araştırmacı Bilgehan Kasım¹**¹Yeşilirmak Elektrik Dağıtım Anonim Şirketi

*Corresponding author: Oğuz Kaan Atar

Özet: Elektrik enerjisi iletim ve dağıtım sistemlerinde meydana gelen arızaların önemli bir kısmı, zaman içinde izolatörlerde oluşan kısmi deşarj (KD) olaylarından kaynaklanmaktadır. Özellikle orta ve yüksek gerilim seviyelerinde, yalıtım malzemelerinde meydana gelen bu lokal deşarjlar, sistemdeki ekipmanların ömrünü kısaltmakta ve ani arızalara neden olabilmektedir. Kısmi deşarjlar, genellikle izolatörlerdeki mikro boşluklarda, yüzey kirliliklerinde veya bağlantı noktalarındaki kusurlarda ortaya çıkmakta olup, sistemin tamamını etkilemeden önce tespit edilebilmeleri durumunda önleyici bakım faaliyetleriyle giderilebilmektedir. Konvansiyonel KD tespit yöntemleri, pahalı donanımlar gerektiren tekniklerdir. Bu yöntemler saha uygulamalarında zaman ve maliyet açısından ciddi kısıtlar yaratmaktadır. Özellikle OG havai hatlarda, personelin sahada fiziksel olarak her bir direkte ölçüm yapması hem zaman alıcı hem de insan hatasına açık bir süreçtir. Bu çalışmada, mobil olarak kullanılacak bir tespit sisteminin tasarımı ve uygulanabilirliği ele alınmaktadır. Geliştirilen sistem; radyo frekansı (RF) emisyonlarını kullanan, geniş bantlı bir anten ve yazılım tabanlı radyo (Software Defined Radio-SDR) altyapısıyla çalışmaktadır. Bu sayede, OG hatlarında hareket halindeki bir araç üzerinden kısmi deşarj noktalarının hızlı, güvenli ve düşük maliyetli biçimde tespiti amaçlanmaktadır. Yapılan literatür taramaları, kısmi deşarjın elektromanyetik spektrumunda özellikle 20–500 MHz aralığında anlamlı emisyonlar ürettiğini ortaya koymuştur. Bu çalışmada, RF tabanlı ölçümün kuramsal altyapısı, anten ve SDR tasarımı, saha testleri ve elde edilen sonuçlar bütünsel bir şekilde sunulmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Kısmi Deşarj (Kd), Radyo Frekans (Rf) Emisyonları, Orta Gerilim Hatları, Yazılım Tabanlı Radyo (Sdr), Geniş Bantlı Anten, Arıza Tespiti, Elektromanyetik Ölçüm

A New Approach for Partial Discharge Detection in Overhead Lines

Abstract: A significant portion of failures occurring in electrical energy transmission and distribution systems stems from partial discharge (PD) phenomena that develop over time in insulators. Particularly in medium and high voltage levels, these localized discharges in insulating materials shorten the lifespan of system components and may lead to sudden breakdowns. Partial discharges typically occur in microvoids within insulators, surface contaminations, or defects at connection points. If detected before affecting the entire system, they can be addressed through preventive maintenance activities. Conventional PD detection methods require expensive equipment and involve techniques that present significant limitations in terms of time and cost during field applications. Especially in medium-voltage (MV) overhead lines, having personnel physically measure each pole on site is both time-consuming and prone to human error. This study focuses on the design and feasibility of a mobile detection system. The developed system operates based on radio frequency (RF) emissions using a wideband antenna and Software Defined Radio (SDR) infrastructure. Thus, it aims to detect PD points quickly, safely, and cost-effectively from a vehicle in motion along MV lines. Literature reviews indicate that partial discharges generate significant emissions in the electromagnetic spectrum, particularly within the 20–500 MHz frequency range. In this study, the theoretical background of RF-based measurement, the design of the antenna and SDR system, field tests, and the resulting findings are presented comprehensively.

Keywords: Partial Discharge (Pd), Radio Frequency (Rf) Emissions, Medium Voltage Lines, Software Defined Radio (Sdr), Wideband Antenna, Fault Detection, Electromagnetic Measurement

1. INTRODUCTION

A significant portion of failures encountered in electrical power transmission and distribution systems originates from partial discharge (PD) phenomena that gradually develop within electrical insulation systems. Partial discharge is a localized electrical breakdown in an insulating material that does not completely bridge the insulation. It typically occurs in micro-voids within insulators, on contaminated surfaces, or at defective connection points (Chen, Tsao & Lin, 2005). Failures caused by undetected PD activity may occur without warning, potentially damaging adjacent equipment, disrupting the economic activities of connected consumers, leading to customer dissatisfaction, and incurring penalties from regulatory authorities. Timely detection of partial discharges is of great importance for predictive maintenance applications. However, traditional methods—such as electrical measurement techniques based on the EN 60270 standard—are both costly and operationally challenging in field conditions (IEC 60270, 2015). Particularly in medium-voltage (MV) overhead lines, field inspections using instruments such as acoustic cameras require stopping at each pole, taking manual measurements, and involve direct human interaction, making the process time-consuming, expensive, and prone to human error. In recent years, alternative approaches based on electromagnetic detection have gained attention, especially the use of radio frequency (RF)-based methods for PD detection (Nepola, 2013). Research has shown that partial discharge activity emits significant electromagnetic radiation in the 20–500 MHz range, which can be detected using wideband antennas (Moore, Portugues & Glover, 2003). In this context, an RF-based detection system integrated into a moving vehicle could enable rapid and cost-effective PD detection over large areas. This study presents a mobile detection system designed for use on MV overhead lines, which utilizes a wideband antenna and Software Defined Radio (SDR) architecture. The system components, theoretical framework, and findings from field tests are presented through a comprehensive approach. Accordingly, the methodology section of this study first explains the concept and types of partial discharge, followed by detailed descriptions of electromagnetic detection techniques, antenna system design, and SDR-based measurement infrastructure.

1.1. Partial Discharge

Partial discharge (PD) refers to microscopic electrical discharges that occur in localized regions of an insulation system where the electric field intensity exceeds the dielectric strength of the material, without causing complete insulation breakdown. These events typically arise in gas-filled voids within solid or liquid dielectrics, on contaminated surfaces, or at defective regions of electrical joints (Chen, Tsao, & Lin, 2005; Kreuger, 1989). The lower relative permittivity of voids compared to the surrounding insulating material leads to intensified electric fields within these regions. When this field exceeds a critical threshold—known as the inception voltage—ionization of the gas occurs, initiating partial discharges (Schön, 2019). Over time, these discharges can propagate within the insulation, degrading material integrity and eventually leading to complete failure. PD activity not only causes localized damage but also serves as an early indicator of potential system-level faults. Therefore, early detection and analysis of partial discharges are of critical importance in predictive maintenance strategies, especially for medium- and high-voltage systems (Natrass, 1988).

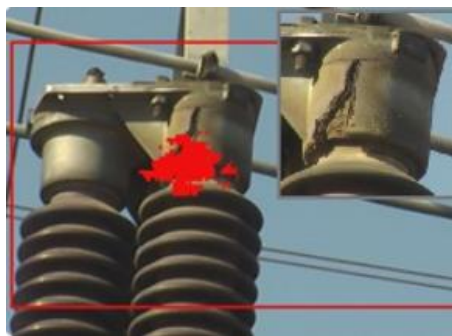


Figure 1. Failure Example Due To Partial Discharge

In high-voltage engineering applications, partial discharges (PD) are classified into various types, such as corona discharge, surface discharge, internal void discharge, electrical treeing, and floating discharge (Bäckström, 2010). These classifications are typically based on the phase relationship, frequency content, and amplitude patterns of the PD signals.

1.2. Partial Discharge Measurement Methods

The detection and quantitative analysis of partial discharges (PD) are critically important for assessing the insulation condition of electrical equipment. PD measurements can be carried out using a range of approaches, from conventional methods involving direct electrical connections to non-contact techniques based on electromagnetic, acoustic, and optical principles (Schön, 2019).

1.2.1. IEC 60270

The IEC 60270 standard is the most widely referenced guideline for partial discharge (PD) measurements. In this method, PD pulses are measured via a coupling capacitor connected between the terminals of the test object, and the apparent charge is expressed in picocoulombs (pC) (Schön, 2019). Conventional measurement systems, whether analog or digital, typically consist of narrow- or wideband filtering, integration, and calibration components.

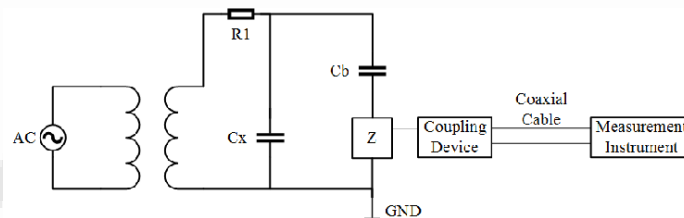


Figure 2. IEC 60270 Test Circuit (Lu, Shibo & Chai, 2020)

The conventional method widely used for partial discharge (PD) measurement is based on the IEC 60270 standard. In this approach, high voltage is applied to the insulation system under test, represented by the C_x component. PD pulses generated within the system are transmitted to the measurement circuit via a coupling capacitor (C_b), which allows high-frequency signals to pass while blocking the test voltage. These pulses are converted into voltage signals by the impedance element (Z) and analyzed in terms of time, amplitude, and frequency to assess insulation condition. Although the method offers high accuracy and sensitivity, it requires galvanic connections and multiple coupling elements in large-scale systems, which limits its practicality in field applications.

1.2.2. Acoustic, Optical and Chemical Methods

Partial discharges generate not only electromagnetic signals but also acoustic emissions, light, and chemical reactions. These physical effects form the basis for alternative detection methods (Chen, Tsao, & Lin, 2005).

Acoustic methods: Enable directional localization of PD sources using ultrasonic microphones.



Figure 3. Acoustic Camera For Detecting PD

Optical methods: Allow visual detection of corona-type discharges through UV cameras. Corona PD occurs when a strong electric field ionizes the surrounding air around a conductor, producing a localized discharge that emits ultraviolet (UV) light. Although invisible to the human eye, these UV emissions can be captured using UV detection technology (Ofilsystems, 2025).

Chemical methods: The presence of PD can be assessed—particularly in oil-filled transformers—by analyzing degradation by-products such as ozone, hydrogen, and nitric acid (Schön, 2019).

1.2.3. IEC TS 62478

IEC TS 62478 is a technical specification that defines the measurement of partial discharges (PD) using electromagnetic (HF, VHF, UHF) and acoustic methods. In this approach, the electromagnetic fields emitted by PD events are captured using wideband antennas or sensors. Measurements within the HF (3–30 MHz), VHF (30–300 MHz), and UHF (300 MHz–3 GHz) frequency ranges enable rapid and safe detection without the need for direct electrical connections (Nepola, 2013). Since high-frequency signals vary according to the physical structure of insulation defects, this method also facilitates localization of PD sources within the frequency spectrum. Signals analyzed using advanced digital oscilloscopes and SDR (Software Defined Radio) platforms provide cost-effective solutions suitable for mobile applications.

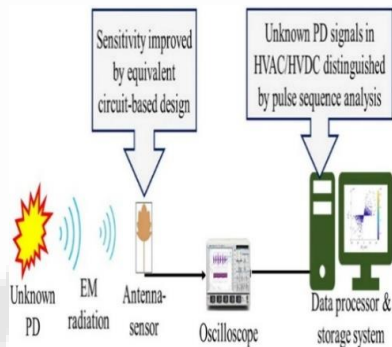


Figure 4. IEC TS 62478

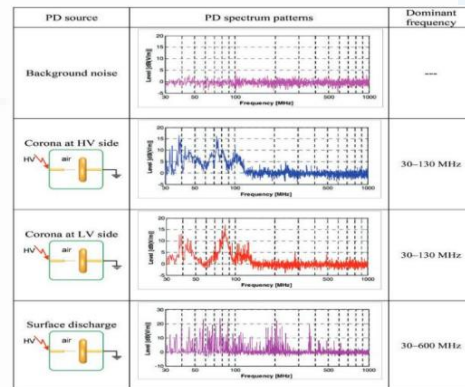


Figure 5. Frequency Spectrum of PD Signal Detected In Air

2. METHOD

2.1. RF Based Partial Discharge Detection with SDR

The detection of partial discharges (PD) in the field using conventional methods is often limited due to hardware requirements, accessibility challenges, and constraints related to time and cost. In response to these limitations, radio frequency (RF)-based techniques have emerged as effective alternatives, particularly for mobile applications (Nepola, 2013). Studies have shown that PD events emit significant electromagnetic radiation within the VHF (30–300 MHz) and UHF (300 MHz–1 GHz) frequency bands. These emissions tend to concentrate in different frequency ranges depending on the type of discharge and can be detected using dedicated antennas and wideband receivers (Moore, Portugues & Glover, 2003). Recently, Software Defined Radio (SDR) technology has gained prominence in RF-based PD detection. Compared to conventional hardware-based receivers, SDR systems offer more flexible, cost-effective, and portable solutions (Schön, 2019). RF signals collected via a wideband antenna are digitized by the SDR receiver and transmitted to a computer or embedded system. Using FFT and spectrum analysis, unique signal signatures of PD can be identified. This method enables fast and comprehensive scanning when integrated into mobile vehicles, particularly in medium-voltage overhead line applications (Nepola, 2013).

2.2. PDDS (Partial Discharge Detection System)

The Partial Discharge Detection System (PDDS) is designed to detect partial discharge (PD) events, which occur when voids exist within the dielectric material between two conductors and current continuity is compromised. Partial discharge phenomena manifest both acoustically and electromagnetically. The PDDS identifies PD activity by monitoring specific bands within the electromagnetic spectrum and applies various algorithms to characterize the discharge pulses. The system performs continuous measurements and analyzes the acquired data, transmitting the results to clients connected to the integrated server. These results can be monitored through a user interface running on the client device.

The PDDS comprises ten main components within its architecture.

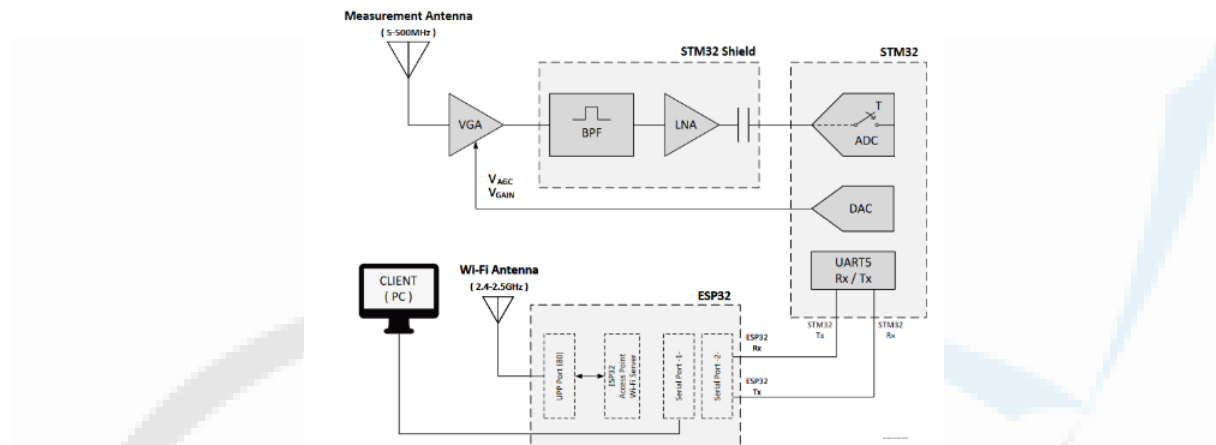


Figure 6. RF And Digital Hardware Diagram of the Partial Discharge Detection System (PDDS)

2.2.1. Battery

To supply the necessary electrical power for the system, two 3.7-volt Orion 18650 series lithium-ion (Li-Ion) batteries connected in parallel were used. The 18650 series Li-Ion batteries are widely utilized in industrial applications.



Figure 7. 18650 Li-Ion Battery

2.2.2. Battery Charging System

The battery charging system consists of a battery level indicator, a high-current protection circuit, and a battery charging circuit. The TP4056 module was used as the battery charging circuit. TP4056 is a commonly used integrated circuit designed for charging single-series lithium-ion battery packs.



Figure 8. TP4056 Battery Charging System

2.2.3. Power Circuits

The device includes two power circuits located at the output of the battery and battery charging system. These circuits regulate the incoming 3.7 V from the battery or the 9–36 V input when the device is connected to a charger, converting it into a voltage range suitable for the operation of internal system modules.



Figure 9. MT3608 Adjustable Step-Up Voltage Regulator Module



Figure 10. LM2596 Adjustable Step-Down Voltage Regulator Module

2.2.3.1. Wi-Fi Communication Module

The ESP32 module was used as the Wi-Fi communication module. ESP32, developed by Espressif, is a low-cost and low-power Wi-Fi and Bluetooth module. The development environment for the ESP32 was set up using the PlatformIO extension within Visual Studio Code, and programming was carried out using the Arduino Framework.



Figure 11. ESP32 Wi-Fi Communication Module

In the system, the ESP32 is configured as an Access Point. It reads the samples obtained from the STM32 ADC via the serial port and transmits them to a computer connected as a server using the User Datagram Protocol (UDP). When the system is running, server information and connected clients can be monitored through the serial interface. The ESP32 operates with FreeRTOS as the real-time operating system and executes four distinct tasks during operation. These tasks are:

- Main
- Transmitter
- Receiver
- STM32 Reset

2.2.3.2. STM32 Microcontroller Module



Figure 12. NUCLEO-F429ZI STM32

In this study, the NUCLEO-F429ZI development board, which features the STM32F429ZIT6 microcontroller, was used. This microcontroller is based on a 32-bit Cortex-M4 architecture and supports floating-point operations via its integrated FPU, offering processing speeds up to 180 MHz and a performance of 225 DMIPS. It includes three 12-bit ADCs (supporting up to 24 channels at 2.4 MSPS) and two 12-bit DAC units. Although an Ethernet MAC interface is available, it was not utilized due to the preference for wireless communication. The system employs FreeRTOS as a real-time operating system to manage tasks, with signal processing operations executed within this framework. Partial discharge pulses are sampled via the ADC, processed, and then transmitted to the ESP32 module through the UART5 interface.

2.2.3.3. STM32 Shield Module

The STM32 shield module includes a Band-Pass Filter (BPF), a Low-Noise Amplifier (LNA), and a coupler circuit.

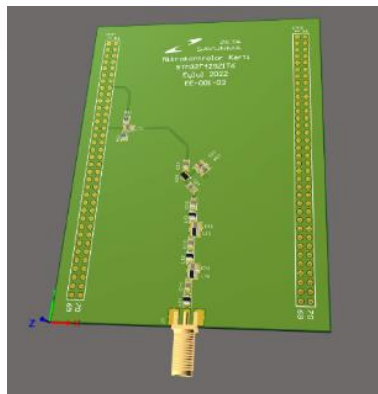


Figure 13. STM32 Shield

On the STM32 Shield, a band-pass filter is positioned immediately after the signal input. This filter is responsible for eliminating unwanted frequency components in the spectrum from the signal amplified by the VGA (Variable Gain Amplifier).

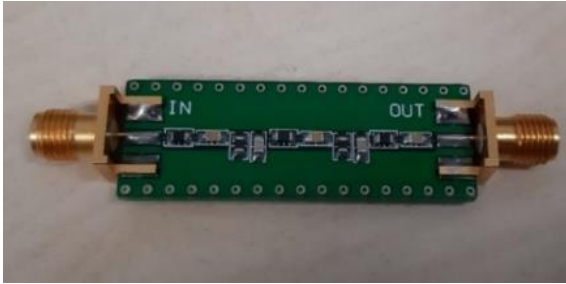


Figure 14. Band Pass filter (BPF)

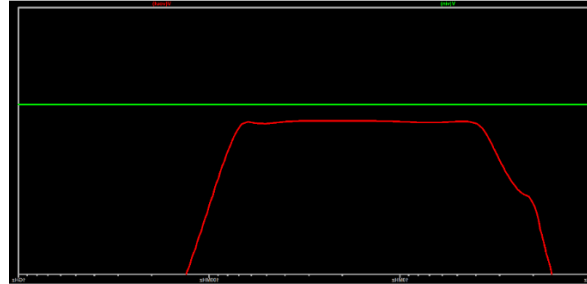


Figure 15. Band Pass Filter Simulation Results

The filter is designed to pass signals in the 3 MHz to 60 MHz range. It has a return loss of -1 dB, meaning that signals within this frequency band are attenuated by only 1 dB. The filter is a 5th-order Butterworth type, which ensures a flat frequency response without ripples across the passband. The design process was automated, and the resulting component values were used to build a circuit in LTSpice, where simulations were conducted to verify performance. As a result, the frequency response of the filter was plotted in red. While the -3 dB point was observed in the simulation, in real-world applications the frequency response is expected to remain within -1 dB throughout the passband. The same circuit was assembled on a separate board before being integrated onto the STM32 Shield, and a Vector Network Analyzer (VNA) was connected to its input and output. The frequency response of the filter was evaluated by observing the S_{21} parameter across the 500 kHz to 200 MHz range. The results showed that the passband exhibited an attenuation close to -1 dB, confirming the expected performance.

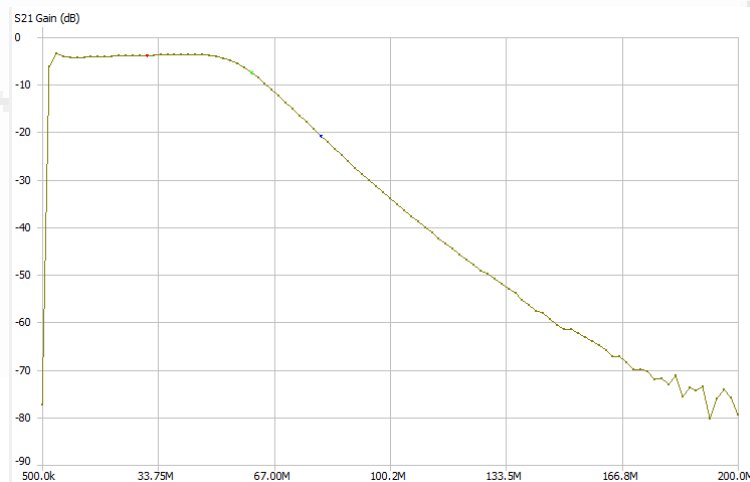


Figure 16. Frequency Response of the Generated Band-Pass Filter (Parameter S_{21})

While evaluating the S_{21} values, it was also noted that the 88–108 MHz band—occupied by FM radio—was sufficiently attenuated to prevent interference with the PDDS. Specifically, the 88 MHz component was observed to be suppressed by approximately 25 to 30 dB. Before the AC signal is applied to the STM32 ADC pins, a coupler circuit is used to shift the signal into an appropriate range. This simple circuit, composed of a capacitor and two resistors, shifts an input signal originally ranging between -1.5 V and +1.5 V to a range of 0 V to +3.0 V by referencing it to 1.5 V. This allows the negative portion of

the input signal to be properly sampled by the STM32 ADC. The maximum amplitude of the AC signal is limited to 3 V peak-to-peak (V_{pp}).

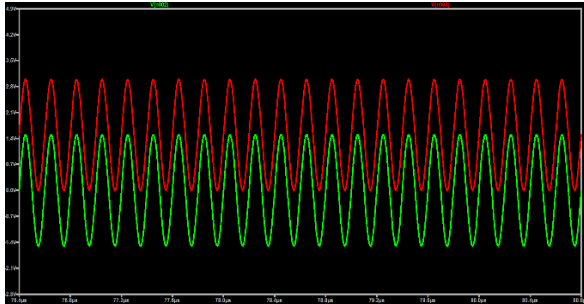


Figure 17. Coupler Simulation Results

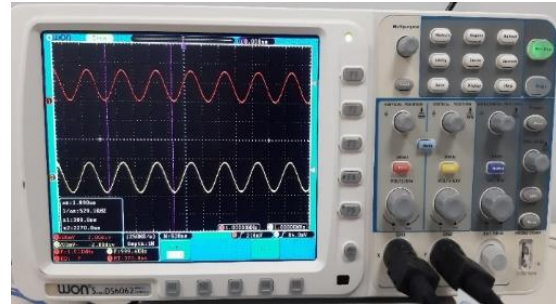


Figure 18. Measurement Results of the Produced Coupler

The circuit, which was found suitable in simulation studies, was tested for real-world operability under practical conditions. For testing, a signal generator capable of generating signals up to 20 MHz and a 60 MHz oscilloscope were connected to the input and output of the circuit. According to the results, a signal with a 1.5 V amplitude oscillated between 0 V and 3 V, confirming proper operation.

2.2.3.4. Adjustable Gain Amplifier (VGA)

Adjustable Gain Amplifier (VGA) is an amplifier whose gain can be adjusted either automatically through Automatic Gain Control (AGC) or manually via a control voltage applied to its input. VGAs are capable of achieving very high levels of amplification.

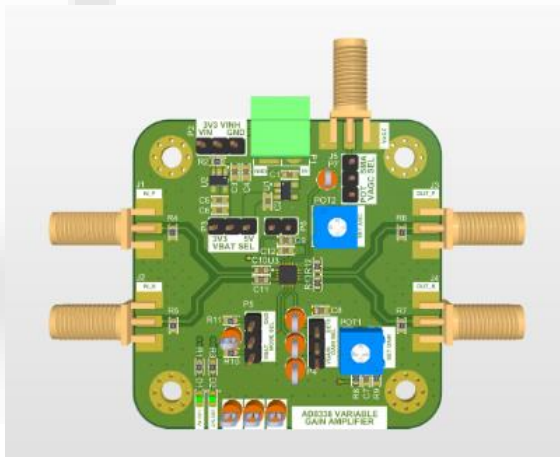


Figure 19. AD8338 Adjustable Gain Amplifier Design (VGA)

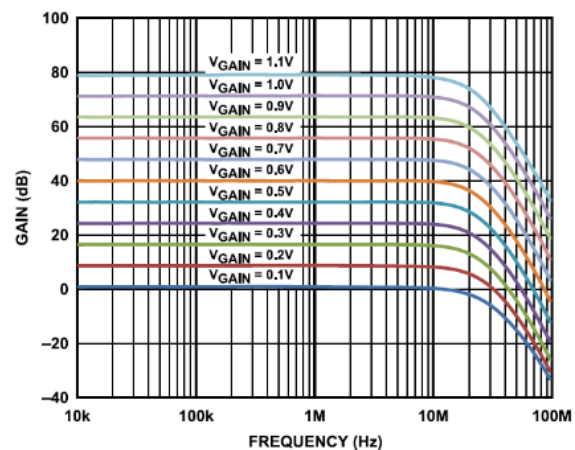


Figure 20. AD8338 Gain and Frequency Table

The AD8338 can provide up to 100 dB of gain under suitable conditions. However, its maximum output level is +10 dBm. This means that even if 100 dB of gain is applied, the input signal can only be amplified up to a maximum of +10 dBm at the output. Exceeding this limit would cause the AD8338 to saturate, resulting in a non-linear gain response.

The gain level of the AD8338 can be adjusted via the V_{GAIN} control voltage, which ranges from 0.1 V to 1.1 V. There is a linear relationship between the V_{GAIN} value and the resulting gain. Specifically, each 100 mV increase in control voltage corresponds to an 8 dB increase in gain. The gain can be calculated using the formulas provided in the device documentation.

$$G \text{ (dB)} = \frac{V_{GAIN}}{12.5mV} - 8 \text{ dB} \quad (1)$$

$$G_N = 0.398 \times 10^{\frac{V_{GAIN}}{250mV}} \quad (2)$$

The low-level signal received from the antenna is directly amplified by the AD8338. In this stage, DC offset circuits are used to nullify the signal offsets and eliminate DC components. To remove the DC component, a High-Pass Filter (HPF) is placed at the output of the AD8338. The cutoff frequency of this filter is determined by the C_{OFSN} capacitor. The required capacitor value for the filter can be calculated using a given formula.

$$f_{OFSN} = \frac{1}{2 \times \pi \times 400\Omega \times C_{OFSN}} \text{ (Hz)} \quad (3)$$

In the implemented circuit, the value of C_{OFSN} was set to $2.2 \mu\text{F}$. Accordingly, the cutoff frequency is calculated as follows:

$$f_{OFSN} = \frac{1}{2 \times \pi \times 400\Omega \times 2.2\mu\text{F}} = \frac{1}{2 \times \pi \times 400\Omega \times 2.2 \times 10^{-6}} \quad (4)$$

$$f_{OFSN} = 180 \text{ Hz}$$

2.2.3.5. Wi-Fi Antenna

The Wi-Fi antenna is connected to the u.FL connector of the ESP32. It provides a gain of 4.5 dBi within the 2400 to 2500 MHz frequency range. The connection type is either u.FL or IPEX. The antenna impedance is measured as 50Ω across the operating frequency range.



Figure 21. Wi-Fi Antenna

2.2.3.6. Software

The client interface is a software application developed in C# and runs on a computer. Through this software, RF emissions generated by partial discharges at their source are detected by the antenna and processed within the system interface.

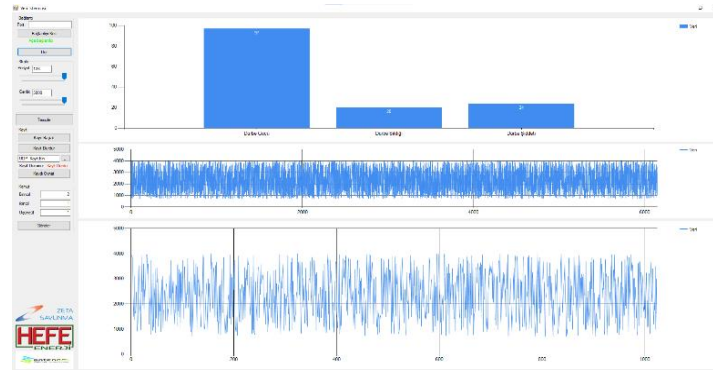


Figure 22. User Interface

3. CONCLUSION

A significant portion of failures in electrical transmission and distribution systems originates from partial discharge (PD) phenomena that develop over time within insulation systems. This study presents a radio frequency (RF)-based and software-defined radio (SDR)-supported mobile measurement system as a potential solution to the limitations of conventional PD detection methods in field applications. Unlike traditional measurement systems, the proposed system allows for non-contact, in-motion detection without the need for galvanic connections. Through its wideband antenna system and SDR-based receiver infrastructure, PD signals emitted in the VHF/UHF band are successfully detected. Field trials have demonstrated that the system operates effectively in mobile scanning applications, particularly on medium-voltage (MV) overhead lines. The ability to perform rapid scans over large areas without physical intervention provides significant advantages in terms of time and manpower efficiency. Additionally, the digital acquisition of measurement data facilitates the integration of signal processing algorithms and lays the foundation for future machine learning-based analysis systems. However, the system also presents certain limitations. In industrial environments with high levels of electromagnetic interference, distinguishing PD signals becomes challenging, and false positives may occur due to background noise. Furthermore, the system's directional sensing capability may vary depending on the gain and placement of the antenna used. For future development, it is recommended to enhance the system with directional antenna arrays, enabling not only the detection but also the classification of PD types. On the signal processing side, the integration of AI-assisted decision-support algorithms is also proposed. These improvements could enhance detection accuracy and facilitate the system's integration into predictive maintenance planning processes.

ACKNOWLEDGMENT

Authors would like to thank to the Energy Market Regulatory Authority (EMRA) and Yeşilirmak Electricity Dis. Co (YEDAS) for their support and making this research possible.

REFERENCES

- Bäckström, K. (2010). Statistical analysis of partial discharges [Master's thesis, Uppsala University].
- Chen, L. J., Tsao, T. P., & Lin, Y. H. (2005). New diagnosis approach to epoxy resin transformer partial discharge using acoustic technology. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 20(4), 2476–2483.
- IEC 60270 - High-voltage test techniques — Partial discharge measurements.
- Kayser Azam, S. M., Othman, M., Ilias, H. A., Abdul Latef, T., Fahmi, D., Raymond, W. J. K., Wan Mahadi, W. N. L., Hossain, A. K. M. Z., Abd. Aziz, M. Z. A., & Ababneh, A. (2024). Unknown PD distinction in HVAC/HVDC by antenna-sensor with pulse sequence analysis. *Alexandria Engineering Journal*, 91, 457–471.
- Kreuger, F. H. (1989). *Partial Discharge Detection in High-voltage Equipment*. Butterworths.

- Lu, S., Chai, H., Sahoo, A., & Phung, T. (2020). Condition Monitoring Based on Partial Discharge Diagnostics Using Machine Learning Methods: A Comprehensive State-of-the-Art Review. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 27, 1861–1888.
- Moore, P. J., Portugués, I., & Glover, I. A. (2003). A non-intrusive partial discharge measurement system based on RF technology. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 18(4), 1434–1440.
- Natrass, D. A. (1988). Partial discharge measurement and interpretation. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 4(3), 5–19.
- Nepola, K. (2013). Feasibility of radio frequency interference measurements in condition monitoring of high voltage substations [Master's thesis, Aalto University].
- Schön, K. (2019). *High Voltage Measurement Techniques: Fundamentals, Measuring Instruments and Measuring Methods*. Springer.
- Ofil Systems. (2025). Partial Discharge Technology Overview. Retrieved from <https://ofilsystems.com/technology/partial-discharge/> (Access Date: 27.06.2025)

Makale id= 17

Sözlü Sunum

ORCID ID: 0000-0001-9647-9404 / 0000-0003-1796-2460

| 73

Elektrik Dağıtım Sektöründe Redresörlerin Uzaktan Takibi ve Akü Durum AnaliziAraştırmacı Bilgehan Kasım¹, Araştırmacı Oğuz Kaan Atar¹¹Yeşilirmak Elektrik Dağıtım Anonim Şirketi

*Corresponding author: Oğuz Kaan Atar

Özet: Elektrik dağıtım sistemlerinde, enerji kesintisi gibi olağan dışı durumlar meydana geldiğinde, dağıtım merkezlerinde bulunan koruma röleleri, sensörler ve IoT cihazlarının belirli bir süre daha çalışmaya devam etmesi büyük önem taşımaktadır. Bu amaçla, dağıtım merkezlerinde redresör sistemleri kullanılarak, akü grupları aracılığıyla sistemin yedek enerjiyi kullanması sağlanmaktadır. Redresörler, alternatif akımı doğru akıma çevirerek aküleri beslemekte ve enerji kesintisi sırasında bu aküler aracılığıyla sistemin beslenmesini sürdürmektedir. Ancak, sahada yaygın olarak kullanılan birçok redresör sistemi, dahili olarak modern haberleşme protokollerini — özellikle endüstride sıkça tercih edilen MODBUS RTU protokolünü desteklememektedir. Bu durum, redresör sistemlerinin SCADA ve IoT tabanlı uzaktan izleme platformlarına entegre edilmesini ve bu sistemlerden gerçek zamanlı veri alınmasını zorlaştırmaktadır. Bu eksiklik, enerji sürekliliğinin takibi ve akü sağlığının uzaktan kontrolü gibi konularda önemli bir engel teşkil etmektedir. Bu çalışmada, mevcut redresör sistemlerine entegre edilebilecek, maliyet etkin ve harici bir donanım geliştirilmiştir. Geliştirilen sistem, redresöre bağlı akü grubunun gerilim ve akım değerlerini ölçebilmekte, bunun yanında akülerin doluluk durumu (State of Charge - SoC) ve sağlık durumu (State of Health - SoH) gibi kritik parametreleri hesaplayabilmektedir. Ölçülen veriler MODBUS RTU haberleşme protokolü aracılığıyla IoT cihazlara iletilmekte ve böylece merkezi SCADA sistemleri üzerinden izlenebilir hale gelmektedir. Donanım laboratuvar ortamında test edilmiş ve simüle edilmiş saha koşullarında güvenli biçimde çalıştığı gözlemlenmiştir. Bu çözüm sayesinde, mevcut redresör sistemlerinin tamamen değiştirilmesine gerek kalmaksızın, modern haberleşme altyapılarına entegrasyonu sağlanmakta, bakım planlamaları daha verimli yapılmakta ve olası arızalara karşı erken müdahale imkânı sunulmaktadır. Sonuç olarak, geliştirilen sistem; dağıtım merkezlerinde kullanılan güç kaynaklarının daha etkin izlenmesini sağlamanın yanı sıra, enerji sürekliliğini artırmaya ve bakım maliyetlerini azaltmaya yönelik somut katkılar sunmaktadır. Bu çalışma, klasik sistemleri dijitalleştirerek akıllı enerji dağıtımı yönünde atılmış önemli bir adımdır.

Anahtar Kelimeler: Elektrik Dağıtım Sistemleri, Redresör İzleme, Akü Sağlığı, Uzaktan İzleme, Modbus Haberleşme, Iot Cihazları, Scada Entegrasyonu, Soc, Soh, Enerji Sürekliliği, Donanım Tasarımı, Endüstriyel Haberleşme

Remote Monitoring of Rectifiers and Battery Condition Analysis in the Electric Distribution Sector

Abstract: In electrical power distribution systems, ensuring the continued operation of protective relays, sensors, and IoT devices in substations during power outages is of critical importance. To maintain this continuity, rectifier systems are commonly used to provide backup energy by charging battery groups. These systems convert alternating current (AC) into direct current (DC) to charge the batteries, which then supply power when the main grid is unavailable. However, most rectifier systems currently in use lack integrated support for modern industrial communication protocols, particularly MODBUS RTU. This shortcoming significantly limits their ability to interact with IoT-based monitoring devices and SCADA platforms, making it difficult to remotely access real-time data such as voltage, current, battery charge level (State of Charge - SoC), and battery health status (State of Health - SoH). As a result, system operators must rely on periodic manual inspections, which increases operational costs and delays fault detection. To address this issue, a cost-effective external monitoring hardware was developed in this study. The device is designed to be easily integrated into existing rectifier systems and is capable of measuring essential electrical parameters such as output voltage and current. Furthermore, it estimates SoC and SoH metrics and transmits the data via MODBUS RTU to IoT devices, which can then relay the information

to central SCADA systems. The system was tested under laboratory conditions and demonstrated stable performance under simulated field scenarios. This approach enables legacy rectifier systems to be upgraded with remote monitoring capabilities without requiring full system replacement. Ultimately, the proposed solution enhances energy reliability, improves maintenance planning, and enables early fault detection. It offers a practical path for integrating traditional power equipment into modern digital energy management frameworks and represents a meaningful step toward smarter, more resilient power distribution networks.

Keywords: Power Distribution Systems, Rectifier Monitoring, Battery Health, Remote Monitoring, Modbus Communication, Iot Devices, Scada Integration, Soc, Soh, Energy Continuity, Hardware Design, Industrial Communication

INTRODUCTION

Today, the growing dependence on electrical energy in both individual life and industrial processes has made the continuity and quality of energy supply more critical than ever before. Power transmission and distribution infrastructures are becoming increasingly complex, especially in densely populated urban areas, and are subject to rising expectations for reliability. In this context, electrical distribution substations not only serve as nodes for directing and transmitting energy but also host critical components responsible for ensuring the overall safety, stability, and observability of the system.

Faults occurring in power distribution systems, whether due to planned or unplanned outages or sudden voltage fluctuations caused by environmental conditions, can negatively impact not only end-users but also the system's ability to protect and monitor itself. In such abnormal situations, it is vital that protective relays, measurement sensors, communication modules, and especially IoT-based monitoring units in distribution substations continue to operate for a certain period. This continuity is essential for fault detection and timely intervention. To ensure such resilience, substations are typically equipped with rectifier systems and battery banks as backup energy sources.

Rectifier systems are key components that convert alternating current (AC) into direct current (DC) to charge battery banks, enabling the system to continue operating during power outages. However, many rectifier systems currently in use do not support modern communication protocols—particularly the MODBUS RTU protocol, which is widely adopted in industrial automation. This limitation significantly hampers the integration of rectifier systems into SCADA systems and IoT-based monitoring platforms. As a result, critical battery parameters such as voltage, current, state of charge (SoC), and state of health (SoH) cannot be monitored remotely, leading to delays in maintenance planning and reduced ability to predict potential failures in advance (Chakraborty, Roy, & Sinha, 2020).

This study presents an innovative and cost-effective hardware solution designed to overcome these technical limitations. The developed system can be integrated with existing rectifiers without requiring any modification, continuously measure voltage and current values of battery banks, and calculate essential parameters such as SoC and SoH. The collected data is transmitted securely to IoT devices or centralized SCADA systems via the MODBUS RTU protocol, enabling real-time monitoring of backup power systems in the field.

Laboratory tests and simulated field conditions have demonstrated the reliability and applicability of the hardware. The proposed solution allows for the integration of legacy rectifier systems into digital monitoring infrastructures without the need for complete replacement. This approach enables improved energy continuity, more efficient maintenance planning, and quicker response to potential faults.

In conclusion, this study represents a concrete step toward building a smarter and more sustainable power distribution system by digitalizing conventional energy infrastructures. The developed hardware not only offers a technical enhancement but also contributes to making energy management processes more transparent, traceable, and data-driven (Fang, Misra, Xue, & Yang, 2012).

METHOD

In this study, a low-cost external monitoring hardware system capable of communicating via the MODBUS RTU protocol has been developed to be integrated into existing rectifier systems. The system architecture is structured around four core components: system design, circuit design, embedded

software development, and the Coulomb Counting method used for SoC/SoH estimation. Each component has been designed to complement one another, enhancing both functionality and reliability.

System Design

During the system design phase, the focus was placed on accurately and reliably acquiring the essential electrical parameters—voltage and current—from the rectifier system. For voltage measurement, a conventional and dependable method utilizing a resistive voltage divider was implemented. Carefully selected precision resistors scaled down the high voltage levels to a safe range suitable for the microcontroller’s ADC input, enabling high-accuracy monitoring. For current measurement, a low-resistance shunt resistor (1.636 mΩ) was integrated into the DC current path. The voltage drop across the shunt resistor was differentially measured, and the resulting current values were used for computing the State of Charge (SoC) and State of Health (SoH) of the battery. An ARM Cortex-M4-based 32-bit STM32F407VGT6 microcontroller was selected as the processing unit for data acquisition, control algorithm execution, and communication functions. This microcontroller offers sufficient computational capacity and supports various peripherals (ADC, UART, Timer, etc.), making it well-suited for system requirements. To establish communication with external systems, the widely adopted industrial MODBUS RTU protocol was implemented. The MAX485 transceiver was used to enable RS-485 physical layer communication, offering reliable differential data transmission in noisy, long-distance industrial environments. The system’s overall architecture and inter-component communication are illustrated in Figure 1 (STMicroelectronics, 2021).

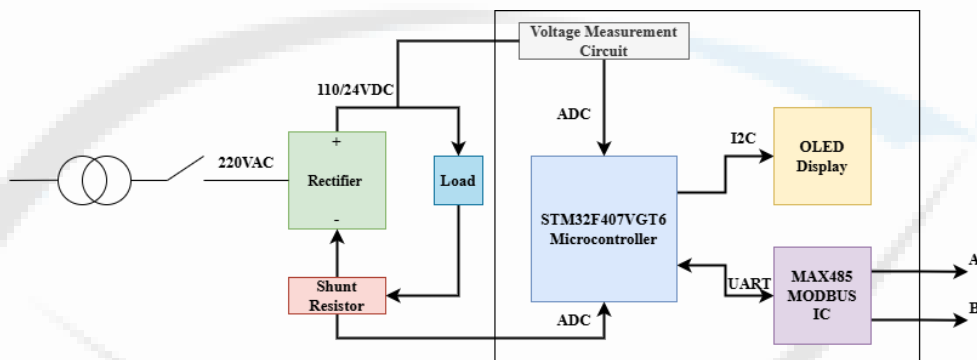


Figure 1. Block Diagram of the System

Circuit Design

The circuit design process began with the development of the current measurement circuit. A 1.636 mΩ shunt resistor was placed in the current path, generating a very low voltage signal due to its low resistance. Since this signal could not be accurately read by the ADC in its original form, it was amplified using a non-inverting operational amplifier circuit with a gain of approximately 22.277. The schematic of the current measurement circuit is shown in Figure 2.

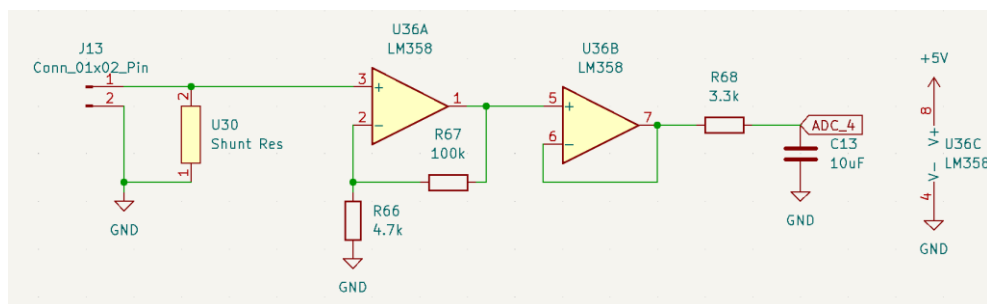


Figure 2. Current Measurement Circuit

Voltage measurement was implemented using a voltage divider network designed specifically for a 110VDC rectifier system. The related voltage measurement setup is provided in Figure 3.

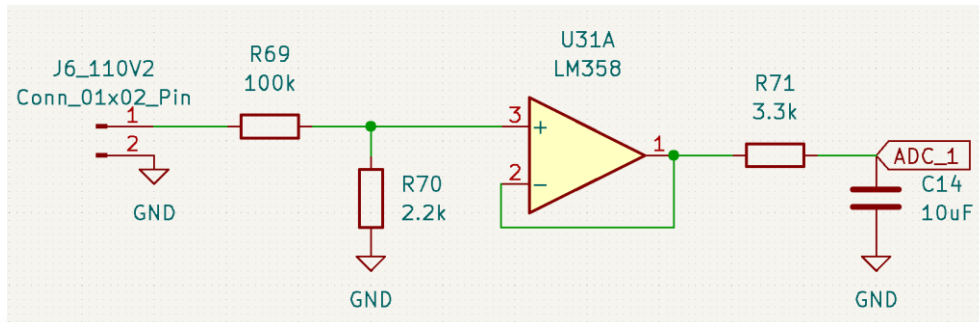


Figure 3. Voltage Measurement Circuit

The system was developed and tested using the STM32F4 Discovery board, which features the STM32F407VGT6 microcontroller. This board is shown in Figure 4.



Figure 4. STM32F4 Discovery Board

The MAX485 IC, responsible for MODBUS communication, is depicted in Figure 5.



Figure 5. MAX485 Transceiver IC

Embedded Software Development

The embedded software was developed using STM32CubeIDE for the STM32F407VGT6 microcontroller. The software includes functionalities for voltage and current measurements, SoC and SoH estimation, MODBUS RTU communication, and data visualization on an OLED screen. For acquiring voltage and current values, the microcontroller's ADC module was configured to work with Direct Memory Access (DMA), significantly reducing CPU load by performing background data transfers. Additionally, the acquired ADC values were processed through a Kalman filter to smooth out signal noise and improve stability. For MODBUS RTU communication, a timer interrupt mechanism was implemented to periodically transmit data. On the receiving side, the DMA feature was again utilized to allow seamless, processor-independent data reception. OLED screen updates were also scheduled using timer interrupts, ensuring periodic and non-blocking data display for real-time monitoring. Sample code sections for MODBUS communication, Kalman filtering, and OLED display routines are provided in Figures 6, 7, and 8, respectively.

```
char bufflt[10];
uint8_t modbusAddr = 0x37;
uint8_t modbusFunction = 0x04;
uint8_t modbusRegister = 0x14;
HAL_GPIO_TogglePin(GPIOB, GPIO_PIN_15);
HAL_GPIO_WritePin(GPIOA, GPIO_PIN_8, SET);
sendData(modbusAddr, modbusFunction, modbusRegister, data);
HAL_GPIO_WritePin(GPIOA, GPIO_PIN_8, RESET);
if(response[0] == 0x37) {
    uint16_t crc = crc16(response, 6);
    crcCheck[0] = crc;
    crcCheck[1] = (crc >> 8);
    if((response[6] == crcCheck[0]) && (response[7] == crcCheck[1])) {
        for(uint8_t i = 0; i < 8; i++) {
            receive[i] = response[i];
        }
    }
}
```

Figure 6. MODBUS Communication Code

```
#include "kalmanfilter.h"
#include "stdint.h"
static float x_k1_k1 = {0};
static float x_k_k1 = {0};
static float P_k1_k1 = {1};
static float P_k_k1 = {1};
static float kalman_adc_old = {0};
static float kalman_adc = {0};
static float Q = 0.001;
static float R = 0.01;
static float Kg = 0;

double kfOperate(kalmanStruct adcValue) {
    uint32_t z_k = adcValue.adcRead;

    x_k1_k1 = kalman_adc_old;
    x_k_k1 = x_k1_k1;
    P_k_k1 = P_k1_k1 + Q;

    Kg = P_k_k1 / (P_k_k1 + R);
    kalman_adc = x_k_k1 + Kg * (z_k - kalman_adc_old);
    P_k1_k1 = (1 - Kg) * P_k_k1;
    P_k_k1 = P_k1_k1;

    kalman_adc_old = kalman_adc;

    return kalman_adc_old;
}
```

Figure 7. Kalman Filter Implementation

```

SH1106_GotoXY (10,10);
SH1106_Puts ("REDRESOR IZLEME", &Font_7x10, 1);

SH1106_DrawLine(0, 20, 128, 20, 1);
SH1106_DrawLine(0, 42, 128, 42, 1);
SH1106_DrawLine(64, 20, 64, 42, 1);
SH1106_DrawLine(64, 42, 64, 64, 1);

SH1106_GotoXY (54, 31);
SH1106_Puts ("V", &Font_7x10, 1);
SH1106_GotoXY (118, 31);
SH1106_Puts ("A", &Font_7x10, 1);
SH1106_GotoXY (54, 53);
SH1106_Puts ("%", &Font_7x10, 1);
SH1106_GotoXY (118, 53);
SH1106_Puts ("%", &Font_7x10, 1);

SH1106_GotoXY (1, 31);
SH1106_Puts ("VBT:", &Font_7x10, 1);
SH1106_GotoXY (65, 31);
SH1106_Puts ("CBT:", &Font_7x10, 1);
SH1106_GotoXY (1, 53);
SH1106_Puts ("SoC:", &Font_7x10, 1);
SH1106_GotoXY (65, 53);
SH1106_Puts ("SoH:", &Font_7x10, 1);
SH1106_UpdateScreen();

```

Figure 8. OLED Display Code

Coulomb Counting Method

A widely used approach for estimating the battery's State of Charge (SoC) is the Coulomb Counting method. In this technique, the current flowing into or out of the battery is integrated over time to determine the change in total charge, thereby estimating the SoC. The current is sampled at regular intervals, and the charge is accumulated relative to an initial SoC value. The method is mathematically expressed in Equation 1 (Mohan, Undeland, & Robbins, 2002):

$$SoC(t) = SoC(t_0) + \frac{1}{C_{nom}} \int_{t_0}^t I(\tau) d\tau \quad (\text{Equation 1})$$

Here $SoC(t_0)$ is the initial state of charge, C_{nom} , is the nominal battery capacity in ampere-hours (Ah), and $I(\tau)$ represents the current as a function of time. In practice, this integral is approximated numerically by the microcontroller based on discrete sampling intervals. The SoC value obtained via this method serves as a critical parameter for monitoring energy continuity and ensuring optimal battery usage (Karden et al., 2007).

RESEARCH FINDINGS AND DISCUSSION

To evaluate the accuracy and reliability of the developed system, testing procedures were carried out using the laboratory facilities of the YEDAŞ Distribution Technologies and R&D Department. During testing, the measurement accuracy of current, voltage, State of Charge (SoC), and State of Health (SoH) was assessed using an M133C 3F Power & Energy Calibrator. The experiments were conducted under voltage levels of 110–120 V and current levels of 5–6 A (Figure 10), with the experimental setup shown in Figure 9. To verify the accuracy of the current measurement circuit, a 5 A DC current was applied through a 1.636 mΩ shunt resistor. Under these conditions, a theoretical voltage drop of approximately 8.18 mV is expected across the shunt. This low-level signal was amplified using a non-inverting operational amplifier with a gain of approximately 22.277, resulting in an expected output of about 182.2 mV. A multimeter measurement yielded 182.5 mV, showing excellent agreement with the theoretical value (Figure 11). Under the same conditions (111 V / 6 A), the STM32F407VGT6 microcontroller measured current and voltage using its ADC module, recording values of 6 A and 111 V respectively (Figure 12). These results confirm that the system is capable of high-precision measurement. Minor deviations observed are attributed to environmental noise and analog component

tolerances. The results demonstrate that the measurement subsystem is valid and that the developed hardware operates reliably. Furthermore, communication via the MODBUS RTU protocol was successfully verified, and the measured data was transmitted in a manner compatible with SCADA systems. Periodic data display on the OLED screen was also successfully implemented using timer interrupts, enabling real-time visual feedback (Figure 12).

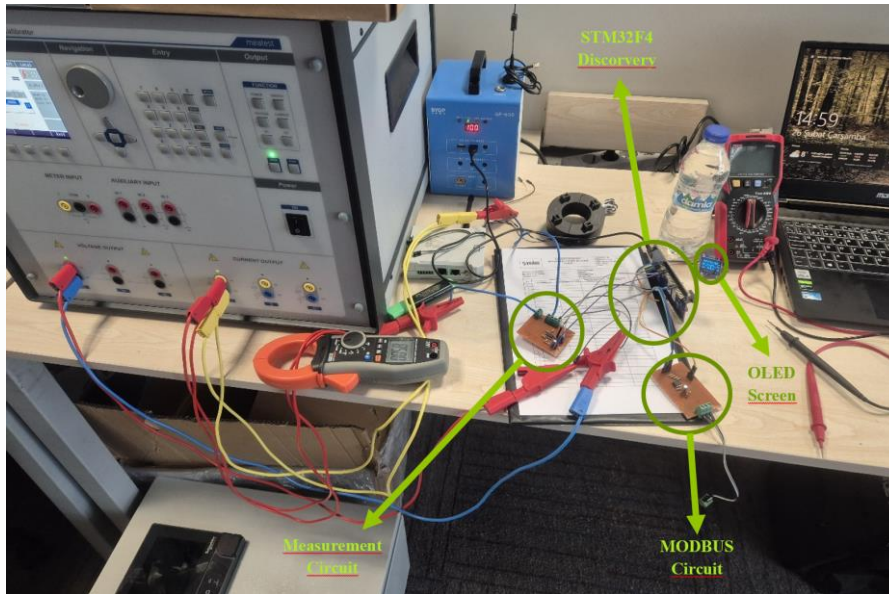


Figure 9. Experimental Setup



Figure 10. Applied Current and Voltage Levels



Figure 11. Amplified Voltage Output from Shunt Resistor



Figure 12. Measured Values Displayed on OLED

CONCLUSION

In this study, an external embedded hardware system was developed to enable the integration of rectifiers used in electrical distribution systems into modern monitoring and communication infrastructures. Through this system, MODBUS RTU communication capability—which is absent in most existing rectifier systems—has been added, allowing backup energy systems in the field to be monitored via SCADA and IoT platforms. The developed system can measure the voltage and current of battery banks in real time, and based on this data, it calculates critical parameters such as the SoC and SoH. Notably, the implementation of SoC estimation based on the Coulomb Counting method has provided significant advantages for maintaining energy continuity. As a result of the test and calibration processes, the system demonstrated high measurement accuracy and strong consistency with theoretical values. Furthermore, hardware and software optimizations such as ADC-DMA integration, timer-based interrupts, and low-level signal amplification contributed to a resource-efficient and high-performance design. The successful implementation of MODBUS RTU communication and local visualization via an OLED display enhanced the system's ability to be monitored both remotely and on-site. Ultimately, the developed hardware solution allows for the digital integration of legacy rectifier systems without requiring complete replacement. This offers a cost-effective approach that contributes to improved energy continuity monitoring, optimized maintenance operations, and earlier fault detection. The study represents a concrete step toward the digital transformation of traditional energy infrastructures and sets a precedent for similar applications. In future work, it is planned to deploy and test the system in a real-world electrical distribution substation environment.

ACKNOWLEDGMENT

The authors would like to express their sincere gratitude to Yeşilirmak Elektrik Dağıtım A.Ş. for their significant contributions to the realization of this study. The support and collaboration provided by the company played a critical role in the success of this research on early detection of electric arcs. In particular, the interest shown and the resources provided during the research and development processes were of great value at every stage of the study.

REFERENCES

- Chakraborty, S., Roy, A., & Sinha, N. (2020). Development of a low-cost MODBUS-based communication system for industrial applications. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 11(6), 365–372. <https://doi.org/10.14569/IJACSA.2020.0110647>
- Fang, X., Misra, S., Xue, G., & Yang, D. (2012). Smart grid—The new and improved power grid: A survey. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 14(4), 944–980. <https://doi.org/10.1109/SURV.2011.101911.00087>
- Karden, E., Ploumen, S., Fricke, B., Miller, T., & Snyder, K. (2007). Energy storage devices for future hybrid electric vehicles. *Journal of Power Sources*, 168(1), 2–11. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2006.10.090>
- Mohan, N., Undeland, T. M., & Robbins, W. P. (2002). *Power electronics: Converters, applications, and design* (3rd ed.). Wiley.

Texas Instruments. (2015). Understanding operational amplifiers (Rev. A) [Application Report]. <https://www.ti.com/lit/an/sloa011/sloa011.pdf>

STMicroelectronics. (2021). STM32F407xx advanced ARM®-based 32-bit MCUs reference manual (RM0090 Rev.20). <https://www.st.com/resource/en/datasheet/dm00037051.pdf>



Makale id= 26

Sözlü Sunum

ORCID ID: 0009-0007-7753-750X

| 82

Alan Yönlendirmeli Kontrol ile Kalıcı Mıknatıslı Senkron Motorun İncelenmesi**Araştırmacı Furkan Soner¹, Dr Volkan Başay¹, Prof. Dr. Güneş Yılmaz¹**
¹Uludağ Üniversitesi

*Corresponding author: Furkan Soner

Özet: Bu çalışmada, Kalıcı Mıknatıslı Senkron Motorun (KMSM) nominal hızının altında, nominal hızında ve üzerindeki çalışma rejimlerinde sergilediği elektriksel tepkiler analiz edilmiştir. Motor davranışı, 1000–5000 rpm aralığında, PI denetleyici tabanlı Alan Yönlendirmeli Kontrol (FOC) yapısına entegre edilen alan zayıflatma tekniği ile MATLAB/Simulink ortamında simüle edilmiştir. Modelde, motorun nominal hızı 3000 rpm olarak tanımlanmıştır. Yalnızca FOC yöntemi uygulandığında, motorun nominal hızın üzerinde çalışması gerilim limitleri nedeniyle kısıtlanmaktadır. Bu durum özellikle yüksek hızlı tahrik sistemlerinde önemli bir kısıt oluşturur. Bu çalışmada, mevcut FOC yapısına alan zayıflatma stratejisi entegre edilerek söz konusu kısıtın aşılması hedeflenmiş ve böylece ilgili kontrol yaklaşımının daha gelişmiş ve uygulanabilir bir versiyonu ortaya konmuştur. Nominal hızın üzerindeki çalışma koşullarında d-ekseni akım bileşenine negatif referans verilerek rotorun manyetik akısı sınırlandırılmış; her bir hedef hız değeri için rotorun gerçek hızı ile d-q eksenlerindeki akım bileşenleri gözlemlenmiştir. Alan zayıflatma tekniği sayesinde, gerilim sınırlarını aşmadan uygulanan negatif d-ekseni akımı ile manyetik akı etkin biçimde zayıflatılarak motorun daha yüksek hızlara ulaşması sağlanmıştır. Simülasyon sonuçlarına göre, alan zayıflatma tekniği uygulanmadan motor 3000 rpm'ye kadar kararlı biçimde çalışabilmiş, bu sınırın üzerinde ise alan zayıflatma aktif hale gelmiştir. 3000, 4000 ve 5000 rpm referans hızları için uygulanan maksimum negatif i_d akımı sırasıyla -4 A, -64 A ve -72 A olarak gözlemlenmiştir. Alan zayıflatmanın etkili olduğu bu rejimlerde sistemin gerilim limiti aşılmadan çalıştığı ve motorun daha yüksek hızlara başarıyla ulaştığı belirlenmiştir. Ayrıca, 5000 rpm'de elde edilen %0.08'lik aşım yüzdesi ve 0.61 saniyelik yerleşme süresi, kontrol yapısının yüksek hızda dahi kararlı, hızlı ve aşırı salınımsız çalıştığını göstermektedir. Bu yönüyle sunulan kontrol stratejisi, özellikle yüksek hızlı tahrik sistemleri için uygulanabilir, güvenilir ve verimli bir çözüm sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Kalıcı mıknatıslı Senkron Motor, Alan Yönlendirmeli Kontrol, Alan Zayıflatma Stratejisi, Üretilen Tork Değeri, D-Q Eksen Akımları

Analysis of Permanent Magnet Synchronous Motor Behavior Under Field-Oriented Control

Abstract: In this study, the electrical responses of a Permanent Magnet Synchronous Motor (PMSM) were analyzed under its nominal speed, at, and above its nominal speed. The motor behavior within the range of 1000–5000 rpm was simulated in the MATLAB/Simulink program using a PI controller-based Field-Oriented Control (FOC) structure integrated with a field weakening technique. In the model, the nominal speed of the motor was defined as 3000 rpm. When only the FOC method is applied, the operation of the motor above its nominal speed becomes limited due to voltage constraints. This presents a significant limitation, particularly for high-speed drive systems. In this study, a field weakening strategy was integrated into the existing FOC structure to overcome this limitation, thereby presenting a more advanced and applicable version of the control approach. Above the nominal speed, a negative reference was applied to the d-axis current unit to weaken the rotor magnetic flux; for each target speed value, the actual rotor speed and the d-q axis current components were observed. Through the field weakening technique, the magnetic flux was effectively reduced by applying a negative d-axis current without exceeding the voltage limits, enabling the motor to reach higher speeds. According to the simulation results, the motor was able to operate stably up to 3000 rpm without the need for field weakening, while the field weakening strategy became active beyond this threshold. The maximum negative i_d currents applied for reference speeds of 3000, 4000, and 5000 rpm were observed to be -4 A, -64 A, and -72 A, respectively. In these regimes where field weakening was effective, the system operated without exceeding voltage limits and successfully reached higher

speeds. Additionally, at 5000 rpm, an overshoot of only 0.08% and a settling time of 0.61 seconds were recorded, demonstrating that the control structure maintained a fast, stable, and overshoot-free performance even at high speeds. In this respect, the proposed control strategy offers a practical, reliable, and efficient solution for high-speed drive applications.

Keywords: Permanent Magnet Synchronous Motor, Field Oriented Control, Field Weakening, Torque Values Produced, D,q Axis Currents

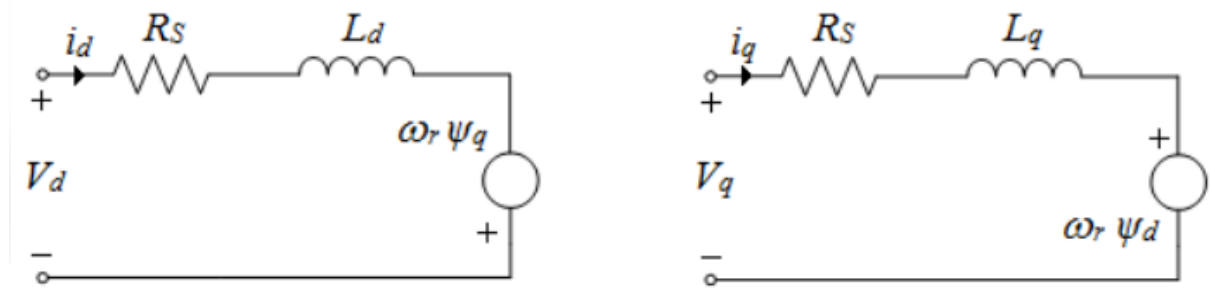
1. GİRİŞ

Günümüzde teknoloji alanındaki hızlı gelişmeler, endüstriyel tahrik sistemlerinin de dönüşüm geçirmesine neden olmuştur. Bu gelişmelerin bir sonucu olarak, motor kontrol teknikleri evrilmiş ve daha gelişmiş motor yapıları üzerine olan ilgi giderek artmıştır. Reaktif güç ihtiyacı yüksek olan ve yüksek moment-ağırlık oranı gerektiren uygulamalarda yetersiz kalan asenkron motorlar, bazı modern endüstriyel ihtiyaçlara yanıt verememektedir. Bu doğrultuda, yüksek güç yoğunluğu, yüksek tork üretimi ve yüksek verimlilik gibi avantajlarıyla Kalıcı Mıknatıslı Senkron Motorlar (KMSM), hem akademik çalışmaların hem de endüstriyel uygulamaların odak noktası haline gelmiştir. (Dalkın 2016).

KMSM'lerde rotor üzerinde sargı yerine kalıcı mıknatısların kullanılması, fırça ve kolektör gibi aşınmaya açık mekanik elemanlara olan ihtiyacı ortadan kaldırarak bakım gereksinimini azaltmış ve güvenilirliği artırmıştır. Rotor sargılarının olmaması, aynı zamanda uyarma kayıplarını da elimine ederek motorun termal kapasitesini yükseltmiş, bu da daha küçük hacimlerde daha yüksek güç üretimini mümkün kılmıştır. Ayrıca, rotor sargısı bulunmaması sebebiyle bakır kayıplarının ortadan kalkması, bu motorların asenkron motorlara kıyasla daha yüksek verimde çalışmasına olanak tanımaktadır. (Özçira ve ark., 2012).

1.1 KMSM'nin Matematiksel Modeli

Bu kısımda KMSM'nin d-q eksenindeki matematiksel modeli ele alınacaktır. d-q eksenli modeli, üç fazlı bir sistemin iki eksenli (doğrultulmuş) dönel bir referans çerçevesine dönüştürülmesini sağlayarak, analiz ve kontrol işlemlerini kolaylaştıran bir yöntemdir. Bu modelin kullanılması ile KMSM'nin matematiksel modeli daha basit ve anlaşılır hale gelir. Şekil 1'de KMSM'nin d-q eşdeğer devreleri gösterilmiştir.



Şekil 1.1: KMSM'nin d-q eşdeğer devreleri (Çelik & Kürüm, 2013)

Bu eş değer devrelerden,

$$V_d = R_s i_d + \frac{d}{dt} \Psi_d - \omega_r \Psi_q \quad (1)$$

$$V_q = R_s i_q + \frac{d}{dt} \Psi_q + \omega_r \Psi_d \quad (2)$$

Burada; V_d ve V_q d-q eksen gerilimlerini (V), i_d ve i_q d-q eksen akımlarını (A), Ψ_d ve Ψ_q d-q eksen akılarını (Wb) ve ω_r rotorun açısal hızını (rad/s) göstermektedir. R_s stator sargı direncini (Ω) göstermektedir.

Ψ_d ve Ψ_q d-q eksen akıları, aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\Psi_d = L_d i_d + \Psi_m \quad (3)$$

$$\Psi_q = L_q i_q \quad (4)$$

Eşitlik (3)'teki Ψ_m , kalıcı mıknatısdan dolayı oluşan karşılıklı manyetik akıdır. L_d ve L_q ise ilgili kartezyenlerin öz indüktansını göstermektedir. Denklem 3 ve 4, denklem 1 ve 2'de yerine yazılırsa d-q eksen gerilimleri aşağıdaki gibi elde edilmektedir.

$$V_d = R_s i_d + L_d \frac{d}{dt} i_d - \omega_r L_q i_q \quad (5)$$

$$V_q = R_s i_q + L_q \frac{d}{dt} i_q + \omega_r L_d i_d + \omega_r \Psi_m \quad (6)$$

Motorun ürettiği elektromanyetik moment, eşitlik (7)'de gösterilmektedir.

$$T_e = \frac{3p}{2} [\Psi_d i_q - \Psi_q i_d] \quad (7)$$

Elektromanyetik moment denklemindeki p ifadesi motorun çift kutup sayısını ifade etmektedir. Eşitlik (3) ve (4)'teki Ψ_d ve Ψ_q akıları, (7)'de yerine yazıldığında moment denkleminin aşağıdaki gibi elde edilmektedir.

$$T_e = \frac{3p}{2} [\Psi_m i_q + (L_d - L_q) i_q i_d] \quad (8)$$

Bu denklemde, birinci terim mıknatıs tarafından üretilen momenti ikinci terim ise relüktans momentini temsil eder. Yüzey mıknatıslı PMSM'lerde L_d ve L_q eşit olduğundan, relüktans momentini sıfırdır. Bu durumda moment denkleminin,

$$T_e = \frac{3p}{2} [\Psi_m i_q] \quad (9)$$

Eşitlik (9)'da elektromanyetik momentin sadece q eksen akımına bağlı olduğu görülmektedir. Bu nedenle kalıcı mıknatıslı senkron motorun moment kontrolünde q eksen akımı dikkate alınmaktadır. Motor modelinin durum uzay formunda gösterimi şu şekilde elde edilmiştir:

$$T_e - T_y = J \cdot \frac{1}{p} \frac{d\omega_e}{dt} + B \cdot \left(\frac{1}{p} \right) \cdot \omega_e \quad (10)$$

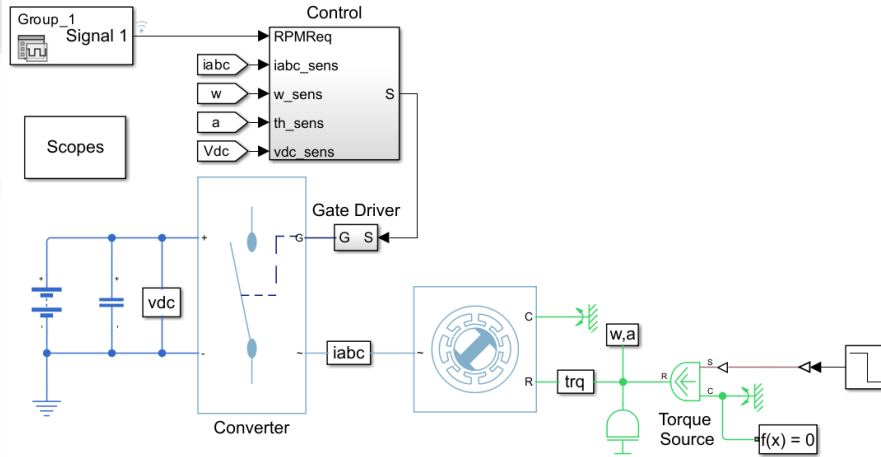
Burada J atalet momentini, B sürtünme katsayısını, ω_e ise elektriksel hızı temsil etmektedir.

2. Materyal ve Yöntem

KMSM'nin vektör kontrol yöntemleri; alan yönlendirmeli kontrol yöntemi, akı zayıflatma yöntemi ve doğrudan moment kontrol yöntemi olarak ifade edilebilir. KMSM'lerin hassas hız kontrolüne uygunluğu, onları günümüzün endüstriyel ihtiyaçları için ideal bir çözüm haline getirmiştir. Bu motorların kontrolünde yaygın olarak tercih edilen Alan Yönlendirmeli Kontrol (Field-Oriented Control- FOC) yöntemi, vektör kontrol esasına dayanmakta olup, d-q referans eksenini üzerinden tork ve akı bileşenlerinin birbirinden bağımsız şekilde kontrolünü sağlar. (Erkara, 2020).

FOC yöntemi, motorun nominal hızının altındaki ve nominal hız değerlerinde yüksek kontrol doğruluğu ve kararlılık sağlarken; nominal hızın üzerindeki çalışma koşullarında sistem gerilimi sınırlarını aşmamak adına ek stratejilere ihtiyaç duyar. Bu gereksinim doğrultusunda geliştirilen alan zayıflatma (field weakening) stratejisi, d-eksenindeki akım bileşeninin negatif yönde artırılması yoluyla manyetik akının zayıflatılarak motorun daha yüksek hızlarda çalışabilmesini mümkün kılar. Bu sayede sistem hem güvenli hem de kararlı bir şekilde nominal hızın üzerinde çalıştırılabilir hale gelir. (Ustun, 2016).

Bu çalışmada, KMSM'nin 1000 ile 5000 d/dk (rpm) aralığında alan yönlendirmeli kontrol ve alan zayıflatma stratejileriyle modellenmesi ve dinamik davranışlarının incelenmesi amaçlanmıştır. MATLAB/Simulink ortamında gerçekleştirilen simülasyonlar kapsamında, her bir referans hız değerine karşılık motorun rotorundan okunan gerçek hız değeri ve d-q eksen akımları gözlenmiştir. Motorun nominal hızların üzerindeki hız seviyelerinde d eksen akımının nasıl değiştiğini gözlemleyebilmek için FOC yapısına, akı zayıflatma yöntemi entegre edilmiştir. Söz konusu kontrol yaklaşımını temel alan bir benzetim modeli oluşturulmuş ve bu model üzerinden alan zayıflatma yönteminin motorun hızına olan etkisi incelenmiştir. Geliştirilen benzetim modeline ilişkin genel blok diyagram Şekil 2.1'de gösterilmiştir.



Şekil 2.1: Kurulan Benzetim Modeli

Şekil 2.1'de KMSM FOC yapısı ve alan zayıflatma stratejisini içeren benzetim modeli gösterilmektedir. Model temel olarak dört ana bileşenden oluşmaktadır: giriş referans bloğu, kontrol yapısı, güç elektroniği dönüştürücüsü ve motor yük sistemi.

Modelin sol üst köşesinde yer alan Signal 1 bloğu, sisteme uygulanacak referans hız sinyalini (RPMReq) üretir. Bu referans sinyal, kontrol algoritmasının giriş parametresi olarak kullanılmaktadır. Kontrol bloğuna iletilen bu sinyal ile, motorun gerçeği zamanlı çıkışı olan motor hızı (w_sens) bilgisi kontrolör tarafından geri besleme olarak alınmaktadır.

Kontrol bloğu, alan yönlendirmeli kontrol algoritmasını ve alan zayıflatma stratejisini bir arada barındırır. Motorun nominal hız üzerindeki çalışma koşulları için, d-eksenine ait referans akımı negatif değerlere ayarlanarak manyetik alan zayıflatılır ve sistemin gerilim sınırları içerisinde çalışması sağlanır. Kontrolörün çıkışı olan d-q eksenindeki gerilim bileşenleri, ters park dönüşümleriyle üç fazlı

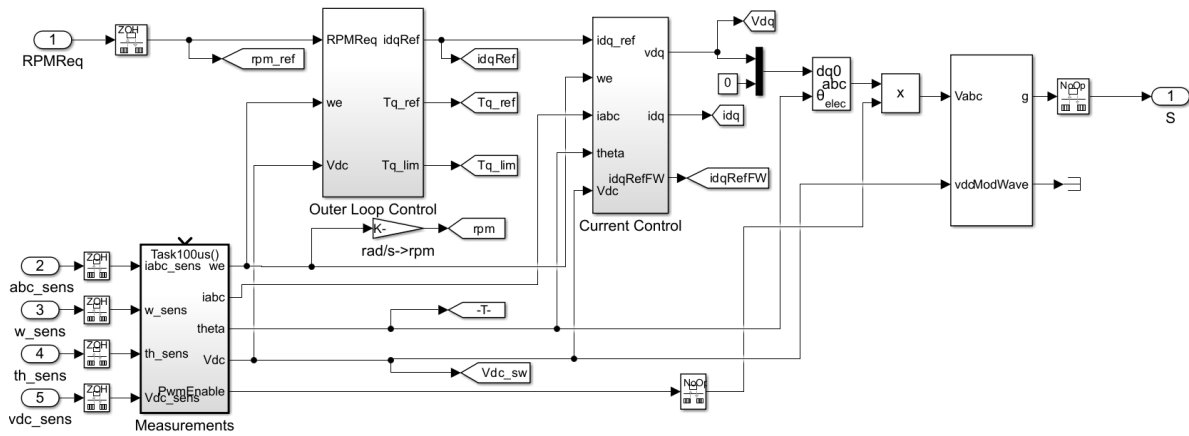
sisteme (abc) dönüştürülerek gate driver üzerinden güç elektroniği dönüştürücüsüne (converter) gönderilir.

Modelin güç katmanında yer alan DC kaynak, inverter beslemesini sağlar. Buradaki converter bloğu, kontrolörün gönderdiği anahtarlama sinyallerine göre üç fazlı gerilim üretimini gerçekleştirir ve bu gerilimler doğrudan PMSM'ye uygulanır.

Motor bloğunun çıkışında, açısal hız (ω) bilgisii hesaplanarak hem kontrolöre geri besleme olarak gönderilir hem de simülasyon sırasında gözlemlenmek üzere kayıt altına alınır. Ayrıca, modeldeki Torque Source bloğu, yük etkisinin modellenmesini sağlar ve $f(x) = 0$ koşulu ile yük torku sabitlenmiştir.

2.1 FOC Kontrol Yapısı

Bu çalışmada, KMSM hız kontrolü için FOC yöntemi kullanılmıştır. FOC yapısı içerisinde iki katmanlı bir geri besleme denetimi uygulanmıştır: dış halka hız kontrolü ve iç halka akım kontrolü. FOC yapısında, motorun hem hızı hem de üç fazlı akımları kontrol altında tutulmak istenir. Bu, iki farklı kontrol hedefini aynı anda gerçekleştirmek anlamına gelir. Dış Halka (Outer Loop) – Hız Kontrolü, İç Halka (Inner Loop) – Akım Kontrolü. Bu 2 geri besleme denetiminin blok diyagramı şekil 2.2 de gösterilmiştir.



Şekil 2.2: 2 Katmanlı Geri Besleme Denetimi

2.1.1 Denetleyici Girişleri

Kontrol bloğuna aşağıdaki geri besleme bilgileri ve referans sinyalleri giriş olarak verilmektedir:

RPMReq: Kullanıcı tarafından belirlenen referans hız (devir/dakika)

iabc_sens: Üç fazlı stator akımları (ölçülen)

w_sens: Rotorun açısal hızı (rad/s)

th_sens: Rotor pozisyonu (elektriksel açı)

vdc_sens: DC sınır gerilimi (ölçülen)

2.1.2 Denetleyici Yapısı

FOC yapısı aşağıdaki bloklardan oluşmaktadır:

- Hız Denetleyicisi (PI kontrolörü): Rotor hızı ile referans hız arasındaki fark kullanılarak hata sinyali oluşturulur. Bu hata, PI kontrolör tarafından işlenerek referans i_q akımı üretilir.
- Akım Denetleyicileri (d-q ekseninde ayrı PI kontrolörleri): i_d ve i_q referans akımları ile ölçülen i_d ve i_q akımları karşılaştırılarak hata sinyalleri oluşturulur. Her iki eksen için ayrı ayrı PI kontrolörler çalışır ve elde edilen gerilim referansları V_d ve V_q hesaplanır.

- Park Dönüşümleri (Clarke & Park): Ölçülen üç fazlı akımlar Clarke ve Park dönüşümleri ile d-q eksenine dönüştürülür. Hesaplanan kontrol gerilimleri tekrar abc sistemine çevrilerek PWM modülüne gönderilir.

2.1.3 Denetleyici Çıkışı ve Etki Noktası

Denetleyicinin çıkışı, inverter anahtarlama sinyallerinin üretimini sağlayan PWM sinyalleridir. Bu sinyaller Gate Driver bloğuna gönderilerek inverterin anahtar elemanları tetiklenir. Bu şekilde kontrol edilen inverter çıkış gerilimi, KMSM'ye uygulanır ve motorun stator sargılarına üç fazlı gerilim olarak iletilir.

2.1.4 Sistem İçindeki Kontrol Etkisi

FOC algoritması, motorun tork ve hız davranışını doğrudan kontrol edebilmek amacıyla d-q eksenlerinde akım bileşenlerini ayrı ayrı yönetir. Özellikle:

d-ekseni akımı i_d : Rotor manyetik akısını belirler. Alan zayıflatma modunda negatif yapılıdır.

q-ekseni akımı i_q : Tork üreten bileşendir. Hız kontrolü için PI denetleyiciden elde edilir.

Bu yapı sayesinde motorun tork üretimi ve yüksek hızlara çıkışı kontrollü bir şekilde sağlanmış olur.

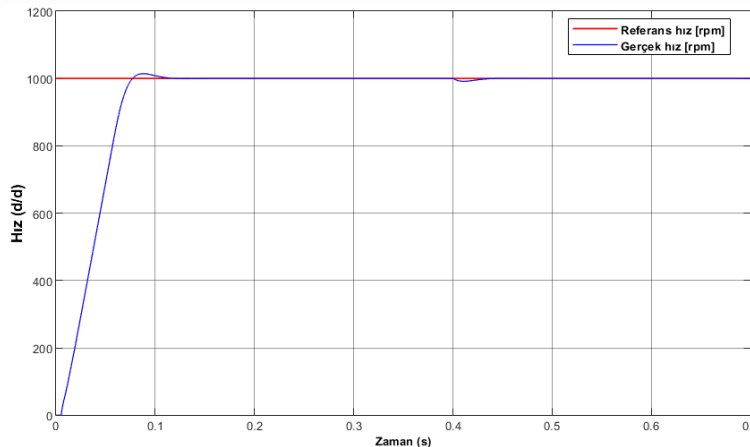
Benzetim modelindeki yapıların kısaca tanımları ve işlevleri aşağıdaki gibidir:

- "Control" Bloğu: Hız ve akım denetleyicilerinin bulunduğu, dönüşümler ve PWM üretimi yapan ana kontrol ünitesidir.
- "Gate Driver": PWM sinyallerini invertere aktaran sürücü katıdır.
- "Converter": Üç fazlı çıkış gerilimi üreten inverterdir.
- "Motor" Bloğu: PMSM modelidir. Dönme hızı ve pozisyon bilgileri geri beslenerek kontrol yapısına gönderilir.
- "Torque Source": Yük momenti modelini temsil eder. Simülasyon yükünü tanımlar.

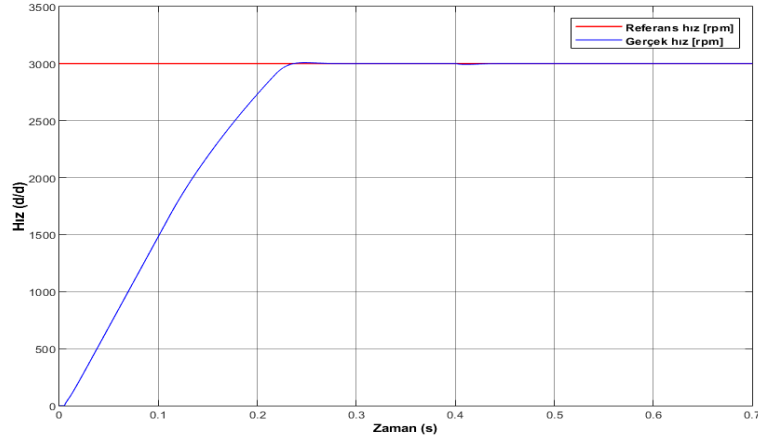
3.BULGULAR

Şekil 2.1'de gösterilen benzetim modeli çalıştırılmıştır. Model çalıştırdıktan sonra scope bloğunda bulunan veriler simülasyon süresince gözlenmiştir. Simülasyon sonucu elde edilen grafikler referans ve ölçülen gerçek hız, ölçülen d ve q eksenli akımlarıdır. Yapılan simülasyonlarda sistem girdisi olarak referans hız kullanılmış ve bu referans hızı hedefleyerek çalıştırılan benzetim modelinin sonucu olarak gerçek hız, d ve q eksenli akımları elde edilmiştir.

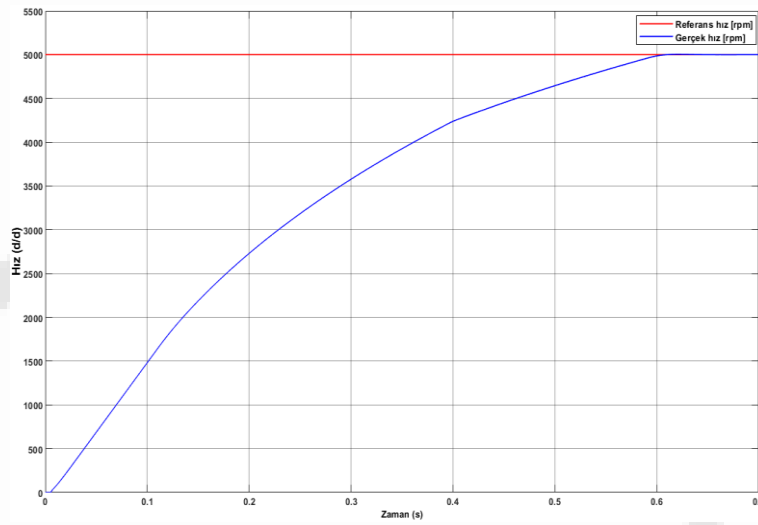
Simülasyon çalışmalarına referans hız girdisi 1000 d/d seçilerek başlanmıştır. Ve sonrasında 5000 d/d 'ya kadar referans hız girdisi artırılmıştır. Her referans hız değeri için simülasyon sonucu 2 farklı grafik elde edilmiştir. Benzetim modeli Simulink ortamında çalıştırılırken simülasyon süresi 0.7s olarak tutulmuştur.



Şekil 3.1 1000 d/d için Referans ve Gerçek Hız



Şekil 3.2 3000 d/d için Referans ve Gerçek Hız

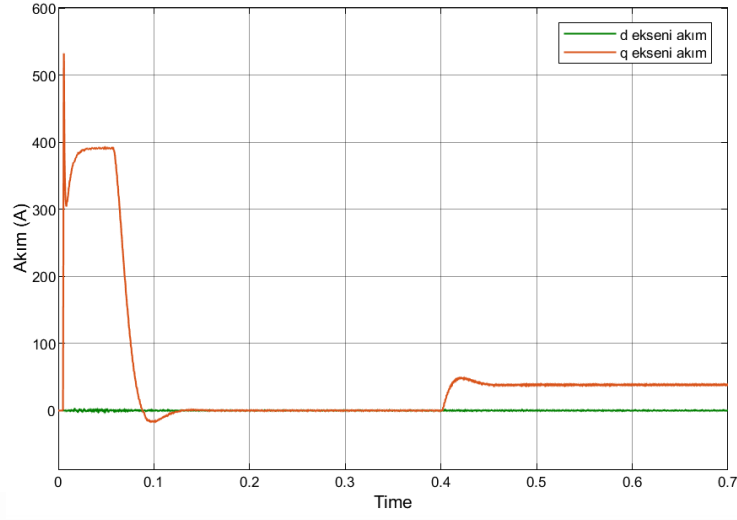


Şekil 3.3 5000 d/d için Referans ve Gerçek Hız

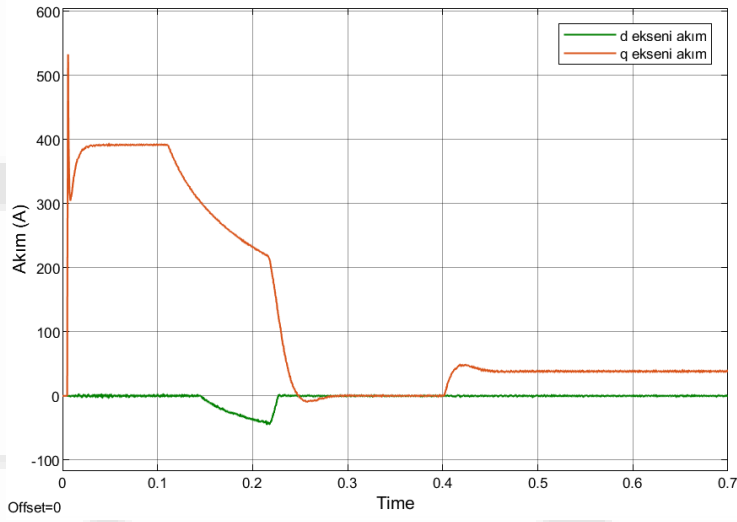
Şekil 3.1'de 1000 d/dk referans hız uygulaması altında motorun rotorundan elde edilen elektriksel hızın zamana bağlı değişimi sunulmuştur. Gerçek hız eğrisine karşılık gelen mavi çizgi incelendiğinde, motorun çalıştırılmasının ardından yaklaşık 0,077 saniye içerisinde hedeflenen hıza ulaştığı ve sistemin bu noktadan sonra kararlı şekilde çalışmaya devam ettiği gözlemlenmiştir. Bu geçiş sürecinde, yaklaşık 1014 d/dk seviyesine kadar çıkan hafif bir geçici taşma oluşmuştur. Söz konusu değer, referansın yaklaşık %1,4 üzerinde olup, sistem tarafından kısa sürede sönmülmüş ve nominal değere ulaşılmıştır.

Şekil 3.2'de 3000 d/dk referans hız altında motorun 0–0,7 s zaman aralığındaki gerçek hız tepkisi verilmiştir. Elde edilen verilere göre, motorun hedef hıza erişmesi yaklaşık 0,3 saniye sürmüştür. Bu esnada meydana gelen sınırlı taşma sonucu motor hızı en fazla 3007 d/dk seviyesine çıkmıştır. Bu değer, referans hızın yaklaşık %0,233 oranında aşıldığını göstermektedir. Ancak sistemin hızlı tepki kabiliyeti sayesinde bu aşım kısa sürede bastırılmış ve hız kararlı bir şekilde 3000 d/dk değerine sabitlenmiştir.

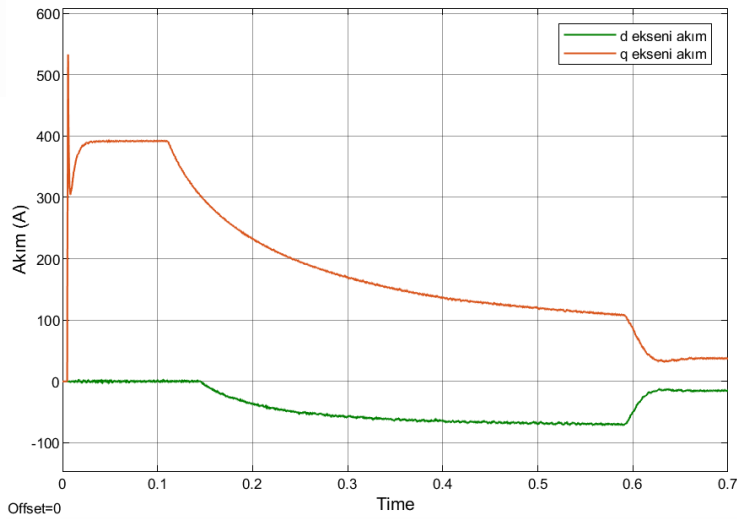
Şekil 3.3'te 5000 d/dk'lık referans hız altında motorun gerçek elektriksel hız yanıtı gözlemlenmiştir. Motorun istenen değere erişme süresi bu senaryoda yaklaşık 0,61 saniye olarak belirlenmiştir. Bu periyot boyunca gerçekleşen taşma ile hız değeri 5004 d/dk seviyesine kadar ulaşmış ve yaklaşık %0,08'lik bir aşım meydana gelmiştir. Bu durum, daha önceki hız senaryoları ile karşılaştırıldığında motorun referans hıza erişme süresinin uzadığını ortaya koymakta, yüksek hızlardaki kontrol hassasiyetinin sistem yanıt süresine etkisini göstermektedir.



Şekil 3.4 1000 d/d için d, q eksenî akımları



Şekil 3.5 3000 d/d için d, q eksenî akımları



Şekil 3.6 5000 d/d için d, q eksenî akımları

Şekil 3.4 incelendiğinde, simülasyonun başlangıç anında q eksenini akım bileşeninin oldukça yüksek değerlere ulaştığı, ardından hızlı bir düşüş sergileyerek yaklaşık 0,153 saniye civarında kararlı bir seviyeye yerleştiği görülmektedir. Bu esnada d eksenini akımı, simülasyon süresince sabit bir şekilde sıfır düzeyinde kalmıştır. Ayrıca yaklaşık 0,401 saniyede, q eksenini akımında belirgin bir artış meydana gelmiş ve bu artış kısa süre içinde 0,45 saniyede sabitlenerek yeni bir denge noktasına ulaşmıştır.

Şekil 3.5 'te yer alan verilere göre, q eksenini akımı motorun ilk hızlanma anında yüksek değerler göstermiş, bu durum motorun tork üretim sürecini desteklemiştir. Hedef hız olan 3000 d/dk'ya ulaşıldıktan sonra ise q eksenini akımı kademeli olarak azalmış ve kararlı bir hale gelmiştir. Bu sırada d eksenini akımı, yaklaşık 0,145 ile 0,228 saniye arasında negatif değerlere inmiştir. Bu gözlem, alan zayıflatma stratejisinin bu zaman aralığında yaklaşık 0,082 saniye boyunca etkin olduğunu göstermektedir.

Şekil 3.6'da ise, q eksenini akımının ilk 0,1 saniye içerisinde 396 A seviyesine ulaştığı, sonrasında hız artışına bağlı olarak gerilim limitlerinin etkisiyle üstel bir düşüş gösterdiği ve 1 saniyede yaklaşık 81 A seviyesine kadar gerilediği gözlenmiştir. Aynı şekilde, d eksenini akımı, 0,145 saniye itibarıyla negatif değerlere geçerek yaklaşık -80 A seviyelerine ulaşmış ve tüm simülasyon boyunca negatif düzeyde kalmıştır. Bu durum, alan zayıflatma stratejisinin 0,885 saniye boyunca aktif kaldığını ve özellikle yüksek hızlı çalışma koşullarında sürekli olarak devrede olduğunu teyit etmektedir.

Bu çalışmada kullanılan MATLAB/Simulink tabanlı modelde, motor çıkışına bağlanan "Torque Source" bloğu üzerinden sabit ve sıfır değerli yük Nm uygulanmıştır. Yani model, motorun yüksüz çalışma koşulu altında değerlendirilmiştir. Bu durum, motorun karşısında herhangi bir mekanik direnç (yük) olmaması anlamına gelir ve bu sayede motor, referans hız değerlerine çok daha kısa sürede ulaşabilmektedir.

Grafiklerde gözlemlenen 0,3 saniye gibi kısa sürelerde 3000 d/dk hızına erişim, doğrudan bu yüksüz çalışmanın sonucu olarak ortaya çıkmaktadır. Gerçek uygulamalarda sistemin atalet momenti, sürtünme etkisi, yük momenti ve inverter çıkış karakteristiği gibi faktörler nedeniyle motorun hızlanma süresi daha uzun olabilecektir. Ancak bu çalışma, FOC ve alan zayıflatma stratejisinin dinamik cevap karakteristiği üzerindeki etkisini izole biçimde analiz etmeyi amaçladığından, yüksüz koşul tercih edilmiştir. Böylece denetleyici yapının kendi içsel dinamikleri ve kontrol başarımı daha net gözlemlenebilmiştir.

3.2 Elde Edilen Bulguların Literatür ile Karşılaştırılması

Bu çalışmada, Kalıcı Mıknatıslı Senkron Motorun (KMSM) Alan Yönlendirmeli Kontrol (FOC) yapısı ile birlikte alan zayıflatma stratejisi uygulanarak, 1000 ila 5000 rpm aralığındaki hızlara karşılık sistemin dinamik tepkisi analiz edilmiştir. Elde edilen bulgular, hem FOC yönteminin performansı hem de alan zayıflatmanın yüksek hızlı rejimlerdeki etkisi açısından mevcut literatürle karşılaştırıldığında dikkat çekici benzerlikler ve bazı özgün farklılıklar içermektedir.

FOC temelli kontrol yapılarının dinamik performansı ile ilgili olarak Erkara (2020) tarafından yapılan çalışmada, FOC yönteminin özellikle nominal hız seviyesine kadar oldukça kararlı çalıştığı, ancak bu seviyenin üzerinde gerilim sınırlarının kontrolü zorlaştırdığı ifade edilmiştir. Benzer şekilde, bu bildiriye 3000 rpm'e kadar yapılan simülasyonlarda, alan zayıflatma stratejisi devreye alınmadan motorun kararlı biçimde çalıştığı ve bu rejimde q-eksenini akımı ile doğrudan tork kontrolü sağlandığı gözlemlenmiştir. Bu yönüyle bulgular, Erkara'nın tespitiyle doğrudan örtüşmektedir.

Öte yandan, alan zayıflatma uygulamasının etkinliği bakımından literatürde genellikle kavramsal anlatımlar bulunmakta, ancak bu yöntemin farklı hız değerlerine göre aktif kalma süresi ve uygulanan d-eksenini akım büyüklüğü gibi detaylı sayısal bulgulara daha az yer verilmektedir. Bu açıdan bakıldığında, bu çalışmada 3000 rpm'den itibaren alan zayıflatma süresinin ölçülmüş olması (örneğin, 3000 rpm için 0,082 s, 5000 rpm için 0,482 s) ve bu hızlara karşılık gelen maksimum negatif i_{d_did} akımlarının -4 A ile -72 A arasında değiştiğinin açık biçimde sunulması, literatüre nicel katkı sağlayan özgün bir yön olarak öne çıkmaktadır.

Ayrıca Özçira ve ark. (2012), FOC ve doğrudan moment kontrolü (DTC) gibi teknikleri karşılaştırdıkları çalışmalarında, PMSM motorlarının hızlı tepki verebilme özelliklerini vurgulamakla birlikte, genellikle yüksek yük koşulları altında sistem yanıtlarını incelemiştirler. Bu bildiriye ise yüksüz çalışma koşulu

altında simülasyon yapılmış ve motorun bu koşulda çok daha hızlı yerleşme sürelerine ulaştığı gösterilmiştir. Örneğin, 1000 rpm için 0,077 s, 3000 rpm için 0,3 s ve 5000 rpm için 0,61 s gibi kısa yerleşme süreleri elde edilmiştir. Bu değerler, doğrudan fiziksel karşılaştırma için yeterli olmasa da, ideal koşullar altında denetleyici başarımını izole biçimde değerlendirmeye olanak sağlamaktadır.

Dalkın (2016) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, FOC ile sağlanan hız kontrolünün zamansal tepki karakteristiğine dair genel yorumlar bulunmakla birlikte, bu bildiriye göre çoklu hız seviyelerinde aşım yüzdesi, yerleşme süresi, zayıflatma süresi ve akım değerlerinin birlikte tablolaştırılması (Çizelge 4.1) daha detaylı bir sunum niteliğindedir ve bu yönüyle literatürdeki benzer çalışmalarla kıyaslandığında açıklık ve karşılaştırılabilirlik açısından daha ileri düzeydedir.

4.SONUÇ

Bulgular bölümünde yer alan grafikler temel alınarak, FOC kontrol yapısı ve alan zayıflatma stratejisinin sistem üzerindeki etkilerini yansıtan kritik büyüklükler tespit edilmiştir. Bu belirleme sürecinde Simulink yazılımı içerisinde yer alan “Measurement Cursor” aracı kullanılmış; ilgili parametrelerin zaman eksenindeki anlık değerleri ile karşılık geldikleri büyüklükler detaylı biçimde analiz edilerek Çizelge 4.1’de sunulmuştur.

Çizelge 4.1. Simülasyondan Elde Edilen Önemli Parametreler

Referans Hız	Yerleşme Süresi (s)	Aşım Yüzdesi (%)	Alan Zayıflatma Süresi (s)	$-i_d$ max (A)
1000 rpm	0.077 (s)	%1,4	Yok	Yok
2000 rpm	0.217 (S)	%0,65	Yok	Yok
3000 rpm	0.3 (s)	%0,233	0.082 s	-4A
4000 rpm	0.369 (s)	%0.15	0.224 s	-64A
5000 rpm	0.61 (s)	%0.08	0.482 s	-72A

Bu çalışmada, Kalıcı Mıknatıslı Senkron Motor (KMSM) için uygulanan Alan Yönlendirmeli Kontrol (FOC) ve alan zayıflatma stratejilerinin motorun dinamik performansı üzerindeki etkileri sayısal olarak incelenmiştir. Simülasyon sonuçlarına göre, düşük ve orta hız aralıklarında (1000–2000 rpm), sistemin kararlı duruma geçiş süresi oldukça kısa olup, alan zayıflatma gerektirmeden referans hızlara ulaşılmıştır. Bu bölgede tespit edilen aşım oranları %1,4 ve %0,65 gibi kabul edilebilir düzeydedir ve herhangi bir d-ekseni akımı müdahalesine ihtiyaç duyulmamıştır.

Motorun nominal hızı olan 3000 rpm’de, 0,3 saniyelik yerleşme süresiyle birlikte %0,233 oranında sınırlı bir taşma gözlemlenmiştir. Bu hız değerinden itibaren sistem, gerilim sınırlarını koruyabilmek adına alan zayıflatma stratejisini aktif hale getirmiş; bu bağlamda 0,082 saniyelik bir zayıflatma süresi ve -4 A seviyesinde bir d-ekseni akımı uygulanmıştır.

Daha yüksek hız seviyelerine çıkıldığında (4000 ve 5000 rpm), hem yerleşme sürelerinin hem de alan zayıflatma süresinin belirgin şekilde arttığı görülmüştür. Özellikle 5000 rpm’de, sistemin referans hızı ulaşması 0,61 saniyeyi bulmuş ve bu süreç boyunca 0,482 saniye boyunca alan zayıflatma aktif kalarak -72 A’lık maksimum d-ekseni akımı uygulanmıştır. Bu durum, alan zayıflatma stratejisinin yüksek hız rejimlerinde daha uzun süreler ve daha yüksek düzeylerde devrede kaldığını açıkça ortaya koymaktadır.

Sonuç olarak, FOC yapısına entegre edilen alan zayıflatma yöntemi, motorun nominal hız üzerindeki çalışma koşullarında gerilim limitlerinin aşılmasını önlemiş ve sistemin kararlı şekilde referans hız değerlerine ulaşmasını sağlamıştır. Bu bağlamda çalışma, yüksek hızlı sürüş gereksinimi olan uygulamalar için FOC ve alan zayıflatma stratejilerinin birlikte kullanımının etkinliğini ortaya koymakta ve gelecekteki kontrol algoritmaları için yol gösterici nitelik taşımaktadır.

5.KAYNAKÇA

- Dalkın, A. 2016.** Trapezoidal ve sinüsoidal komutasyon teknikleri kullanılarak PMSM'nin hız ve pozisyon kontrollerinin karşılaştırılması. *Yüksek Lisans Tezi*, Abant İzzet Baysal Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bolu
- Ozcira S, Bekiroglu N, Senol I, Aycicek E, (2012).** Sürekli Mıknatıslı Senkron Motorlarda Doğrudan Moment Kontrolünün İncelenmesi ve Benzetim Çalışmasının Gerçekleştirilmesi. *EMO Bilimsel Dergi*, 2 (3):1-6
- Çelik, H., Kürüm, H. 2013.** Sabit mıknatıslı senkron motorun alan yönlendirmeli kontrolü. *e-Journal of New World Sciences Academy (NWSA-Engineering Sciences)*, 8(1): 1–6.
- Erkara, K. 2020.** Kalıcı Mıknatıslı Senkron Motorlarda Alan Yönlendirmeli Kontrol Modellerinin Karşılaştırılması. *Yüksek Lisans Tezi*, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Kütahya.
- Ustun, O. 2016.** Genetik Tabanlı Geleneksel Denetleyicilerle Anahtarlamalı Relüktans Motorun Pozisyon Takip Kontrolü. *SDÜ International Journal of Technological Science*, 8(1): 66-75.

Makale id= 56

Sözlü Sunum

ORCID ID: 0000-0001-5252-6301

| 93

Yapay Zeka Destekli Sürü İHA'larda Lider Seçimi ve Formasyon kontrolü**Assoc.prof.Dr. Can Bülent Fidan¹, Researcher Batuhan Karaçal¹**
¹Karabük Üniversitesi

*Corresponding author: Batuhan Karaçal

Özet: Bu çalışma, çoklu İnsansız Hava Aracı (İHA) sistemlerinde merkezi kontrol yöntemiyle lider seçimi, görev dağılımı ve geometrik formasyon oluşturma süreçlerine odaklanmaktadır. Geliştirilen sistemde, tüm sürü üyelerinin konum, hız ve yönelim bilgileri yer kontrol merkezinde toplanmakta ve karar alma süreci merkezi yapı üzerinden yürütülmektedir. Lider İHA, yapay sinir ağı (YSA) temelli bir karar modeli ile belirlenmekte ve sürünün tüm hareketleri liderin yönlendirmesiyle koordine edilmektedir. Lider seçiminde görev merkezine olan uzaklık, yön sabitliği ve hız vektörleri temel parametreler olarak dikkate alınmıştır. Formasyon kontrolü kapsamında, sürü bireylerinin çizgi, üçgen, kare, hilal gibi geometrik yapılarda dizilmesi hedeflenmiş ve atama işlemleri için Hungarian algoritması uygulanmıştır. Bu yapılar arasında geçişlerde çarpışma riskini azaltmak adına yapay potansiyel alan yaklaşımıyla çarpışma engelleme sağlanmıştır. Kontrol algoritmaları MATLAB ortamında simüle edilmiş; gerçek zamanlı uygulamalar için ise GAZEBO-ROS altyapısında çoklu İHA modellemeleri test edilmiştir. Geliştirilen sistemde Wi-Fi üzerinden yer istasyonundan her bireye Mavlink protokolü ile veri aktarımı yapılmıştır. Sonuçlar, merkezi kontrol altyapısının düşük gecikme süresiyle etkin bir görev dağılımı ve koordinasyon sağladığını göstermiştir. Bu yöntem, keşif-gözetleme, alan tarama ve hedef takibi gibi görevlerde sürü performansını artırarak askeri ve sivil uygulamalar için önemli bir alternatif sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: İnsansız Hava Aracı (İha), Sürü Kontrolü, Merkezi Kontrol, Lider Seçimi, Yapay Sinir Ağı, Formasyon Kontrolü, Çarpışma Engelleme, Görev Atama

Leader Selection and Formation Control in Swarm Uavs Supported by Artificial Intelligence

Abstract: This study focuses on the leader selection, task allocation, and geometric formation control of multi-Unmanned Aerial Vehicle (UAV) systems using a centralized control architecture. In the developed system, position, velocity, and orientation data of all UAVs are collected at a ground control station, and decision-making processes are executed centrally. The leader UAV is selected using a neural network-based decision model, and all swarm maneuvers are coordinated through this leader under the supervision of the control center. The selection process considers factors such as distance to mission center, heading stability, and velocity vectors. For formation control, the swarm is configured into geometric shapes such as line, triangle, square, and crescent, with assignments managed via the Hungarian algorithm. To reduce collision risks during formation transitions, a collision avoidance method based on Artificial Potential Field (APF) is employed. The algorithms are first modeled and tested in MATLAB and then verified in real-time through UAV simulations in the GAZEBO-ROS environment. Communication is maintained using Wi-Fi and the Mavlink protocol from the ground station to each UAV. Results demonstrate that the centralized control framework offers low-latency and efficient coordination, making it a viable method for reconnaissance, area scanning, and target tracking tasks. The system contributes to enhanced swarm performance, offering a promising approach for both military and civilian UAV applications.

Keywords: Unmanned Aerial Vehicle (Uav), Swarm Control, Centralized Control, Leader Selection, Neural Network, Formation Control, Collision Avoidance, Task Assignment

1. INTRODUCTION

In recent years, Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) have been actively used in military, civilian and industrial missions, and research has intensified on the swarming of these systems in multiple configurations. UAV systems operating with swarm architecture stand out with their advantages such as high mission efficiency, area coverage and mission continuity (Bayındır, 2016).

Swarm systems are generally based on distributed and centralized control approaches. In distributed systems, each UAV works as an individual decision maker, while the overall system is shaped by biologically inspired rules. Although this structure increases fault tolerance, it can cause coordination complexity (Olfati-Saber, 2006). Centralized systems, on the other hand, provide more controlled task management by linking decision-making processes to a ground station; however, this structure may create reliability problems due to the dependence on communication infrastructure (Beard & McLain, 2012).

One of the critical control elements in swarm systems is leader selection. In the literature, most of the time the leader is determined statically, which does not adequately adapt to the dynamism of the task. The use of artificial intelligence approaches in dynamic leader selection increases intra-swarm coordination and enables adaptive behavior (Zhou et al., 2020). In particular, artificial neural networks (ANNs) provide effective decision support for selecting the most suitable leader by evaluating factors such as location, speed, and task distance of individuals (Wang et al., 2015).

In this study, an ANN-supported leader selection mechanism is proposed within a centralized control structure, and then the geometric formation and task assignment processes are supported by the Hungarian algorithm. In addition, an artificial potential field approach is integrated into the system to eliminate collision risks. The model was simulated in MATLAB and GAZEBO-ROS environments and its effect on flock coordination was analyzed.

2. LEADER SELECTION

In a swarm structure, it is very important to determine the leader UAV correctly in order to carry out the missions in an organized manner. In this study, a single layer artificial neural network (ANN) model is used for leader selection. The input layer contains the location, speed and distance of each UAV from the mission center, while the output layer produces the fitness score for each individual (Arı & Berberler, 2018). With the activation function, the output values are normalized to the range of $-1, 1$ and the value of 0 is prevented with the threshold value ϕ . The individual with the highest score value is assigned as the leader UAV by the system and is taken as a reference in the formation process.

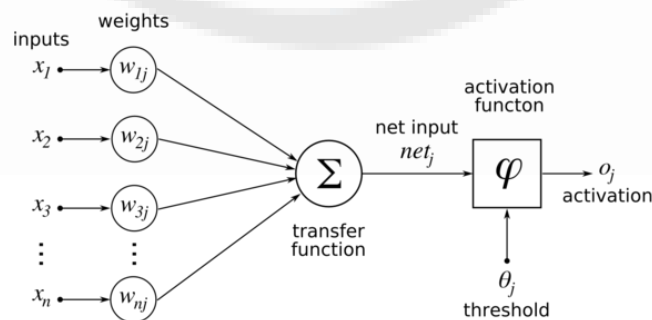


Figure 2.1. Single layer artificial neural network model.

In this study, a single layer artificial neural network (ANN) model is preferred instead of traditional "if-then" rule-based decision structures for determining the swarm leader. The input parameters of the network consist of the distance of individuals to the global best position, target position information and weighted position values of these variables. As a result of the evaluation applied to the input vectors, the UAV with the output value closest to 1 is assigned as the leader. The system model is modeled under the assumption of a linear problem in scenarios where the number of UAVs is limited and the network

input parameters are low dimensional. Therefore, in the leader selection process, a single-layer structure that directly learns the input-output relationship was sufficient instead of a deep multi-layer structure. However, if the number of input variables increases or the system becomes more complex, this structure will be transformed into a multilayer artificial neural network (ML-NN) and will need to be trained with a back-propagation algorithm. Within the scope of the simulation studies, a training data set was created using the swarm control outputs and this data set was used in the learning process of the leader detection algorithm. The adequacy of the training data and the variety of parameters directly affect the generalization and prediction performance of the network. In this context, the accuracy of the model largely depends on the structure of the training data set.

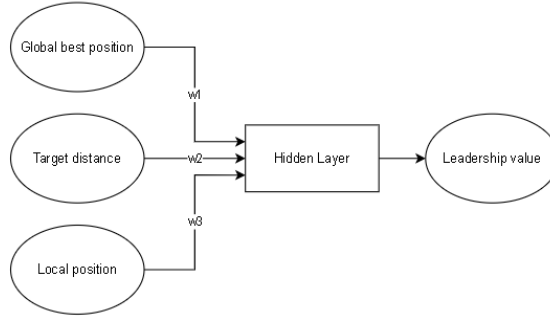


Figure 2.2. Swarm leader selection process network structure.

In the hidden layer of the network structure shown in Figure 4.2, the tanh (tangent hyperbolic) function operating in the interval $[-1,1]$ was used in the selection process of the activation function to be used.

The activation function used for this operation,

$$f(x) = \frac{2}{1+e^{-x}} - 1, \quad (2.1)$$

In each iteration, the weights are updated as follows,

$$w_{i+1} = w_i + y * error * f(x), \quad (2.2)$$

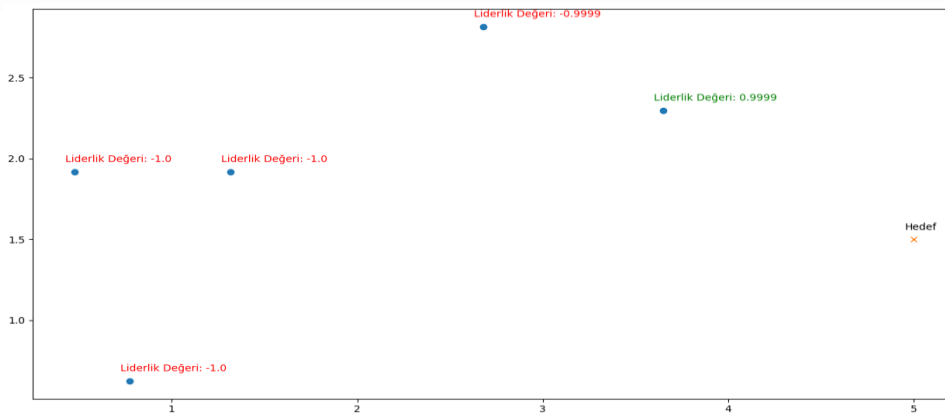


Figure 2.3. Example dataset result with leader selection learned.

3. FORMATION CONTROL AND NEW FORMATION CREATION

3.1. Formation Control

In swarm systems, it is necessary for individuals to be arranged under a certain geometric structure in order to increase mission effectiveness and for collision-free navigation planning. For this purpose, formation generation was performed using a method based on analytic geometry. The formation structure is created by distributing the positions of the individuals around a predetermined reference point in three-dimensional space (x, y, z) according to certain rules. In formation planning, a local coordinate frame is defined for each formation type. This frame contains the center point of the formation and the positions of the elements around it. The center point is also used as the reference point of the formation. The formation geometry is built around this center in a symmetric or directional way. Positioning all individuals according to this coordinate system increases the structural stability of the swarm and directly contributes to task performance. For example, for a triangular formation, a center point (x_0, y_0, z_0) is selected and new location points are placed at equal distances to the left and right of this point. In this way, the base of the triangle is determined, and the third point is positioned at a fixed height upwards from the midpoint of the base. According to these references, all UAVs are assigned target points and the role of each individual in the formation is fixed.

The formation distribution is realized with the Hungarian algorithm to ensure the minimum total movement distance. Thanks to this algorithm, each UAV is assigned to the most suitable target point, thus ensuring fast and energy efficient completion of the formation. During the transition to the formation, collision avoidance algorithms are active as the individuals move towards the designated points.

In addition, V-type and crescent formations with more complex geometries were also modeled. In the V-type formation, the leader UAV is located in the center and individuals are arranged at an angle along both flanks. The angle is determined by a fixed angle θ and individuals are equally spaced on the left and right wings. The crescent formation is based on the positioning of individuals along a semicircular curve, each individual is assigned to correspond to a specific angular position on the curve, and this structure is focused on the formation center.

During the formation process, an appropriate control algorithm is needed for the individuals to reach the target points in a synchronized and stable manner. In this study, PD (proportional-derivative) control simulation is used to guide the UAVs to the target formation points. With this approach, each UAV moves by taking into account both its position error and speed difference. Thus, deviations and irregularities that may occur during formation are minimized. A similar approach has been successfully implemented in multiple quadrotor systems by Toksöz, Oğuz and Gazi (Toksöz, Oğuz & Gazi, 2016).

$$f(u_i) = \sum_{j=1}^N (P_i - P_j - \delta_{ij}), \quad (3.1)$$

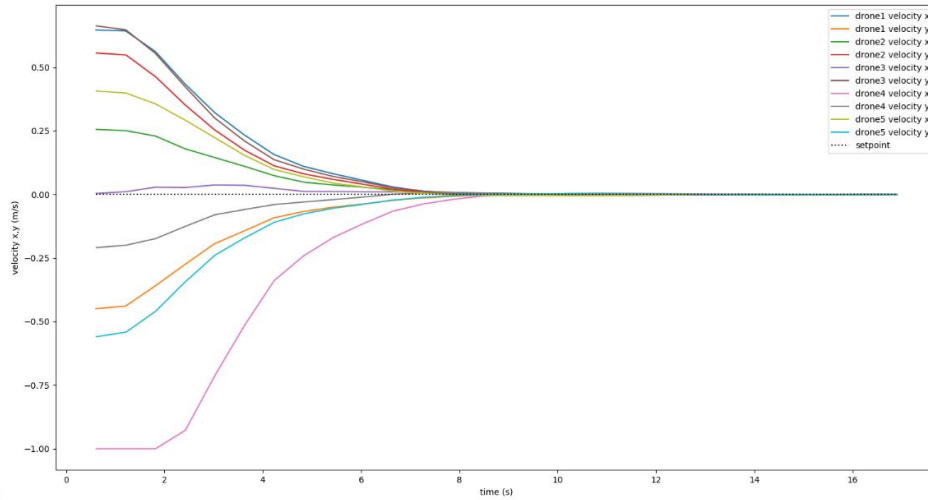


Figure 3.1. V formation transition, PD controller vectorial velocities (Karaçal, B. 2022).

3.2. Line Pattern

The main objective of the model is to put one UAV in the center with reference to the center of the UAVs and distribute the remaining UAVs equally to the left and right arms (Karaçal, B. 2022).

γ : Determined formation distance between UAVs

For left region; $i = 1, \dots, N/2$, For right region; $i = N/2, \dots, N$

$$x_i = x_{center} + \gamma \times i, \tag{3.2}$$

$$y_i = y_{center}, \tag{3.3}$$

In determining the formation pattern, the x or y axis remained fixed and the other axis was translated by the distance determined to the center point of the UAVs.

Table 3.1. Final UAV positions in the line formation.

UAV NO	X	Y	Z
1	0,2	0,2	3,0
2	5,2	0,2	3,0
3	10,2	0,2	3,0
4	-4,8	0,2	3,0
5	-9,8	0,2	3,0

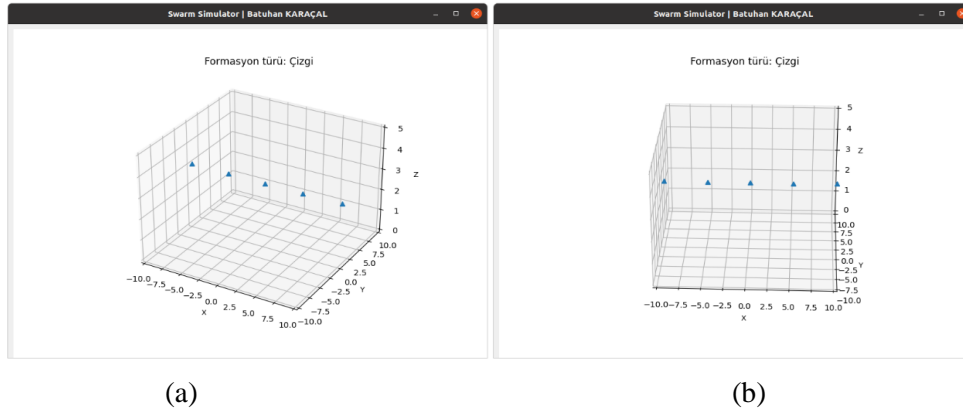


Figure 3.2. Simulation result of the line formation (a) perspective, (b) front.

3.3. Triangle Formation

To create the triangle formation, the center point is taken as a reference point and the right and left arms are added. For the requirement, 3 UAVs and 6 UAVs are added evenly to the center of the right and left arms.

For the right zone;

$$x_i = x_1 + \frac{\gamma \cdot i}{2}, \quad (3.3)$$

$$y_i = y_1 - \sqrt{i \times \gamma^2 - \left(\frac{i \times \gamma}{2}\right)^2}, \quad (3.4)$$

For the left region;

$$x_i = x_1 - \frac{\gamma \cdot i}{2}, \quad (3.5)$$

Table 3.2. Final positions of the triangular formation in simulation results.

UAV NO	X	Y	Z
1	-2,2779	0,1789	3,0
2	2,6912	0,2226	3,0
3	-4,8024	-4,1630	3,0
4	0,1729	4,5051	3,0
5	5,1993	-4,1360	3,0

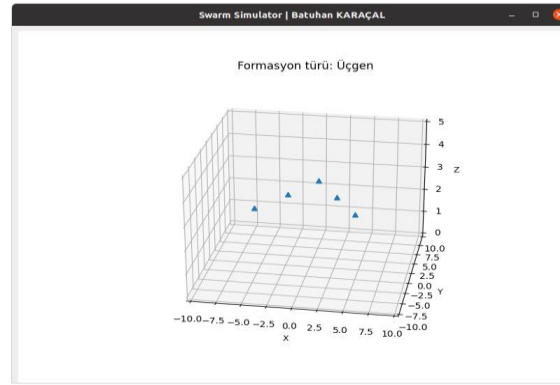


Figure 3.3. Triangle pattern.

3.4. Assignment to Pattern Points

In order to successfully implement formation structures, each UAV must be matched with one of the target points. In this matching process, a cost matrix is constructed based on the distance between each UAV and each formation point, and an assignment is made to minimize the total movement cost. The assignment problem is solved by the Hungarian algorithm. This algorithm provides a one-to-one mapping between n UAVs and n target points, resulting in a solution with the lowest total cost. Thus, UAVs are guided to their targets by the shortest possible routes, reducing mission time and energy consumption. The method is managed by a central control unit and the calculated assignment results are transmitted to the UAVs via Mavlink protocol. This process makes it possible to complete formation transitions synchronously and without overlap.

$$Cost_{ij} = P_i - P_j,$$

(3.6)

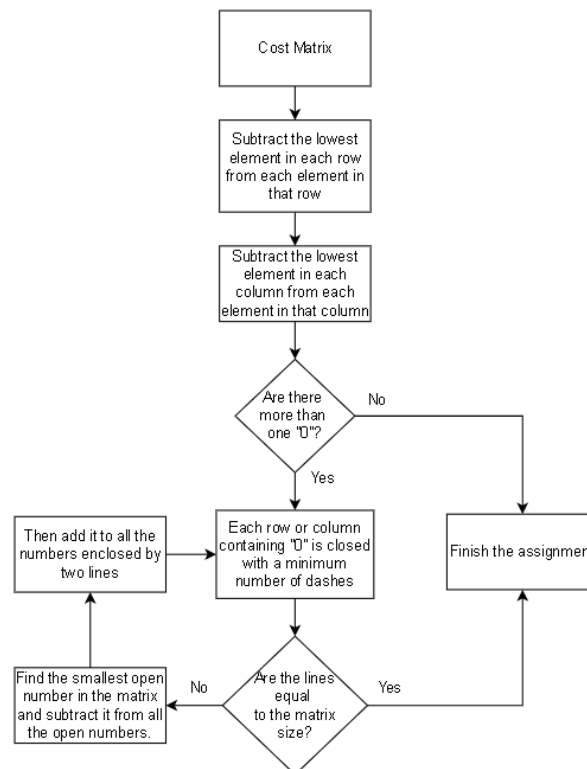


Figure 3.4. Hungarian assignment algorithm.

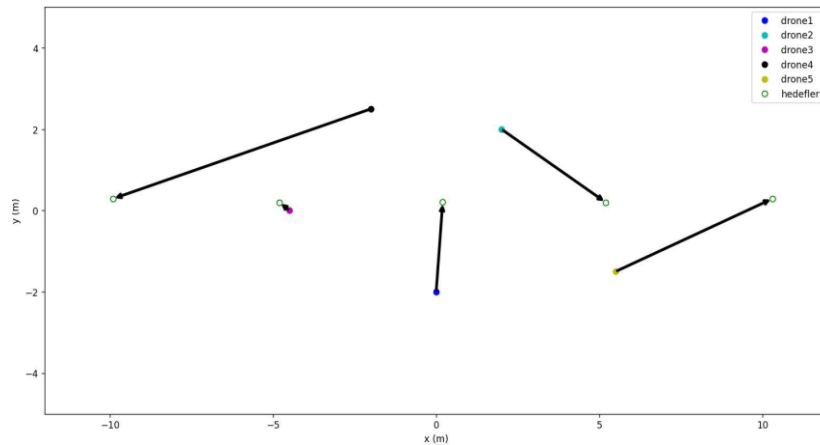


Figure 3.5. Line formation assignment process.

4. CONCLUSION AND DISCUSSION

In this study, in order to realize mission coordination in swarm UAV systems under a centralized control architecture, leader selection is performed dynamically with a single layer artificial neural network (ANN) model; then geometric formation points are analytically defined and assigned to individuals with the Hungarian algorithm. An artificial potential field method is applied for collision avoidance during formation transitions.

Simulation results show that the developed system completes the tasks with a high success rate while maintaining the integrity of the swarm. The ANN-based leader selection model, working together with the centralized control system, produced effective results in intra-swarm routing; reduction in task duration and stability in formation transitions were achieved. Moreover, the Hungarian algorithm optimized the formation process by minimizing the total distance and energy consumption.

However, the dependency of the centralized control structure on the communication infrastructure limits the robustness of the system against network delays and single points of failure. Therefore, hybrid control architectures are recommended to increase fault tolerance, especially in large-scale swarms. The dependency of the ANN structure used in leader selection on the training data set is also an important factor affecting the system performance.

In conclusion, the proposed control architecture has the potential to improve task efficiency in small and medium-sized swarm systems. In future studies, it is planned to test the model with distributed control systems and to make the leadership mechanism more flexible with multilayer neural networks or reinforcement learning.

5. ACKNOWLEDGMENT

This study was supported by Karabuk University Scientific Research Projects Coordination Unit. Project Number: FYL-2020-2367

6. REFERENCES

- Bayındır, L. (2016). A review of swarm robotics tasks. *Neurocomputing*, 172, 292-321. <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2015.05.116>
- Beard, R. W., & McLain, T. W. (2012). *Small Unmanned Aircraft: Theory and Practice*. Princeton University Press.
- Olfati-Saber, R. (2006). Flocking for multi-agent dynamic systems: Algorithms and theory. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 51(3), 401-420. <https://doi.org/10.1109/TAC.2005.864190>

- Wang, H., Liu, Y., & Zhang, D. (2015). A neural-network-based control strategy for formation flying UAVs. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 80(3-4), 531-547. <https://doi.org/10.1007/s10846-015-0232-5>
- Zhou, Y., Yang, Y., & Zhang, G. (2020). Adaptive leader-follower formation control using artificial neural networks. *Aerospace Science and Technology*, 98, 105660. <https://doi.org/10.1016/j.ast.2020.105660>
- Toksöz, M. A., Oğuz, S., and Gazi, V., "Decentralized Formation Control of a Swarm of Quadrotor Helicopters", *2019 IEEE 15th International Conference On Control And Automation (ICCA)*, (2019).
- Arı, A. and Berberler, M. E., "Interface design for solving prediction and classification problems with artificial neural networks", (2017).
- Karaçal, B. (2022). İnsansız Hava Araçlarında Kümelenme ve Sürü Kontrolü (Yüksek lisans tezi, Karabük Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü). YÖK Ulusal Tez Merkezi.

Makale id= 62

Sözlü Sunum

ORCID ID: 0000-0001-5252-6301

| 102

İnsansız Hava Araçlarında Sürü Kontrol Yöntemlerinin Performans Analizi**Researcher Batuhan Karaçal¹, Assoc.prof.Dr. Can Bülent Fidan¹**
¹Karabük Üniversitesi

*Corresponding author: Batuhan Karaçal

Özet: Bu çalışma, sürü İnsansız Hava Araçları (İHA) sistemlerinde merkezi kontrol mimarisi altında uygulanan çeşitli sürü optimizasyon yöntemleri ve kontrol algoritmalarının performans karşılaştırmasını sunmaktadır. Temel kontrol algoritması olarak Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) kullanılmış; bunun yanı sıra Kuş Sürüsü Algoritması (BSA), Yapay Arı Kolonisi (ABC), Yarasa Algoritması (BA) ve Ateş Böceği Algoritması (FA) ile sistemin göreve tepkisi, yakınsama süresi, minimuma ulaşma başarımı ve işlem yükü gibi metrikler üzerinde değerlendirmeler yapılmıştır. Geliştirilen yazılım altyapısı ile sürü İHA'ların konum, hız ve yönelim bilgileri, merkezi kontrol biriminden yönetilmiştir; Wi-Fi tabanlı iletişim aracılığıyla, yer istasyonundan alınan telemetri verileri kullanılarak her bir İHA'ya kontrol komutları iletilmiştir. İHA'lar arası çarpışma önleme için potansiyel fonksiyon temelli bir yaklaşım uygulanmış, lider seçimi ise tek katmanlı yapay sinir ağı modeliyle gerçekleştirilmiştir. Geliştirilen tüm algoritmaların analizleri, GAZEBO-ROS simülasyon ortamında gerçekleştirilmiş ve elde edilen bulgular ışığında, PSO algoritmasının genel sistem başarımı ve kararlılığı açısından diğer yöntemlere kıyasla daha yüksek bir başarı sağladığı tespit edilmiştir. FA ve BSA algoritmaları ise daha düşük hesaplama maliyetleri ve hızlı tepkileriyle belirli senaryolar için uygunluk göstermiştir. Bu çalışma, sürü İHA sistemlerinde merkezi kontrol yaklaşımı altında farklı optimizasyon tabanlı kontrol yöntemlerinin uygulanabilirliğini ve göreve etkisini karşılaştırmalı olarak ortaya koymaktadır.

Anahtar Kelimeler: Sürü İha, Merkezi Kontrol, Pso, Optimizasyon Algoritmaları, Çarpışma Önleme, Yapay Zeka, Simülasyon

Performance Analysis of Swarm Control Methods in Unmanned Aerial Vehicles

Abstract: This study presents a comparative performance evaluation of various swarm optimization methods and control algorithms implemented within a centralized architecture for Unmanned Aerial Vehicle (UAV) swarms. Particle Swarm Optimization (PSO) is adopted as the baseline method and compared with Bird Swarm Algorithm (BSA), Artificial Bee Colony (ABC), Bat Algorithm (BA), and Firefly Algorithm (FA). Each algorithm is assessed in terms of convergence speed, task success rate, computational efficiency, and stability. A custom software framework enables centralized command and telemetry management over a Wi-Fi-based communication network, allowing real-time position and velocity control of swarm members. Collision avoidance is ensured using potential field functions, while leader selection is performed through a single-layer artificial neural network model based on mission requirements. All control approaches are implemented and evaluated in the GAZEBO-ROS simulation environment. Results indicate that PSO offers superior overall performance, while FA and BSA present advantages in terms of lower computational cost in simpler tasks. This work highlights the applicability and limitations of various centralized control strategies in swarm UAV coordination, offering practical insights for both military and civilian mission planning.

Keywords: Uav Swarm, Centralized Control, Swarm Optimization, Pso, Control Algorithms, Artificial Intelligence, Simulation

INTRODUCTION

The rapid development of Unmanned Aerial Vehicles (UAV) technology has increased the importance of swarm structures based on the coordinated operation of multiple UAV systems. These systems are widely used in applications such as military reconnaissance, border surveillance, disaster management and civil logistics. The effectiveness of control strategies in swarm UAV systems plays a direct determining role on mission success, system stability and resource utilization.

Control architectures are generally divided into centralized and distributed structures. In centralized systems, all decisions are made by a single unit, while distributed systems rely on local interactions between individuals. While centralized control provides uniformity in decision quality, it may have limitations in terms of scalability and communication delays. In this context, centralized control architectures provide advantages in terms of task assignment and decision optimality (Khamis et al., 2015).

Among the methods used in swarm control, biologically inspired optimization algorithms stand out. These algorithms aim to achieve a balance of exploration and exploitation in problem solving by taking inspiration from collective action behaviors in nature. Methods such as Particle Swarm Optimization (PSO), Artificial Bee Colony (ABC), Bird Swarm Algorithm (BSA), Bat Algorithm (BA) and Firefly Algorithm (FA) have been successfully applied in multi-objective missions. For example, Karaboga and Basturk (2008) state that the ABC algorithm offers advantages such as implementation flexibility, robustness and low parameter dependency; however, it is also noted that the algorithm converges slowly in batch processes.

In this paper, a comparative analysis of five different swarm optimization methods operating under a centralized control architecture is presented. Each algorithm is evaluated on performance criteria such as task success rate, convergence time, computational load and stability. The developed systems were tested in the GAZEBO-ROS simulation environment to systematically demonstrate the success of the algorithms under different conditions.

METHOD

General system architecture of the methods used in swarm control operations. Telemetry information (position, speed, etc.) received from UAVs is bridged with mavproxy via serial port. Mavproxy translates the read data to local and broadcasts from UDP or TCP protocols. By accessing this information in the ROS simulation, operations are performed with real data. The other method is to broadcast telemetry information directly from the Wi-Fi network and all UAV access points are gathered in a single station and connected by ROS through the router.

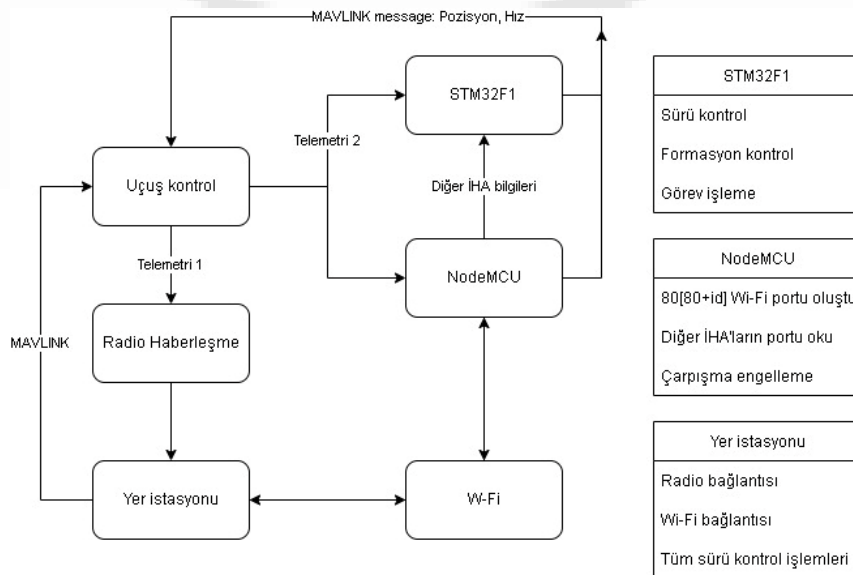


Figure 2.1. System diagram used in flight tests.

1.1. Particle Swarm Optimization (PSO)

Kennedy and Eberhart (1995) developed the Particle Swarm Optimization (PSO) algorithm for the optimization of nonlinear functions, a method based on a stochastic-based collective intelligence approach. PSO is an optimization method inspired by the foraging behavior of flocks of birds. Each "particle" represents a solution and acts in the direction of the best individual (pbest) and global (gbest) solutions. In the Particle Swarm Optimization (PSO) algorithm, the best solution position achieved by each particle in its own history is called personal best (pbest), while the best solution position achieved among all particles in the population is called global best (gbest). In each iteration of the algorithm, the velocity and position vectors of the particles are recalculated according to the current pbest and gbest values in accordance with certain update rules.

$$V_s = c_1 \times rnd_1^t \times (p_{best_i}^k - p_i^t), \quad (2.1)$$

$$V_c = c_2 \times rnd_2^t \times (g_{best}^t - p_i^t), \quad (2.2)$$

$$V_i^{t+1} = w \times V_i^t + V_s + V_c, \quad (2.3)$$

Herew is the inertia coefficient, c_1 and c_2 are the learning coefficients, rnd_1^t and rnd_2^t are random numbers between $[0,1]$, p_i^t is the position of the particle and V_i^t is the velocity. New location

1.2. Bird Swarm Algorithm (BSA)

Meng et al. (2015) developed a new swarm intelligence algorithm called Bird Swarm Optimization (BSO/BSA) for solving optimization problems. This method is inspired by the social behaviors and interactions observed in bird flocks and is based on three basic biological behavior models, specifically foraging, vigilance and flight behaviors. The BSO algorithm defines four different search strategies based on five rules of thumb corresponding to these behaviors. Comparative simulations have shown that the proposed method achieves high performance on various standard optimization problems (Meng et al., 2015).

Goal search formula (social interaction):

$$x_i(t+1) = x_i(t) \times c \times rnd_1^t \times (x_i(t) - x_k(t)), \quad (2.4)$$

Arousal behavior (leader following):

$$x_i(t+1) = x_i(t) \times c \times (x_{lider}(t) - x_i(t)), \quad (2.5)$$

1.3. Artificial Bee Colony (ABC)

The ABC algorithm is based on the processes by which bees search for nectar sources and share information. Bees are divided into three roles: worker bees, scout bees and observers.

New solution generation (worker bees), path planning:

$$x_{ij} = x_{ij}(t) + \phi_{ij} \times (x_{ij} - x_{kj}), \quad (2.6)$$

Here

- x_{ij} available solution
- x_{kj} a different solution
- $\emptyset_{ij} \in [-1,1]$: random number

The selected solutions are evaluated by the observers according to their suitability values and directed towards better solutions.

1.4. Bat Algorithm (BA)

BA is based on the echo-orientation and navigation behavior of microbats. By sending sound waves, bats detect objects in their environment and change direction accordingly. Based on this biological principle, the frequency, speed and position of each individual are updated with the following formulas

$$f_i = f_{min} + (f_{max} - f_{min})x_{rnd}_1^t, \quad (2.7)$$

$$v_i(t) = v_i(t-1) + (x_i(t-1) - x_*)x f_i, \quad (2.8)$$

$$x_i(t) = x_i(t-1) + v_i(t), \quad (2.9)$$

1.5. Firefly Algorithm (FA)

FA is based on the behavior of fireflies to approach each other in response to light intensity. Each individual moves according to the brightness level of other individuals. Brightness is proportional to solution quality. Better solutions are considered brighter and other individuals gravitate towards them. The equation of motion is as follows:

$$x_i(t) = x_i + \beta_0 e^{-\gamma r_{ij}^2} (x_j - x_i) + \alpha \epsilon_i, \quad (2.10)$$

β_0 : maximum attractiveness,

γ : light absorption coefficient,

r_{ij} : the distance between two individuals,

α : coefficient of randomness,

ϵ : random distribution function (usually $[-1,1]$).

The FA algorithm produces fast results with its simple structure and low computational cost; however, its stability and success rate may be lower compared to algorithms such as PSO.

PERFORMANCE ANALYSIS

In this study, the vectorial method change of the PSO algorithm in MATLAB environment was tested with 4 iterations in order to observe the best position (Pbest) and best orientation (Gbest) in the swarm (Karaçal, B. 2022).

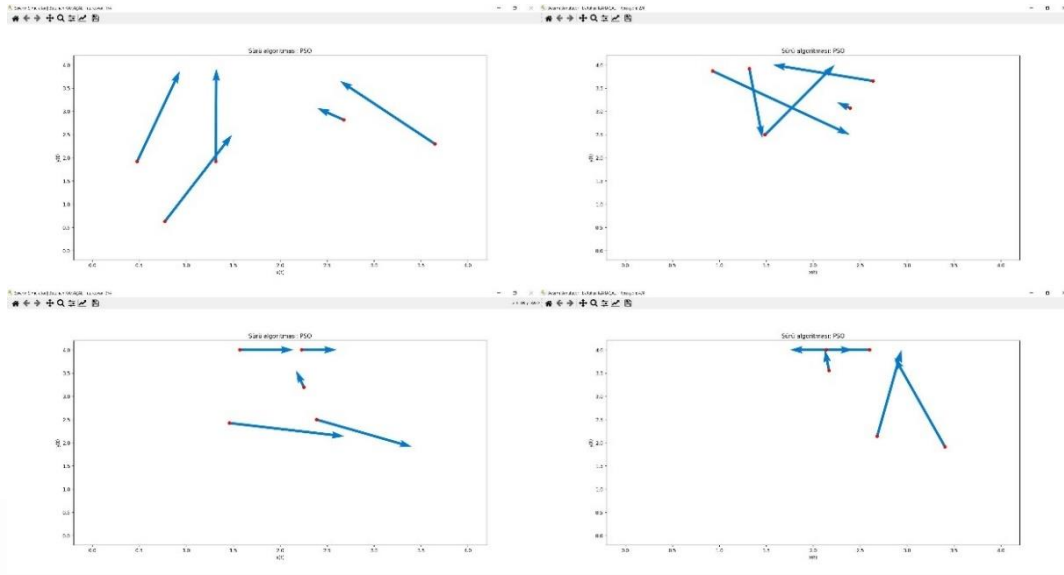


Figure 3.1. Vectorial simulation of PSO algorithm with 4 iterations

The output results of the Michalewicz and Easom test functions, which are used to evaluate the global and local minimum detection ability of the PSO algorithm, are obtained under boundary values in the range of $[0, 4]$ and operating conditions of 20 iterations. The optimization outputs of these functions are presented in Figure 3.2 and Figure 3.3 respectively.

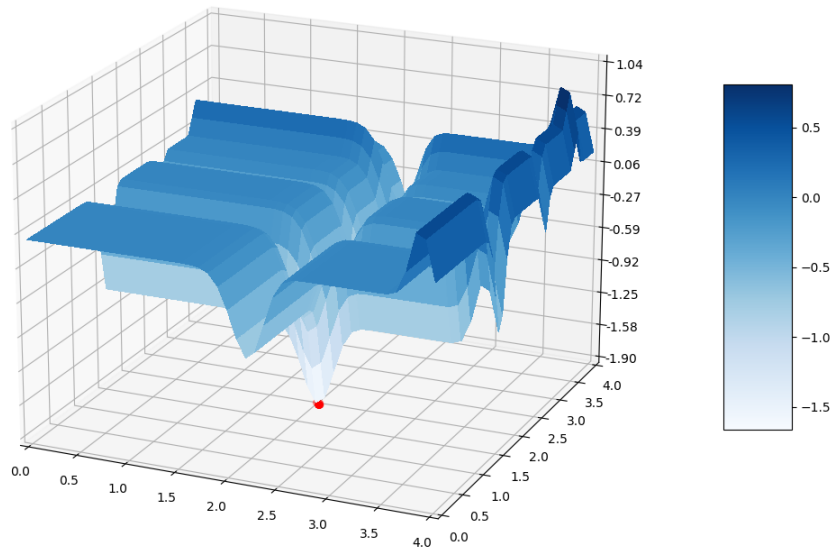


Figure 3.2. MICHALEWICZ function output for PSO minimization search.

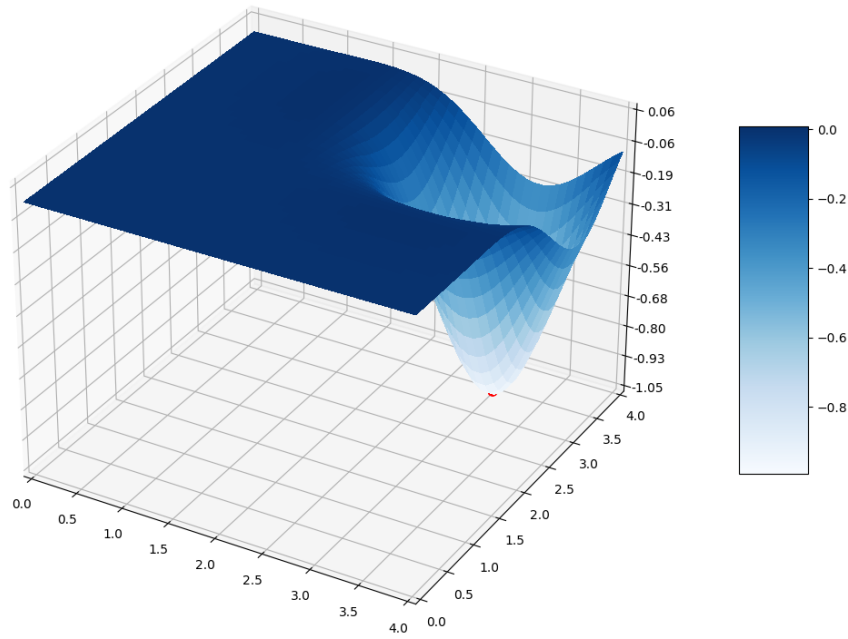


Figure 3.3. EASOM function output for PSO minimization.

In Figure 3.2 and Figure 3.3, in the function outputs of the PSO algorithm for the minimum search process, it is observed that particles are concentrated in the regions of the curves with the steepest slope (minimum). Particles clustered in these regions are represented in red on the graph.

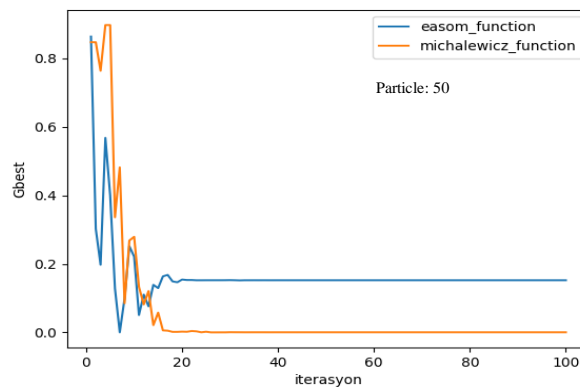


Figure 3.4. Performance comparison of two functions for finding the minimum.

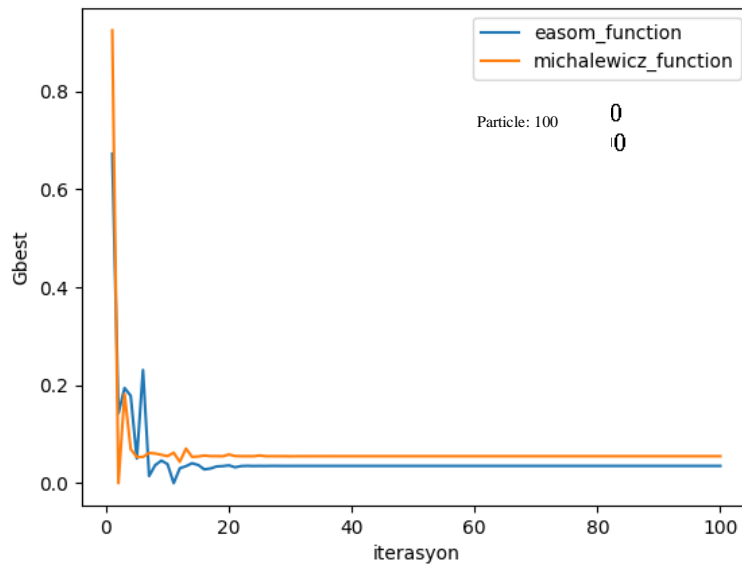


Figure 3.5. Testing different iterations and number of particles to find the minimum.

Other swarm intelligence based algorithms such as Bird Swarm Algorithm (BSA), Artificial Bee Colony (ABC/ABA), Bat Algorithm (BA) and Firefly Algorithm (FA) were evaluated in the comparative analysis and their optimization performances were analyzed in a simulation environment by modeling them on a complex nonlinear test function, Michalewicz function.

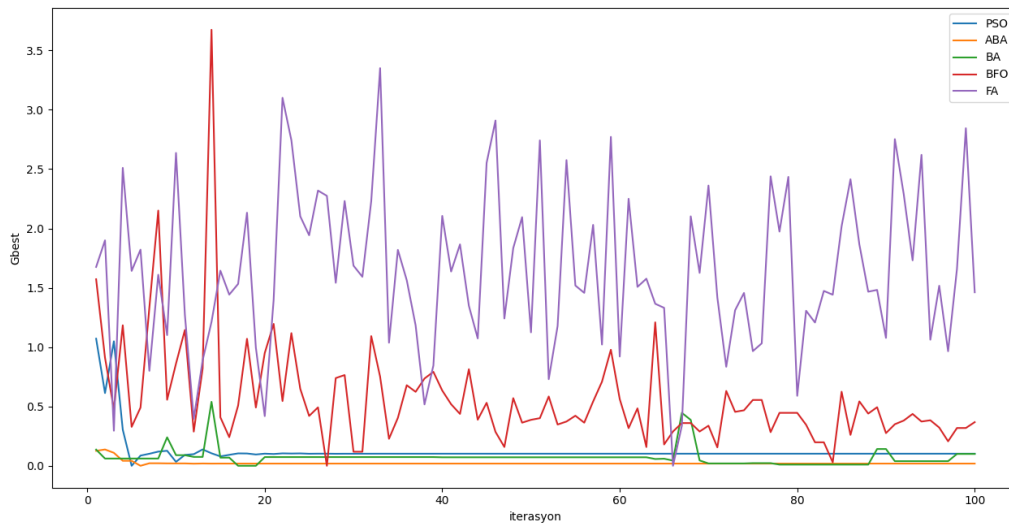


Figure 3.6. Swarm algorithms xy junction vector test results.

As part of the comparative analysis, the performance of the Particle Swarm Optimization (PSO) algorithm was evaluated for different particle numbers, keeping the number of iterations constant. For this purpose, a total of 200 particles were initially generated to run for 100 iterations in each scenario, the initial positions of the particles were fixed, and the velocity update coefficients were randomized for each iteration and particle. In the experimental scenarios, the number of particles was changed to 5, 20, 40, 50, 100 and 200, which directly affected the interaction between particles and the success of reaching the global best position. In the minimum search tests, it is observed that PSO and ABA/ABC algorithms

can successfully reach the global minimum point in the simulations performed with reference to the Michalewicz function (Karaçal, B. 2022).

CONCLUSION AND DISCUSSION

When the results obtained are evaluated, it is observed that the time to reach the fixed target position in the search space decreases significantly with the increase in the number of particles used. In the Particle Swarm Optimization (PSO) algorithm, since the positions of the particles are dynamically updated at each iteration, the algorithm tends to generate new solution points around both global and local minima. Thanks to this structure, more solution regions are scanned when using a higher number of particles, and the system can reach the target faster and more consistently from fixed initial positions. This reveals that increasing the number of particles significantly improves the optimization performance, especially in scenarios where the initial positions are kept constant.

ACKNOWLEDGMENT

This study was supported by Karabuk University Scientific Research Projects Coordination Unit. Project Number: FYL-2020-2367

REFERENCES

- Khamis, A., Hussein, A., & Elmogy, A. (2015). Multi-robot task allocation: A review of the state-of-the-art. *Studies in Informatics and Control*, 22(4), 349-358.
- Karaboga, D., & Basturk, B. (2008). On the performance of Artificial Bee Colony (ABC) algorithm. *Applied Soft Computing*, 8(1), 687-697.
- Meng, X. B., Gao, X. Z., Lu, L., Liu, Y., & Zhang, H. (2016). A new bio-inspired optimization algorithm: Bird swarm algorithm. *Journal of Experimental and Theoretical Artificial Intelligence*, 28(4), 673-687.
- Reynolds, C. W. (1987). Flocks, herds, and schools: A distributed behavioral model. *Computer Graphics*, 21(4), 25-34.
- Muntasha, G., Karna, N., & Shin, S. Y. (2021). Performance analysis on artificial bee colony algorithm for path planning and collision avoidance in swarm unmanned aerial vehicle. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 12
- Karaçal, B. (2022). İnsansız Hava Araçlarında Kümelenme ve Sürü Kontrolü (Yüksek lisans tezi, Karabük Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü). YÖK Ulusal Tez Merkezi.

Makale id= 60

Sözlü Sunum

ORCID ID: 0009-0004-0749-0687

| 110

**Sürdürülebilirlik Odaklı Tedarik Zinciri ve Ürün Yaşam Döngüsü (Plm) Entegrasyonu:
Döngüsel Ekonomi Perspektifinden Bir Yaklaşım****Araştırmacı Sevgi Gökçe Toper¹, Doç.Dr. Volkan Yavaş¹**
¹Ege Üniversitesi

*Corresponding author: Sevgi Gökçe Toper

Özet: Küresel rekabetin ve çevresel risklerin arttığı günümüzde, sürdürülebilirlik odaklı tedarik zinciri yönetimi, sanayi kuruluşları için stratejik bir öneme sahiptir. Bu doğrultuda, Ürün Yaşam Döngüsü Yönetimi (PLM) sistemleri; ürünün tasarımından geri dönüşümüne kadar tüm aşamalarda çevresel hedeflerle uyumlu veri ve süreç yönetimi imkanı sunmaktadır. PLM ile tedarik zinciri süreçlerinin entegrasyonu, kaynak kullanımının optimize edilmesini, çevresel etkilerin azaltılmasını ve tüm yaşam döngüsü boyunca izlenebilirliğin sağlanmasına imkan verir. Bu çalışma, sürdürülebilir tedarik zinciri ve PLM entegrasyonunu döngüsel ekonomi perspektifinden ele almaktadır. Aynı zamanda bu yapının karbon ayak izini azaltma, verimlilik sağlama ve yeşil dönüşümü destekleme potansiyelini değerlendirmektedir. Literatür taramasına dayalı olarak PLM çözümlerinin karbon takibi, malzeme seçimi ve üretim planlamasına etkisi analiz edilmiştir. Elde edilen veriler, PLM tabanlı sürdürülebilirlik uygulamalarının işletmelere çevresel etkiyi azaltma, tedarik zincirinde şeffaflığı sağlama ve döngüsel üretim prensiplerini destekleme yönünde önemli katkılar sunduğunu göstermektedir. Sonuç olarak, döngüsel ekonomiye geçiş sürecinde PLM sistemlerinin tedarik zinciriyle entegre biçimde kullanımı, işletmelere sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmada stratejik bir avantaj sağlamaktadır.

Anahtar Kelimeler: Sürdürülebilirlik, Tedarik Zinciri, Plm, Döngüsel Ekonomi,

A Circular Economy Perspective On the Integration of Sustainable Supply Chain Management and Product Lifecycle Management (Plm)

Abstract: In today's world, where global competition and environmental risks are on the rise, sustainability-oriented supply chain management holds strategic importance for industrial enterprises. In this context, Product Lifecycle Management (PLM) systems offer the opportunity to manage data and processes in alignment with environmental goals across all stages of a product's lifecycle—from design to recycling. The integration of PLM with supply chain processes enables the optimization of resource usage, reduction of environmental impacts, and ensures traceability throughout the entire lifecycle. This study examines the integration of sustainable supply chains and PLM from the perspective of the circular economy. It also evaluates the potential of this integration to reduce carbon footprints, enhance efficiency, and support green transformation. Based on a literature review, the impact of PLM solutions on carbon tracking, material selection, and production planning is analyzed. The findings indicate that PLM-based sustainability practices make significant contributions to reducing environmental impact, ensuring transparency in the supply chain, and supporting circular production principles. In conclusion, the integrated use of PLM systems with supply chains during the transition to a circular economy provides businesses with a strategic advantage in achieving sustainability goals.

Keywords: Sustainability, Supply Chain, Plm, Circular Economy

GİRİŞ

21. Yüzyılda artan çevresel baskılar, kaynakların tükenme riski ve iklim değişikliği gibi küresel sorunlar, işletmeleri daha sürdürülebilir üretim ve tedarik yapıları kurmaya zorlamaktadır. Bu bağlamda, sürdürülebilirlik sadece çevresel bir sorumluluk olmaktan çıkıp, aynı zamanda rekabet gücü, maliyet

avantajı ve kurumsal değer açısından stratejik bir unsur haline gelmiştir. İşletmelerin çevresel, ekonomik ve sosyal sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşabilmeleri ise ancak bütünsel ve dijital olarak izlenebilir sistemlerle mümkündür. Porter ve Kramer (2011), şirketlerin topluma fayda sağlayabileceği ve aynı zamanda ekonomik rekabet güçlerini artırabileceği Paylaşılan Değer Yaratma kavramını önerdiler. Kar amacı gütmeyen sosyal amaçla birleştiği daha yüksek bir kapitalizm biçimine ihtiyaç olduğunu öne sürdüler.

Günümüz sanayi ortamında küresel rekabet hızla artarken, çevresel sürdürülebilirlik de kritik bir öncelik haline gelmiştir. İşletmeler artık sadece maliyet ve kalite odaklı üretimden ziyade, çevresel etkileri minimize eden ve kaynak verimliliğini artıran stratejilere yöneliyor. Bu dönüşüm, özellikle tedarik zinciri süreçlerinde sürdürülebilirlik ilkelerinin benimsenmesini zorunlu kılıyor. Tedarik zinciri boyunca sera gazı emisyonlarının azaltılması, malzeme kullanımının optimize edilmesi ve geri dönüşüm potansiyelinin artırılması gibi hedefler, çevresel yönetim politikalarının ayrılmaz bir parçası haline gelmiştir.

Bu bağlamda, Ürün Yaşam Döngüsü Yönetimi (PLM) sistemleri, ürünlerin tasarımından üretimine, kullanım ömrü sonuna ve geri dönüşüm süreçlerine kadar tüm aşamaları dijital olarak izlemeye ve yönetmeye olanak sağlayan kapsamlı çözümler sunuyor. PLM sistemleri; sürdürülebilirlik odaklı malzeme seçimi, karbon ayak izi takibi, tedarikçi değerlendirme kriterlerinin dijitalleştirilmesi ve çevresel etki analizleri gibi işlevlerle, çevreci tedarik zinciri yönetimini daha etkili hale getiriyor

İşletmelerin hızlı, kaliteli ve düşük maliyetli üretim yapabilmeleri adına PLM sistemleri entegre edilmiş süreçlere ihtiyaçları vardır. Bu gereklilikle küresel pazarda rekabet için PLM sistemleri vazgeçilmez hale gelmiştir. Ürün yaşam döngüsü boyunca izlenebilirlik sunan sistemler sayesinde kullan at modeli yerine ürünlerin dönüştürülerek tekrar kullanıma kazandırıldığı üretim modellerine kolayca geçiş sağlanmaktadır. Kaynakların tekrar kazanımı esasına dayanan üretim anlayışı sürdürülebilir kaynak yönetimini birlikte getirir ve hem çevresel hem ekonomik fayda sağlar. Plm çözümleri ürünlerin yaşam döngülerini kullanımlarından geri kazanımlarına kadar olan bu döngüsel faaliyetlerini sürdürebilmeleri için en iyi öneridir. Ancak, literatürde sürdürülebilirlik hedefleriyle yapılandırılmış tedarik zinciri yönetimi ile PLM sistemlerinin döngüsel ekonomi perspektifinden bütüncül entegrasyonuna yönelik çalışmalar sınırlıdır. Bu çalışma, söz konusu entegrasyonun işletmelere sağlayacağı çevresel, dijital ve operasyonel kazanımları incelemeyi amaçlamaktadır. Aynı zamanda sürdürülebilir dijital dönüşüm stratejilerinin uygulanabilirliğini de değerlendiriyor.

Bu kapsamda, çalışmanın temel amacı; sürdürülebilirlik hedefleri doğrultusunda yapılandırılmış tedarik zinciri yönetimi ile PLM sistemlerinin entegrasyonunu analiz ederek, döngüsel ekonomi yaklaşımıyla işletmelere sağlayabileceği katma değeri ortaya koymaktır. PLM çözümlerinin karbon ayak izi takibi, malzeme seçimi ve üretim planlaması üzerindeki etkilerine odaklanan uygulama örnekleri analiz edilmiştir.

1. KAVRAMSAL ÇERÇEVE

Sürdürülebilir Tedarik Zinciri Yönetimi ile Ürün Yaşam Döngüsü sistemlerinin entegrasyonuna yönelik çalışmalar, son yıllarda artan çevresel kaygılar ve döngüsel ekonomi hedefleri doğrultusunda akademik literatürde giderek daha fazla yer bulmaktadır. Bu bölümde, sürdürülebilirlik, PLM, tedarik zinciri stratejileri ve döngüsel ekonomi yaklaşımlarını konu alan güncel araştırmalar incelenmiştir.

1.1 Sürdürülebilirlik

Sürdürülebilirlik, doğal kaynakların korunması, iklim değişikliğiyle mücadele, ekonomik dayanıklılık, toplumsal refah ve eşitlik, kurumsal itibar ve rekabet üstünlüğü ve yasal düzenlemelere uyum açısından tüm canlılar için kritik öneme sahiptir. (Mete, 2025) Sürdürülebilirlik ekonomik, çevresel ve sosyal olarak üç ana başlık altında ele alınır, ve ancak birlikte ele alındığında gerçek anlamda bütünsel sürdürülebilirlik sağlanabilir. Son yıllarda büyüyen sanayileşme doğal kaynakların tüketimini hızlandırmıştır. (Ma ve ark., 2025) Artan ham madde tüketimi; metal, plastik, ağaç, su ve enerji tüketiminin artması, fosil yakıt bağımlılığı; yenilenemeyen yakıt kullanımı dışına çıkılmaması, su kaynaklarının aşırı kullanımı ve atık suların arıtılmadan doğaya bırakılmasıyla temiz kaynakların

kullanımını da azaltması, sanayileşme sonucu ortaya çıkan katı atıklar; kimyasal sızıntılar, hava kirliliği gibi etkenlerin doğal kaynakların kalitesini bozmasıyla çevre kirliliği, iklim değişikliği ile mücadele artmıştır. Karbon emisyonlarının azaltılması, Avrupa Yeşil Mutabakatı' na göre zorunludur. Avrupa Birliği, 2050 yılına kadar iklim nötr bir kıta olma hedefi doğrultusunda, net sera gazı emisyonlarını sıfıra indirmeyi amaçlamaktadır. Bu doğrultuda, Avrupa sanayisinin rekabetçiliğini koruyarak, iklim nötr bir ekonomi oluşturulması sürecinde temiz teknolojilerin geliştirilmesini hızlandırmaktır. (European Commission, 2023) Türkiye'de çevre kirliliğinin önlenmesi ve çevrenin korunması için bu alanda uygulanmakta olan Çevre Kanunları mevcuttur ve sürdürülebilir kalkınma ilkesi doğrultusunda doğal kaynakların dengeli ve verimli kullanılmasını sağlar. Çevre Kanunu'nun 12–15. maddeleri uyarınca, çevreyi kirlüten işletmelere çeşitli yaptırımlar uygulanabilir (T.C. Resmî Gazete, 1983). Firmalar hem kanunlar hem de sosyal sorumluluk kapsamında yürüttükleri çeşitli projeler ile yerel istihdam, çalışan haklarına saygı, kadın istihdamı, engelli erişimi gibi projeler ile marka itibarı ve değer oluşturmaya hedefler. Ayrıca Avrupa pazarına ihracat yapan firmalar için AB Yeşil Mutabakatı kapsamında karbon ayak izini raporlayabilenler, vergisel yükten korunur. (OECD, 2025)

1.2 Tedarik Zinciri Yönetimi

İşletmeler, tedarik zincirini yalnızca kısa vadeli maliyet avantajları elde etmenin ötesinde, uzun vadede stratejik rekabet üstünlüğü sağlayabilecek bir değer yaratım alanı olarak değerlendirmektedir. (Manthou, Vlachopoulou & Folinas, 2003) Tedarik zinciri süreçlerinde sürdürülebilir uygulamalara öncelik veren organizasyonlar, pazardaki rekabet dinamikleri üzerinde olumlu etkiler oluşturmuş ve marka değerlerini güçlendirmiştir. (Kılıç, 2024)

Tedarik Zinciri Yönetimi, malzeme ve ürünlerin tedarikçilerden nihai müşteriye kadar olan tüm hareketini yöneten bir dizi süreçtir. Endüstriyel üretim ortamlarında, tedarik zinciri; maliyet baskıları, zamanında üretim gereklilikleri ve tedarikçi ilişkilerinin karmaşıklığı nedeniyle stratejik bir öneme sahiptir. Christopher, tedarik zinciri yönetiminin üretim verimliliği, zamanında teslimat ve maliyetlerin kontrol altında tutulması açısından merkezi bir rol oynadığını vurgulamaktadır. Tedarik Zinciri Yönetimi'in dijitalleşmesi, daha hızlı ve doğru kararlar alınmasını sağlar ve tedarik zincirinin her aşamasındaki süreçlerin şeffaflığını artırır. Müller ve Hepp'in çalışmasında ise, Tedarik Zinciri Yönetimi'in PLM ile entegrasyonunun, üretim şirketlerine ürün geliştirme ve tedarik süreçlerini eş zamanlı olarak optimize etme fırsatı sunduğu öne sürülmektedir. Bu entegrasyon, ürün tasarımından üretime kadar olan süreçlerin birbirine daha uyumlu hale gelmesini sağlar ve zaman kaybını minimize eder.

Dijital Dönüşüm ile birlikte Tedarik Zinciri Yönetimi süreçleri daha izlenebilir ve bir yapıya kavuşmuştur. Özellikle PLM sistemleri ile Tedarik Zinciri Yönetimi entegrasyonu, ürün geliştirme ile tedarik faaliyetlerinin eş zamanlı yürütülmesine olanak tanımakta ve bu sayede tasarımdan üretime kadar olan tüm süreçlerin sanal ortamda gerçekleşen hesaplamalar ile tüm çıktıları önceden görülebilmektedir. Elkington (1998), İşletmelerin sürdürülebilir kalkınma çerçevesinde faaliyetlerinin ekonomik, çevresel ve sosyal etkilerini değerlendirmektedir.

Hervani'ye göre “yeşil” sözcüğü ile çevre ile ilgili faaliyetler ilişkilendirilmiştir, buna göre Yeşil Tedarik Zinciri Yönetimi; çevre dostu sürdürülebilir süreçleri ifade eder. Yeşil Tedarik Zinciri ürünün yaşam döngüsü boyunca tedarikten geri dönüşüme kadar gerçekleşen tüm faaliyetlerde çevresel etkilerin göz önünde bulundurulmasıdır. Yeşil Tedarik Zincirini günümüzde PLM çözümleri ile entegre hale getirdiğimizde çevresel atık yönetimine malzeme seçim aşamasından başlanmasına imkan sağlamaktadır. Bu avantaj dögüsel ekonomi anlayışını desteklemektedir. Üçok ve Yeşilay (2022), a göre PLM sistemi, kaynakların yeniden kullanımı ve geri dönüşümünü destekleyen ekonomik modelin yönetimi için ürün yaşam döngüsünün sağladığı imkanlar ile en verimli sonuç elde edilebilir.

1.3 Ürün Yaşam Dögüsü (PLM)

Günümüzde teknoloji hızının artmasıyla birlikte tüketici davranışları değişmiş tüketim hızı artmıştır. Bu değişen koşullarda kaynak verimliliğini sürdürebilmek için firmaların ürün geliştirme süreçleri ve hızları önem kazanmıştır. Gelişen teknolojiyle dijitalleşmenin hayatımıza kattığı PLM çözümleri, ürünlerin fikir aşamasından atık haline geldikleri süreç boyunca, (tasarım, malzeme seçimi, üretim, atık yönetimi, yeniden kullanım, veri paylaşımı vb.) sanal ortamda izlenebilirliğin sağlanmasıyla organizasyonların

birbirinden farklı tüm süreçlerine entegre edilebilmektedir. (Sayer & Ülker, 2014) PLM sistemleri, firmaların sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmalarında, kaynak verimliliği, maliyet avantajı ve çevresel etkileri azaltmaya katkı sağlayan bir çözüm önerisidir. (Üçok & Yeşilay, 2022) Ürün Yaşam Döngüsünde sağlanan izlenebilirlik sayesinde sürdürülebilir Tedarik Zinciri Yönetimi de optimize edilmiştir. Özellikle döngüsel ekonominin getirisi olan yeniden kullanım PLM sayesinde çok daha kolaylaşmıştır. PLM kullanımıyla birlikte tasarım aşamasında malzeme seçimlerini, üretim sırasında oluşabilecek karbon salınımını hesaplayabilir ve yıllık karbon emisyon miktarını bu sayede dengede tutabilirler. Aynı zamanda bu sistemler, malzemelerin tekrar kullanımlarını sağlayan modüler tasarımı destekleyen bir bakış açısına sahiptir, yeniden kullanılabilir malzemelerin nerede değerlendirileceği bilgisine kolay ve hızlıca ulaşabilmemizi sağlar. Sürdürülebilir Tedarik Zinciri Yönetimi ve PLM çözümleri entegrasyonu sağlandığında kaynakların verimli kullanılması, çevresel etkilerin azaltılması, yaşam döngüsü boyunca izlenebilir olması hedefi gerçekleştirilebilir. Stark (2022), PLM sistemlerinin temel amacını, bir ürünün yaşam döngüsü boyunca oluşan tüm veri, süreç ve kaynakları dijital olarak entegre şekilde yönetmek, böylece işletmeye verimlilik, hız, kalite ve inovasyon avantajı sağlamak olarak belirtmiştir. PLM sistemleri, yeni ürün geliştirme süreçlerini daha verimli, entegre ve izlenebilir kılmak amacıyla pek çok stratejik avantaj sunmaktadır. Bunun yanında ISO 14001 gibi çevresel yönetim standartlarıyla uyumlu dijital üretim stratejilerinin, PLM sistemleri ile etkin biçimde yönetilebildiği anlaşılmıştır.

SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK ODAKLI TEDARİK ZİNCİRİ YÖNETİMİ YAKLAŞIMLARI

Seuring ve Müller (2008), 'e göre Sürdürülebilir tedarik zinciri yönetimi; firmaların kaynak kullanımını gözetken devamlı kalkınma hedefleri için ham madde temininden son kullanıcıya kadar ilgili tarafların taleplerini dinleyerek ekonomik, çevresel ve sosyal yönden operasyonel süreçlerde yer alan bilgi, mal ve para transferi hareketlerinin yönetimidir.. Buna göre tüm işleyişin çevresel, sosyal ve ekonomik yönden uyumlanması olarak görülmektedir, hatta bu durum işletmenin faaliyetleri kapsamında ilişkide olduğu tüm kesimleri kapsar.

Sürdürülebilirlik odaklı tedarik zinciri yönetimi, sadece maliyet ve verimlilik temelli değil; aynı zamanda çevresel etkileri minimize eden, sosyal sorumluluğu önceleyen ve uzun vadeli değer yaratan bir anlayışı benimsediği birçok araştırmada yer almıştır.

Sürdürülebilirlik odaklı tedarik zinciri yönetimi yaklaşımları, geleneksel tedarik zinciri süreçlerinin çevresel odaklı yaklaşım entegrasyonunu amaçlamaktadır. Bu bağlamda, yeşil tedarik zinciri yönetimi kavramı hayatımıza girerek; ürünün yaşam döngüsü boyunca tüm süreçlerine kadar çevre dostu, doğa dostu uygulamaların benimsenmesini ifade etmektedir.

Döngüsel ekonomi ilkeleri doğrultusunda geliştirilen tedarik zinciri yaklaşımları ürünlerin yeniden kullanımını, onarımını ve geri dönüştürülmesini mümkün kılarak kaynak tüketimini azaltmakta ve çevresel sürdürülebilirliğe katkı sunmaktadır. Bu yaklaşım, atık yönetimi politikalarının etkinliğini de artırmaktadır. Ürünlerin tasarımından itibaren yeniden kullanılabilir, geri dönüştürülebilir şekilde planlanması esastır. Balbay(2021)'a göre döngüsel ekonomi; doğru süreçler ile kullanım sonrası geri kalan malzemelerin yeniden kullanılacağı, finansal değer taşıyan ham maddelere dönüştürülmesini sağlayan faaliyetlerdir.

Sosyal sürdürülebilirlik, tedarik zinciri süreçlerinde adil çalışma koşullarının teminat altına alınmasını, insan haklarına saygının gözetilmesini ve yerel tedarikçilerle etik temelli iş ilişkilerinin sürdürülmesini içerir. Bu yaklaşımda, şeffaflık, izlenebilirlik ve mevzuata uyum gibi unsurlar, sosyal sürdürülebilirliğin temel belirleyicileri arasında yer almaktadır.

Dijital dönüşümle desteklenen çözümler, sürdürülebilir tedarik zinciri yönetiminin verimliliğini ve etkinliğini önemli ölçüde artırmaktadır. Nesnelerin İnterneti (IoT), yapay zekâ, blokzincir ve büyük veri analitiği gibi araçlar sayesinde, tedarik zincirindeki süreçler daha şeffaf, ölçülebilir ve izlenebilir hale gelmektedir. Bu sayede işletmeler hem yasal gerekliliklere daha kolay uyum sağlamak hem de sürdürülebilirlik hedeflerine daha planlı programlı bir şekilde ulaşabilmektedir.

PLM UYGULAMALARI VE SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK ENTEGRASYONU

PLM uygulamalarının sunduğu çözümler yeşil tedarik zinciri ve döngüsel ekonomiyi desteklemektedir. Günümüzde otomotiv, havacılık, tekstil, gıda gibi birçok sektör PLM sistemi entegrasyonu sayesinde

hem çevresel hem mali avantaj sağlamaktadır. Bunun yanında bu firmaların iklim ve insan odaklı yaklaşımları hem sürdürülebilirlik raporlamalarında hem de firmanın değer yaratımı ve itibarını pozitif etkilemektedir. PLM çözüm uygulamalarından bazı örnekleri aşağıda inceleyeceğim.

3.1 Teamcenter ile Dijital ve Sürdürülebilir Ürün Geliştirme

Siemens'in Teamcenter Ürün Maliyet Yönetimi çözümü, ürünlerin karbon ve maliyet etkilerini eş zamanlı, dinamik ve bütünsel şekilde analiz etmeyi sağlar. Tasarım, malzeme seçimi, üretim yeri ve taşıma gibi parametreler üzerinden senaryo simülasyonları yapılarak en uygun kararlar verilebilir. Bu sistem, PLM ve ERP sistemleriyle tam entegre çalışarak ürün yaşam döngüsündeki tüm maliyet ve karbon verilerini güncel tutar. Maliyet ve karbon ayak izi verilerini, fikir aşamasından geliştirme ve doğrulamaya, üretim başlangıcına kadar her aşamada, gelişen malzeme listesiyle dinamik olarak eşlenik kılar. Malzeme listesi Ürün Yaşam Döngüsü Yönetimi (PLM) ve Kurumsal Kaynak Planlama (ERP) sistemlerinden gelen güncellemelerle eşeler, ekipler özellikler ve maliyetlerdeki her değişikliği sorunsuz bir şekilde izleyebilir. Bu yetenek, özellikle otomotiv gibi karmaşık endüstrilerde paha biçilmezdir ve mühendislik, tedarik ve finansı kapsayan dijital bir iş parçacığı sağlar. Ayrıca, tedarik zincirindeki her paydaşın ortak bir veri seti üzerinden çalışmasına olanak tanıyarak izlenebilirlik sağlar.

Teamcenter, üretim başlamadan önce karbon salımı ve maliyetleri detaylı şekilde modellemeye imkân tanıyarak, işletmelere daha bilinçli ve sürdürülebilir tedarik kararları alma fırsatı sunar. Bununla birlikte tedarikçi verileri, lojistik senaryoları ve üretim parametreleri gibi kritik girdilerle yapılan analizler, maliyet avantajı sağlarken çevresel sorumluluğun da yerine getirilmesini mümkün kılar.

3.2 Airbus'ta Dijital Dönüşüm

Dijital ikiz teknolojisiyle desteklenen PLM platformunu kullanan Airbus, yalnızca tasarımda ve üretimde malzeme ile enerji kullanımını en aza indirmekle kalmayıp; aynı zamanda müşteri ve tedarikçilerle kurduğu entegre sistem sayesinde çevresel sürdürülebilirliği merkeze alan bir yapı oluşturmuştur. Airbus'ın internet sitesinde bu dijital dönüşüm ile ilgili şu ifadeye yer verilmektedir: *“Dijital devrim, Airbus'taki operasyonların her seviyesinde gerçekleşiyor ve ekosistemimiz genelinde inovasyon ve mükemmelliği teşvik ediyor. Ekipleri dijital araçları benimsemeye, süreçleri kolaylaştırmaya, verimliliği artırmaya ve üretim yöntemlerinde devrim yaratmaya teşvik ediyor. Güvenli ve birleşik bir dünya için sürdürülebilir havacılıkta öncülük etme amacımızı desteklemede önemli bir rol oynuyor.”*

Varhan (2023), çeşitli isterlere göre üretilecek ürünlerin tasarımı, analiz ve üretiminde dögüsel ekonomiye göre özelleştirme yapılmasının PLM sistemlerine katkı oranında önemli bir fayda sağladığını vurgulamaktadır. Bu sistemlerin tasarım ve analizden planlamaya, malzeme kullanımından tersine lojistiğe kadar birçok farklı alanda, yapayzeka gibi araçlarla süreçler arası izlenebilirlik yeteneğini geliştirmesi ile havacılık ve savunma sektörüne değer katarken dögüsel ekonomiye uygun çıktılarının oluşmasına da olanak sağlamaktadır.



Şekil 6: Konsept Tasarım

(İniş Takımı Mekanizması)



Şekil 7: AI Tasarım Optimizasyonu

(İniş Takımı Mekanizması)

Kaynak: Airbus & Dassault Systemes, 2019.



Şekil 5: İmalat Türlerine Göre AI Tasarım Optimizasyon Sonuçları

Kaynak: Airbus & Dassault Systemes, 2019.

Şekil 1: Kaynak: Varhan (2023), Şekil 5, Şekil 6 ve Şekil 7.

Varhan, O. (2024). *Türk Savunma ve Havacılık Sanayiinde Dögüsel Ekonomi ve Ürün Yaşam Döngüsü Yönetimi: Yapay Zekâ Destekli Uygulama Örnekleri*. Ege Üniversitesi Ulaştırma Yönetimi Araştırmaları Dergisi, 1(1), 35-59.

3.3 Mavi Jeans : Sürdürülebilir Tasarım ve Malzeme Seçimi (All Blue Koleksiyonu)

Sürdürülebilirlik hedeflerinde organik pamuk, geri dönüştürülmüş denim ve polyester gibi sürdürülebilir malzemelerin kullanımını artırmak yer almaktadır. Ürünlerin çevresel ayak izini daha tasarım aşamasında optimize etmesi ile Mavi'nin All Blue koleksiyonu bunun somut bir örneğidir.

PLM Entegrasyonu sayesinde merkezi malzeme veritabanı ile PLM sistemi, Mavi'nin kullandığı tüm kumaşların, ipliklerin ve aksesuarların çevresel özelliklerini (su ayak izi, CO2 emisyonu, geri dönüştürülmüş içerik oranı, kimyasal sertifikaları - örneğin Oeko-Tex, GOTS) içeren kapsamlı bir dijital kütüphane sunar.

Tasarım Karar Desteği sayesinde tasarımcılar ve ürün geliştirme ekipleri, yeni bir jean veya giysi tasarlarlarken, PLM' deki bu verileri kullanarak farklı malzeme ve yıkama kombinasyonlarının ürünün toplam çevresel etkisi üzerindeki potansiyel etkilerini görebilirler. Bu, en sürdürülebilir seçenekleri bilinçli olarak seçmelerini sağlar.

Sanal Prototipleme ile fiziksel numune üretimini azaltarak malzeme ve enerji israfını önlemek için 3D tasarım ve sanal prototipleme yoğun olarak kullanılır. Bu, aynı zamanda pazara çıkış süresini de hızlandırır. Sürdürülebilirlik faydası olarak daha düşük çevresel etkiye sahip ürünler, sürdürülebilir malzeme kullanımının artırılması, Ar-Ge süreçlerindeki atıkların azaltılması.

SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, sürdürülebilirlik odaklı tedarik zinciri yönetimi ile PLM sistemlerinin entegrasyonu, döngüsel ekonomi perspektifi çerçevesinde ele alınmıştır. Çalışmalar sonucunda, işletmelerin uzun vadeli sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşabilmesi için tedarik zinciri süreçlerini dijital, bütüncül ve çevresel etkileri gözetilen bir yapıda yeniden kurgulaması gerektiği ortaya çıkmıştır.

PLM sistemleri, ürünün fikir aşamasından nihai elden çıkarılmasına kadar tüm süreçlerde veri yönetimini merkezileştirerek, ürünün çevresel etkilerinin tasarım aşamasında minimize edilmesine olanak sağlamaktadır. Aynı zamanda, tedarik zinciri boyunca şeffaflık ve izlenebilirlik sağlayarak sürdürülebilir kaynak kullanımı, atık yönetimi ve geri dönüşüm gibi kritik döngüsel ekonomi uygulamalarını da desteklemektedir.

Entegrasyonun başarıya ulaşabilmesi için, PLM ve Tedarik Zinciri Yönetimi sistemleri arasındaki veri alışverişi akıcı ve senkronize olmalı ve bilgi akışı kesintisiz sağlanmalıdır. Bu bağlamda, hem dijital alt yapı hem de organizasyonel kültür açısından dönüşüm gereklidir. Bu doğrultuda, sürdürülebilirlik odaklı tedarik zinciri ile PLM sistemlerinin entegrasyonunun daha etkin ve verimli bir şekilde sağlanabilmesi için sistematik adımların atılması gerekmektedir.

Öncelikle, dijital altyapıların güçlendirilmesi ile başlanmalıdır. PLM ve Tedarik Zinciri Yönetimi sistemleri arasındaki veri alışverişinin gerçek zamanlı, güvenilir ve şeffaf bir biçimde gerçekleştirilebilmesi için entegre dijital platformlara yatırım yapılmalıdır.

Ürün tasarımı süreçlerinde döngüsel ekonomi yaklaşımları temel alınmalı; malzeme seçimi, sökülebilirlik, onarılabilirlik ve yeniden kullanım-geri dönüşüm olanakları tasarımın ayrılmaz bir parçası haline getirilmelidir. PLM sistemlerinin bu kriterleri destekleyecek şekilde yapılandırılması sonucunda, çevresel etkilerin henüz tasarım aşamasında minimize edilmesi ortaya çıkacaktır.

Ayrıca, sürdürülebilir tedarik zinciri hedeflerine ulaşmak için tedarikçilerin sisteme entegre edilmesi ve bu paydaşlara yönelik sürdürülebilir üretim farkındalığı kazandıracak dış eğitimlerin verilmesi gerekmektedir. Böylece döngüsel ekonomi yaklaşımı, sadece şirket içi süreçlerle sınırlı kalmaz; tedarikçilerden müşterilere kadar tüm paydaşları kapsayan geniş bir değer zincirine entegre edilebilir.

PLM sistemlerine karbon ayak izi, enerji tüketimi, atık değeri gibi sürdürülebilirlik performans göstergeleri entegre edilmeli; bu göstergeler, tedarik zinciri boyunca alınacak stratejik hedefli kararların temelini oluşturmalıdır.

Buna ek olarak, entegrasyon süreci uluslararası sürdürülebilirlik standartları ve yasal düzenlemeler doğrultusunda yürütülmeli; şirket politikaları bu normlara uygun olarak yeniden şekillendirilme ve yasal uyumda sürdürülebilirlik sağlanmalıdır.

Son olarak, bu alandaki bilgi/veri birikiminin artırılması adına, PLM–Tedarik Zinciri Yönetimi entegrasyonunun çevresel ve operasyonel etkilerini değerlendiren sektörel ve akademik araştırmaların teşvik edilmesi ve desteklenmesi gerekmektedir. Bu tür çalışmalar, uygulama örnekleri ve en iyi pratikler üzerinden Dijital Dönüşümü hedefleyen karar vericilere yol gösterici olacaktır.

KAYNAKÇA

- Vedrtnam, A., Negi, H., & Kalauni, K. (2025). Materials and Energy-Centric Life Cycle Assessment for Drones: A Review. *Journal of Composites Science*, 9(4), 169.
- Elkington, J. (1998). Partnerships from cannibals with forks: The triple bottom line of 21st-century business. *Environmental Quality Management*, 8(1), 37–51.
- Porter, Michael E., and Mark R. Kramer. "Creating Shared Value." *Harvard Business Review* 89, nos. 1-2 (January–February 2011): 62–77.
- Üçok, B., & Yeşilay, R. B. (2022). Ürün Yaşam Döngüsü Yönetimi Perspektifinden Döngüsel Ekonomi. *Yaşar Üniversitesi E-Dergisi*, 17(67), 688-717.
- Varhan, O. (2024). Türk Savunma ve Havacılık Sanayiinde Döngüsel Ekonomi ve Ürün Yaşam Döngüsü Yönetimi: Yapay Zekâ Destekli Uygulama Örnekleri. *Ege Üniversitesi Ulaştırma Yönetimi Araştırmaları Dergisi*, 1(1), 35-59.
- Osintsev, N., & Rakhmangulov, A. (2025). Green logistics instruments: Systematization and ranking. *Sustainability*, 17(13), 5946. <https://doi.org/10.3390/su17135946>
- European Commission. (2023). The European Green Deal (COM(2019) 640 final). <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52019DC0640>
- European Commission. (2023). A Green Deal Industrial Plan for the Net-Zero Age (COM(2023) 62 final). <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52023DC0062>
- Ellen MacArthur Foundation. (2022). What is a circular economy? Ellen MacArthur Foundation. <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/topics/circular-economy-introduction/glossary>
- Carter, C. R., & Rogers, D. S. (2008). A framework of sustainable supply chain management: Moving toward new theory. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 38(5), 360–387. <https://doi.org/10.1108/09600030810882816>
- Theeraworawit, M., Suriyankietkaew, S., & Hallinger, P. (2022). Sustainable Supply Chain Management in a Circular Economy: A Bibliometric Review. *Sustainability*, 14(15), 9304. <https://doi.org/10.3390/su14159304>
- Empringham, P. (t.y.). How PLM can support the Circular Economy. *Product Innovation – PI Blog*. <https://www.pi.tv/blog>
- Kuban, D., & Yeşilay, R. B. (2021). PLM ve inovasyon: PLM, inovasyon için bir kolaylaştırıcı olabilir mi? *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry*, 5(1), 76–84. <https://doi.org/10.46519/ij3dptdi.769824>
- Pancaroglu, M. S., & Perçin, S. (2023). Çevik Üretim Sürdürülebilirlik Performansına Etkisinde Ürün ve Süreç İnovasyonunun Aracı Rolü. *Hacettepe Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 41(4), 675-699.
- Finkbeiner, M., Lehmann, A., & Traverso, M. (2020). How to consider life cycle thinking into ISO 14001? A step-by-step method for small and medium-sized companies and a case study in waste management. *Journal of Cleaner Production*, 247, 119125. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119125>
- Camilleri, M. A. (2022). The rationale for ISO 14001 certification: A systematic review and a cost–benefit analysis. *Corporate Social Responsibility and Environmental Management*, 29(4), 1067–1083. <https://doi.org/10.1002/csr.2254>

- Sarı, G., & Sayer, S. (2021). PLM kullanımı ile ürün geliştirme sürecinde etkin bilgi akışının sağlanması. *Mühendis ve Makina*, 62(704), 513–533. <https://doi.org/10.46399/muhendismakina.880194>
- Sayer, S., & Ülker, A. (2014). Ürün yaşam döngüsü yönetimi. *Mühendis ve Makina*, 55(657), 57–64. Erişim adresi: https://www.mmo.org.tr/sites/default/files/6f292665c405114_ek.pdf
- T.C. Resmî Gazete. (1983, 11 Ağustos). 2872 sayılı Çevre Kanunu. Resmî Gazete (Sayı: 18132). <https://www.mevzuat.gov.tr/mevzuat?MevzuatNo=2872&MevzuatTur=1&MevzuatTertip=5>
- T.C. Resmî Gazete. (1983, 11 Ağustos). 2872 sayılı Çevre Kanunu (Madde 12–15). Resmî Gazete (Sayı: 18132). <https://www.mevzuat.gov.tr/mevzuat?MevzuatNo=2872&MevzuatTur=1&MevzuatTertip=5>
- Mete, M. H. (2025). Sürdürülebilir kalkınmanın sağlanmasında sanayide yeşil dönüşümün rolü. *Bölgesel Kalkınma Dergisi*, 3(1), 67–79. <https://doi.org/10.61138/bolgeselkalkinmadergisi.1662812>
- OECD. (2025). The potential effects of the EU CBAM along the supply chain (OECD Science, Technology and Industry Working Papers No. 2025/02). OECD Publishing. <https://doi.org/10.1787/b9049067-en>
- Manthou, V., Vlachopoulou, M., & Folinis, D. (2003). The supply chain perspective of e-business evolution. In J. L. Monteiro, P. M. C. Swatman, & L. V. Tavares (Eds.), *Towards the Knowledge Society (IFIP AICT, Vol. 105, pp. 229–242)*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-0-387-35617-4_15
- Kılıç, M. (2024). Tedarik zinciri yönetiminde sürdürülebilirlik: Endüstri 4.0 etkisi. *Mersin Üniversitesi Denizcilik ve Lojistik Araştırmaları Dergisi*, 6(2), 52–83. <https://doi.org/10.54410/denlojad.1498744>
- Üçok, B., & Yeşilay, R. B. (2022). Ürün yaşam döngüsü yönetimi perspektifinden dögüsel ekonomi [Circular economy from product lifecycle management perspective]. *Journal of Yaşar University*, 17(67), 688–717. <https://doi.org/10.19168/jyasar.1006411>

Makale id= 58

Sözlü Sunum

ORCID ID: 0000-0001-9121-0510, 0000-0002-0809-2531

| 118

Helisel Kazıklarda Çekme Yüklerinin Sonlu Elemanlar Limit Analizi Yöntemiyle Belirlenmesi**Araştırmacı Betül Keseroğlu¹, Prof.Dr. Murat Örnek¹**
¹İskenderun Teknik Üniversitesi

*Corresponding author: Betül Keseroğlu

Özet: Helisel kazıklar; sahip oldukları şaftta, kuvvet momenti uygulanması yoluyla zeminlere döndürülerek yerleştirilen ve basınç, çekme, yanal, eksantrik gibi farklı tip yüklere karşı mukavemet sağlayabilen derin temel sistemleridir. Bu çalışmada, kohezyonsuz sıkı zemine gömülü model helisel kazıkların eksenel çekme yükü etkisi altındaki davranışları; sonlu elemanlar limit analizi yöntemiyle araştırılmıştır. Helis çapı (D), sayısı (N) ve aralığı (s) ile gömülme derinliği (L) değerleri değişen farklı tip model helisel kazıklar; iki boyutlu olarak OPTUM G2 geoteknik tasarım yazılımında modellenmiştir. Eksenel çekme yüküne maruz on beş adet farklı özelliğe sahip helisel kazık, sonlu elemanlar limit analiziyle çözümlenerek her bir analiz için maksimum çekme yükleri sayısal olarak tespit edilmiştir. Bu çalışmada, kurulan tüm iki boyutlu sonlu elemanlar modeli çözümlenmelerinden elde edilen maksimum çekme yükleri; deneysel bulgularla kıyaslanarak, deneysel-sayısal uyumluluğu temsilen, maksimum çekme yükleri arasındaki fark ortalama %22 olarak hesaplanmıştır. Sonuçta, helisel kazıkların eksenel yüklenme koşulları altında sayısal olarak çözümlenmesi için sonlu elemanlar limit analizi yönteminin kullanılabilir olduğu ortaya koyulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Helisel Kazık, Kohezyonsuz Zemin, Sıkı Kum, Eksenel Yükleme, Sayısal Analiz, Sonlu Elemanlar Limit Analizi

Determination of Uplift Capacity of Helical Piles Using Finite Element Limit Analysis

Abstract: Helical piles are deep foundation systems installed through the application of rotational torque, which allows them to be screwed into the soil to effectively resist a composite of loading conditions, including compression, tension, lateral, and eccentric forces. In this study, the behavior of model helical piles embedded in dense cohesionless soil under the effect of axial uplift load was investigated using the finite element limit analysis method. Different types of model helical piles, with varying helix diameters (D), number of helices (N), helix spacing (s), and embedment depths (L), were modeled two-dimensionally in OPTUM G2 geotechnical design software. Fifteen helical piles with different characteristics subjected to axial uplift load were analyzed by finite element limit analysis, and the maximum uplift loads for each analysis were determined numerically. In this paper, the maximum tensile loads obtained from all the established two-dimensional finite element model analyses were compared with the experimental findings, and the difference between the maximum tensile loads was calculated to be 22% on average, representing the experimental-numerical compatibility. Consequently, it has been demonstrated that the finite element limit analysis method is applicable for the numerical analysis of helical piles under axial loading conditions.

Keywords: Helical Pile, Cohesionless Soil, Dense Sand, Axial Loading, Numerical Analysis, Finite Element Limit Analysis

1. GİRİŞ

Helisel kazıklar; geoteknik mühendisliğine konu olan birçok tasarım ve uygulamada tercih edilen, yapısal olarak merkezinde bir shaft ile shafta tutturulmuş bir veya daha fazla helis yaprağı barındıran ve genellikle çelikten imal edilen derin temel sistemleridir. Vida kazıklar veya helisel ankrajlar olarak da adlandırılan helisel kazıklar; maliyet etkinliğine, yüksek yük taşıma kapasitesine ve düşük çevresel etkiye sahip olmaları nedeniyle öne çıkan bir temel sistemi çözümüdür (Qu ve diğerleri, 2025). Helisel kazıkların merkezinde yer alan shaftın altındaki konik uç yapısı ve helis yapraklarının sarmal geometrisi sayesinde, kazık ekseninde, shaft üzerinden bir kuvvet momenti uygulanması sonucu döndürülerek zeminlere kurulumu gerçekleştirilmektedir. Bu kazıklar, hidrolik motorlar ile sağlanan aksel dönme hareketi sayesinde zeminlere monte edilirken bu işlemin kayda değer bir diğer özelliği de bu kazıkların zeminlere kurulumunun çok düşük düzeyde bir gürültü ve titreşim oluşturmalarıdır (Akbari Zare ve diğerleri, 2025).

Helisel kazıklar; kil, kum, buzul gibi çok çeşitli zemin profillerinde; basınç, çekme, yanal, eksantrik, dinamik gibi farklı yükleme koşulları altında mühendislik yapılarının temellerini desteklemek amacıyla kullanımı giderek yaygınlaşan bir derin temel elemanıdır (Türedi, 2025). Ek olarak, bu kazıkların sahada kurulumu nispeten kolay olmasının yanında erişimi güç konumlarda bile asgari çevresel etkiyle zeminlere monte edilebilmekte ve kazık kapasitesi kurulum esnasında ölçülen kurulum torkuyla da belirlenebildiğinden, helisel kazıklar; zeminlere yerleştirilmelerinin hemen ardından rahatlıkla yüklenebilmektedir (Perko, 2009; Harnish ve El Naggar, 2017; Christoni ve diğerleri, 2025). Helisel kazıklar; iletim kuleleri, açık deniz platformları ve rüzgâr türbinleri gibi yapılar için bir temel sistemi olarak geniş çapta kullanılmalarının yanı sıra, son yıllarda yenilenebilir enerji yapılarında da çakma kazıklara potansiyel bir alt seçenek olarak önerilmektedir (Hao ve diğerleri, 2022; Lin ve diğerleri, 2022).

Merkezindeki shafta kaynaklanmış helisel plakalara sahip bu kazıklar, geleneksel düz shaftlı kazıklara kıyasla daha yüksek taşıma kapasitesi ve çekme dayanımı sağladığından ötürü helisel kazıklar, çekme kuvvetlerine karşı koyan bir temel tekniği olarak kullanılır ve çekmeye karşı temelde meydana gelen kabarmayı veya yükselmeyi etkin bir şekilde kontrol eder (Venkatesan ve Mayakrishnan, 2022). Buna karşın helisel kazıklar; çekme yüküne karşı mukavemet sağlamak amacıyla uzun süredir kullanılıyor olsa da kurulum etkilerini de içeren çekme kapasitesi tahminleri, kazık tasarımında halen bir güçlük olarak sürmektedir (Wang ve diğerleri, 2020).

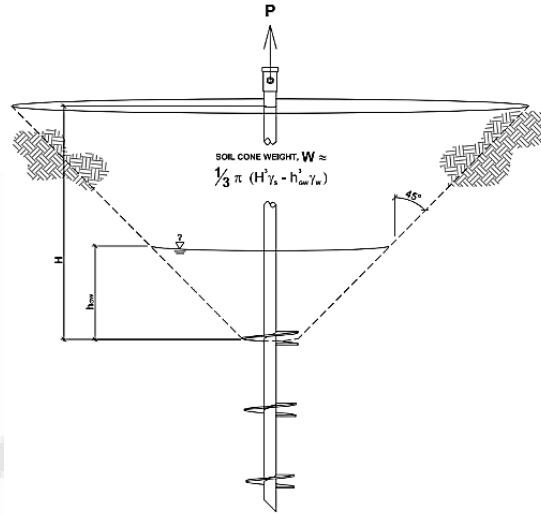
Bu çalışmada, model helisel kazıkların, kohezyonsuz sıkı zeminde, aksel çekme yükü etkisi altındaki davranışları; bilgisayar ortamında yürütülen sonlu elemanlar limit analizi yöntemi ile incelenmiştir. Farklı helis çapı (D), sayısı (N) ve aralığı (s) ile kazık gömülme derinliği (L) değerlerine sahip model helisel kazıklar; iki boyutlu aksel simetri geometrik idealizasyon yaklaşımıyla OPTUM G2 geoteknik tasarım programında sonlu elemanlar esaslı modellenmiştir. Laboratuvar koşullarında, aksel çekme yüküne maruz sıkı zemine gömülü on beş adet farklı özellikteki helisel kazık, sonlu elemanlar limit analizi ile çözümlenerek her bir analiz için kazıkların yenilme biçimleri ile maksimum çekme yükleri tespit edilmiştir.

2. YÖNTEM

Bu çalışma kapsamında, Tahiroğlu (2021) tarafından yapılan bir tez çalışmasında paylaşılan, laboratuvar ortamındaki sıkı kum zeminlerde çekme yüküne maruz helisel kazıkların tasarım verileri ve deneysel sonuçları; sayısal modelleme amacıyla kaynak olarak alınmıştır. Sayısal çözümlenmelerde, doğrulama örnekleri olarak seçilen on beş adet farklı tasarıma sahip helisel kazık, aksel doğrultuda çekme yüküne maruz bırakılarak konik yenilme davranışı ve maksimum çekme yükü gibi önemli mühendislik bulguları; bu çalışma içerisinde irdelenmiştir.

Eksel çekme yükü etkisi altındaki helisel kazıklarda, en üstteki helis plakasının üzerinde konik formdaki zemin kütlelerinin ağırlığından kaynaklanan ve kazığın yukarı yönlü hareketine karşı koyan aşağı yönlü bir zemin direnci oluşur iken bahsedilen bu konik çekme mekanizması, helisel plakaların sağladığı kenetlenme etkisi ile birleşerek kazığın yerinden çıkmasını engeller ve bu sayede, düz kazıklara kıyasla çok daha üstün bir çekme kapasitesi ve duraylılığı mümkün olur (Tahiroğlu, 2021).

Bir gömülü helisel kazık veya ankraj sisteminin nihai çekme kapasitesi; ankraj elemanının öz ağırlığı, potansiyel göçme yüzeyi boyunca devreye giren zemin-kazık arayüzeyi kayma direnci ve yenilme mekanizmasını teşkil eden zemin kütlelerinin ağırlığı toplamından oluşmaktadır (Demir ve Ok, 2015). Helisel kazıkların (ve helisel ankrajların) çekme yükü altındaki bu karakteristik davranışı, bir sığ göçme mekanizması göstergesi olan ve konik yenilme yüzeyi olarak bilinen bu durumun oluşmasına neden olur ve bu durumun gerekçesi, çekme yükünün, zeminin direncini aşması durumunda; **Şekil 1**'de gösterildiği üzere helis plakası ile zemin yüzeyi arasında uzanan ve yukarıya doğru genişleyen kesik bir koni biçimindeki zemin kütlelerinin yer değişiminden dolayı açıklanabilir (Mitsch ve Clemence, 1985; Ghaly ve diğerleri, 1991; Perko, 2009; Das ve Shukla, 2013; Cerfontaine ve diğerleri, 2020).



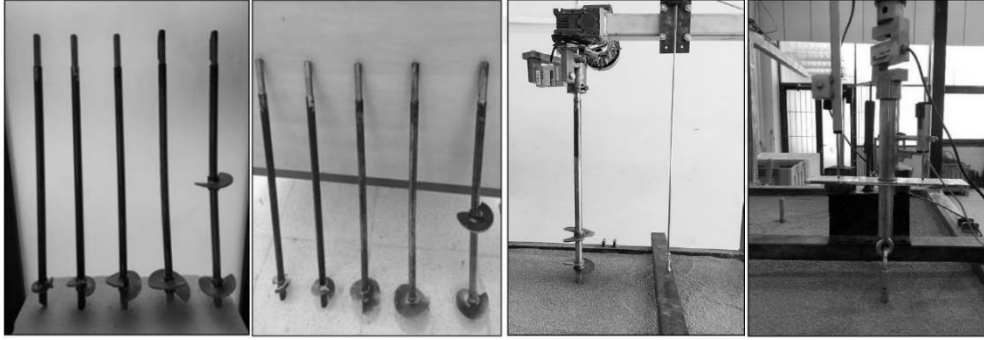
Şekil 1. Çekme yüküne maruz helisel kazıklarda örnek bir konik etki alanı (Perko, 2009)

Bu çalışmada, sonlu elemanlar limit analizi yöntemi yoluyla sıkı kum zeminde çekme yüküne maruz helisel kazıklar; OPTUM G2 (2025) geoteknik tasarım programında modellenerek konik yenilme davranışı ve maksimum çekme yükü değeri sayısal yollarla ortaya koyulmuştur. OPTUM G2 programı, içerisinde yerleşik olarak limit analiz başta olmak üzere elastoplastik, zemin su akışı, konsolidasyon ve kohezyon-içsel sürtünme açısı azaltma çözümlerini içeren, kütüphanesinde birçok zemin malzeme bünye modeli bulunan ve iki boyutlu düzlem gerilme ile eksenel simetri geometrik idealizasyon yaklaşımlarına sahip olan bir sonlu elemanlar yöntemi esaslı ileri seviye geoteknik tasarım yazılımıdır. Sonlu elemanlar limit analizi (FELA) ise geleneksel doğrusal olmayan sonlu elemanlar tekniklerinde olduğu gibi bir göçme yüküne zaman adımlarıyla ulaşmaktan ziyade mekanik bir sistem için üst-alt sınır plastik göçme yükünü iyileştirme teknikleri kullanarak doğrudan hesaplayan ve kinematik ya da denge formunda formüle edilebilen bir yöntemdir (Lysmer, 1970; Sloan, 1988; Krabbenhöft ve Lyamin, 2015; Martin, 2011). Sonlu elemanlar limit analizi, geomekanikte nihai taşıma kapasitesinin, nihai göçme yüklerinin ve nihai sıyırılma faktörlerinin sayısal olarak belirlenmesi ile şev duraylılığı benzeri stabilite problemlerinin çözülmesi gibi zemin mekaniğinde ve geoteknik mühendisliğinde çok geniş amaçlarla kullanılan en belirgin çözümlenme yöntemlerinden biridir (Krabbenhöft ve diğerleri, 2016; Lim ve diğerleri, 2017; Li ve diğerleri, 2022; Chen ve diğerleri, 2025; Dalal ve diğerleri, 2025; Schmüdderich ve diğerleri, 2025).

3. MODEL

Bu bölümde, sayısal çözümlerini doğrulayabilmek için daha önceden gerçekleştirilmiş deneysel verilere sahip bir tez çalışmasından alınan (Tahiroğlu, 2021) sıkı kum zeminlerde çekme yüküne maruz helisel kazıkların tasarım verileri kullanılmıştır ve on beş farklı laboratuvar deneyi OPTUM G2 geoteknik tasarım programında birebir modellenmiştir. Tahiroğlu (2021) tarafından yapılan tez çalışmasındaki bahsi geçen laboratuvar deneyleri, İskenderun Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Geoteknik Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir. Bu deneylerde kullanılan helisel kazıklar ile

laboratuvar deney ortamı genel görünümü Şekil 2’de; OPTUM G2 geoteknik tasarım yazılımı içerisinde sayısal modellemelerde kullanılan kohezyonsuz zemin ve model helisel kazık verileri ise Çizelge 1’de sunulmuştur.



Şekil 2. Doğrulama amaçlı esas alınan tez çalışmasından derlenen görüntüler (Tahiroğlu, 2021)

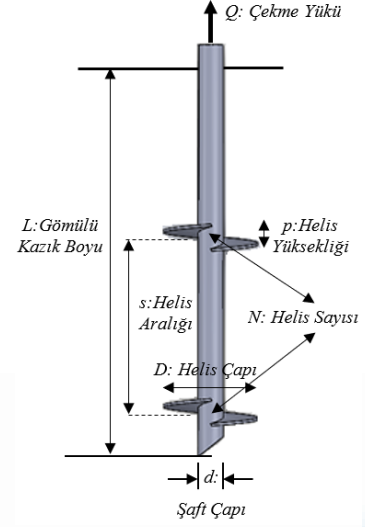
Çizelge 1. Sonlu elemanlar modellerinde kullanılan geoteknik tasarım verileri

Değişken	Değer
Zemin Türü	Sıkı Kum Zemin
Zemin Malzeme Modeli	MC (Elasto-Plastik)
Kohezyon Katsayısı (c), kPa	0
İçsel Sürtünme Açısı (ϕ), °	43
Elastisite Modülü (E), MPa	37.5
Poisson Oranı (ν)	0.3
Kuru Birim Hacim Ağırlık (γ_k), kN/m ³	16.5
Doygun Birim Hacim Ağırlık (γ_d), kN/m ³	19
Kazık Malzeme Modeli	LE (Doğrusal Elastik)
Kazık Young Modülü (E_p), MPa	2E+05
Kazık Akma Gerilmesi (σ_0), MPa	180

Çizelge 1’de verilen sonlu elemanlar modellerine ait geoteknik tasarım verileri; tüm limit analizi durumu çözümlerinde ortak olarak kullanılmıştır ve Çizelge 1’deki tasarım koşullarına ek olarak, her bir modelde helis çapına bağlı olarak değişen genişliklere ve azaltılmış geomekanik tasarım verilerine sahip bir örselenmiş sıkı zemin malzeme bölgesi tanımlanmıştır. Literatürde, helisel kazıkların kurulumları esnasında yaşanan örselenmenin etkisinin, sayısal analizlerde mutlaka dikkate alınması gerektiği ifade edilmektedir (Türedi, 2021; Annicchini ve diğerleri, 2023). Bu çalışmadaki tasarımlarda, kazık-zemin etkileşimi de göz önüne alınarak, kazık ile zemin arasında temas eden tüm etkin yüzeylerde bir etkileşim arayüzü tanımlanmış ve her bir model için uygun bir mukavemet azaltma faktörü katsayısı girişi yapılmıştır. Kurulan tüm modellerde ortak olarak aksel simetri geometrik yaklaşımı benimsenmiştir. Sınır koşulları ve hareket serbestliği açısından ise zemin yüzeyi sınırında tam hareket serbestliği tanımlanmış, zemin taban sınırında her iki yatay ve düşey yönde hareket kısıtlanmış, model yan yüzeylerinde ise sadece düşey doğrultuda yer değişimi serbestliği tanımlanmıştır. Çizelge 2’de, bu çalışma kapsamında modellenen, farklı değerlerdeki helis çapı (D), sayısı (N) ve aralığı (s) ile kazık gömülme derinliği (L) verilerine sahip helisel kazıkların yapısal boyutları sunulmuştur.

Çizelge 2. Modellenen helisel kazıkların tasarım değişkenleri

Deney No	D (mm)	L (mm)	N	s/D	L/D
2	60	600	1	-	10
3	80	600	1	-	7.5
4	100	600	1	-	6
5	120	600	1	-	5
6	100	600	2	1	6
7	100	600	2	1.5	6
8	100	600	2	2	6
9	100	600	2	2.5	6
10	100	600	2	3	6
11	100	600	3	1.5	6
12	100	600	3	2	6
13	100	500	1	-	5
14	100	400	1	-	4
15	100	300	1	-	3
16	100	200	1	-	2

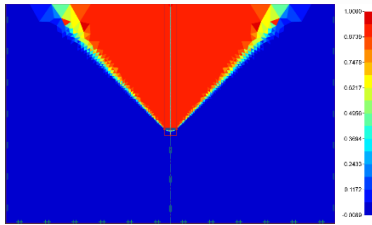


*NOT: Deney No: 1 (düz şaft) bu çalışmada dikkate alınmamıştır. Tüm kazıklar için $d=22$ mm ve $p=0.3D$ mm

4. ÇÖZÜMLEME

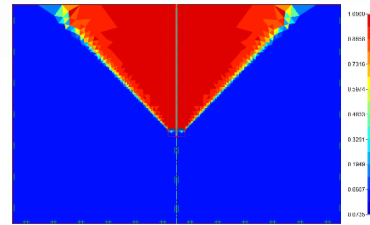
OPTUM G2 geoteknik tasarım yazılımında modellenen ve ayrıntıları bir önceki başlıkta sunulan farklı helis çapı (D), sayısı (N) ve aralığı (s) ile kazık gömülme derinliği (L) değerlerine sahip model helisel kazıklar, sonlu elemanlar limit analizi yöntemi kullanılarak aksenal çekme yükü etkisi altında sistem göçme anları belirlenmiştir. Sonlu elemanlar ağ dağılımının ve eleman-nokta dengesinin otomatik olarak probleme özgü gerçekleştirildiği ağ uyumluluğu dikkate alınarak tamamlanan sonlu elemanlar limit analizleri neticesinde, çekme yükü uygulanan helisel kazıkların göçme anı gerçekleştiğinde OPTUM G2 yazılımından modellere ait konik yenilme yüzeyi görüntüleri elde edilmiştir.

Helis çapının (D) değiştiği analizlerde (2,3,4,5) görülen yenilme biçimleri ve maksimum çekme yükleri (Q_{max}) Şekil 3'te, helis aralığının (s) değiştiği çözümlerlerde (6,7,8,9,10) belirlenen yenilme formları ve en yüksek çekme yükleri (Q_{max}) ise Şekil 4'te verilmiştir.



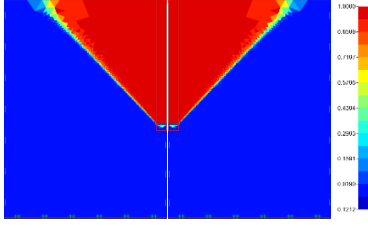
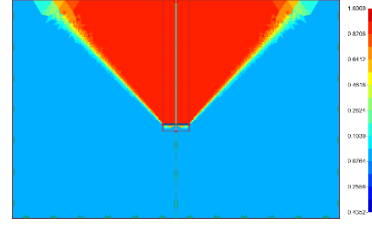
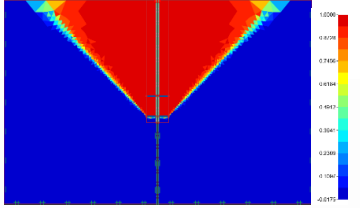
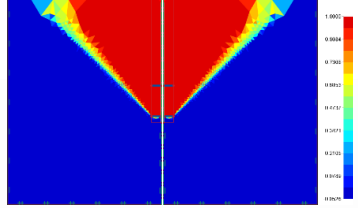
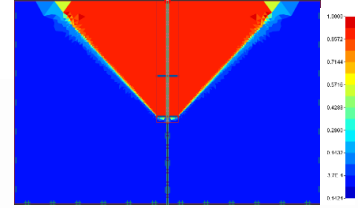
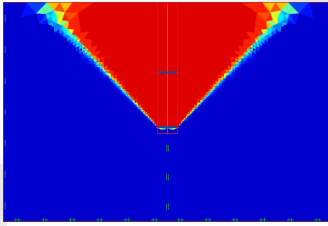
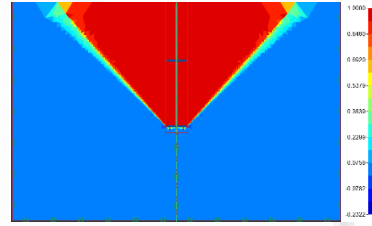
Deney No 2: $D=60$ mm

($Q_{max}=3.111$ kN)

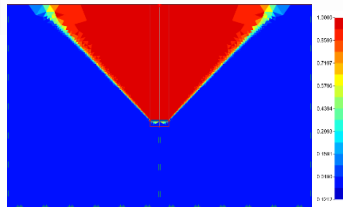
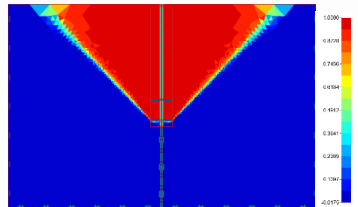
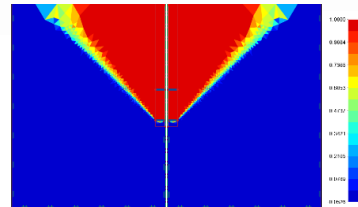


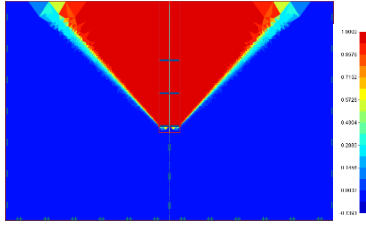
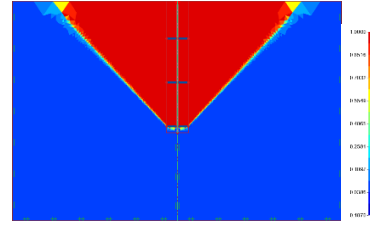
Deney No 3: $D=80$ mm

($Q_{max}=3.338$ kN)

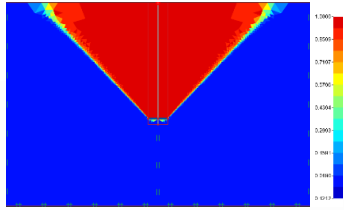
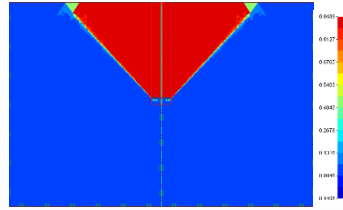
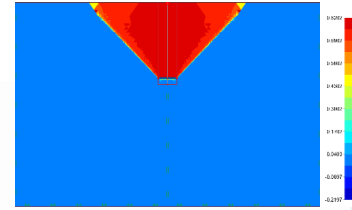
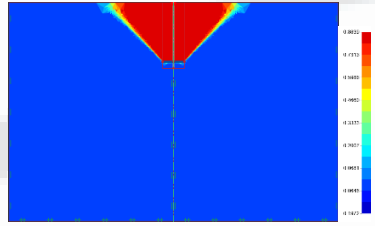
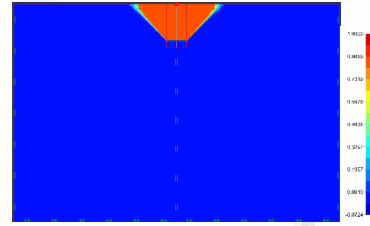
Deney No 4: $D=100\text{mm}$ $(Q_{max}=3.566\text{ kN})$ Deney No 5: $D=120\text{mm}$ $(Q_{max}=3.744\text{ kN})$ **Şekil 3.** Helis çapının değiştiği analizlerde gözlenen konik yenilme yüzeyleriDeney No 6: $s/D=1$ $(Q_{max}=3.448\text{ kN})$ Deney No 7: $s/D=1.5$ $(Q_{max}=3.534\text{ kN})$ Deney No 8: $s/D=2$ $(Q_{max}=3.621\text{ kN})$ Deney No 9: $s/D=2.5$ $(Q_{max}=3.519\text{ kN})$ Deney No 10: $s/D=3$ $(Q_{max}=3.558\text{ kN})$ **Şekil 4.** Helis aralığının değiştiği çözümler için konik yenilme biçimleri

Şekil 5'te değişen helis sayısına (N) sahip analizlerdeki (4,6,7,11,12) yenilme desenleri ve maksimum çekme yükleri (Q_{max}); Şekil 6'da farklı kazık gömülme derinliğindeki (L) çözümlerde (4,13,14,15,16) yenilme mekanizmaları ve en yüksek çekme yükleri (Q_{max}) verilmiştir.

Deney No 4: $N=1\ s/D=0$ $(Q_{max}=3.566\text{ kN})$ Deney No 6: $N=2\ s/D=1$ $(Q_{max}=3.448\text{ kN})$ Deney No 7: $N=2\ s/D=1.5$ $(Q_{max}=3.534\text{ kN})$

Deneysel No 11: $N=3$ $s/D=1$ $(Q_{max}=3.577 \text{ kN})$ Deneysel No 12: $N=3$ $s/D=1.5$ $(Q_{max}=3.581 \text{ kN})$

Şekil 5. Helis sayısının değiştiği analizlerde ortaya çıkan konik yenilme desenleri

Deneysel No 4: $L/D=6$ $(Q_{max}=3.566 \text{ kN})$ Deneysel No 13: $L/D=5$ $(Q_{max}=2.081 \text{ kN})$ Deneysel No 14: $L/D=4$ $(Q_{max}=1.092 \text{ kN})$ Deneysel No 15: $L/D=4$ $(Q_{max}=0.495 \text{ kN})$ Deneysel No 16: $L/D=2$ $(Q_{max}=0.173 \text{ kN})$

Şekil 6. Kazık gömülme derinliğinin değiştiği çözümler için konik yenilme mekanizmaları

5. BULGULAR

OPTUM G2'de yapılan modelleme ve çözümlene sonucunda bir önceki başlıkta paylaşılan konik yenilme yüzeylerine ek olarak her bir analiz için sonlu elemanlar limit analizi çözümü sayesinde maksimum çekme yükleri hesap edilmiş ve Tahiroğlu (2021) tarafından yapılan tez çalışmasındaki laboratuvar deney sonuçlarıyla beraber verilen en yüksek çekme yükleri değerleriyle Çizelge 3'te kıyaslanmıştır.

Çizelge 3. OPTUM G2'de yapılan sayısal çözümler ile Tahiroğlu (2021) tarafından yapılan tez çalışmasındaki laboratuvar deneylerinden alınan maksimum çekme yüklerinin kıyaslanması

Analiz No	OPTUM G2 Maksimum Çekme Yüğü (kN)	Tahiroğlu (2021) Maksimum Çekme Yüğü (kN)
2	3.111	2.352
3	3.338	2.755
4	3.566	3.293
5	3.744	3.706
6	3.448	2.607
7	3.534	2.961
8	3.621	3.906
9	3.519	2.986

Analiz No	OPTUM G2 Maksimum Çekme Yüğü (kN)	Tahiroğlu (2021) Maksimum Çekme Yüğü (kN)
10	3.558	2.973
11	3.577	3.238
12	3.581	3.459
13	2.081	1.825
14	1.092	0.734
15	0.495	0.324
16	0.173	0.117

6. SONUÇ

Bu çalışmada, kohezyonsuz kum zeminlere gömölü helisel kazıkların aksel çekme yüğü etkisi altındaki davranışları ve göçme anındaki yenilme biçimleri; OPTUM G2 yazılımında yer alan sonlu elemanlar limit analizi sayısal yöntemi ile incelenmiştir. Bu araştırma neticesinde ortaya koyulan bulgular ve yapılan nihai değerlendirmeler aşağıda maddeler halinde paylaşılmıştır:

- İki boyutlu bir sonlu elemanlar çözümleme yazılımı olan OPTUM G2 geoteknik tasarım programında, aksel çekme yüküne maruz on beş adet farklı özelliğe sahip model helisel kazık, göçme anındaki davranışlarını ortaya koymak amacıyla sonlu elemanlar limit analizi ile çözümlenmiştir. Farklı helis çapı (D), sayısı (N) ve aralığı (s) ile kazık gömölme derinliğine (L) sahip helisel kazıklar, sonlu elemanlar limit analizi yöntemiyle uygun malzeme modelleri, sınır şartları ve otomatik ağ uyumluluğu kullanılarak çözümlenmiş ve kazıklara ait konik yenilme desenleri ile göçme anındaki maksimum çekme yükleri, sayısal olarak elde edilmiştir.
- Maksimum çekme yükleri (Q_{max}) incelendiğinde, helis çapı (D) ve kazık gömölme derinliği (L) arttıkça çekme kapasitesinin arttığı belirlenmiştir. Helis aralığı (s) değişmesi durumunda, çekme kapasitesinde sürekli artış veya sürekli azalış gibi doğrusal bir tepki gözlenmemiştir. Helis sayısı (N) etkisi için tek helisli çözüm referans alındığında, iki helisli çözümlerde çekme kapasitesinde net bir artış gerçekleşmez iken üç helisli kazıklarda çekme kapasitesi artmıştır.
- Laboratuvar ortamında üç boyutlu olarak gerçekleştirilen fiziksel çekme testleri; sayısal ortamda iki boyutlu bir probleme indirgenerek aksel simetri geometrik yaklaşımıyla OPTUM G2 yazılımında başarıyla modellenmiştir. Sonlu elemanlar limit analiz yöntemine göre yapılan çözümlemelerde hesaplanan çekme yükleri; deneysel bulgularla kıyaslandığında, göçme anındaki maksimum çekme yüğü değerleri arasındaki farkın ortalaması yaklaşık %22 olarak bulunmuştur. Ayrıca, OPTUM G2 yazılımından alınan analiz çıktılarına göre göçme anındaki konik yenilme yüzeylerinin varlığı da görsel olarak ortaya koyulmuştur.
- Geleneksel sayısal analiz yaklaşımlarından biri olan doğrusal olmayan sonlu elemanlar çözümlemelerinde, göçme anına artımsal zaman adımlarıyla ulaşmaya çalışılır iken klasik olarak nihai kapasitenin tayini yük-deplasman ilişkisi üzerinden belirlenmektedir. Buna karşın, aynı zamanda bu çalışmanın yenilikçi ve özgün yanı olarak, mevcut sistemin göçme anında, helisel kazığın kapasitesini ifade eden maksimum çekme yüğü değerleri; alt sınır-üst sınır plastik göçme yüğü ve devamında takip eden optimizasyonlar sonucu doğrudan sonlu elemanlar limit analizi yoluyla hesaplanmıştır.
- Sonlu elemanlar limit analizi yöntemini bünyesinde barındıran, otomatik ağ uyumluluğu destekli çözümleme olanakları sağlayan ve düzlem gerilme-aksel simetri gibi üç boyutlu problemleri iki boyuta indirgeme yaklaşımlarına sahip olan OPTUM G2 geoteknik yazılımı, bu yönüyle birçok farklı kazık-zemin etkileşimli çalışmada kullanılabilceği ön görülmektedir.

6. KAYNAKÇA

- Akbari Zare, A., Eslami, A., Razmkhah, A., & Vosoughifar, H. (2025). Investigation of the Load–Displacement Behavior of Helical Piles in Sand Through Novel Instrumentation. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 1-13.
- Annicchini, M. M., Schiavon, J. A., & Tsuha, C. D. H. C. (2023). Effects of installation advancement rate on helical pile helix behavior in very dense sand. *Acta Geotechnica*, 18(5), 2795-2811. <https://doi.org/10.1007/s11440-022-01713-3>

- Cerfontaine, B., Knappett, J., Brown, M. J., Davidson, C., & Sharif, Y. (2020). Optimised design of screw anchors in tension in sand for renewable energy applications. *Ocean Engineering*, 217, 108010. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.108010>
- Chen, X., Wang, Z., Kong, D., Lou, X., & Zhu, B. (2025). Development of an adaptive meshing upper bound limit analysis method for large deformation axisymmetric geotechnical problems. *Scientific Reports*, 15(1), 5771. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-89033-w>
- Christoni, A. R. F., Santos Filho, J. M. S. M., Morais, T. S. O., & Tsuha, C. H. C. (2025). Field investigation of a multi-helix pile under tensile axial cyclic loading. *Proceedings of ISFOG 2025 5th International Symposium on Frontiers in Offshore Geotechnics*. Nantes, June 9-13 2025.
- Dalal, P., Chavda, J. T., & Solanki, C. H. (2025). FELA Evaluation of uplift, lateral and inclined capacity of buried pipeline in layered clays. *Journal of Pipeline Science and Engineering*, 5(1), 100226.
- Das, B. M., & Shukla, S. K. (2013). *Earth anchors*. Second edition. J. Ross Publishing, May, 2013.
- Demir, A., & Ok, B. (2015). Helisel Ankraj Plakalarının Tabakalı Zeminlerdeki Çekme Kapasitelerinin İncelenmesi. *Selçuk Üni. Mühendislik, Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 3(2), 25-38.
- Ghaly, A. M., Hanna, A. M., & Hanna, M. (1991). Uplift behavior of screw anchors in sand. I: Dry sand. *Journal of Geotechnical Engineering*, 117(5), 773-793.
- Hao, D., Che, J., Chen, R., Zhang, X., Yuan, C., & Chen, X. (2022). Experimental investigation on behavior of single-helix anchor in sand subjected to uplift cyclic loading. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(10), 1338. <https://doi.org/10.3390/jmse10101338>
- Harnish, J. L., & El Naggar, M. H. (2017). Large-diameter helical pile capacity–torque correlations. *Canadian Geotechnical Journal*, 54(7), 968-986.
- Krabbenhøft, K., & Lyamin, A. V. (2015). Strength reduction finite-element limit analysis. *Géotechnique Letters*, 5(4), 250-253. <https://doi.org/10.1680/jgele.15.00110>
- Krabbenhøft, K., Lyamin, A., ve Krabbenhøft, J. (2016). *OPTUM G2*. Optum Computational Engineering: Optum CE, Copenhagen, Denmark.
- Li, A. J., Mburu, J. W., Chen, C. W., & Yang, K. H. (2022). Investigations of silty soil slopes under unsaturated conditions based on strength reduction finite element and limit analysis. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 26(3), 1095-1110. <https://doi.org/10.1007/s12205-021-1162-y>
- Lim, K., Li, A. J., Schmid, A., & Lyamin, A. V. (2017). Slope-stability assessments using finite-element limit-analysis methods. *International Journal of Geomechanics*, 17(2), 06016017.
- Lin, Y., Xiao, J., Le, C., Zhang, P., Chen, Q., & Ding, H. (2022). Bearing characteristics of helical pile foundations for offshore wind turbines in sandy soil. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(7), 889. <https://doi.org/10.3390/jmse10070889>
- Lysmer, J. (1970). Limit analysis of plane problems in soil mechanics. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division ASCE* 96(4), 1311–1334.
- Martin, C. M. (2011). The use of adaptive finite-element limit analysis to reveal slip-line fields. *Géotechnique Letters*, 1(2), 23-29. <https://doi.org/10.1680/geolett.11.00018>
- Mitsch, P. M., & Clemence, P. S. (1985). The uplift capacity of helix anchors in sand. *Part of Uplift Behavior of Anchor Foundation in Soil – ASCE*, 26-47.
- OPTUM G2. (2025). Academic License. 2D Geotechnical Design & Analysis Software, Optum.
- Perko, H. A. (2009). *Helical piles: A practical guide to design and installation*. Wiley & Sons, Inc.
- Qu, S., Guo, Y., & Zhang, Q. (2025). Theoretical and Experimental Investigation of Torque and Crowd Force on Helical Piles in $c-\phi$ Soil. *International Journal of Civil Engineering*, 1-33.

- Schmüdderich, C., Herz, C., Albared, A., Machaček, J., Prada-Sarmiento, L. F., Staubach, P., & Wichtmann, T. (2025). A two-step dynamic FEM-FELA approach for seismic slope stability assessment. *Acta Geotechnica*, 20(1), 303-322. <https://doi.org/10.1007/s11440-024-02443-4>
- Sloan, S. (1988). Lower bound limit analysis using finite elements and linear programming. *Int. J. Num. Anal. Meth. in Geomech.* 12(4), 61–77.
- Tahiroğlu, M. (2021). Helisel Kazıklarda Çekme Davranışının Deneysel ve Sayısal Analizler ile Araştırılması (Yüksek Lisans Tezi). Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, 2021, Adana.
- Türedi, Y. (2021). Basınç yüküne maruz helisel kazık davranışının laboratuvar ve arazi deneyleri ile araştırılması (Doktora Tezi). İskenderun Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, 2021, Hatay.
- Türedi, Y. (2025). Helisel Kazıkların Tarihsel Gelişimi ve Günümüzdeki Uygulama Alanları. *International Journal of Advanced Natural Sciences and Engineering Researches*, 7(11), 128–132.
- Venkatesan, V., & Mayakrishnan, M. (2022). Behavior of mono helical pile foundation in clays under combined uplift and lateral loading conditions. *Applied Sciences*, 12(14), 6827.
- Wang, L., Zhang, P., Ding, H., Tian, Y., & Qi, X. (2020). The uplift capacity of single-plate helical pile in shallow dense sand including the influence of installation. *Marine Structures*, 71, 102697.

Makale id= 59

Sözlü Sunum

ORCID ID: 0000-0001-6671-7045

| 128

Çapı En Fazla İki Olan Bazı Grafların G^{xy+} Transformasyonlarında Yarı Toplam Baskınlık Sayısı**Öğr. Gör. Dr Zeliha Kartal Yıldız¹**
¹İzmir Kavram Meslek Yüksekokulu

Özet: Gerçek dünya ağlarının yapısal analizinde, düğüm (tepe) noktalarının ağ üzerindeki etkisini ve rolünü belirlemek önemli bir araştırma alanıdır. Bu bağlamda, baskınlık ve buna dayalı türetilmiş kavramlar, ağ içerisindeki kontrol ve etki bölgelerinin belirlenmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu çalışmada, baskınlık ve toplam baskınlık kavramlarının genişletilmesiyle elde edilmiş olan yarı toplam baskınlık kavramı ele alınmıştır. İzole tepe içermeyen bir G grafinde, bir S tepe kümesi, hem baskın küme olma özelliğini taşıyorsa hem de her bir elemanı, küme içinde en fazla uzaklığı iki olan başka bir tepeyle bağlantılıysa, bu küme yarı toplam baskın küme olarak tanımlanır. Bu tür kümelerin en küçük eleman sayısı, grafin yarı toplam baskınlık sayısı $\gamma t_2(G)$ olarak adlandırılır. Bu çalışmada, G^{xy+} transformasyonları altında oluşan graflar incelenmiş ve bu bağlamda tekerlek grafi (W_n), iki parçalı tam grafi ($K_{m,n}$), tam grafi (K_n) ve yıldız grafi (S_n) için yarı toplam baskınlık sayıları belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar, bu temel grafi türlerinden türetilen daha karmaşık ağ yapılarında, kritik düğümlerin belirlenmesinde yapısal olarak tutarlı ve etkili bir yaklaşım sunmaktadır. Bu bağlamda, önerilen yöntem iletişim, sosyal ve bilgisayar ağlarında düğüm seçimi ve kontrol noktalarının tespiti açısından uygulama potansiyeline sahiptir.

Anahtar Kelimeler: Grafi Teori, Baskınlık, Yarı Toplam Baskınlık, Transformasyon Grafları

Semitotal Domination Number in G^{xy+} Transformations of Some Graphs With Diameter At Most Two

Abstract: In the structural analysis of real-world networks, determining the influence and role of nodes (vertices) in a network is a significant research area. In this context, domination and related derived concepts are widely used in identifying control and influence regions within a network. This study focuses on the concept of semitotal domination, which is an extension of domination and total domination. In a graph G without isolated vertices, a set S of vertices is called a semitotal dominating set if it is a dominating set and each of its elements is at most distance 2 from another vertex in the set. The smallest cardinality of such sets is the semitotal domination number, denoted $\gamma t_2(G)$. This study examines graphs obtained under G^{xy+} transformations and determines the semitotal domination numbers for wheel graphs (W_n), complete bipartite graphs ($K_{m,n}$), complete graphs (K_n), and star graphs (S_n). The results offer a consistent and effective structural approach to identifying critical nodes in more complex networks derived from these basic graph types. Accordingly, the proposed method has potential applications in communication, social, and computer networks for node selection and control point detection.

Keywords: Graph Theory, Domination, Semitotal Domination, Transformation Graphs

1. GİRİŞ

Grafi teori, matematiksel yapıların tepeler ve bu tepeleri birbirine bağlayan ayrıtlar aracılığıyla modellenmesini sağlayan önemli bir araçtır. Bilgisayar bilimi, iletişim ağları, sosyal ağ analizi gibi birçok alanda yaygın biçimde kullanılmaktadır. $G(V(G), E(G))$ ile temsil edilen graflarda $V(G)$ tepeler kümesini, $E(G)$ ayrıtlar kümesini göstermektedir. Bir G grafinin her bir tepe çifti arasındaki uzaklıkların maksimumuna çap denirken, bir tepeye bağlı ayrıt sayısına da o tepenin derecesi denir ve $deg_G(v)$ ile gösterilir (Chartrand ve Lesniak, 2004). Grafi teori alanında yaygın olarak çalışılan alt alanlardan biri

baskınlıktır. Bir $S \subseteq V(G)$ tepeler kümesinin baskın küme olması için G grafindaki tüm tepelerin ya S kümesinde olması ya da S kümesindeki tepelerden herhangi birine komşu olması gerekir. Elde edilen bu baskın kümelerden en az sayıda tepeye sahip olan kümenin eleman sayısına grafin baskınlık sayısı denir ve $\gamma(G)$ ile gösterilir. Baskın kümeler, ağlarda izleme, kontrol, veri yayılımı ve kapsama alanı gibi pek çok pratik uygulamada temel çözümleme araçlarıdır. Bu kavram, özellikle **Haynes, Hedetniemi ve Slater** tarafından yapılan kapsamlı çalışmalarla (Haynes vd.,1998a; Haynes ve Hedetniemi, 1998b), hem teorik temelleriyle hem de uygulamalı yönleriyle derinlemesine ele alınmıştır. Bu çalışmalar, baskınlık kuramının temel yapı taşlarını ortaya koyarak sonraki pek çok araştırmaya zemin hazırlamıştır. Ancak gerçek dünya ağlarında yalnızca doğrudan komşuluk ilişkisi yeterli olmayabilir. Bu nedenle, klasik baskınlık kavramı zamanla genişletilmiş ve **toplam baskınlık, yarı toplam baskınlık** gibi daha farklı ölçütler geliştirilmiştir. Bu çalışmada odaklanılan ve Goddard, Henning ve McPillan tarafından 2014 yılında tanımlanan yarı toplam baskınlık kavramında, bir kümenin baskın olmasının yanı sıra, kümedeki her tepe noktasının yine aynı kümede yer alan başka bir tepe ile en fazla iki uzaklık içinde olması gerekmektedir (Goddard vd., 2014). Bu yönüyle yarı toplam baskınlık, ağın iç yapısal bütünlüğünü daha bütüncül şekilde analiz etmeye olanak tanımakta ve klasik baskınlık kuramının ötesinde, etkileşim kapasitesinin daha hassas biçimde değerlendirilmesini sağlamaktadır. Bir grafin yarı toplam baskınlık sayısı, en az elemana sahip yarı toplam baskın kümenin eleman sayısıdır ve $\gamma_{t_2}(G)$ ile gösterilir. Yarı toplam baskınlık sayısını veren kümeye de γ_{t_2} -set denir.

2. BİLİNEN SONUÇLAR

Bu bölümde, çalışmanın bütünlüğünü sağlamak ve sunulan ispatların anlaşılabilirliğini artırmak amacıyla kullanılan temel teoremler sunulacaktır.

Gözlem 2.1. $n - 1$ dereceli bir tepeye sahip bir G grafi için yarı toplam baskınlık sayısı $\gamma_{t_2}(G) = 2$ dir.

Gözlem 2.2. Eğer G izole tepe içermeyen bir graf ise $\gamma_{t_2}(G) \geq 2$ dir.

Teorem 2.3. (Goddard vd., 2014) Eğer G izole tepe içermeyen bir graf ise $\gamma(G) \leq \gamma_{t_2}(G) \leq \gamma_t(G)$ dir.

Teorem 2.4. (Goddard vd., 2014) C_n, n tepeli bir çevre graf olmak üzere $\gamma(C_n) = \left\lfloor \frac{n}{3} \right\rfloor$ dür.

Teorem 2.5. (Turacı, T., 2012) $W_{1,n}$ $n + 1$ tepeli bir tekerlek graf olsun. Bu durumda $\gamma(W_{1,n}^{+++}) = \left\lfloor \frac{n+3}{3} \right\rfloor$ dür.

Teorem 2.6. (Turacı, T., 2012) $W_{1,n}$ $n + 1$ tepeli bir tekerlek graf olsun. Bu durumda $\gamma(W_{1,n}^{+-+}) = 3$ dür.

Teorem 2.7. (Turacı, T., 2012) K_n n tepeli bir tam graf olsun. Bu durumda $\gamma(K_n^{-++}) = \left\lfloor \frac{n}{2} \right\rfloor$ dir.

Teorem 2.8. (Turacı, T., 2012) $W_{1,n}$ $n + 1$ tepeli bir tekerlek graf olsun. Bu durumda $\gamma(W_{1,n}^{--+}) = 4$ dür.

3. TRANSFORMASYON GRAFLARDA YARI TOPLAM BASKINLIK

Bu bölümde, transformasyon graf tanımı verilip G^{xyz} dönüşümlerinin nasıl elde edildiği anlatılacaktır. Daha sonra, çapı en fazla iki olan bazı bilinen graflar sınıflarının - $K_n, S_{1,n}, W_{1,n} - G^{+++} G^{++-} G^{-++}$ dönüşümleri altında elde edilen yarı toplam baskınlık sonuçları verilecektir.

Tanım: (Wu ve Meng, (2001)) $G = (V(G), E(G))$ bir graf ve x, y, z değişkenleri $\{+, -\}$ değerlerini alan üç parametre olsun. G^{xyz} transformasyon grafinin tepe kümesi $V(G) \cup E(G)$ 'dir. $a, b \in V(G) \cup E(G)$ olmak üzere, a ile b 'nin G^{xyz} 'de komşu olması için gerekli ve yeterli koşullar:

- Eğer $a, b \in V(G)$ ise:

$x = +$: a ile b , G grafinda komşudur.

$x = -$: a ile b , G grafinda komşu değildir.

- $a, b \in E(G)$

$y = +$: a ile b , G grafinda komşudur

$y = -$: a ile b , G grafinda komşu değildir.

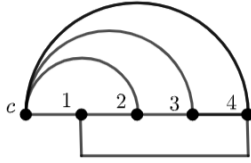
- $a \in V(G), b \in E(G)$ (veya tersi) ise:

$z = +$: a ile b , G grafında komşudur.

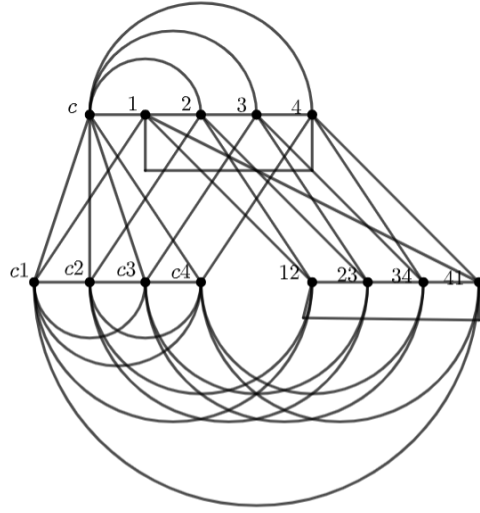
$z = -$: a ile b , G grafında komşu değildir

Şekil 1'de transformasyon graf oluşumuna örnek olarak $W_{1,4}$ tekerlek grafi ve G^{+++} dönüşümü altında elde edilen $W_{1,4}^{+++}$ grafi verilmiştir.

Şekil 1. (a) $W_{1,4}$ tekerlek grafi, (b) $W_{1,4}^{+++}$ transformasyon grafi



(a)



(b)

3.1. G^{+++} Transformasyon Grafları

Teorem 3.1.1. $S_{1,n}$, $n + 1$ tepeli bir yıldız graf olsun. Bu durumda, $S_{1,n}^{+++}$ transformasyon grafinin yarı toplam baskınlık sayısı de $\gamma_{t2}(S_{1,n}^{+++}) = 2$ dir.

İspat. $S_{1,n}$ yıldız grafında yer alan merkez tepeli c ile adlandıralım. c tepesi, G^{+++} dönüşümü altındaki $S_{1,n}^{+++}$ grafında tüm tepeler ile komşudur. Yani $deg_{S_{1,n}^{+++}}(c) = |V(S_{1,n}^{+++})| - 1$ dir. Böylece Gözlem 2.1.'den $\gamma_{t2}(S_{1,n}^{+++}) = 2$ elde edilir.

Teorem 3.1.2. $W_{1,n}$, $n + 1$ tepeli bir tekerlek graf olsun. Bu durumda, $W_{1,n}^{+++}$ grafının yarı toplam baskınlık sayısı $n \geq 6$ için $\gamma_{t2}(W_{1,n}^{+++}) = \left\lfloor \frac{n}{3} \right\rfloor + 1$ dir.

İspat. S kümesi, $W_{1,n}^{+++}$ grafi için bir γ_{t2} -set olsun. $W_{1,n}$ grafının merkez tepesini c ile isimlendirelim. $W_{1,n}^{+++}$ grafi $W_{1,n}$, K_n ve C_n alt graflarını içerir. c tepesi $W_{1,n}$ ve K_n alt graflarındaki tüm tepelere komşudur. Bu durumda, $\{c\} \subseteq S$ olması gerekir. Böylece $W_{1,n}^{+++}$ grafiadaki $W_{1,n}$, ve K_n alt graflarının tüm tepeleri bastırılmış olur. Geriye sadece C_n alt grafinin tepeleri kalır. $\forall u \in V(C_n)$ için $d_{W_{1,n}^{+++}}(c, u) = 2$ olduğundan S kümesine $\gamma(C_n)$ tane tepenin eklenmesi gerekir. Böylece, $\gamma_{t2}(W_{1,n}^{+++}) \leq 1 + \gamma(C_n)$ elde edilir. Teorem 2.4'den, $\gamma_{t2}(W_{1,n}^{+++}) \leq 1 + \left\lfloor \frac{n}{3} \right\rfloor$ olduğu görülmektedir. Ayrıca Teorem 2.3. ve Teorem 2.5.'den $\gamma_{t2}(W_{1,n}^{+++}) \geq \gamma(W_{1,n}^{+++}) = \left\lfloor \frac{n+3}{3} \right\rfloor$ olduğu bilinmektedir. Alt ve üst sınırdan $W_{1,n}^{+++}$ transformasyon grafinin yarı toplam baskınlık sayısı $\gamma_{t2}(W_{1,n}^{+++}) = \left\lfloor \frac{n}{3} \right\rfloor + 1$ elde edilir.

Teorem 3.1.3. K_n , n tepeli bir tam graf olsun. Bu durumda, K_n^{+++} grafının yarı toplam baskınlık sayısı $\gamma_{t2}(K_n^{+++}) = \lfloor \frac{n}{2} \rfloor$ dir.

İspat. S kümesi, K_n^{+++} grafi için bir γ_{t2} -set olsun. $L(K_n) \subset K_n^{+++}$ alt grafında yer alan ij $i \in \{1, 2, \dots, n-1\}, j \in \{i+1, \dots, n\}$ tepelerini i indisine göre gruplandığımızda $n-1$ tane grup yer almaktadır ve herhangi bir ij tepesi S kümesine eklendiğinde, i . ve $(i+1)$. gruplardaki tüm tepeler bastırılmış olur. Ayrıca $K_n \subset K_n^{+++}$ alt grafındaki i ve j tepeleri de bastırılmış olur. Eğer n çift ise $L(K_n) \subset K_n^{+++}$ alt grafındaki $\{1, 2, 3, 4, \dots, (n-1)n\}$ tepeleri S kümesine alınarak tüm tepeler bastırılmış olur ve $|S| = \frac{n}{2}$ elde edilir. Eğer n tek ise $L(K_n) \subset K_n^{+++}$ alt grafındaki $\{1, 2, 3, 4, \dots, (n-2)n-1\}$ tepeleri S kümesine alınarak n tepesi hariç tüm tepeler bastırılmış olur. n tepesini bastırmak için S kümesine bir tepe daha eklenmesi gerekir ve böylece $|S| = \frac{n}{2} + 1$ elde edilir. Sonuç olarak, iki durum birleştirildiğinde $\gamma_{t2}(K_n^{+++}) = |S| = \lfloor \frac{n}{2} \rfloor$ elde edilir.

3.2. G^{+-+} Transformasyon Grafları

Teorem 3.2.1. $S_{1,n}$, $n+1$ tepeli bir yıldız graf olsun. Bu durumda $S_{1,n}^{+-+}$ grafının yarı toplam baskınlık sayısı $\gamma_{t2}(S_{1,n}^{+-+}) = 2$ dir.

İspat. $S_{1,n}$ yıldız grafında yer alan merkez tepesi c ile adlandıralım. G^{+-+} dönüşümü altında c merkez tepesi $V(S_{1,n}^{+-+}) - \{c\}$ kümesindeki tüm tepeler ile komşudur. Dolayısıyla, $deg_{S_{1,n}^{+-+}}(c) = |V(S_{1,n}^{+-+})| - 1$ dir. Teorem 2.1.'den $\gamma_{t2}(S_{1,n}^{+-+}) = 2$ elde edilir.

Teorem 3.2.2. $W_{1,n}$ $n+1$ tepeli bir tekerlek graf olsun. Bu durumda, $n > 5$ için $W_{1,n}^{+-+}$ grafının yarı toplam baskınlık sayısı $\gamma_{t2}(W_{1,n}^{+-+}) = 3$ dür.

İspat. S kümesi, $W_{1,n}^{+-+}$ grafi için bir γ_{t2} -set olsun. $W_{1,n}$ grafının merkez tepesini c ile adlandıralım. c tepesi G^{+-+} grafının yapısı gereği $V(W_{1,n}) - \{c\} \cup \{1u, u \in \{1, 2, \dots, n+1\}\}$ kümesindeki her tepe ile komşudur. Dolayısıyla $c \in S$ olmalıdır. Geriye bastırılmamış $\{2, 3, 4, \dots, (n+1)1\}$ tepeleri kalır. Bunlar için de $\{x, y\} \cap \{z, w\} = \emptyset$ olacak şekilde S kümesine 2 tane xy ve zw tepelerinin eklenmesiyle tüm tepeler bastırılmış olur. Aynı zamanda S kümesi içerisindeki tepeler iki uzaklık içinde olduğundan $\gamma_{t2}(W_{1,n}^{+-+}) \leq 3$ elde edilir. Teorem 2.3. ve Teorem 2.6'dan $\gamma_{t2}(W_{1,n}^{+-+}) \geq 3$ olduğu görülmektedir. Alt ve üst sınırlardan $\gamma_{t2}(W_{1,n}^{+-+}) = 3$ elde edilir.

Teorem 3.2.3. K_n , n tepeli bir tam graf olsun. Bu durumda, K_n^{+-+} grafının yarı toplam baskınlık sayısı $\gamma_{t2}(K_n^{+-+}) = 3$ dür.

İspat. S kümesi, K_n^{+-+} grafi için bir γ_{t2} -set olsun. $\overline{L(K_n)} \subset K_n^{+-+}$ grafında yer alan ij $i \in \{1, 2, \dots, n-1\}, j \in \{i+1, \dots, n\}$ tepelerini i indisine göre gruplandığımızda $n-1$ tane grup yer almaktadır ve herhangi bir ij tepesi S kümesine eklendiğinde i ve j grupları hariç $\overline{L(K_n)}$ grafındaki tüm tepeler bastırılmış olur. K_n grafından i ve j tepeleri S kümesine eklenerek hem K_n grafındaki tüm tepeler hem de $\overline{L(K_n)}$ grafında yer alan i ve j gruplarındaki tüm tepeler bastırılmış olur. S kümesi içerisindeki iki uzaklık koşulu da sağlandığından $\gamma_{t2}(K_n^{+-+}) = |S| = 3$ elde edilir.

3.3. G^{-++} Transformasyon Grafları

Teorem 3.3.1. $S_{1,n}$, $n+1$ tepeli bir yıldız graf olsun. Bu durumda $S_{1,n}^{-++}$ grafının yarı toplam baskınlık sayısı $\gamma_{t2}(S_{1,n}^{-++}) = 2$ dir.

İspat. $S_{1,n}$ yıldız grafının merkez tepesini c ile adlandıralım. G^{-++} dönüşümü altında c tepesi $L(S_{1,n}) \subset S_{1,n}^{-++}$ alt grafındaki tüm tepelere komşudur. Geriye bastırılmamış $\overline{S_{1,n}} - \{c\}$ alt grafındaki tepeler kalır. Bu yapı da bir tam graf olduğundan bir tepenin alınmasıyla hepsi bastırılmış olur. Ayrıca Teorem 2.2.'den $\gamma_{t2}(S_{1,n}^{-++}) \geq 2$ olduğu bilinmektedir. Sonuç olarak $\gamma_{t2}(S_{1,n}^{-++}) = 2$ elde edilir.

Teorem 3.3.2. K_n n tepeli bir tam graf olsun. Bu durumda, K_n^{-++} grafının yarı toplam baskınlık sayısı $\gamma_{t2}(K_n^{-++}) = \lfloor \frac{n}{2} \rfloor$ dir.

İspat. İspat, Teorem 3.1.3'ün ispatına benzer şekilde yapılır.

3.4. G^{--+} Transformasyon Grafları

Teorem 3.4.1. $S_{1,n}$, $n + 1$ tepeli bir yıldız graf olsun. Bu durumda, $S_{1,n}^{--+}$ transformasyon grafının yarı toplam baskınlık sayısı $\gamma_{t2}(S_{1,n}^{--+}) = 2$ dir.

İspat. $S_{1,n}$ yıldız grafında yer alan merkez tepeyi c ile adlandıralım. c tepesi, G^{--+} dönüşümü altında $L(S_{1,n}) \subset S_{1,n}^{--+}$ alt grafindaki tüm tepeler ile komşudur. Ayrıca $L(S_{1,n}) - \{c\}$ alt grafi de bir tam graf oluşturduğundan, bu tepelerin herhangi bir tanesi ile diğer tepeler bastırılmış olur. Böylece $S = \{u, ci \mid u \in \{1, 2, \dots, n - 1\}, i \in \{1, 2, \dots, n - 1\}\}$ kümesi $S_{1,n}^{--+}$ grafi için bir γ_{t2} -settir ve $\gamma_{t2}(S_{1,n}^{--+}) = 2$ elde edilir.

Teorem 3.4.2. $W_{1,n}$, $n + 1$ tepeli bir tekerlek graf olsun. Bu durumda, $n \geq 6$ için $W_{1,n}^{--+}$ transformasyon grafının yarı toplam baskınlık sayısı $\gamma_{t2}(W_{1,n}^{--+}) = 4$ tür.

İspat. Teorem 2.3 ve Teorem 2.8'den $\gamma_{t2}(W_{1,n}^{--+}) \geq \gamma(W_{1,n}^{--+}) = 4$ olduğu biliniyor. $W_{1,n}$ grafının merkez tepesini c ile adlandıralım. S kümesi de $W_{1,n}^{--+}$ grafi için bir yarı toplam baskın küme olsun. $W_{1,n}^{--+}$ grafının en büyük dereceli tepeleri $V(L(W_{1,n})) - \{c1, c2, \dots, cn\}$ tepeleri olduğundan S kümesine 12 tepesini ekleyerek işleme başlayalım. 12 tepesi ile $\{1, 2, c3, \dots, cn, 34, 45, \dots, n1\}$ tepeleri bastırılmış olur. 34 tepesi ile $\{c1, c2, 3, 4\}$ tepeleri bastırılmış olur. 2 tepesi ile $W_{1,n} - \{c\}$ alt grafinda bastırılmamış tüm tepeler de bastırılmış olur. Geriye sadece c tepesi kalır. Bu tepenin de S kümesine eklenmesiyle tüm tepeler bastırılmış olur ve S kümesi içerisinde iki uzaklık koşulu da sağlandığından, $\gamma_{t2}(W_{1,n}^{--+}) \leq |S| = 4$ elde edilir. Böylece alt ve üst sınırdan ispat tamamlanır.

4. SONUÇ

Bu çalışmada, graf teorisinin önemli konularından biri olan **yarı toplam baskınlık** kavramı, çapı en fazla iki olan bazı temel graf türleri üzerinde yapılan G^{xy+} **transformasyonları** bağlamında incelenmiştir. Transformasyon graf kavramı üzerinden yapılan analizlerde, yıldız grafi $S_{1,n}$, tekerlek grafi $W_{1,n}$, tam graf K_n gibi yaygın kullanılan graf sınıfları ele alınmış ve bu grafların çeşitli G^{xy+} dönüşümleri altında elde edilen yeni yapılar için **yarı toplam baskınlık sayıları** belirlenmiştir. Çalışmanın bulguları, özellikle ağ yapılarında kritik tepelerin seçimi, kontrol noktalarının belirlenmesi ve ağı etkili biçimde izlenmesi gibi uygulama alanlarında yarı toplam baskınlık kavramının güçlü bir araç olarak kullanılabileceğini göstermektedir. Transformasyon graflar üzerindeki bu tür analizlerin, ilerleyen çalışmalarda daha büyük ve karmaşık ağ yapıları için de genellenerek uygulanabileceği değerlendirilmektedir. Bu doğrultuda, gelecekte yapılacak çalışmaların farklı graf sınıfları ve yeni transformasyon türleri üzerinde yarı toplam baskınlık analizi gerçekleştirmesi, hem teorik gelişim hem de uygulamalı katkılar açısından önemli bir potansiyel taşımaktadır.

5. REFERANSLAR

- Chartrand G. & Lesniak L., (2004), *Graphs and Digraphs*, California Wadsworth and Brooks.
- Goddard, W., Henning, M. A., & McPillan, C. A. (2014). Semitotal domination in graphs. *Utilitas Mathematica*, 94, 67–81.
- Haynes, T. W., Hedetniemi, S. T., & Slater, P. J. (1998a). *Fundamentals of domination in graphs*. Marcel Dekker.
- Haynes, T. W., & Hedetniemi, S. T. (1998b). *Domination in graphs: Advanced topics*. Marcel Dekker.
- Turacı, T., (2012), *Baskınlık Sayısı Parametreleri ve Sezgisel Algoritmalar*, Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi.
- Wu, B. Ve Meng, J. (2001), Basic Properties of Total Transformation Graphs. *Journal of Mathematical Study*, 34(2), 109-116.

Makale id= 46

Sözlü SunumORCID ID: <https://orcid.org/0009-0007-6869-5733>

| 133

Bitkisel ve Hayvansal Ürünlerin Karbon Ayak İzi Karşılaştırılması: Sürdürülebilir Beslenme İçin Yol HaritasıAraştırmacı İrem Başçı¹, Doç.Dr Fatma Hepsağ¹¹Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi

*Corresponding author: İrem Başçı

Özet: Gıda üretimi, tüketimi ve tedarik zinciri süreçleri, küresel sera gazı emisyonlarının önemli bir bölümünü oluşturmaktadır ve bu durum, sürdürülebilir beslenme ve çevre politikaları açısından kritik bir sorun teşkil etmektedir. Özellikle hayvansal ve bitkisel ürünler arasında karbon ayak izi bakımından belirgin farklar bulunmaktadır. Bu çalışmada, güncel literatürden elde edilen veriler ışığında bitkisel ve hayvansal ürünlerin çevresel etkileri karşılaştırılmıştır. Hayvansal ürünlerin, özellikle sığır eti ve süt gibi geniş getiren hayvan kaynaklı gıdaların üretim süreçlerinde yüksek oranda metan ve karbondioksit salınımı gerçekleşmektedir. Buna karşılık, bitkisel üretim, özellikle meyve, sebze ve tahıllar, daha düşük sera gazı emisyonları ile çevre dostu bir alternatif sunmaktadır. Ayrıca, organik tarım ve permakültür gibi sürdürülebilir üretim modelleri, gıda sistemlerinin çevresel etkisini azaltma potansiyeline sahiptir. Çalışmada ayrıca, tüketicilerin bilinçli beslenme tercihleri ile karbon ayak izini düşürmenin mümkün olduğu ve bitki temelli diyetlerin, sera gazı salınımını azaltmanın yanında insan sağlığına da olumlu katkılar sunduğu vurgulanmaktadır. Elde edilen bulgular, çevre dostu tarım uygulamalarının yaygınlaştırılması ve tüketim alışkanlıklarının dönüştürülmesinin, sürdürülebilir gıda sistemlerinin temel bileşenleri olduğunu ortaya koymaktadır.

Anahtar Kelimeler: Karbon Ayak İzi, Sürdürülebilir Beslenme, Sera Gazı Emisyonları, İklim Değişikliği

Comparison of Carbon Footprint in Plant- and Animal-Based Products: A Roadmap for Sustainable Nutrition

Abstract: Food production and consumption are among the leading contributors to global greenhouse gas (GHG) emissions, making it essential to evaluate the environmental impacts of different dietary choices. This chapter compares the carbon footprint of plant-based and animal-based food products and explores their roles in shaping sustainable nutrition strategies. Research findings indicate that animal-based products, particularly red meat and dairy from ruminants, generate significant GHG emissions due to methane release during enteric fermentation and CO₂ emissions throughout production. In contrast, plant-based products, especially fruits, vegetables, and cereals, offer environmentally friendly alternatives with relatively lower carbon footprints. Furthermore, sustainable agricultural practices such as organic farming and permaculture are highlighted for their potential to reduce the environmental impact of food systems by enhancing soil quality, reducing synthetic inputs, and promoting biodiversity. The chapter also emphasizes the critical role of consumer dietary choices in reducing GHG emissions. Shifting toward plant-based diets not only mitigates carbon footprints but also supports human health through nutrient-rich food consumption. Overall, the findings underline the importance of integrating environmentally conscious agricultural models and promoting consumer awareness to achieve sustainable and low-carbon food systems for future generations.

Keywords: Carbon Footprint, Sustainable Nutrition, Greenhouse Gas Emissions, Climate Change

Giriş

Uygun beslenmeye erişim, çeşitli sosyal, politik ve ekonomik koşullardan etkilenen temel bir insan ihtiyacıdır. İnsan sağlığı ve refahı, dengeli ve tam bir diyetten etkilenir. Bir gıda türünün diğerine tercih

edilmesi, tedarik zincirinde ve üretim süreciyle ilgili çevresel, ekonomik ve sosyal sorunlarda anında etkilere sahiptir (Afrouzi ve ark., 2023). Küresel gıda ve tarım sektörleri, hızla artan küresel nüfus, genişleyen orta sınıf ve daha fazla insanın yüksek kaliteli, düşük maliyetli gıdaya ulaşma isteğinin artması da dahil olmak üzere çok sayıda baskıyla karşı karşıyadır (Thoma ve ark., 2018). Karbon ayak izleri, tüketim mallarının üretimi, işlenmesi ve perakende satışı sırasında yayılan toplam sera gazı miktarını tahmin eder. Amaç, tedarik zincirlerindeki başlıca emisyon kaynaklarını belirleyerek ilgili paydaşları bilgilendirmek ve böylece emisyonları azaltmak için önlemler alınmasını sağlamaktır (Plassmann ve Edwards-Jones, 2010). Başka bir kavramla; Karbon ayak izi, "Antropojenik faaliyetler nedeniyle üretilen sera gazlarına eşdeğer ton cinsinden karbondioksit" olarak tanımlanabilir (Bhatia ve ark., 2023). Çeşitli ürün ve süreçlerin çevresel etkisini değerlendirmek için kullanılır ve sera gazı emisyonlarını yönetmek için önemli bir araçtır (Çelekli ve Zariç, 2023). Gıda işleme, enerji yoğun bir süreçtir ve genellikle teşhis edilemeyen ve dolayısıyla niceliksel olarak ölçülemeyen çevre üzerinde bir etkiye sahiptir (Naresh Kumar ve Chakabarti, 2019). Karbon ayak izi, doğrudan iklim değişikliğiyle bağlantılıdır ve bu da çevresel sorunların ve [gıda güvenliğinin](#) dünya çapında ortak endişeler haline gelmesine neden olur (Afrouzi ve ark., 2023). Gıda sistemi, iklim değişikliğine en büyük katkıda bulunanlardan biri olarak tanımlanmıştır (Röös ve ark., 2014). Sera gazı emisyonlarının başlıca kaynakları, topraklardan gelen azot oksit (N_2O), hayvanlarda enterik fermantasyondan kaynaklanan metan (CH_4) ve ormansızlaşma gibi arazi kullanım değişikliklerinden kaynaklanan karbondioksittir (CO_2) (Röös ve ark., 2014).

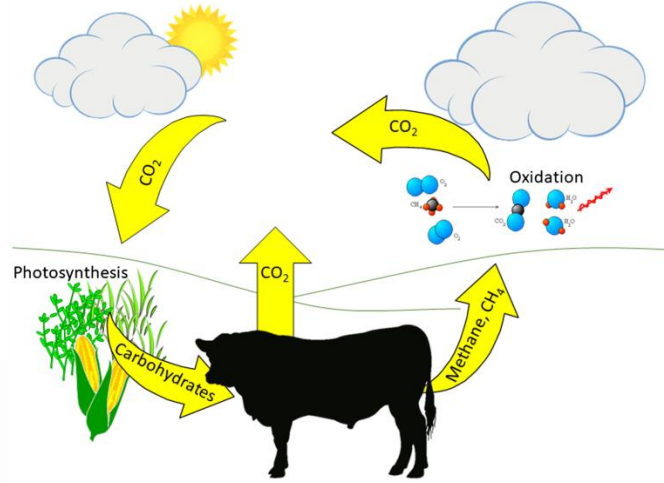
Giderek daha da önemli hale gelen bir diğer konu ise beslenme düzenleri, kaynak tüketimi ve çevresel etkiler arasındaki ilişkidir. Tüketicilerin, en çevre dostu beslenme tercihini belirleyebilmeleri için satın alma seçeneklerinin çevresel sürdürülebilirliği hakkında bilgilendirilmeleri gerekir (González-García ve ark., 2018). Gıda endüstrisi, insan tüketimi için gıda sağlamada önemli bir rol oynar. Gıda bulunabilirliği, dağıtımı ve kalitesi açısından toplum ihtiyaçlarını karşılar. Hızla değiştiği için dünyanın en dinamik ekonomik sektörlerinden biridir (Sadiku ve ark., 2019). Gıda sistemi, esas olarak Sera gazı emisyonu, su gereksinimi ve arazi kullanımı ile ilişkilendirilen olumsuz çevresel etkiler açısından en önemli sektörlerden biri olarak kabul edilir (González-García ve ark., 2018). Tarımsal gıda sektörü, ekonominin birbirinden ayrılmaz iki sektörünü içerir: Bitkisel ve hayvansal hammadde kaynağı olan tarım ve tarımsal ürünlerin ana alıcısı olan ve aynı zamanda tarımsal hammadde üretimini teşvik etmekten ve yönlendirmekten sorumlu olan gıda işleme (Karwacka ve ark., 2020). FAO verilerine göre hayvansal üretim, yani et ve süt ürünleri, küresel sera gazı emisyonlarının %18'ini oluşturmaktadır. Tüketilen etin türüne bağlı olarak, etsiz bir diyetin etli bir diyetten çevreye birkaç kat daha az zararlı olduğu tahmin edilmektedir (Karwacka ve ark., 2020). Ortalama bir orta et yiyen, 12,4 pound karbon üretir. Ağır et yiyen birinin diyetiyle karşılaştırıldığında, ortalama bir vejetaryen diyet her gün 8,4 pound karbondioksit üretir. Bu, ağır et yiyen bir diyetin genellikle ürettiği karbonun neredeyse yarısıdır (Afrouzi ve ark., 2023).

Gıda Üretimine Çevresel Etkileri

Gıda üretiminin çevresel etkisinin bir ölçüsü, sera gazı emisyonları olarak tahmin edilen gıdaların karbon ayak izinin yaşam döngüsü değerlendirmesidir (Drewnowski ve ark., 2015). Karbon ayak izi, bir ürünün veya hizmetin ham maddeden bertarafına kadar tüm yaşam döngüsü boyunca çevresel etkisini değerlendiren bir süreçtir. Hayvancılık üretiminin çevresel etkisi, öncelikle küresel ısınma üzerindeki bildirilen etkiler nedeniyle önemli ve tartışmalı bir küresel sorun haline gelmiştir. Bu endişe tüm et hayvanları için geçerlidir, ancak özellikle enterik metan emisyonları nedeniyle sığırlar için geçerlidir (Rotz ve Rotz, 2020). Hayvancılık sektörü doğal kaynakların önemli bir kullanıcısı olup, azot, fosfor ve karbonun biyojeokimyasal döngülerini değiştirerek hava kalitesi, küresel iklim, toprak kalitesi, biyolojik çeşitlilik ve su kalitesi üzerinde önemli etkiye sahip olup, çevresel endişelere yol açmaktadır (Tullo ve ark., 2019). Örneğin Gıda ve Tarım Örgütü'ne göre, dünya hayvancılık sektörü küresel sera gazı emisyonunun %18'inden sorumludur. Bu %18'lik katkı, fosil yakıt yanması ve ormansızlaşmadan kaynaklanan karbondioksit emisyonu, gübre ve geviş getiren hayvanlar tarafından bağırsak fermantasyonu sonucu oluşan metan emisyonu ve yetiştirme sırasında gübre uygulamasından kaynaklanan azot oksit emisyonu ile açıklanmıştır (De Vries ve de Boer, 2010).

Hayvancılık faaliyetleri, özellikle sığır yetiştiriciliği, atmosferdeki sera gazı konsantrasyonlarını önemli ölçüde etkileyen metan emisyonlarının başlıca kaynaklarından biridir. Sığırlar tarafından üretilen metan,

atmosferde oksitlenerek karbondioksite dönüşür ve bu karbon, fotosentez yoluyla yeniden bitkisel üretime dâhil olur Şekil 1’de verilmiştir (Rotz ve Rotz, 2020).



Şekil 1. Sığır ve diğer çiftlik hayvanları tarafından üretilen metan, metanın atmosferde oksitlenerek karbonu tekrar karbondioksite dönüştürdüğü doğal döngünün bir parçasıdır; karbondioksit formu, başlangıçta büyüyen yem bitkilerinde karbonhidratları sabitlemek için kullanılır (Rotz ve Rotz, 2020).

Tarım sektörü küresel gıda güvenliği için elzem olmasının yanı sıra, çevresel bozulmaya ve iklim değişikliğine de en büyük katkıda bulunan sektörlerden biridir (Kross ve ark., 2022). Gıda, lif ve farklı hammaddeler sağlayarak tarımsal sistemler, insan popülasyonlarının sürdürülmesi için gereklidir. Ancak bu sistemlerin çevre üzerinde önemli bir olumsuz veya olumlu etkiye sahip olma potansiyeli vardır (Ullah ve Shabir, 2023). Organik tarım ve otlar beslenmiş sığır eti gibi gıda üretim sistemleri, tarımın çevresel etkilerini azaltmanın potansiyel yolları olarak önerilmiştir. Örneğin organik tarım, tarımsal kimyasal girdileri gübre gibi doğal girdilerle veya haşere kontrolü gibi ekosistem hizmetleriyle değiştirdiği için, yüksek girdili geleneksel sistemlere kıyasla daha düşük çevresel etkiye sahip olarak sıklıkla teşvik edilir (Clark ve Tilman, 2017). Toprakta karbon depolama yeteneğinin daha yüksek olması nedeniyle, organik tarım büyük ölçekte benimsenirse CO₂ azaltımını iyileştirmenin bir yolunu temsil edebilir (Gomiero ve ark., 2011). Tarım sektöründeki sera gazı emisyonları fosil yakıtların kullanımından (makine, mekan ve proses ısıtması ve diğer kullanımlar için), hayvan yetiştiriciliğinden ve tarımsal arazi kullanımından (mineral ve/veya organik gübrelerle gübreleme, azot bileşiklerinin suda durulanması, ürün artıklarının ayrıştırılması, histosollerin işlenmesi, vb.) kaynaklanmaktadır. Dolaylı sera gazı emisyonları ise tarımda elektrik tüketimi ve bölgesel ısıtma nedeniyle ortaya çıkmaktadır (Al-Mansour ve Jecic, 2017).

Hayvansal Ürünlerin Karbon Ayak İzi

Hayvancılık sektörünün toprak, su ve enerji gibi doğal kaynaklara olan ihtiyacı artmaktadır ve bu sektörün hava, su ve toprak üzerinde ciddi bir çevresel etkisi vardır. Bu etkiler, çevreye yapılan çeşitli emisyonlardan ve üretim süreçleriyle ilişkili kaynakların tüketiminden kaynaklanmaktadır (Djekic, 2015). Et, en büyük çevresel etkiye sahip gıda ürünüdür. Bunun nedeni, hayvanların yemi ete dönüştürmedeki verimsizliğidir, çünkü tüketilen enerjinin %75-90'ı vücut bakımı için gereklidir veya gübre ve deri ve kemik gibi yan ürünlerde kaybolur (Röös ve ark., 2013). Et türleri arasında, geviş getiren hayvan üretimi genellikle geviş getirmeyen memelilere göre daha fazla emisyonu açar ve kümes hayvanı üretimi genellikle memelilere göre daha az emisyonu açar. Et üretimi, CO₂ ile karşılaştırıldığında çevredeki nispeten yüksek bir ısınma potansiyeline ancak düşük bir ömre sahip olan metanın en önemli kaynağıdır (Godfray ve ark., 2018). Sığır eti çevresel etkileri nedeniyle en çok ilgi gören ürün olarak ortaya çıkmaktadır. Bunun nedeni, sığır eti üretiminin iklim değişikliği ve arazi kullanımı gibi küresel çevre sorunlarına yaptığı belirgin toplu katkısıdır. Küresel olarak, sığır eti tedarik zincirlerinin yaşam döngüsü yaklaşımı kullanılarak yaklaşık 2,9 gigaton CO₂ .eq yani tüm hayvancılık

emisyonlarının yaklaşık %40'ını yaydığı tahmin edilmektedir (Gerber ve ark., 2015). Küresel süt üretimi, işlenmesi ve taşınmasının toplam antropojenik emisyonlara genel katkısının %2,7 olduğu tahmin edilmektedir (Bertrand ve Barnett, 2011). Çiftlikteki süt üretiminin bir kısmı ve işleme sırasında kullanılan enerji, süt endüstrisinin toplam sera gazı emisyonlarına en büyük iki katkıda bulunan unsurdur. Örneğin, tereyağı, çedar peyniri ve yağsız süt tozunun kilogram başına süt katısı içeriği, çiğ süttten sırasıyla 1,2, 5,1 ve 7,9 kat daha yüksektir. Tersine, yoğurt için süt katısı konsantrasyon faktörü yalnızca 1,2'dir (Vergé ve ark., 2013). İşlenmiş süt ürünlerinin, işlenmemiş süte kıyasla daha yüksek karbon ayak izi değerine sahip olduğu bulunmuştur. Süt çiftliklerinden emisyon azaltımı için çeşitli azaltma stratejileri önerilmiştir; örneğin laktasyon döneminde hayvan vücut gereksinimlerine göre dengeli yem rasyonları ve konsantreleri, azot bazlı gübre kullanımının azaltılması ve mahsul üretimi sırasında uygulama verimliliğinin artırılması, inek gübresi yerine biyogaz kullanımı, anaerobik sindirim (AD) ve etkili gübre yönetimi gibi (Sahu ve Agarwal, 2021).

Metan, büyük ölçüde tarımsal genişlemeye bağlı olarak, atmosferik bolluğu üç yüzyıl boyunca 2,5 kat artan güçlü bir sera gazıdır. Sindirim sırasında metan üreten ve yayan ('enterik fermantasyon') geviş getiren [hayvanların](#) çiftçiliği, bu büyümeye önde gelen bir katkıda bulunmaktadır (Lassey, 2007). Sığırlardan kaynaklanan metan emisyonlarını etkileyen birçok faktör vardır ve bunlar şunları içerir: yem alımı seviyesi, diyetdeki karbonhidrat türü, yem işleme, diyet lipit veya iyonofor eklenmesi ve ruminal mikrofloradaki değişiklikler gibi (Johnson ve Johnson, 1995).

Bitkisel Ürünlerin Karbon Ayak İzi

Diyette meyve, sebze ve tam tahılların yüksek oranda tüketilmesi, sanayileşmiş ülkelerde başlıca ölüm nedenleri olan kanser ve kardiyovasküler hastalıklar gibi kronik hastalıkların gelişme riskinin azaltılmasıyla yakından ilişkilidir (Esteve-Llorens, 2019). Bitkisel üretimde toplam emisyonların %75'inin N gübre kullanımına (hem organik hem de inorganik) atfedildiğini bildirmiştir; üretim, uygulama ve uygulamadan kaynaklanan topraktan doğrudan azot oksit emisyonlarından kaynaklanmaktadır (Hillier ve ark., 2009). Kahve ve bahçe bitkileri de büyük bir karbona sahiptir. Ratchawat ve arkadaşları (2020), Robusta kahve ürünlerinin karbonunu (kg CO₂eq / kg) kahve kirazı için 0,40 ± 0,12, kavrulmuş kahve için 0,55 ± 0,08 ve çekilmiş kahve için 0,56 ± 0,08 olarak bildirmiştir (Lal, 2022). Hindistan'da bazı sebze ve meyvelerin (örneğin karnabahar, patlıcan, patates ve muz) karbonların tahıl ürünlerinden (örneğin çapati ve ekmek) daha düşük olduğunu belirtmiştir (Xu ve Lan, 2016). Organik olarak uygulanan gıda sistemlerinde daha fazla mikrobiyal, karbon ve besin içeriğine ek olarak, azaltılmış toprak işleme, azaltılmış sentetik gübreler ve organik gübre kullanımı nedeniyle tarımdan kaynaklanan sera gazlarını azalttığı gösterilmiştir (Williamson ve ark., 2024). Gübre üretiminden kaynaklanan sera gazı emisyonları, tarlalardan kaynaklanan sera gazı emisyonlarından sonra, bitkisel üretim döngüsünün tamamında gübreleme sürecinden kaynaklanan ikinci emisyon kaynağıdır (Holka ve ark., 2022). Permakültür ve biyoyoğun mikro bahçe uygulamaları, ekolojik işlevlerinin ve ekosistem hizmetlerinin verimli bir şekilde kullanılması için toprak-bitki sistemindeki etkileşimleri optimize etmeyi ve aynı zamanda küçük bir alandan yüksek verim elde etmeyi ve toprak verimliliğini sürdürmeyi amaçlamaktadır (De Tombeur ve ark., 2018). Permakültür yönetiminin toprak organik madde dağılımı üzerindeki potansiyel etkisini araştırmış ve partikül organik maddenin daha fazla parçalandığını, bunun da sonuç olarak permakültür yönetimi altında daha yüksek organik karbon ve azot içeriklerine yol açtığını bulmuştur (Williamson ve ark., 2024).

Bitkisel Ve Hayvansal Ürünlerin Karşılaştırılmasının Önemi

Dünya çapında, yaklaşık 2 milyar insanın temel olarak et temelli bir diyetle yaşadığı tahmin edilirken, yaklaşık 4 milyar insanın temel olarak bitki temelli bir diyetle yaşadığı tahmin edilmektedir (Pimentel ve Pimentel, 2003). Her yıl gıda tedarik zinciri yoluyla yaklaşık 9800-16900 milyon ton CO₂ üretilmektedir ve bu rakamın 2050 yılına kadar %30'a çıkması beklenmektedir. Metan emisyonları hayvansal et ve süt ürünleri ile pirinç üretiminden kaynaklanırken, azot oksit emisyonları diğer mahsullerden elde edilen gıda ürünlerinden kaynaklanmaktadır (Shabir ve ark., 2023). Hayvansal üretim ve tüketim, sera gazı emisyonları, arazi kullanımı ve bozulması, kıtlık ağırlıklı su kullanımı, besin kirliliği (örneğin asitlenme ve ötrofikasyon), gübre ve pestisit kullanımı ve tüm ürün gıda zinciri boyunca tüketici düzeyinde gıda israfı dahil olmak üzere sürdürülebilirliği tehdit eden çok çeşitli çevresel yüklerden sorumludur (Espinosa-Marrón ve ark., 2022). Artan dünya nüfusu ve buna bağlı

olarak gıda tüketimindeki küresel ortalama artış, özellikle et ürünleri, iklim değişikliği, ekosistem sağlığı, gıda güvenliği ve genel nüfusun sağlığı ve beslenmesi için daha da büyük bir tehdit oluşturabilir (Castañé ve Antón, 2017). Amerika'da, ağır et yiyen birinin diyeti her yıl atmosfere 3,3 ton CO₂ e katkıda bulunur. Diğer et türlerini tüketen ancak sığır etinden kaçınan Amerikalılar, et seven birinin diyetine kıyasla 1,4 ton CO₂ e daha az olan 1,9 ton CO₂ e'ye katkıda bulunur (Afrouzi ve ark., 2023). Kuzu eti (22,96 kg CO₂-eq / kg) ve sığır eti (18,21 kg CO₂-eq / kg) en büyük karbon ayak izine sahiptir. Hindi, domuz eti, tavuk, yumurta ve balık gibi diğer ürünlerin göstergeleri birkaç kat daha küçüktür ve sırasıyla 5,56, 4,97, 4,02, 3,03 ve 2,83 kg CO₂-eq / kg'dir. Bir kilogram sığır eti üretmek 60 kilogram sera gazı (CO₂ -eşdeğeri) yayar. Buna karşılık, bezelye kg başına sadece 1 kilogram yayar. Hayvansal gıdalar bitki bazlı olanlardan daha yüksek bir ayak izine sahip olma eğilimindedir. Kuzu eti ve peynir, kilogram başına 20 kilogramdan fazla CO₂ eşdeğeri yayar. Kümes hayvanları ve domuz eti daha düşük ayak izlerine sahiptir ancak yine de sırasıyla 6 ve 7 kg CO₂ eşdeğeri ile çoğu bitki bazlı gıdadan daha yüksektir (Ritchie, 2020). Pirinç için karbon ayak izi, çeltik tarlasından kaynaklanan CH₄ emisyonu nedeniyle bitkisel ürünler arasında nispeten yüksektir. Meyvelerin Çin'de mısır ve buğdaydan daha fazla karbon ayak izi ürettiğini öne sürdüler. Hindistan'da bazı sebze ve meyvelerin (örneğin karnabahar, patlıcan, patates ve muz) karbon ayak izi'lerinin tahıl ürünlerinden (örneğin çapati ve ekmeği) daha düşük olduğunu belirtmiştir (Xu XiaoMing ve ark., 2016). En düşük sera gazı emisyonlarına sahip yiyecekler arasında yüksek enerji içeriğine sahip ancak düşük [besin değerine sahip tahıllar](#) ve tatlılar yer almıştır (Drewnowski ve ark., 2015).

Bitki bazlı gıdalarla karşılaştırıldığında, hayvansal bazlı gıdaların daha büyük olumsuz etkileri ve Karbon ayak izi 'si vardır. [Yenilenebilir enerji kaynaklarının](#) kullanılması ve sentetik gübreler ile bitki pestisitlerinden vazgeçilmesinin sera gazı emisyonlarını düşüreceği öngörülmektedir (Shabir ve ark., 2023). Yani gıda enerjimize dayanarak, hayvancılık ürünleri bitki bazlı gıdaların neredeyse iki katı karbon ayak izine sahiptir. Sonuç olarak Gıda sera gazı emisyonlarımızı azaltmanın diğer yolları arasında daha az gübre kullanarak daha verimli çiftçilik yapmak ve verimliliği artırmak yer alır (Murphy-Bokern, 2010).

Beslenme şeklimiz, çevresel sürdürülebilirlik açısından önemli bir rol oynamaktadır. Özellikle hayvansal ürünler, sera gazı emisyonları açısından en yüksek etkiye sahip besin grupları arasında yer alır. Etler %56,6, süt ürünleri ise %18,3 oranında toplam diyet emisyonlarına katkı sağlamaktadır Şekil 2'de verilmiştir (Poore ve Nemecek, 2018).



Şekil 2. Besin türüne göre sera gazı emisyonlarının diyet katkısı. Karbon ayak izi infografiği, farklı gıda gruplarının çevresel etkilerini karşılaştırmalı olarak göstermektedir (Poore ve Nemecek, 2018).

Sonuç

Gıda üretim süreçlerinin çevresel etkileri, günümüzde küresel sürdürülebilirlik hedefleri doğrultusunda artan bir ilgiyle ele alınmaktadır. Özellikle sera gazı emisyonlarının önemli bir kaynağı olan tarımsal üretim faaliyetleri, gıda sistemlerinin çevresel performansını doğrudan etkilemektedir. Bu bağlamda, hayvansal ve bitkisel kaynaklı gıdaların karbon ayak izi bakımından karşılaştırılması, sürdürülebilir gıda sistemlerinin tasarlanmasında temel bir değerlendirme aracıdır. Literatürdeki bulgular, hayvansal ürünlerin üretiminde; yem üretimi, metan salınımı, enerji ve su kullanımı gibi faktörlerin etkisiyle, bitkisel ürünlere kıyasla daha yüksek düzeyde karbon ayak izine sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Buna karşın, bitkisel ürünler genellikle daha düşük sera gazı emisyonu ile üretilebilmekte ve çevresel yük açısından daha avantajlı bir profil sergilemektedir. Bu durum, sürdürülebilir beslenme modellerinin geliştirilmesinde bitkisel temelli gıda tercihlerinin önemini ortaya koymaktadır. Bitkisel ve hayvansal ürünlerin karbon ayak izlerinin karşılaştırmalı olarak incelenmesi, yalnızca çevresel etkilerin belirlenmesi açısından değil, aynı zamanda politika yapımcılar, üreticiler ve tüketiciler için bilinçli karar alma süreçlerinin desteklenmesi bakımından da kritik öneme sahiptir. Bu doğrultuda, gıda sistemlerinde çevresel sürdürülebilirliğin sağlanabilmesi için düşük karbon ayak izine sahip ürünlerin teşvik edilmesi, tüketici farkındalığının artırılması ve üretim süreçlerinin yeniden yapılandırılması gereklidir. Sonuç olarak, sürdürülebilir beslenme stratejilerinin oluşturulmasında, gıdaların karbon ayak izinin dikkate alınması ve bu doğrultuda üretim-tüketim döngüsünün çevresel etkiler göz önünde bulundurularak yeniden şekillendirilmesi, hem çevresel hem de toplumsal düzeyde sürdürülebilirliğe katkı sağlayacaktır.

Kaynakça

- Afrouzi, H. N., Ahmed, J., Siddique, B. M., Khairuddin, N., & Hassan, A. (2023). A comprehensive review on carbon footprint of regular diet and ways to improving lowered emissions. *Results in Engineering*, 18, 101054.
- Thoma, G. J., Ellsworth, S. W., & Yan, M. J. (2018). Principles of green food processing (including lifecycle assessment and carbon footprint).
- Plassmann, K., & Edwards-Jones, G. (2010). Carbon footprinting and carbon labelling of food products. In *Environmental Assessment and Management in the Food Industry* (pp. 272-296). Woodhead publishing
- Bhatia, L., Jha, H., Sarkar, T., & Sarangi, P. K. (2023). Food waste utilization for reducing carbon footprints towards sustainable and cleaner environment: a review. *International journal of environmental research and public health*, 20(3), 2318.
- Çelekli, A., & Zariç, Ö. E. (2023). From emissions to environmental impact: understanding the carbon footprint. *International Journal of Environment and Geoinformatics*, 10(4), 146-156.
- Naresh Kumar, S., Chakabarti, B. (2019). Energy and Carbon Footprint of Food Industry. In: Muthu, S. (eds) Energy Footprints of the Food and Textile Sectors. Environmental Footprints and Eco-design of Products and Processes.
- Röös, E., Sundberg, C., Hansson, PA. (2014). Carbon Footprint of Food Products. In: Muthu, S. (eds) Assessment of Carbon Footprint in Different Industrial Sectors, Volume 1. EcoProduction.
- González-García, S., Esteve-Llorens, X., Moreira, M. T., & Feijoo, G. (2018). Carbon footprint and nutritional quality of different human dietary choices. *Science of the total environment*, 644, 77-94.
- Sadiku, M. N., Musa, S. M., & Ashaolu, T. J. (2019). Food industry: An introduction. *International Journal of Trend in Scientific Research and Development*, 3(4), 128-30.
- Karwacka, M., Ciurzyńska, A., Lenart, A., & Janowicz, M. (2020). Sustainable development in the agri-food sector in terms of the carbon footprint: A Review. *Sustainability*, 12(16), 6463.
- Drewnowski, A., Rehm, C. D., Martin, A., Verger, E. O., Voinnesson, M., & Imbert, P. (2015). Energy and nutrient density of foods in relation to their carbon footprint. *The American journal of clinical nutrition*, 101(1), 184-191.

- Rotz, A., & Rotz, C. A. (2020). Environmental sustainability of livestock production. *Meat and Muscle Biology*, 4(2).
- Tullo, E., Finzi, A., & Guarino, M. (2019). Environmental impact of livestock farming and Precision Livestock Farming as a mitigation strategy. *Science of the total environment*, 650, 2751-2760.
- De Vries, M., & de Boer, I. J. (2010). Comparing environmental impacts for livestock products: A review of life cycle assessments. *Livestock science*, 128(1-3), 1-11.
- Kross, A., Kaur, G., & Jaeger, J. A. (2022). A geospatial framework for the assessment and monitoring of environmental impacts of agriculture. *Environmental Impact Assessment Review*, 97, 106851.
- Ullah, M. K., & Shabir, S. (2023). The significant effects of agricultural systems on the environment. *Journal of World Science*, 2(6), 798-805.
- Clark, M., & Tilman, D. (2017). Comparative analysis of environmental impacts of agricultural production systems, agricultural input efficiency, and food choice. *Environmental Research Letters*, 12(6), 064016.
- Gomiero, T., Pimentel, D., & Paoletti, M. G. (2011). Environmental impact of different agricultural management practices: conventional vs. organic agriculture. *Critical reviews in plant sciences*, 30(1-2), 95-124.
- Al-Mansour, F., & Jecic, V. (2017). A model calculation of the carbon footprint of agricultural products: The case of Slovenia. *Energy*, 136, 7-15.
- Djekic, I. (2015). Environmental impact of meat industry—current status and future perspectives. *Procedia Food Science*, 5, 61-64.
- Röös, E., Sundberg, C., Tidåker, P., Strid, I., & Hansson, P. A. (2013). Can carbon footprint serve as an indicator of the environmental impact of meat production?. *Ecological indicators*, 24, 573-581.
- Godfray, H. C. J., Aveyard, P., Garnett, T., Hall, J. W., Key, T. J., Lorimer, J., ... & Jebb, S. A. (2018). Meat consumption, health, and the environment. *Science*, 361(6399), eaam5324
- Gerber, P. J., Mottet, A., Opio, C. I., Falcucci, A., & Teillard, F. (2015). Environmental impacts of beef production: Review of challenges and perspectives for durability. *Meat science*, 109, 2-12.
- Bertrand, S., & Barnett, J. (2011). Standard method for determining the carbon footprint of dairy products reduces confusion. *Animal Frontiers*, 1(1), 14-18.
- Vergé, X. P., Maxime, D., Dyer, J. A., Desjardins, R. L., Arcand, Y., & Vanderzaag, A. (2013). Carbon footprint of Canadian dairy products: Calculations and issues. *Journal of dairy science*, 96(9), 6091-6104.
- Sahu, R., & Agarwal, T. (2021). Carbon footprint of raw milk and other dairy products. *Challenges and Opportunities of Circular Economy in Agri-Food Sector: Rethinking Waste*, 177-189.
- Lassey, K. R. (2007). Livestock methane emission: From the individual grazing animal through national inventories to the global methane cycle. *Agricultural and forest meteorology*, 142(2-4), 120-132.
- Johnson, K. A., & Johnson, D. E. (1995). Methane emissions from cattle. *Journal of animal science*, 73(8), 2483-2492
- Esteve-Llorens, X., Darriba, C., Moreira, M. T., Feijoo, G., & González-García, S. (2019). Towards an environmentally sustainable and healthy Atlantic dietary pattern: life cycle carbon footprint and nutritional quality. *Science of the Total Environment*, 646, 704-715.
- Hillier, J., Hawes, C., Squire, G., Hilton, A., Wale, S., & Smith, P. (2009). The carbon footprints of food crop production. *International Journal of Agricultural Sustainability*, 7(2), 107-118.
- Lal, R. (2022). Reducing carbon footprints of agriculture and food systems. *Carbon Footprints*, 1(1), N-A.

- Xu, X., & Lan, Y. (2016). A comparative study on carbon footprints between plant-and animal-based foods in China. *Journal of Cleaner Production*, 112, 2581-2592.
- Williamson, RF, Reay, M. ve Sgouridis, F. (2024). Ekilebilir Toprağın Permakültür Yönetimi, Geleneksel Tarıma Kıyasla Toprak Mikrobiyal Bolluğunu, Besin Maddelerini ve Karbon Stoklarını Arttırır. *Tarım Bilimi* , 14 (7), 1446.
- Holka, M., Kowalska, J., & Jakubowska, M. (2022). Reducing carbon footprint of agriculture—can organic farming help to mitigate climate change?. *Agriculture*, 12(9), 1383.
- De Tombeur, F., Sohy, V., Chenu, C., Colinet, G., & Cornelis, J. T. (2018). Effects of permaculture practices on soil physicochemical properties and organic matter distribution in aggregates: A case study of the bec-hellouin farm (France). *Frontiers in Environmental Science*, 6, 116.
- Pimentel, D., & Pimentel, M. (2003). Sustainability of meat-based and plant-based diets and the environment. *The American journal of clinical nutrition*, 78(3), 660S-663S.
- Shabir, I., Dash, K. K., Dar, A. H., Pandey, V. K., Fayaz, U., & Srivastava, S. (2023). Carbon footprints evaluation for sustainable food processing system development: A comprehensive review. *Future Foods*, 7, 100215.
- Espinosa-Marrón, A., Adams, K., Sinno, L., Cantu-Aldana, A., Tamez, M., Marrero, A., ... & Mattei, J. (2022). Environmental impact of animal-based food production and the feasibility of a shift toward sustainable plant-based diets in the United States. *Frontiers in Sustainability*, 3, 841106.
- Castañé, S., & Antón, A. (2017). Assessment of the nutritional quality and environmental impact of two food diets: A Mediterranean and a vegan diet. *Journal of Cleaner Production*, 167, 929-937.
- Ritchie, H. (2020). You want to reduce the carbon footprint of your food? Focus on what you eat, not whether your food is local. *Our world in data*.
- Xu XiaoMing, X. X., & Lan Ying, L. Y. (2016). A comparative study on carbon footprints between plant-and animal-based foods in China.
- Poore, J., & Nemecek, T. (2018). Reducing food's environmental impacts through producers and consumers. *Science*, 360(6392), 987-992.

Makale id= 47

Sözlü SunumORCID ID: 1- <https://orcid.org/0009-0007-6869-5733> 2- <https://orcid.org/0000-0002-3688-4106>

| 141

Gıda Sektöründe Karbon Ayak İzini Azaltma Stratejileri: Üreticide Tüketicie Yeşil Dönüşüm**Araştırmacı İrem Başçı¹, Doç.Dr. Fatma Hepsağ¹**¹Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi

*Corresponding author: İrem Başçı

Özet: Küresel iklim değişikliğiyle mücadelede gıda sektörünün karbon ayak izini azaltma çabaları büyük önem taşımaktadır. Gıda tedarik zinciri, tarımsal üretimden başlayarak işleme, ambalajlama ve tüketiciye ulaşana kadar geçen tüm aşamalarda ciddi çevresel etkiler yaratmaktadır. Bu çalışmada, gıda sektöründe uygulanabilecek karbon ayak izi azaltma stratejileri bütüncül bir yaklaşımla ele alınmıştır. Özellikle tarımda aşırı kimyasal gübre ve pestisit kullanımı, toprak, su ve hava kirliliğinin yanı sıra sera gazı salınımının artmasına yol açmaktadır. Bu kapsamda, organik tarım, agroekolojik uygulamalar ve hassas tarım teknolojileri sayesinde üretim süreçlerinin çevresel etkilerinin azaltılması mümkündür. Yenilenebilir enerji kaynaklarının, biyogaz teknolojilerinin ve akıllı sulama sistemlerinin kullanımı, enerji verimliliğini artırmakta ve sera gazı emisyonlarını azaltmaktadır. Ayrıca, gıda işleme ve ambalajlama aşamalarında çevre dostu teknolojilerin benimsenmesi, atık miktarını azaltmakta ve karbon salınımını düşürmektedir. Tek kullanımlık plastiklerin yerini biyolojik olarak parçalanabilir ambalaj malzemeleri alırken, karbon etiketi uygulamaları tüketicilerin çevre bilincini artırmaktadır. Sonuç olarak, gıda zincirinin tüm halkalarında çevresel sürdürülebilirliğe yönelik stratejik adımların atılması, karbon ayak izinin azaltılmasına ve daha yeşil bir gıda sistemine geçişe katkı sağlayacaktır.

Anahtar Kelimeler: Karbon Ayak İzi, Sera Gazı Emisyonları, Sürdürülebilir Tarım, Akıllı Tarım Teknolojileri

Strategies to Reduce Carbon Footprint in the Food Sector: Green Transformation From Production to Consumption

Abstract: Reducing the carbon footprint across the food sector is a crucial component of global climate change mitigation efforts. Each stage of the food supply chain, from agricultural production to food processing, packaging, and final consumption, contributes significantly to environmental degradation. This chapter presents comprehensive strategies to minimize the carbon footprint within food systems. Excessive use of chemical fertilizers and pesticides in agriculture is identified as a major source of soil, air, and water pollution, as well as GHG emissions. In response, the chapter discusses the importance of adopting sustainable farming practices, including organic agriculture, agroecology, and precision agriculture technologies, which help lower environmental impacts while enhancing resource efficiency. The integration of renewable energy sources, such as biogas and solar energy, along with smart irrigation systems, further contributes to emission reduction and energy efficiency. In food processing and packaging stages, the use of innovative, eco-friendly technologies and biodegradable packaging materials is emphasized. Additionally, carbon labeling is presented as a tool to raise consumer awareness and encourage environmentally responsible purchasing decisions. The chapter concludes that implementing holistic and integrated environmental management approaches across the food supply chain is key to achieving a greener, more efficient, and low-emission food sector, while also fostering economic and social sustainability.

Keywords: Carbon Footprint, Greenhouse Gas Emissions, Sustainable Agriculture, Smart Agriculture Technologies

Giriş

"Karbon ayak izi" terimi, çevresel sorunlar ve iklim değişikliği konusunda artan kamu farkındalığına yanıt olarak son on yılda popülerlik kazanmıştır (East, 2008). Bu nedenle, karbon ayak izi hesaplamalarına olan talep yüksektir (Durojaye ve ark., 2020). Son 2-3 yıldır endüstriyel büyüme uğruna yapılan gelişmeler, dünyamızın büyük bir alanını, geniş orman alanlarını, nehirlerini, buzullarını ve ayrıca iklimini olumsuz yönde etkilemeye devam etmektedir (Kumar ve ark., 2014). Bu nedenle, yıllar boyunca, bir dizi uluslararası strateji ve politikalar bu sorunları çözmeyi özellikle karbondioksit emisyonlarını azaltmayı ve iklim değişikliğini olumlu yönde etkilemeyi amaçlamaktadır (Lombardi ve ark., 2017). Karbon ayak izi, genellikle karbondioksit emisyonlarını veya sera gazları emisyonlarını CO₂ eşdeğerleri (CO₂ -eq) açısından ölçmek için bir gösterge olarak benimsenmektedir (Chowdhury, 2010). Küresel sanayileşme ve yenilenemeyen enerji kaynaklarının aşırı sömürülmesi geliştikçe atmosfere büyük miktarda sera gazları salınmaktadır. Bu, küresel bir sıcaklık artışına neden olmakta ve çevresel bozulmayla ilgili bir dizi soruna yol açmaktadır (Lobus ve ark., 2023). Karbon ayak izi önerisi, insan davranışlarının iklim değişikliği üzerindeki etkisini canlı bir şekilde ortaya koymakta ve karbon emisyonlarını bilimsel olarak ölçmek için etkili bir araç sağlamaktadır. Karbon ayak izine dayalı nicel analiz, yalnızca karbon emisyonlarının yoğunlaşma alanlarının ve yoğunluğunun keşfedilmesini kolaylaştırmakla kalmaz, aynı zamanda hedeflenen önlemlerin alınması ve bunların periyodik olarak denetlenmesi için bir temel sağlar (Shi ve Yin, 2021). İklim koruma, modern dünya için önemli bir zorluktur. Değişen bir iklim karşısında, küresel sıcaklık artışını 1,5 °C ile sınırlamak için yoğun çabalara ihtiyaç vardır. Atmosferdeki doğal olarak oluşan sera gazlarının konsantrasyonu önemli ölçüde artmış ve bu da sera etkisinin ve küresel ısınmanın şiddetine katkıda bulunmuştur (Holka ve ark., 2022). "Küresel ısınma" olarak da adlandırılan iklim değişikliği, atmosferde ısıyı hapseden karbondioksit ve metan gibi gazların artması sonucu dünya ikliminde meydana gelen bir değişiklik olup, gezegenin ısınmasına yol açmaktadır (Çelekli ve Zariç, 2023). İklim değişiklikleri toprak sağlığını ve verimliliğini, su mevcudiyetini ve nihayetinde ürün verimliliğini etkiler (Han ve ark.,2024).

Emisyonlar ayrıca gübre yönetimi, mineral gübre üretimi ve çiftliklerde enerji kullanımı ile işleme, paketleme, depolama, dağıtım ve atık yönetimi gibi çiftlik sonrası faaliyetlerden de kaynaklanmaktadır (Röös ve ark., 2014). Çiftçilikten üretim sonrasına kadar uzanan gıda sistemi, büyük miktarda insan yapımı sera gazı emisyonu üretmekten sorumludur. Çiftlik aşamasında, emisyonlar öncelikle tarım ve hayvancılık üretiminin yanı sıra ilgili arazi kullanım değişikliklerinden kaynaklanır (Liu ve ark., 2023). Dahası, kimyasal gübrelerin, böcek ilaçlarının ve plastik filmlerin yoğun kullanımı önemli miktarda azot oksit emisyonuna yol açabilir ve küresel ısınmayı etkileyebilir (Niu ve ark., 2022). Yine hammadde temini, işleme, paketleme, koruma, taşıma, tüketim olmak üzere tüm gıda sistemleri, yönetim tekniklerini iyileştirmek ve gelişmiş teknoloji ve ekipmanı benimsemek, bir gıda sisteminin her aşaması için kritik öneme sahiptir (Xu ve ark., 2015). Bu sektörde sürdürülebilirliği teşvik etmek için etkili stratejiler geliştirmek amacıyla bu zorlukların anlaşılması gerekmektedir. Gıda işlemede sürdürülebilirliği sağlamak için enerji verimliliği, atık azaltma ve yenilenebilir enerjinin entegrasyonuna odaklanan çeşitli yaklaşımlar benimsenmelidir (Lukose ve Singh, 2024).

Gıda Zincirinde Karbon Ayak İzinin Kaynakları

Pestisitler, bitkileri zararlılardan, yabancı otlardan veya hastalıklardan ve insanları da hastalıklardan korumak için esas olarak tarımda veya halk sağlığı koruma programlarında kullanılan maddeler veya madde karışımlarıdır (Nicolopoulou-Stamati ve ark., 2016). Gübre uygulamalarında ürünlerin büyümesi ve üretimde artan verim için gereken çeşitli besinleri sağlar. Ancak, birçok ülke toprakta, suda, havada, tarımsal ürünlerde ve hatta insan kanında ve yağ dokusunda endişe verici tarımsal kimyasal kalıntıları bildirmiştir (Zhang ve ark., 2018). Literatürde bilindiği üzere kimyasal gübrelerin aşırı uygulanmasının zararlı etkileri şunlardır: Azotlu gübrenin bitkinin asimilasyon kapasitesinin ötesinde aşırı ve tekrarlı uygulanmasıyla atmosfere sera gazları olan karbondioksit ve azot oksit salınabilir ve küresel ısınmaya ve düzensiz iklim koşullarına katkıda bulunabilir (Doll ve Baranski, 2011). Kimyasal gübrelerin dengesiz oranda uygulanması, toprağın vazgeçilmez besin maddelerinin bir kısmını tüketerek, gıda maddelerindeki mineral ve vitamin miktarının azalmasına neden olmaktadır (Das ve ark.,2016). Ayrıca toprak asitlenmesi, aşırı kimyasal gübre kullanımı sonucu topraktaki organik maddenin azalmasıyla meydana gelebilir ve bitkilerin yaşamını tehdit eder hale gelebilir (Velthof ve ark., 2011).

Enerji, bir ülke veya bölgenin ekonomik büyümesi ve sosyal gelişimi için temel gereksinimlerden biridir. Enerji verimliliğinin artırılması, yalnızca maliyet azaltımı yoluyla rekabet gücünü artırmaya yardımcı olmakla kalmaz, aynı zamanda sera gazı emisyonlarının ve çevresel etkilerin en aza indirilmesiyle de sonuçlanır (Mohammadi ve ark., 2014). Maliyetleri düşürmek ve enerji tasarrufu sağlamak amacıyla çiftçilere çeşitli sera yapıları ve farklı örtüler sunulmaktadır (Djevic ve Dimitrijevic, 2009). [Sera tarımı birçok ülkede büyüyen bir endüstri olup](#), oldukça masraflı bir yoldur ve çiftçi bu yolu seçmeye karar vermeden önce dikkate alınması gereken birçok değişken vardır (Canakci ve Akinci, 2006). Sera üretim sistemleri, açık tarla yetiştiriciliğine kıyasla mahsulün su gereksinimlerini %20 ila %40 oranında azaltır; ancak yetiştiriciler rutin olarak tahmini su tüketiminden daha fazla sulama suyu uygularlar (Nikolaou ve ark., 2019). Sulama, ürün verimliliğini artırır, ancak uygulanması genellikle operasyonel enerji talebini ve potansiyel olarak sera gazı emisyonlarını artırır. Ayrıca, sulama mahsul üretimini artırmak için bir çözüm olsa da, toprak biyojeokimyasal özelliklerini ve toprak yapısını değiştirebilir ve bu da toprak karbon tutma potansiyelini olumsuz etkileyebilir (Sapkota ve ark., 2020). Hayvancılıktan kaynaklanan metan büyük ölçüde endojendir ve yoğun hayvansal üretimde azaltılması zor olabilir. Metan emisyonu azaltma stratejileri, yakıt olarak kullanılmasına veya oluşumunun önlenmesine, özellikle çiftlik içi depolama (kapalı alanda, açık alanda) veya kritik süreçlerin (organik maddenin bozunması) ve kritik faktörlerin (örneğin sıcaklık) kontrolü yoluyla işlemeye odaklanmalıdır (Monteny ve ark., 2001). Hayvancılıktan kaynaklanan doğrudan ve dolaylı olmak üzere iki tür sera gazı emisyonu vardır. Enterik fermantasyon doğrudan emisyonlara neden olur, ancak yem üretimi ve mera büyümesinin neden olduğu ormansızlaşma gibi dış faaliyetler dolaylı emisyonların nedenleridir (Vaghar Seyedin ve ark., 2022). Metan emisyonları, gübrelerden üretilen gazın örneğin enerji üretimi için optimum şekilde kullanılmasıyla da etkili bir şekilde azaltılabilir. Hayvan barınaklarından sık ve eksiksiz gübre temizliği, çiftlikte [biyogaz](#) üretimiyle birleştirildiğinde, entegre bir çiftlik içi çözüme örnektir (Monteny ve ark., 2006).

Plastik, akışkan, kalıplanabilir, ısıyla kapatılabilir, basımı kolay ve üretim süreçlerine entegre edilebilir olması nedeniyle gıda ambalajlarında yaygın olarak kullanılan bir malzemedir (Kan ve Miller, 2022). Tek kullanımlık plastik önemli bir çevresel etkiye sahiptir ve azaltılması, dünya çapında plastik kirliliğini azaltmak için zorunlu bir adımdır. Dahası, plastik öğelerin üretimi, kullanımı ve bertarafı sera etkisi üzerinde de önemli bir etkiye sahiptir; bu, karbon ayak izlerini değerlendirerek bir yaşam döngüsü yaklaşımıyla tahmin edilebilir (Di Paolo ve ark., 2022). Plastik bir ambalaj malzemesi olarak camdan daha düşük bir karbon ayak izine sahip olduğunu buldular (örneğin, üretim ülkesine bağlı olarak, PP'den üretilen bebek maması kaplarının camdan üretilenlere göre %28 ila %31 arasında daha düşük bir karbon ayak izine sahip olduğu bulundu (Dormer ve ark., 2013). Ekonomiyi sürdürmek ve iklim değişikliğiyle mücadele etmek için gıda israfını azaltmaya yönelik stratejiler geliştirmek, zamanın ihtiyacıdır. Gıda israfıyla mücadelenin en popüler ve geleneksel yolları arasında, depolama, anaerobik sindirim, yakma, kompostlama, gübre temininde kullanma ve hayvan yemi olarak kullanma yer almaktadır (Bhatia ve ark., 2023).

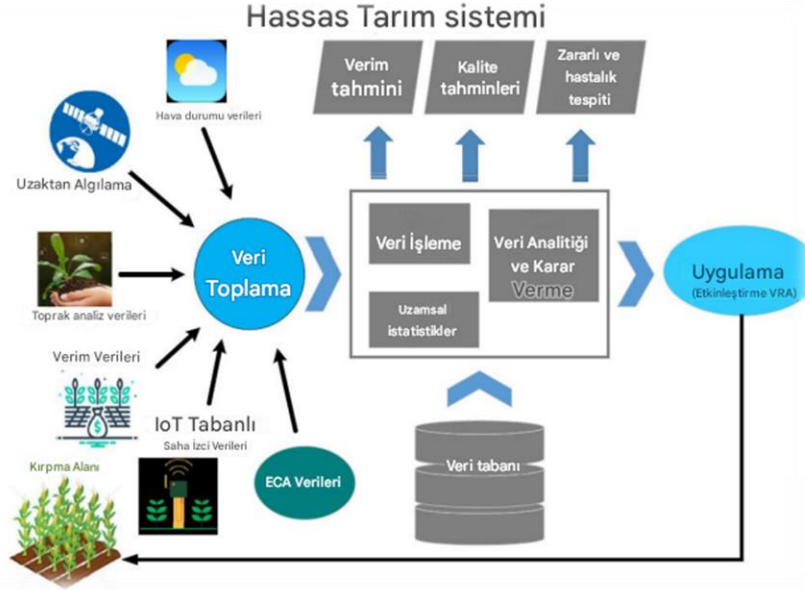
Üretim Aşamasında Karbon Ayak İzini Azaltma Yöntemleri

Sürdürülebilir tarım, çevre üzerinde olumsuz bir etki yaratmadan ürün verimini ve hayvancılık üretimini artıran farklı çevre dostu çiftçilik tekniklerini içerir. Organik tarım, sürdürülebilir tarım hedefine ulaşmak için uygulanması gereken bir yaklaşımdır (Soni ve ark., 2022). Organik tarım terimi "yapay girdilerin (örneğin gübreler, pestisitler, hormonlar, [yem katkı maddeleri](#) vb.) kullanımını önleyen ve büyük ölçüde dışlayan bir sistem" anlamına gelir (Gamage ve ark., 2023). Organik Tarım, geleneksel tarım yöntemlerine kıyasla olumsuz çevresel etki riskini azaltır; toprak verimliliği ve besin yönetimi açısından, organik tarım çiftlik düzeyinde toprak verimliliğini ve besin yönetimini önemli ölçüde iyileştirmek için uygundur (Giri ve Pokhrel, 2022). Bu organik girdiler toprak mikroorganizmalarının ve biyokütlesinin aktivitesini artırır, toprak solunumunu iyileştirir ve toprak enzimlerinin aktivitesini artırır; bunların hepsi bitkiler için besin maddesi bulunabilirliğinin artmasına katkıda bulunur. Bu entegre etkiler organik olarak yönetilen toprakları daha dinamik ve verimli hale getirir (Varma ve ark., 2024). Tarımsal sistemlerin ekolojisi üzerine araştırma faaliyetlerinde son zamanlarda bir artış olmaktadır. Tarımsal ekoloji, sürdürülebilirliği gıda sisteminin tüm parçalarına getiren araştırma, eğitim, eylem ve değişimin bütünleşmesidir: ekolojik, ekonomik ve sosyal. Gıda sistemi değişiminde her türlü bilgi ve deneyime değer verdiği için disiplinler arasıdır (Gliessman, 2018).

Tarım ekolojisinin temel ilkeleri arasında, harici girdiler sunmak yerine çiftlikte besin maddelerini ve enerjiyi geri dönüştürmek; toprak organik maddesini ve toprak biyolojik aktivitesini artırmak; zaman ve mekanda tarımsal ekosistemlerde bitki türlerinin ve genetik kaynakların çeşitlendirilmesi; mahsullerin ve hayvanların entegre edilmesi ve bireysel türlerin verimlerinden ziyade toplam çiftçilik sisteminin etkileşimlerinin ve üretkenliğinin optimize edilmesidir (Altieri ve ark., 2017). Agroekoloji, kırsal topluluklar ve yerel olarak uyarlanmış çözümler arayan küçük çiftlikler için daha uygun olan büyük ölçekli bir sistemde gıda güvenliği ve tarımın zorlukları üzerinde etki elde etmenin sınırlamalarını ortaya koymaktadır. Öte yandan, literatür, sürdürülebilir tarımın daha etkili olabileceği küresel nüfusun artan gıda taleplerini karşılamak için çok ölçekli bir sistem yaklaşımı benimsemenin çok önemli olduğunu ortaya koymaktadır (Terán-Samaniego ve ark., 2025). Toprak sağlığı, besin bulunabilirliğini, su tutulmasını ve genel tarımsal ekosistem dayanıklılığını etkilediği için sürdürülebilir ürün üretiminde önemli bir faktördür (Saliu ve ark., 2023). Sağlıklı bir toprak, su kalitesini ve bitki üretkenliğini sürdürme, toprak besin geri dönüşüm ayrışmasını kontrol etme ve atmosferden sera gazlarını uzaklaştırma gibi birden fazla ekosistem hizmeti sunan dinamik bir yaşayan sistem görevi görür (Tahat ve ark., 2020). Sürdürülebilir toprak yönetimindeki en büyük zorluk, tarımsal verimi optimize ederken ekosistem hizmet sunumunu korumaktır (Kibblewhite ve ark., 2008). Topraklar, iklim ve ekosistemler tarafından belirlenen kısıtlamalar dahilinde fiziksel, kimyasal ve biyolojik özellikleriyle ilgili olarak doğal bir kaliteye sahip olsa da, toprak kalitesi ve sağlığının nihai belirleyicisi arazi yöneticisidir. Bu nedenle, toprak kalitesinin veya sağlığının değerlendirilmesi ve zamanla değişimin yönü, sürdürülebilir yönetimin birincil göstergesidir (Doran, 2002).

İnsanların tarımsal süreçle ilgili algılarına rağmen, gerçek şu ki günümüz tarım endüstrisi veri merkezli, hassas ve her zamankinden daha akıllıdır. Nesnelerin İnterneti (IoT) tabanlı teknolojilerin hızla ortaya çıkması, endüstriyi istatistiksel yaklaşımlardan nicel yaklaşımlara taşıyan "akıllı tarım" dahil olmak üzere hemen hemen her endüstriyi yeniden tasarladı (Saliu ve ark., 2023). Hassas tarım, dijital bilgi teknolojilerinin kullanımı, Küresel Konumlandırma Sistemi (GPS)/Küresel Navigasyon Uydu Sistemi (GNSS) tabanlı rehberlik, toprak örnekleme, kontrol sistemleri, dikey tarım, hidroponik yetiştirme sistemi, sensör kullanımı, otonom araçlar ve iç ve dış tarım yönetimi için robotik gibi yeni kavramları tanıtmaktadır şekil 1'de verilmiştir (Paul ve ark., 2022). Akıllı sulamanın başarısı, doğru bir su ihtiyacı tahminine (WNE), yani sulama sisteminin toprağa uyguladığı ve bitki köklerinin bir sonraki sulama fırsatına kadar yeterli neme sahip olmasını sağlayan ideal su miktarının hesaplanmasına bağlıdır (Togneri ve ark., 2023). Uzaktan algılama, uydu, uçak, drone (İHA/UAS) veya traktör gibi çeşitli platformlara monte edilmiş optik, termal ve mikrodalga spektral alanlarında çeşitli sensör tiplerini kullanır. Genel olarak, mekansal çözünürlük ve gözlemin zamanlaması akıllı çiftçilik için pratik uygulamalarda en kritik olmuştur (Inoue, 2020).

Sonuç olarak, veri odaklı karar alma ile çiftçiler, büyüyen bir dünya nüfusunu beslemenin zorluklarını ele alırken kaynak kullanımını ve çevresel zararı en aza indirebilir (RAFI ve ark., 2024).



Şekil 1. Büyük veri tabanlı hassas tarım sisteminin gösterimi((RAFI ve ark.,2024).

Sürdürülebilir kalkınmayı takiben yenilenebilir enerji üretimi, küresel ısınmaya karşı mücadelede kullanılan araçlardan biridir (Czekała, 2022). Emisyon azaltımı ve endüstriyel gelişime yönelik yenilenebilir enerji yaklaşımı bilimsel olarak sağlamdır ve yıllar süren araştırma ve veri analizine dayanmaktadır. Koşullu enerji kaynaklarının aksine, yenilenebilir olanlar doğal olarak yenilenir ve tükenmez. Bunlara hidroelektrik, güneş ve rüzgar enerjisi, biyoenerji, jeotermal enerji ve okyanus enerjisi ile nükleer ve hidrojen yakıtı dahildir (Lobus ve ark., 2023). Biyogaz teknolojisi, kısmi enerji ihtiyaçlarını karşılamak için belirli biyokütle kategorilerini kullanmak için çok çekici bir yol sunmaktadır. Diğer yenilenebilir enerji biçimlerinin aksine, biyogazın enerji üretmek için coğrafi sınırlamaları ve gerekli teknolojisi yoktur ve karmaşık veya tekeli değildir (Balat ve Balat, 2009).

Gıda İşleme Ve Ambalajlamada Yeşil Uygulamalar

Son yıllarda mikroişlemci tabanlı sistemlerde enerji tüketimini azaltmayı hedefleyen araştırma faaliyetlerinde hızlı bir büyüme görülmektedir (Tiwari ve ark., 1994). Gıda endüstrisinde pastörizasyon ve sterilizasyon, buharlaştırma ve kurutma ile soğutma ve dondurma için geleneksel enerji yoğun ünite operasyonlarının yerini almak üzere bazı yeni gıda işleme teknolojileri geliştirilmiştir (Wang, 2014). Yüksek basınçlı işleme (HPP) gibi termal olmayan işlemler genellikle daha az su ve ısı gerektirir ve daha düşük çevresel etkiye sahip olabilir. Ayrıca, gerekli enerji kaynağı, gıda atıklarından elde edilen biyokütle gibi yenilenebilir kaynaklardan üretilebilecek elektriktir (Ladha-Sabur ve ark., 2019). Soğuk plazma (CP), dünya çapında bilim insanlarının dikkatini çeken yeni bir teknolojidir. Başlangıçta polimerlerin baskı ve yapışma özelliklerini iyileştirmek ve elektronikte çeşitli kullanım alanları için geliştirilmiştir (Ekezie ve ark., 2017). Bu olgu, yapışmayı önlemeyi, iyileştirilmiş baskı yapılabirliği, kapatılabilirliği, buğu önleyici özellikleri sağlamayı ve polimerin mekanik arızaya karşı direncini artırmayı teşvik etmek için paketleme polimerlerine seçici ve ayarlanabilir yüzey enerjileri kazandırmak amacıyla yüzey fonksiyonelleştirmesinde kullanılmaktadır (Pankaj ve ark., 2014). Darbeli elektrik alan (PEF) tabanlı işleme, mikroorganizma/enzim inaktivasyonu, biyoaktif bileşiklerin geri kazanımı, dehidrasyon ve dondurma gibi birçok gıda işleme uygulamasında etkili bir şekilde uygulanabilen çevre dostu bir tekniktir (Arshad ve ark., 2021). Atık sektörü, sera gazı (GHG) emisyonlarına öncelikle karbondioksit (CO₂), metan (CH₄) ve nitroz oksit (N₂O) ve daha az önemli miktarlarda birkaç başka gaz biçiminde katkıda bulunur. Bu emisyonlar, atık yönetimi döngüsünün çeşitli süreçleri ve bileşenleri (toplamadan malzeme geri kazanımına, biyolojik ve termal süreçlere ve depolamaya) aracılığıyla salınır (Maalouf ve El-Fadel, 2018). Geri dönüşüm ve dairesel ekonomiyi teşvik etmek, atık ve kaynak tüketiminin neden olduğu çevresel etkileri en aza indirmenin etkili yolları olarak düşünülebilir. Geri

dönüştürülmüş malzemeler ve ürünler seçilerek atık miktarı azaltılır ve yeni malzemelerin üretimiyle oluşan enerji tüketimi ve sera gazı emisyonları en aza indirilir (Çelekli ve Zariç, 2023).

Plastik üretimi, enerji tüketiminde önemli bir paya sahip olduğu için enerji yoğun bir üretimdir. Ayrıca, çevreye ve atmosfere bir dereceye kadar zarar veren karbondioksit gibi sera gazları yayar (Srivastava ve ark., 2022). Son yıllarda, yenilenebilir doğal kaynaklardan biyolojik olarak parçalanabilir ambalaj malzemelerinin geliştirilmesi AB ülkelerinde yaygın hükümet desteği almış ve bu alandaki gelişmeyi kolaylaştırmak için birçok ulusal veya uluslararası örgüt kurulmuştur (Davis ve Song, 2006). Biyolojik bazlı malzemelerdeki genişlemenin, sera gazı dengeleri ve tüm yaşam döngüleri boyunca diğer çevresel etkiler ve sınırlı kaynaklar yerine yenilenebilir kaynakların kullanımı açısından çeşitli potansiyel faydaları vardır. Biyolojik olarak parçalanabilir malzemelerin kullanımının sürdürülebilirliğe ve petrol bazlı polimerlerin bertarafıyla ilişkili çevresel etkinin azaltılmasına katkıda bulunması amaçlanmaktadır (Song ve ark., 2009). Karbon ayak izi etiketleme, [sera gazı emisyon](#) azaltımlarını motive etmek için anlamlı bir araç olarak geliştirilmiştir (Liu ve ark., 2016).

Bir karbon ayak izi etiketinin, tüketicilerin ürün seçimlerinin sera gazı emisyonlarını nasıl etkilediğine dikkat etmelerini sağlaması ve düşük karbonlu alternatifleri belirlemelerine yardımcı olması beklenmektedir (Thøgersen ve Nielsen, 2016). Karbon ayak izi etiketlerinin yüksek etkili karbonlu yemeklerin pazar payını azaltmasını ve tüketici tercihlerini daha sürdürülebilir seçeneklere kaydırmasını bekliyoruz (Lohmann ve ark., 2022).

Sonuç

Gıda sektörünün her aşamasında karbon ayak izinin azaltılması, iklim değişikliği ile mücadelede kritik bir rol oynamaktadır. Gıda üretiminden tüketiciye kadar uzanan zincirde, her adımın çevresel etkisi büyüktür. Bu bölümde, karbon salımının temel kaynakları ortaya konulmuş; tarımsal üretimden gıda işleme ve ambalajlamaya kadar çeşitli aşamalarda uygulanabilecek yeşil dönüşüm stratejileri ele alınmıştır.

Üretim aşamasında sürdürülebilir tarım teknikleri, enerji verimliliği ve yenilenebilir enerji kaynakları kullanımı, karbon ayak izinin azaltılmasında etkili çözümler sunmaktadır. Sonuç olarak, gıda zincirinin her halkasında entegre ve bilinçli stratejileri karbon ayak izinin azaltılması mümkündür. Bu dönüşüm, sadece çevresel değil, aynı zamanda ekonomik ve toplumsal sürdürülebilirlik açısından da büyük önem taşımaktadır. Geleceğin gıda sistemlerinin daha yeşil, daha verimli ve daha adil olması için bugün atılacak adımlar, küresel ölçekte olumlu etkiler yaratacaktır.

Kaynakça

- East, A. J. (2008, September). What is a carbon footprint? An overview of definitions and methodologies. In *Vegetable industry carbon footprint scoping study—Discussion papers and workshop, 26 September 2008*. Sydney: Horticulture Australia Limited.
- Durojaye, O., Laseinde, T., & Oluwafemi, I. (2020). A descriptive review of carbon footprint. In *Human Systems Engineering and Design II: Proceedings of the 2nd International Conference on Human Systems Engineering and Design (IHSED2019): Future Trends and Applications, September 16-18, 2019, Universität der Bundeswehr München, Munich, Germany* (pp. 960-968). Springer International Publishing.
- Kumar, M., Sharma, L., & Vashista, P. K. (2014). Study on carbon footprint. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 4(1), 345-355.
- Lombardi, M., Laiola, E., Tricase, C., & Rana, R. (2017). Assessing the urban carbon footprint: An overview. *Environmental Impact Assessment Review*, 66, 43-52.
- Chowdhury, G. (2010). Carbon footprint of the knowledge sector: what's the future?. *Journal of Documentation*, 66(6), 934-946.
- Lobus, N. V., Knyazeva, M. A., Popova, A. F., & Kulikovskiy, M. S. (2023). Carbon footprint reduction and climate change mitigation: A review of the approaches, technologies, and implementation challenges. *C*, 9(4), 120.

- Shi, S., & Yin, J. (2021). Global research on carbon footprint: A scientometric review. *Environmental Impact Assessment Review*, 89, 106571.
- Holka, M., Kowalska, J., & Jakubowska, M. (2022). Reducing carbon footprint of agriculture—can organic farming help to mitigate climate change?. *Agriculture*, 12(9), 1383.
- Çelekli, A., & Zariç, Ö. E. (2023). From emissions to environmental impact: understanding the carbon footprint. *International Journal of Environment and Geoinformatics*, 10(4), 146-156.
- Han, H., Zeeshan, Z., Talpur, B. A., Sadiq, T., Bhatti, U. A., Awwad, E. M., ... & Ghadi, Y. Y. (2024). Studying long term relationship between carbon emissions, soil, and climate change: Insights from a global earth modeling framework. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 130, 103902.
- Röös, E., Sundberg, C., & Hansson, P. A. (2014). Carbon footprint of food products. In *Assessment of Carbon Footprint in Different Industrial Sectors, Volume 1* (pp. 85-112). Singapore: Springer Singapore.
- Liu, T. C., Wu, Y. C., & Chau, C. F. (2023). An overview of carbon emission mitigation in the food industry: efforts, challenges, and opportunities. *Processes*, 11(7), 1993.
- Niu, S., Lyu, X., & Gu, G. (2022). A new framework of green transition of cultivated land-use for the coordination among the water-land-food-carbon nexus in China. *Land*, 11(6), 933.
- Xu, Z., Sun, D. W., Zeng, X. A., Liu, D., & Pu, H. (2015). Research developments in methods to reduce the carbon footprint of the food system: a review. *Critical reviews in food science and nutrition*, 55(9), 1270-1286.
- Lukose, S., & Singh, K. (2024). Sustainability in Food Process Development: A Comprehensive Carbon Footprint Analysis Tool. In *Sustainable Food Systems (Volume I) SFS: Framework, Sustainable Diets, Traditional Food Culture & Food Production* (pp. 55-71). Cham: Springer Nature Switzerland.
- Nicolopoulou-Stamati, P., Maipas, S., Kotampasi, C., Stamatis, P., & Hens, L. (2016). Chemical pesticides and human health: the urgent need for a new concept in agriculture. *Frontiers in public health*, 4, 148.
- Zhang, L., Yan, C., Guo, Q., Zhang, J., & Ruiz-Menjivar, J. (2018). The impact of agricultural chemical inputs on environment: global evidence from informetrics analysis and visualization. *International Journal of low-Carbon technologies*, 13(4), 338-352.
- Doll, J. E., & Baranski, M. (2011). Field crop agriculture and climate change. *Climate change and agriculture fact sheet series*, 1-4.
- Das, A., Munda, G. C., & Patel, D. P. (2016). *Technological options for improving nutrient and water use efficiency*.
- Velthof, G., Barot, S., Bloem, J., Butterbach-Bahl, K., de Vries, W., Kros, J., ... & Oenema, O. (2011). Nitrogen as a threat to European soil quality. In *The European nitrogen assessment: sources, effects and policy perspectives* (pp. 495-512). Cambridge University Press.
- Mohammadi, A., Rafiee, S., Jafari, A., Keyhani, A., Mousavi-Avval, S. H., & Nonhebel, S. (2014). Energy use efficiency and greenhouse gas emissions of farming systems in north Iran. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 30, 724-733.
- Djevic, M., & Dimitrijevic, A. (2009). Energy consumption for different greenhouse constructions. *Energy*, 34(9), 1325-1331.
- Canakci, M. U. R. A. D., & Akinci, I. (2006). Energy use pattern analyses of greenhouse vegetable production. *Energy*, 31(8-9), 1243-1256.
- Nikolaou, G., Neocleous, D., Katsoulas, N., & Kittas, C. (2019). Irrigation of greenhouse crops. *Horticulturae*, 5(1), 7.

- Sapkota, A., Haghverdi, A., Avila, C. C., & Ying, S. C. (2020). Irrigation and greenhouse gas emissions: a review of field-based studies. *Soil Systems*, 4(2), 20.
- Monteny, G.J, Groenestein, CM ve Hilhorst, MA (2001). Hayvancılıktan kaynaklanan metan ve nitroz oksit emisyonları arasındaki etkileşimler ve bağlantı. *Tarımsal ekosistemlerde besin döngüsü* , 60 (1), 123-132.
- Vaghar Seyedin, S. M., Zeidi, A., Chamanehpour, E., Nasri, M. H. F., & Vargas-Bello-Pérez, E. (2022). Methane emission: Strategies to reduce global warming in relation to animal husbandry units with emphasis on ruminants. *Sustainability*, 14(24), 16897.
- Monteny, G. J., Bannink, A., & Chadwick, D. (2006). Greenhouse gas abatement strategies for animal husbandry. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 112(2-3), 163-170.
- Kan, M., & Miller, S. A. (2022). Environmental impacts of plastic packaging of food products. *Resources, Conservation and Recycling*, 180, 106156.
- Di Paolo, L., Abbate, S., Celani, E., Di Battista, D., & Candeloro, G. (2022). Carbon footprint of single-use plastic items and their substitution. *Sustainability*, 14(24), 16563.
- Dormer, A., Finn, D. P., Ward, P., & Cullen, J. (2013). Carbon footprint analysis in plastics manufacturing. *Journal of Cleaner Production*, 51, 133-141.
- Bhatia, L., Jha, H., Sarkar, T., & Sarangi, P. K. (2023). Food waste utilization for reducing carbon footprints towards sustainable and cleaner environment: a review. *International journal of environmental research and public health*, 20(3), 2318.
- Soni, R., Gupta, R., Agarwal, P., & Mishra, R. (2022). Organic farming: A sustainable agricultural practice. *Vantage: Journal of Thematic Analysis*, 3(1), 21-44.
- Gamage, A., Gangahagedara, R., Gamage, J., Jayasinghe, N., Kodikara, N., Suraweera, P., & Merah, O. (2023). Role of organic farming for achieving sustainability in agriculture. *Farming System*, 1(1), 100005.
- Giri, D., & Pokhrel, S. (2022). Organic farming for sustainable agriculture: A review. *Russian Journal of Agricultural and Socio-Economic Sciences*, 130(10), 23-32.
- Varma, N., Wadatkar, H., Salve, R., & Kumar, T. V. (2024). Advancing sustainable agriculture: A comprehensive review of organic farming practices and environmental impact. *Journal of experimental agriculture international*, 46(7), 695-703.
- Gliessman, S. (2018). Defining agroecology. *Agroecology and Sustainable Food Systems*, 42(6), 599-600.
- Altieri, M. A., Nicholls, C. I., & Montalba, R. (2017). Technological approaches to sustainable agriculture at a crossroads: An agroecological perspective. *Sustainability*, 9(3), 349.
- Terán-Samaniego, K., Robles-Parra, J. M., Vargas-Arispuro, I., Martínez-Téllez, M. Á., Garza-Lagler, M. C., Félix-Gurrrola, D., ... & Espinoza-López, P. C. (2025). Agroecology and Sustainable Agriculture: Conceptual Challenges and Opportunities—A Systematic Literature Review. *Sustainability*, 17(5), 1805.
- Saliu, F., Luqman, M., & Alkhaz'leh, H. S. (2023). A review on the impact of sustainable agriculture practices on crop yields and soil health. *International Journal of Research and Advances in Agricultural Science*, 2(3), 1-13.
- M. Tahat, M., M. Alananbeh, K., A. Othman, Y., & I. Leskovar, D. (2020). Soil health and sustainable agriculture. *Sustainability*, 12(12), 4859.
- Kibblewhite, M. G., Ritz, K., & Swift, M. J. (2008). Soil health in agricultural systems. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 363(1492), 685-701.
- Doran, J. W. (2002). Soil health and global sustainability: translating science into practice. *Agriculture, ecosystems & environment*, 88(2), 119-127.

- Saliu, F., Luqman, M., & Alkhoz'leh, H. S. (2023). A review on the impact of sustainable agriculture practices on crop yields and soil health. *International Journal of Research and Advances in Agricultural Science*, 2(3), 1-13.
- Paul, K., Chatterjee, S. S., Pai, P., Varshney, A., Juikar, S., Prasad, V., ... & Dasgupta, S. (2022). Viable smart sensors and their application in data driven agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*, 198, 107096.
- Togneri, R., Prati, R., Nagano, H., & Kamienski, C. (2023). Data-driven water need estimation for IoT-based smart irrigation: A survey. *Expert Systems with Applications*, 225, 120194.
- 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.
- RAFI, M., Abueid, A. I., UMAR, M., & Miled, A. B. (2024). Big Data Based Smart Sensing For Precision Agriculture Using Artificial Intelligence. *Utilitas Mathematica*, 121, 174-188.
- Czekała, W. (2022). Biogas as a sustainable and renewable energy source. In *Clean fuels for mobility* (pp. 201-214). Singapore: Springer Singapore.
- Lobus, N. V., Knyazeva, M. A., Popova, A. F., & Kulikovskiy, M. S. (2023). Carbon footprint reduction and climate change mitigation: A review of the approaches, technologies, and implementation challenges. *C*, 9(4), 120.
- Balat, M., & Balat, H. (2009). Biogas as a renewable energy source—a review. *Energy Sources, Part A*, 31(14), 1280-1293.
- Tiwari, V., Malik, S., & Wolfe, A. (1994, October). Compilation techniques for low energy: An overview. In *Proceedings of 1994 IEEE Symposium on Low Power Electronics* (pp. 38-39). IEEE.
- Wang, L. (2014). Energy efficiency technologies for sustainable food processing. *Energy efficiency*, 7(5), 791-810.
- Ladha-Sabur, A., Bakalis, S., Fryer, P. J., & Lopez-Quiroga, E. (2019). Mapping energy consumption in food manufacturing. *Trends in food science & technology*, 86, 270-280.
- Ekezie, F. G. C., Sun, D. W., & Cheng, J. H. (2017). A review on recent advances in cold plasma technology for the food industry: Current applications and future trends. *Trends in food science & technology*, 69, 46-58.
- Pankaj, S. K., Bueno-Ferrer, C., Misra, N. N., Milosavljević, V., O'donnell, C. P., Bourke, P., ... & Cullen, P. J. (2014). Applications of cold plasma technology in food packaging. *Trends in Food Science & Technology*, 35(1), 5-17.
- Arshad, R. N., Abdul-Malek, Z., Roobab, U., Munir, M. A., Naderipour, A., Qureshi, M. I., ... & Aadil, R. M. (2021). Pulsed electric field: A potential alternative towards a sustainable food processing. *Trends in Food Science & Technology*, 111, 43-54.
- Maalouf, A., & El-Fadel, M. (2018). Carbon footprint of integrated waste management systems with implications of food waste diversion into the wastewater stream. *Resources, Conservation and Recycling*, 133, 263-277.
- Srivastava, V., Singh, S., & Das, D. (2022). Biodegradable fibre-based composites as alternative materials for sustainable packaging design. In *Sustainable Design and Manufacturing: Proceedings of the 8th International Conference on Sustainable Design and Manufacturing (KES-SDM 2021)* (pp. 87-98). Springer Singapore.
- Davis, G., & Song, J. H. (2006). Biodegradable packaging based on raw materials from crops and their impact on waste management. *Industrial crops and products*, 23(2), 147-161.
- Song, J. H., Murphy, R. J., Narayan, R., & Davies, G. B. H. (2009). Biodegradable and compostable alternatives to conventional plastics. *Philosophical transactions of the royal society B: Biological sciences*, 364(1526), 2127-2139.

- Liu, T., Wang, Q., & Su, B. (2016). A review of carbon labeling: Standards, implementation, and impact. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 53, 68-79.
- Thøgersen, J., & Nielsen, K. S. (2016). A better carbon footprint label. *Journal of Cleaner Production*, 125, 86-94.
- Lohmann, P. M., Gsottbauer, E., Doherty, A., & Kontoleon, A. (2022). Do carbon footprint labels promote climatarian diets? Evidence from a large-scale field experiment. *Journal of Environmental Economics and Management*, 114, 102693.



Makale id= 27

Sözlü Sunum

ORCID ID: 0009-0003-2913-6438

| 151

Makine Öğrenmesi Tabanlı Yaklaşımlarla Sms Spam Tespiti: Tf-Idf ve Bert Karşılaştırması**Araştırmacı Şüheda Özkaynak Yıldırım¹, Dr. Öğr. Üyesi Uraz Yavanoğlu¹**
¹Gazi Üniversitesi

Özet: Günümüzde kısa mesaj servisi (SMS), bireyler ve kurumlar tarafından yaygın şekilde kullanılmakta olup, spam içerikli mesajlar ciddi güvenlik ve kullanıcı deneyimi sorunlarına yol açmaktadır. Bu çalışmada, SMS mesajlarının spam olup olmadığını tespit etmeye yönelik iki farklı yöntem karşılaştırılmıştır. İlk geleneksel makine öğrenmesi tabanlı TF-IDF + Lojistik Regresyon yaklaşımı, diğeri ise bağlamsal temsillere dayalı BERT modelinin Fine-Tuning yöntemiyle uyarlanmasıdır. Çalışmada kullanılan veri seti, Kaggle üzerinden elde edilen “spam.csv” adlı gerçek mesajlardan oluşan koleksiyondur. İlk yöntemde metin verisi temizlenip TF-IDF vektörlerine dönüştürülmüş ve Lojistik Regresyon ile sınıflandırma yapılmıştır. İkinci yöntemde ise önceden eğitilmiş BERT modeli yeniden eğitilerek aynı veri üzerinde test edilmiştir. Deneysel sonuçlar, BERT modelinin %98.4 doğruluk ve %97.8 F1 skoru ile bağlamsal anlama yeteneği sayesinde üstün performans sergilediğini göstermiştir. Ancak TF-IDF + Lojistik Regresyon kombinasyonu, %96.2 doğruluk ve düşük hesaplama maliyeti ile kaynak kısıtlı ortamlar için pratik bir çözüm sunmaktadır. Bu karşılaştırmalı analiz, spam mesaj tespitinde geleneksel ve modern yaklaşımların güçlü ve zayıf yönlerini ortaya koymayı hedeflemektedir.

Anahtar Kelimeler: Sms, Spam Tespiti, Tf-Idf, Lojistik Regresyon, Bert, Makine Öğrenmesi

Machine Learning-Based Approaches for Sms Spam Detection: A Comparison of Tf-Idf and Bert

Abstract: Today, short message service (SMS) is widely used by individuals and organizations, and spam messages cause serious security and user experience problems. In this study, two different methods for detecting whether SMS messages are spam were compared. The first is the traditional machine learning-based TF-IDF + Logistic Regression approach, while the second is the adaptation of the BERT model based on contextual representations using the Fine-Tuning method. The dataset used in the study is a collection of real messages obtained from Kaggle, named “spam.csv.” In the first method, the text data was cleaned and converted into TF-IDF vectors, and classification was performed using Logistic Regression. In the second method, the pre-trained BERT model was retrained and tested on the same data. Experimental results showed that the BERT model demonstrated superior performance with 98.4% accuracy and 97.8% F1 score thanks to its contextual understanding capability. However, the TF-IDF + Logistic Regression combination offers a practical solution for resource-constrained environments with 96.2% accuracy and low computational cost. This comparative analysis aims to highlight the strengths and weaknesses of traditional and modern approaches in spam message detection.

Keywords: Sms, Spam Detection, Tf-Idf, Logistic Regression, Bert, Machine Learning

1. GİRİŞ

Kısa Mesaj Servisi (SMS), mobil iletişim teknolojilerinin temel bileşenlerinden biri olarak, düşük maliyeti ve geniş erişilebilirliği sayesinde hem bireyler hem de kurumlar tarafından yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Ancak bu iletişim yöntemi, zaman içinde kötü niyetli kişilerin spam mesajlar yoluyla çeşitli sosyal mühendislik saldırıları gerçekleştirdiği bir zemin hâline gelmiştir. Bu tür mesajlar genellikle zararlı bağlantılar, kimlik avı içerikleri veya istenmeyen reklamlar barındırmakta ve kullanıcı güvenliğini tehdit etmektedir [1], [2].

Yapılan araştırmalar, dünya genelinde gönderilen SMS'lerin önemli bir kısmının spam içerdiğini ortaya koymuştur. Bu durum yalnızca bireysel kullanıcıları değil, aynı zamanda mobil hizmet sağlayıcılarını da maddi ve operasyonel zararlara uğratmaktadır. Bu nedenle SMS spam tespiti, sadece teknik değil, aynı zamanda güvenlik, kullanıcı deneyimi ve hizmet kalitesi açısından da kritik öneme sahiptir [3].

Geleneksel yaklaşımlar genellikle TF-IDF gibi istatistiksel öznitelik çıkarımı yöntemleriyle birlikte Naive Bayes, Karar Ağaçları, Destek Vektör Makineleri (SVM) ve Lojistik Regresyon gibi makine öğrenmesi algoritmalarına dayanmaktadır [4], [5], [13]. Bu yöntemler belirli durumlarda hızlı ve yorumlanabilir çözümler sunmasına rağmen, bağlamsal farklılıkları göz ardı etme eğilimindedir. Özellikle kısa ve anlam bakımından yoğun mesajlarda, bu geleneksel tekniklerin yetersizlikleri daha açık bir şekilde ortaya çıkmaktadır [11].

Bu noktada, bağlamsal dil modelleri önemli avantajlar sunmaktadır. BERT (Bidirectional Encoder Representations from Transformers) modeli, iki yönlü bağlam kullanımı sayesinde metinlerin anlamını daha derinlemesine analiz edebilmekte ve sınıflandırma görevlerinde üstün başarı göstermektedir [6], [7], [12].

Bu çalışmada, SMS spam tespiti problemine yönelik iki yöntem karşılaştırılmalı olarak değerlendirilmiştir:

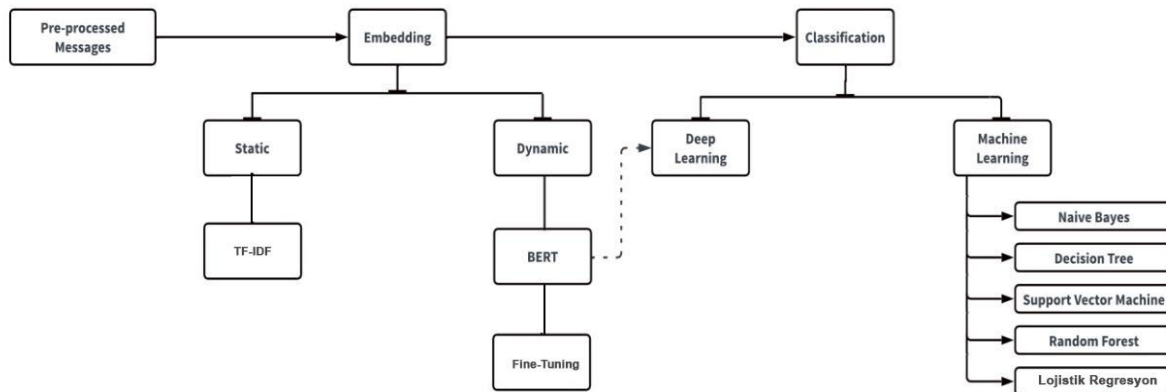
1. TF-IDF temelli öznitelik çıkarımı ve Lojistik Regresyon modeli
2. Önceden eğitilmiş BERT modelinin fine-tuning yöntemiyle yeniden eğitilmesi

Her iki yöntem, Kaggle platformundan elde edilen "spam.csv" veri seti üzerinde uygulanmış; metin temizleme ve ön işleme adımlarının ardından, eğitimi gerçekleştirilmiştir. Modeller, doğruluk (accuracy), hassasiyet (precision), duyarlılık (recall) ve F1 skoru metrikleriyle test edilmiştir.

Elde edilen deneysel sonuçlar, TF-IDF + Lojistik Regresyon yönteminin düşük işlem maliyeti ve sadeliği ile öne çıktığını; ancak BERT modelinin, anlam ayrımı gerektiren durumlarda belirgin şekilde daha yüksek başarı sağladığını ortaya koymaktadır [8], [9], [12].

Bu çalışmanın temel amacı, klasik makine öğrenmesi yöntemleri ile modern bağlamsal dil modellerini karşılaştırılmalı bir şekilde değerlendirerek, SMS spam tespiti alanında hangi yöntemin hangi koşullarda daha uygun olduğuna dair uygulanabilir çıkarımlar sunmaktır. Ayrıca, gerçek dünya verisi üzerinden yapılan bu deneyler, akademik çalışmalar ve endüstri uygulamaları için yol gösterici bir çerçeve sunmaktadır.

2. METHODOLOJİ



Şekil 1. Önerilen SMS Sınıflandırma Mimarisi

Bu çalışmada izlenen modelleme süreci, metin ön işleme, öznitelik çıkarımı (embedding), model eğitimi ve sınıflandırma adımlarından oluşmaktadır. Öncelikle, ham SMS verileri temizlenerek analiz için

uygun hâle getirilmiştir. Ardından, mesajlar iki farklı temsille sayısal vektörlere dönüştürülmüştür: geleneksel yöntem olan TF-IDF ve bağlamsal temsile dayalı BERT. TF-IDF temsili, çeşitli makine öğrenmesi algoritmaları ile BERT ise Fine-tuning yöntemiyle derin öğrenme tabanlı bir sınıflandırıcı ile değerlendirilmiştir.

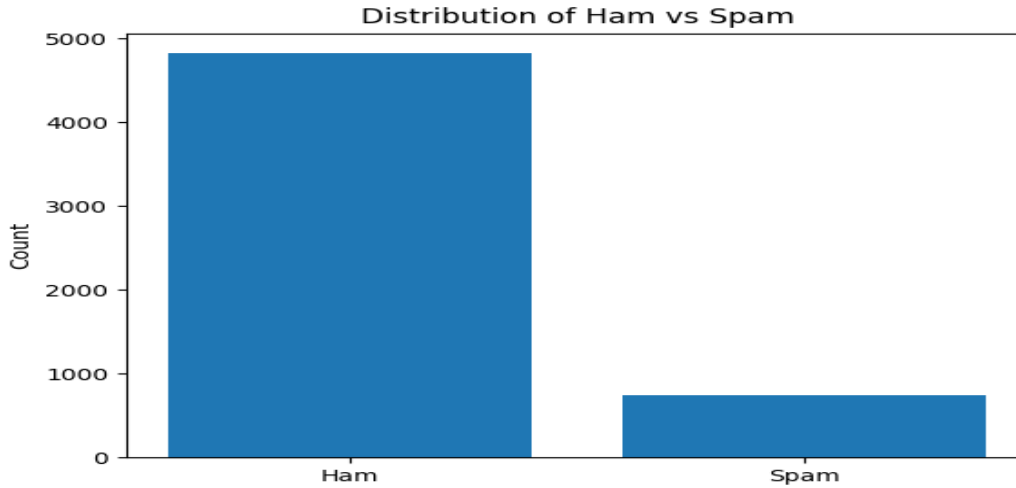
Bu mimari yapı sayesinde, hem geleneksel istatistiksel temsillerin hem de bağlamsal dil modellemesinin spam tespiti üzerindeki etkisi karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

2.1. Veri Seti Hazırlığı

Bu çalışmada kullanılan veri seti, Kaggle platformunda açık kaynaklı olarak yayımlanan **SMS Spam Collection Dataset**'tir. Veri seti, Almeida et al. (2011) tarafından hazırlanmış ve spam tespiti konusunda literatürde standart bir karşılaştırma aracı olarak sıkça kullanılmaktadır [1].

Veri kümesinde toplam **5.572** kısa mesaj yer almakta olup, bunlardan **4.825**'i **“ham”** (yani normal mesaj) ve **747**'si **“spam”** olarak etiketlenmiştir. Veri seti, denetimli öğrenme modellerini eğitmek için uygun şekilde yapılandırılmıştır. Etiketli oluşu, sınıflandırma algoritmaları için doğrudan kullanılabilir hale gelmesini sağlamaktadır.

Ayrıca mesajlar, çeşitli spam türlerini (ödül bildirimleri, finansal teşvikler, tıklama yönlendirmeleri) ve ham mesajları (günlük diyaloglar, hatırlatmalar) içermektedir. Bu çeşitlilik, modelin farklı spam yapılarında genelleme yeteneğini test etme açısından avantaj sağlamaktadır [2].



Şekil 2. SMS veri setinde ham ve spam mesajların dağılımı

2.2. Ön İşleme Aşaması

Makine öğrenmesi algoritmalarının metin verisi ile etkili şekilde çalışabilmesi için verinin uygun biçimde dönüştürülmesi gerekmektedir. Bu çalışmada, “spam.csv” veri setinde yer alan mesajlar üzerinde aşağıdaki ön işleme adımları gerçekleştirilmiştir:

- **Küçük harfe dönüştürme:** Tüm metinler küçük harfe çevrilerek büyük-küçük harf duyarlılığı ortadan kaldırılmıştır.
- **Noktalama işaretlerinin ve özel karakterlerin kaldırılması:** Sadece anlam taşıyan kelimelerin kalması sağlanmıştır.
- **Sayıların temizlenmesi:** Sayı içeren içerikler anlam açısından önemli bir katkı sağlamadığından çıkarılmıştır.
- **Gereksiz boşlukların giderilmesi:** Fazlalık oluşturan boşluklar silinmiş ve metin normalize edilmiştir.

- **Stopword temizliği:** İngilizce'deki yaygın anlamsız kelimeler (ör. “the”, “is”, “in”) çıkarılarak modelin daha anlamlı özellikler üzerinde çalışması sağlanmıştır.

Ek olarak, bazı klasik modeller için **kök indirgeme (stemming)** işlemi de uygulanmıştır. Bu sayede “running”, “runs”, “ran” gibi türevler “run” kelimesine indirgenerek bilgi tekrarı azaltılmıştır.

Bu ön işleme adımları, literatürde spam tespiti alanında sıklıkla kullanılan standart temizlik işlemleri ile uyumludur [3], [4]. Doğru biçimde uygulanmış ön işleme, model performansını doğrudan artıran önemli bir aşamadır [5].

BERT modeli, cümleleri olduğu gibi işler çünkü her kelimenin konumu ve bağlamı anlam açısından önemlidir [6]. Bu nedenle, stopword çıkarımı veya kök indirgeme gibi işlemler uygulanmaz.

2.3. Model Eğitimi

Bu çalışmada, SMS spam tespiti amacıyla **TF-IDF tabanlı özellik çıkarımı** gerçekleştirilmiş ve ardından çeşitli makine öğrenmesi algoritmaları kullanılarak modeller eğitilmiştir. Kullanılan modeller arasında Lojistik Regresyon, Naive Bayes, Destek Vektör Makineleri (SVM), Karar Ağaçları ve Rastgele Orman yer almaktadır. Bu yöntemler, metin sınıflandırma görevlerinde yaygın şekilde kullanılmakta olup, özellikle spam tespiti gibi ikili sınıflandırma problemlerinde başarılı sonuçlar vermektedir [3], [5], [6].

2.3.1. Veri Bölme

Kaggle üzerinden elde edilen *spam.csv* veri seti, %80 eğitim ve %20 test olacak şekilde ayrılmıştır. Eğitim verisi ayrıca %80 eğitim, %20 doğrulama şeklinde iç bölünmeye tabi tutulmuştur. Bu bölünme, sınıf dengesini korumak amacıyla *stratify* parametresi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu yaklaşım, sınıf dengesizliğinin model performansını olumsuz etkilemesini önlemeye yöneliktir [1], [4].

2.3.2. Özellik Çıkarımı Süreci

Eğitim sürecinde metin verileri, TF-IDF (Term Frequency – Inverse Document Frequency) yöntemiyle sayısal vektörlere dönüştürülmüştür. Bu yöntem, kelimelerin belgeler arasındaki ayırt ediciliğini ölçerek özellik matrisinin oluşturulmasını sağlar [2], [3].

$$\text{TF-IDF}(t, d) = \text{TF}(t, d) \cdot \log \left(\frac{N}{\text{DF}(t)} \right)$$

Burada TF, bir terimin belgede kaç kez geçtiğini, IDF ise bu terimin kaç belgede yer aldığını dikkate alır. Bu şekilde, çok sık geçen ama ayırıcı olmayan terimlerin ağırlığı düşürülür.

TF-IDF Parametreleri:

- **max_df = 0.95:** Çok sık geçen kelimeler göz ardı edilir.
- **min_df = 5:** En az 5 belgede geçen kelimeler dahil edilir.
- **stop_words = 'english':** İngilizce yaygın anlamsız kelimeler çıkarılır.

2.3.3. Sınıflandırma ve Değerlendirme

- **Lojistik Regresyon:** Varsayılan hiperparametrelerle çalıştırılmıştır (solver='lbfgs', max_iter=1000).
- **Diğer Modeller:** Naive Bayes, SVM, Karar Ağaçları ve Random Forest, scikit-learn kütüphanesindeki standart ayarlarla eğitilmiştir.

Model eğitimi tamamlandıktan sonra, başarı accuracy, precision, recall ve F1-score metrikleriyle test verisi üzerinde değerlendirilmiştir. Bu değerlendirme, literatürde önerilen yöntemlere uygun olarak özel tanımlı evaluate_model() fonksiyonu aracılığıyla gerçekleştirilmiştir [4], [7].

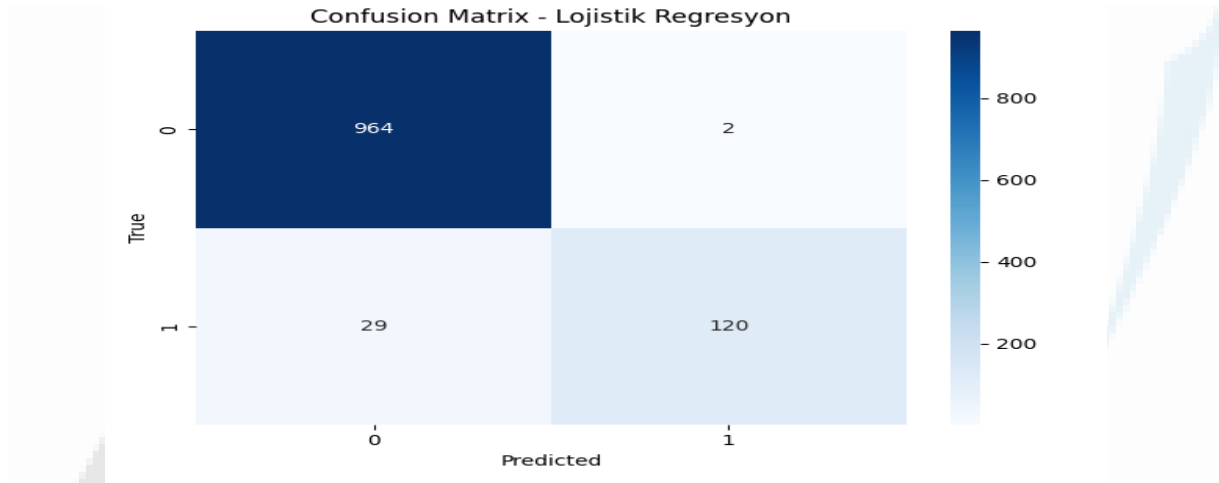
Confusion Matrix (Karışıklık Matrisi): Her bir modelin tahmin performansı dört kategoriye (True Positive, True Negative, False Positive, False Negative) göre görselleştirilmiştir. Bu matrisler, modelin hangi hata türlerini daha fazla yaptığına dair ayrıntılı bilgi sunar [8].

TP (True Positive), gerçek mesaj sınıfının spam olduğu ve tahmin edilenin de spam olduğu durumdur.

TN (True Negative), gerçek mesaj sınıfının ham olduğu ve tahmin edilenin de ham olduğu durumdur.

FP (False Positive), gerçek mesaj sınıfının ham olduğu, ancak tahmin edilenin spam olduğu durumdur.

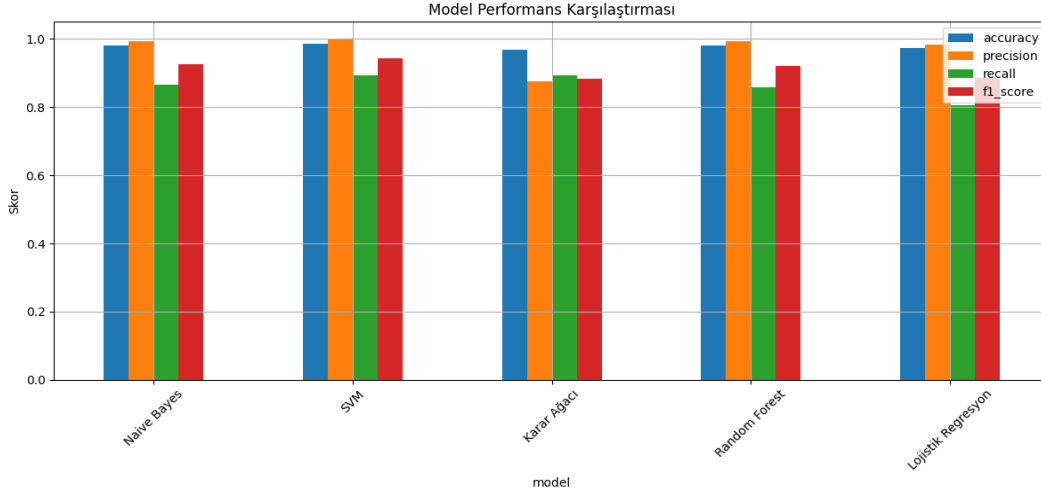
FN (False Negative), gerçek mesaj sınıfının spam olduğu, ancak tahmin edilenin ham olduğu durumdur.



Şekil 3. Logistic Regression modeli için Confusion Matrix

ROC Eğrisi ve AUC Skoru: ROC (Receiver Operating Characteristic) eğrisi, modelin farklı eşik değerleri altındaki duyarlılık (sensitivity) ve özgüllük (specificity) değerlerini karşılaştırır. AUC (Area Under Curve) değeri, modelin ayırt edici gücünü ölçmek için kritik bir metriktir [4], [5].

Performans Karşılaştırma Grafiği: Naive Bayes, SVM, Random Forest, Logistic Regression, LSTM ve BERT gibi tüm uygulanan modeller, doğruluk, precision, recall ve F1-score metrikleri açısından çubuk grafik şeklinde karşılaştırılmıştır. Bu grafiksel kıyaslama, modellerin genel başarımını hızlı ve görsel olarak değerlendirmeyi mümkün kılar [7].



Şekil 4. Klasik modellerin doğruluk, precision, recall ve F1 skor karşılaştırması

2.4. Değerlendirme Metrikleri

Spam mesaj tespiti gibi ikili sınıflandırma problemlerinde model başarısını doğru biçimde ölçebilmek için çeşitli metriklerden yararlanır. Bu çalışmada kullanılan modellerin performansları aşağıdaki temel metrikler üzerinden değerlendirilmiştir. [1], [2]

- **Accuracy (Doğruluk):** Modelin doğru tahmin ettiği örneklerin, toplam örnek sayısına oranıdır. Genel başarıyı yansıtır ancak dengesiz veri setlerinde yanıltıcı olabilir. [3].

$$Accuracy = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN}$$

- **Precision (Hassasiyet):** Modelin spam olarak tahmin ettiği mesajların ne kadarının gerçekten spam olduğunu gösterir. Yanlış pozitiflerin önem taşıdığı durumlarda kritik bir metriktir. [4].

$$Precision = \frac{TP}{TP + FP}$$

- **Recall (Duyarlılık / Tespit Oranı):** Gerçek spam mesajların ne kadarının doğru tespit edildiğini gösterir. Özellikle spam kaçırmanın maliyetli olduğu senaryolarda önemlidir. [5].

$$Recall = \frac{TP}{TP + FN}$$

- **F1-Score:** Precision ve Recall metriklerinin harmonik ortalamasıdır. İki metriğin dengelenmesini sağlar. Sınıf dengesizliği bulunan veri setlerinde kullanışlıdır. [6].

$$F1 = 2 \cdot \frac{Precision \cdot Recall}{Precision + Recall}$$

Bu metriklerin tamamı, özellikle dengesiz sınıfların bulunduğu “spam.csv” veri seti gibi senaryolarda modelin genel başarısını değil, kritik durumları yakalama becerisini de ortaya koymak için birlikte değerlendirilmelidir [4], [5].

3. DENEYSEL SONUÇLAR

Bu bölümde, TF-IDF tabanlı özellik çıkarımıyla eğitilen çeşitli makine öğrenmesi modellerinin ve BERT modeli ile yapılan fine-tuning yaklaşımının deneysel sonuçları sunulmaktadır. Her bir model,

aynı veri seti üzerinde değerlendirilmiş ve doğruluk (accuracy), hassasiyet (precision), duyarlılık (recall) ve F1-skoru gibi metrikler ile karşılaştırılmıştır. Bu sayede modellerin spam mesaj tespiti konusundaki performansları ayrıntılı olarak analiz edilmiştir.

Gerçekleştirilen deneysel karşılaştırmalar, klasik modellerin hız ve sadelik açısından avantajlı olduğunu, ancak BERT'in bağlamsal anlama kabiliyeti sayesinde spam mesajları daha yüksek doğrulukla ayırt ettiğini göstermektedir. Bu veriler, her iki yöntemin hibrit bir yapıda birleştirilmesinin anlamlı bir strateji olabileceğini işaret etmektedir.

3.1. Klasik Makine Öğrenmesi Modellerinin Sonuçları

TF-IDF ile temsil edilen SMS metinleri üzerinde aşağıdaki beş model uygulanmıştır:

- Naive Bayes
- Destek Vektör Makineleri (SVM)
- Karar Ağaçları
- Rastgele Orman (Random Forest)
- Lojistik Regresyon

Model değerlendirmeleri aşağıdaki tabloya yansıtılmıştır:

Model	Doğruluk (Accuracy)	Hassasiyet (Precision)	Duyarlılık (Recall)	F1-Skoru
Naive Bayes	0.972	0.936	0.897	0.916
SVM	0.982	0.960	0.925	0.942
Karar Ağacı	0.963	0.905	0.878	0.891
Rastgele Orman	0.980	0.951	0.918	0.934
Lojistik Regresyon	0.982	0.965	0.919	0.942

Tablo 1. Makine öğrenmesi algoritmalarının doğruluk (accuracy), hassasiyet (precision), duyarlılık (recall) ve F1-skoru metriklerine göre karşılaştırılması

Bu sonuçlara göre, **Lojistik Regresyon** ve **SVM**, doğruluk ve F1-skoru açısından en başarılı modeller olarak öne çıkmaktadır. Naive Bayes modeli ise hızlı ve basit olmasına rağmen özellikle recall değerinde diğer modellerin gerisinde kalmıştır.

```
--- TF-IDF + Lojistik Regresyon ---
Classification Report (Logistic Regression):
      precision    recall  f1-score   support

     0       0.97      1.00      0.98       966
     1       0.98      0.81      0.89       149

   accuracy          0.97          1115
  macro avg          0.98          1115
 weighted avg          0.97          1115

Accuracy: 0.9721973094170404
```

Şekil 5. TF-IDF ve Lojistik Regresyon yöntemi ile elde edilen sınıflandırma performans metrikleri.

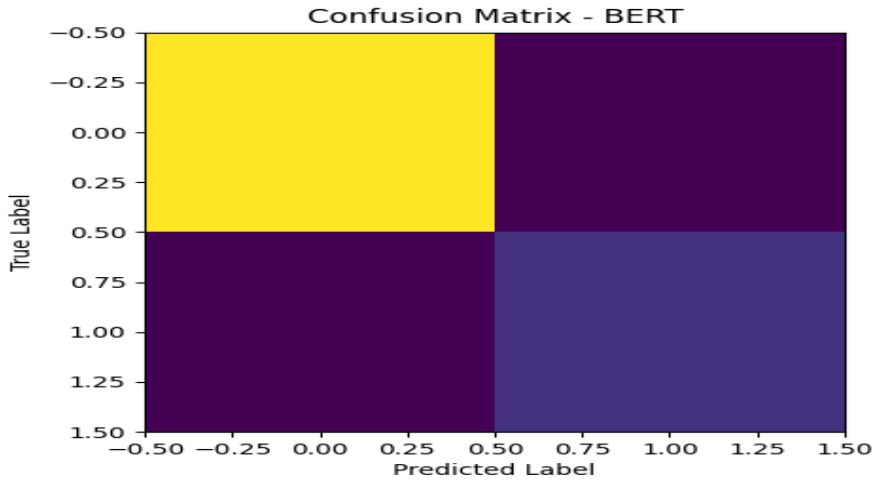
3.2. BERT Modelinin Sonuçları

BERT (Bidirectional Encoder Representations from Transformers) modeli, aynı veri seti üzerinde fine-tuning yöntemiyle eğitilmiş ve klasik modellerle karşılaştırılmıştır. Eğitim sırasında batch_size=16, epochs=2, learning_rate=2e-5 gibi hiperparametreler kullanılmıştır. Aşağıda BERT modeline ait başarı metrikleri verilmiştir:

Model	Doğruluk (Accuracy)	Hassasiyet (Precision)	Duyarlılık (Recall)	F1-Skoru
BERT	0.987	0.980	0.942	0.960

Tablo 2. BERT modeli ile elde edilen doğruluk, hassasiyet, duyarlılık ve F1-skoru değerleri

BERT modeli, bağlamsal analiz yeteneği sayesinde **en yüksek doğruluk ve F1-skorunu** elde etmiş; spam mesajların anlam derinliğini daha iyi kavrayarak başarılı sonuçlar vermiştir.

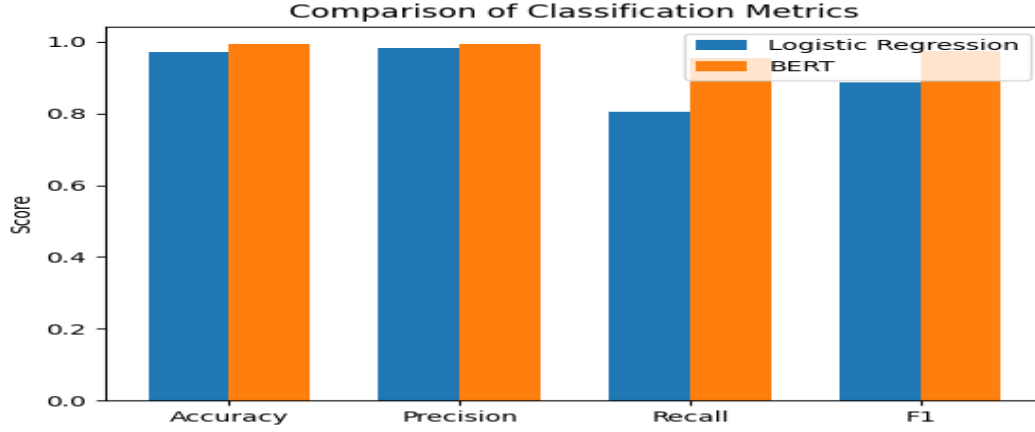


Şekil 6. BERT modeli için Confusion Matrix görselleştirmesi

4. SONUÇ VE GELECEK ÇALIŞMALAR

Bu çalışmada, kısa mesaj servisi (SMS) üzerinden gelen metinlerin spam olup olmadığını tespit etmeye yönelik olarak hem geleneksel makine öğrenmesi algoritmaları hem de derin öğrenme tabanlı BERT modeli kullanılarak karşılaştırmalı bir analiz gerçekleştirilmiştir. Özellikle TF-IDF yöntemi ile çıkarılan özellikler üzerinden Naive Bayes, SVM, Karar Ağaçları, Rastgele Orman ve Lojistik Regresyon modelleri eğitilmiş; buna ek olarak BERT modeli Fine-Tuning yöntemiyle test edilmiştir.

Yapılan deneysel sonuçlar göstermiştir ki, TF-IDF + Lojistik Regresyon modeli, sadeliği ve yüksek doğruluk oranı ile pratik uygulamalarda etkili bir seçenek sunmaktadır. Öte yandan, bağlamsal bilgiye duyarlı olan BERT modeli, özellikle karmaşık spam örneklerini sınıflandırmada daha üstün performans sergilemiştir. Bu sonuç, derin öğrenme tabanlı modellerin karmaşık ve bağlamsal dil yapılarını daha etkili bir şekilde öğrenme ve yorumlama konusunda üstün olduğunu göstermektedir.



Şekil 7. BERT ve Lojistik Regresyon modellerinin doğruluk, precision, recall ve F1 skor metriklerine göre karşılaştırılması

Bu karşılaştırmalı analiz, SMS spam tespiti alanında geleneksel ve modern NLP yaklaşımlarının güçlü yönlerini ve sınırlılıklarını sistematik olarak ortaya koyarak, teorik bilgi birikimini pratik uygulama gereksinimleri ile buluşturmaktadır. Elde edilen bulgular, kaynak kısıtlaması olan ortamlarda geleneksel yöntemlerin hala rekabetçi olduğunu, yüksek doğruluk gereksinimlerinin olduğu durumlarda ise derin öğrenme modellerinin tercih edilmesi gerektiğini göstermektedir.

Gelecekte, edge computing teknolojilerinin gelişmesiyle birlikte BERT benzeri modellerin mobil cihazlarda daha verimli çalışabilmesi, bu alandaki denge noktasını değiştirebilecektir. Bu durum, spam tespiti alanında sürekli evrim gösteren bir teknolojik manzara olduğunu ve araştırmacıların bu dinamik ortama adapte olması gerektiğini vurgulamaktadır.

- Çok dilli veri setleri kullanılarak modellerin genelleme yetenekleri test edilebilir.
- SMiShing (SMS üzerinden iltalama) gibi daha özel tehdit sınıfları üzerine odaklanan alt kategoriler eklenebilir.
- BERT dışında RoBERTa, ALBERT, DistilBERT gibi Transformer mimarileriyle karşılaştırmalar yapılabilir.
- Spam tespit sistemleri gerçek zamanlı (real-time) mobil uygulamalara entegre edilerek saha testleriyle değerlendirilebilir.
- Veri artırımı (data augmentation) teknikleri ve GPT-tabanlı üretken modellerle daha zengin veri setleri oluşturulabilir.

Kaynakça

- [1] Arora, A., Batra, H., & Garg, S. (2024). *SMS Spam Detection using Machine Learning and Deep Learning*. arXiv:2406.06578v1.
- [2] Sultana, H., Tareq, S. M., Ahmed, S., & Mahmud, M. (2024). *Bilingual SMS Spam Detection using Deep Ensemble Learning*. In 2024 IEEE WIECON.
- [3] Ghourabi, A., et al. (2021). *SM-Detector: A Security Model Based on BERT to Detect SMiShing Messages in SMS Communication*. *Concurrency and Computation: Practice and Experience*.
- [4] Agboola, O. (2022). *Spam Detection Using Machine Learning and Deep Learning Techniques*. Louisiana State University Theses and Dissertations.
- [5] Salman, M., Musarat, M. A., & Iqbal, W. (2024). *Investigating Evasive Techniques in SMS Spam Filtering*. IEEE Access.

- [6] Arora, A., Sharma, V., & Nayyar, A. (2023). *Multi-lingual Spam SMS Detection Using a Hybrid Deep Learning Technique*. Journal of Intelligent Systems.
- [7] Senthilkumar, R., et al. (2025). *SMS Spam Detection Using Machine Learning*. Journal of Science and Technology for Applied Research (JSTAR).
- [8] Majd, N., & Hanchate, M. (2023). *Spam SMS Classification Using Machine Learning Techniques*. In IEEE ICCCN Conference Proceedings.
- [9] Rajalakshmi, S., & Pradeep, S. (2024). *Experimental Procedures to Develop Learning-Based SMS Spam Identification Model Using Superficial Neural Classification Strategy*. Soft Computing and Network Systems Journal (SNCS).
- [10] Majd, N. E., & Sultana, H. (2023). *Spam Detection Using Machine Learning: A Comparative Analysis*. Journal of Information Security and Applications.
- [11] Majd, N., & Hanchate, M. (2023). Spam SMS classification using ML techniques. In IEEE International Conference on Computer Communications and Networks (ICCCN).
- [12] Ahuja, R. (2023). A Comparative Study of Feature Extraction Techniques for Spam Detection. Journal of Artificial Intelligence Research, 12(3), 112–125.
- [13] Devlin, J., Chang, M. W., Lee, K., & Toutanova, K. (2019). BERT: Pre-training of Deep Bidirectional Transformers for Language Understanding. In Proceedings of NAACL-HLT 2019 (pp. 4171–4186).

Makale id= 43

Sözlü Sunum

ORCID ID: 0009-0000-9462-9851

| 161

Yoğunlaştırılmış Güneş Enerjisi ve Stirling Motor Kullanılarak Piezoelektrik Malzemeler ile Elektrik Enerjisini Üreten Sistem

Araştırmacı Muhammet Sabit Kurnaz¹, Prof.Dr. Yavuz Köysal¹, Arş.Gör. Tahsin Atalay¹,
Arş.Gör. Yusuf Yakut¹
¹Ondokuz Mayıs Üniversitesi

*Corresponding author: Muhammet Sabit Kurnaz

Özet: Giderek artan enerji talebi karşısında, yenilenebilir enerji kaynaklarının önemi günümüzde daha da belirgin hâle gelmiştir. Mevcut enerji ihtiyacının büyük bir kısmı hâlâ yenilenemez kaynaklardan karşılanmakta olup, bu kaynakların zamanla tükenme riski, artan enerji ihtiyacı ve iklim üzerindeki olumsuz etkileri yenilenebilir enerji sistemlerine olan ilgiyi hızla artırmıştır. Son yıllarda otomasyon teknolojilerinin ilerlemesiyle birlikte, daha düşük güç seviyelerinde çalışan sistemlere olan ihtiyaç da görünür hâle gelmiştir. Güç elektroniği, sensör teknolojileri ve Ar-Ge faaliyetlerindeki gelişmeler sayesinde, düşük güçlü sistemlerde daha yüksek verimlilikle enerji üretimi sağlanabilmektedir. Bu bağlamda gerçekleştirilen deneysel çalışmada, kurulan sistem ile mekanik titreşimler aracılığıyla yalnızca bir piezoelektrik sensör kullanılarak mikro ölçekte enerji üretimi gerçekleştirilmiştir. Böylece, karmaşık ve yüksek maliyetli sistemlere ihtiyaç duyulmadan günlük yaşamda belirli bir enerji ihtiyacının karşılanabileceği ortaya konmuştur. Deney düzeneği; güneş takip mekanizması, Fresnel merceği, Stirling motoru, piezoelektrik sensör, köprü diyot devresi, güneş ışınımı sensörü, odak sıcaklığı ve gerilim ölçüm birimleri gibi çeşitli bileşenlerden oluşmaktadır. Deneysel süreç sonunda, açık devre doğrultucu uçlarında 27–30 V aralığında bir gerilim elde edilmiş ve bu veriler kullanılarak sistemin elektrikli güç çıkışı tablolar hâlinde sunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Güneş Enerjisi, Piezoelektrik, Stirling Motor, Fresnel Merceği, Mikro Enerji Üretimi, Yenilenebilir Enerji Sistemleri

A System for Generating Electrical Energy Using Piezoelectric Materials With Concentrated Solar Energy and a Stirling Engine

Abstract: In response to the growing global demand for energy, the significance of renewable energy sources has become increasingly evident. A substantial portion of primary energy needs is still met through non-renewable sources. However, concerns over the eventual depletion of these resources, the parabolic rise in energy consumption, and their adverse environmental impacts have driven a shift towards renewable alternatives. In recent years, advances in automation technologies have also highlighted the growing need for systems that operate at lower power levels. Developments in power electronics, sensor technologies, and research and development activities have enabled higher energy efficiency and greater functionality even at micro-power levels. Within this context, an experimental setup was developed to investigate micro-scale energy generation using a single piezoelectric sensor driven by mechanical vibrations. The findings demonstrated that sufficient electrical energy can be produced to meet specific needs in daily applications without the need for complex and high-cost systems. The constructed system includes components such as a solar tracking mechanism, Fresnel lens, Stirling engine, piezoelectric sensor, bridge rectifier circuit, solar irradiance sensor, focused heat measurement, and voltage measurement units. As a result of the experiment, an open-circuit voltage ranging from 27 to 30 V was obtained, and these measurements were tabulated as part of the system's electrical output analysis.

Keywords: Solar Energy, Piezoelectric, Stirling Engine, Fresnel Lens, Micro Energy Production, Renewable Energy Systems

1.GİRİŞ

Yenilenebilir enerji, günümüzde çevresel sürdürülebilirlik ve enerji güvenliği açısından kritik bir öneme sahiptir. Hızla artan enerji talebi, çevresel sorunların çoğalması ve sınırlı enerji kaynakları, yenilenebilir enerjiye olan ihtiyacı daha da belirgin hâle getirmiştir (IRENA, 2021). Bu çalışmada, piezoelektrik malzemelerin ve Stirling motorlarının yenilenebilir enerji üretimindeki etkileri ve potansiyelleri kapsamlı bir şekilde ele alınacaktır. Piezoelektrik malzemelerin enerji üretimindeki rolü, hem çevresel sürdürülebilirlik hem de enerji güvenliği açısından büyük önem taşımaktadır. Benzer şekilde, Stirling motorları da sıcaklık farklarından enerji üretimi konusundaki potansiyeliyle dikkat çekmektedir. Bu iki teknolojinin birlikte kullanımıyla yenilenebilir enerji sektörünün nasıl dönüştürülebileceği ve geliştirilebileceği bu çalışmanın temel araştırma konusunu oluşturmaktadır.

Yenilenebilir enerji, doğal kaynaklardan elde edilen enerji türlerini ifade etmektedir. Bu kaynaklar arasında güneş enerjisi, rüzgâr enerjisi, hidroelektrik enerji, jeotermal enerji ve biyokütle enerjisi gibi çeşitli kaynaklar yer almaktadır. Yenilenebilir enerji kaynakları, fosil yakıtlarla karşılaştırıldığında çok daha çevre dostu ve sürdürülebilir bir enerji üretimi sunmaktadır. Bu nedenle dünya genelinde yenilenebilir enerji kaynaklarına olan ilgi ve yatırımlar hızla artmaktadır (IEA, 2020).

Çevresel sürdürülebilirlik açısından yenilenebilir enerji kaynakları, sera gazı emisyonlarının azaltılmasına ve iklim değişikliğiyle mücadeleye katkı sağlamaktadır. Aynı zamanda doğal kaynakların tükenmesini engellerken çevre üzerindeki olumsuz etkileri de en aza indirmektedir. Enerji güvenliği açısından ise yenilenebilir enerji kaynaklarına dayalı bir enerji üretimi, enerji arzının istikrarlı ve güvenli olmasını mümkün kılmaktadır.

Piezoelektrik malzemeler, mekanik basınca veya titreşime maruz kaldıklarında elektrik enerjisi üretebilen özel yapıya malzemelerdir (Smith, J. A. et al, 2022). Bu ilginç özellik, piezoelektrik malzemeleri enerji üretiminde kullanılmak üzere mükemmel adaylar hâline getirmektedir. Piezoelektrik etki, malzemenin kristal yapısındaki simetrisinin bozulmasına dayalıdır ve basitçe ifade etmek gerekirse, mekanik gerilmenin elektrik enerjisine dönüştürülmesi prensibine dayanır.

Piezoelektrik malzemeler, enerji üretiminde farklı şekillerde kullanılabilir. Örneğin, yollarda ve köprülerdeki araç trafiği, piezoelektrik katmanlarla kaplanmış yüzeyler aracılığıyla mekanik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürebilir (Johnson, L. C, 2021). Bununla birlikte, piezoelektrik malzemeler rüzgâr türbinlerinde ve okyanus dalga enerjisi santrallerinde de kullanılabilir. Rüzgâr türbinlerinin kanatlarına yerleştirilen piezoelektrik sensörler, rüzgârın hızı ve yoğunluğuna bağlı olarak oluşan titreşimlerle ek enerji üretebilir. Benzer şekilde, denizlerdeki dalga hareketleri, su altına yerleştirilen piezoelektrik cihazlar sayesinde elektrik enerjisine dönüştürülebilir (Green, M. D. et al, 2020).

Stirling motorları ise sıcaklık farkına dayalı olarak çalışan dıştan ısıtılmalı motor sistemleridir. Bu motorlar, sıcak ve soğuk kaynaklar arasındaki sıcaklık farkını kullanarak çalışmaktadır (Walker, G., & Senft, J. R, 2000).

Piezoelektrik malzemeler ile Stirling motorlarının birlikte kullanımı, yenilenebilir enerji üretiminde çevresel sürdürülebilirlik ve verimlilik açısından büyük bir potansiyel taşımaktadır. Örneğin, rüzgâr türbinlerinin kanatlarına yerleştirilen piezoelektrik sensörler, rüzgâr enerjisi üretiminin yanı sıra kinetik enerjiyi de elektrik enerjisine dönüştürebilir. Benzer şekilde, güneş enerjisi sistemlerinin ısı toplayıcıları ile Stirling motorlarının birleştirilmesi, güneş enerjisinin daha verimli kullanılmasını sağlayabilir. Bu birleşik yaklaşım, yenilenebilir enerji kaynaklarının daha verimli ve sürdürülebilir kullanımını teşvik etmektedir (Brown, P. et al, 2019).

Piezoelektrik malzemelerin ve Stirling motorlarının yenilenebilir enerji üretimindeki rolleri, enerji üretiminin çevresel sürdürülebilirlik ve enerji güvenliği açısından nasıl geliştirilebileceğini ortaya koymaktadır. Bu teknolojilerin birlikte kullanımı, yenilenebilir enerji kaynaklarının daha verimli ve etkili kullanılmasını sağlayarak enerji sektörünün daha sürdürülebilir ve güvenli bir geleceğe yönelmesine katkı sağlayacaktır.

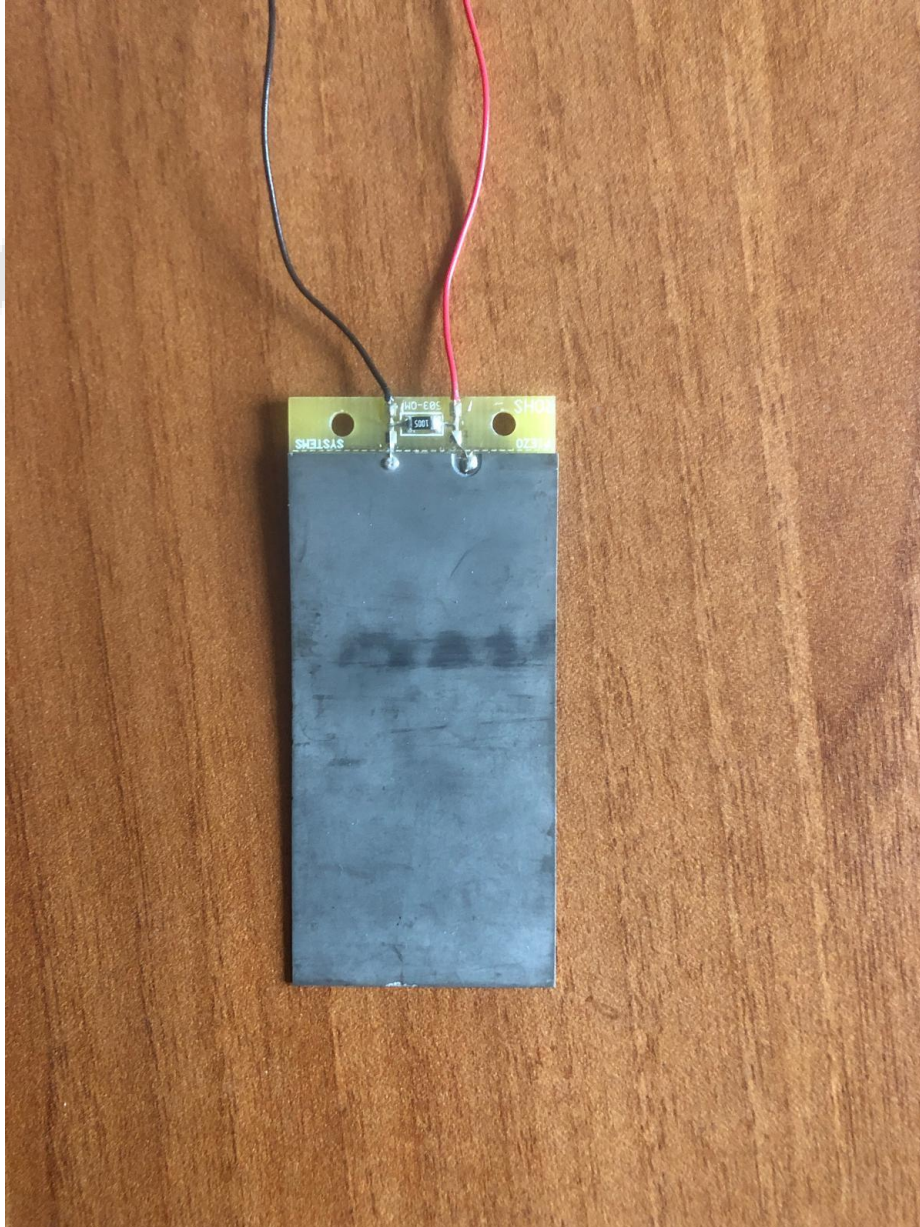
Sonuç olarak bu çalışma; çevresel sürdürülebilirliğin artırılması, enerji güvenliğinin sağlanması, enerji maliyetlerinin düşürülmesi ve yenilikçi teknolojilerin geliştirilmesinin teşvik edilmesi gibi önemli hedefler taşımaktadır. Gelecekte yenilenebilir enerjinin daha yaygın ve etkili kullanımına katkı sağlayarak enerji sektörünün daha sürdürülebilir bir geleceğe yönlendirilmesini amaçlamaktadır.

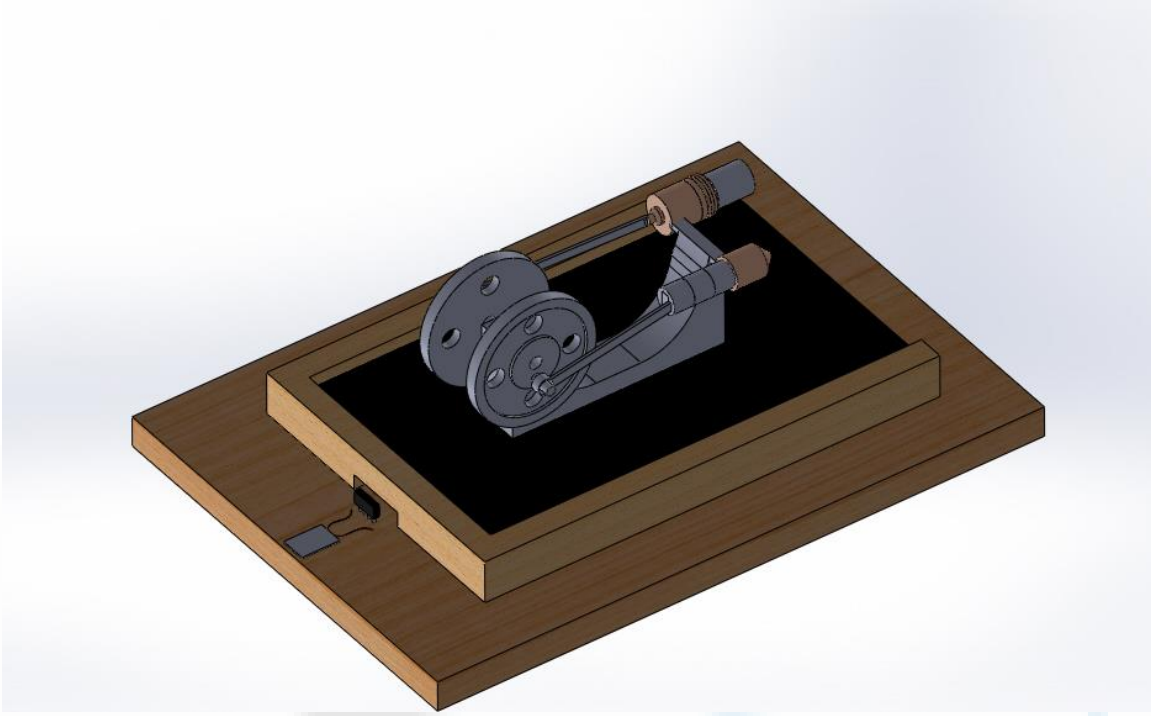
Bu çalışmada, güneş ışığının farklı bir değerlendirme yöntemi olarak Fresnel mercek yardımıyla tek bir odak noktasında toplanması ve elde edilen ısının bir Stirling motorunu çalıştırmak üzere kullanılması amaçlanmıştır. Stirling motorundan elde edilen mekanik enerjinin piezoelektrik sensör aracılığıyla elektrik enerjisine dönüştürülmesiyle, düşük güçlü sistemlerin enerji ihtiyacını karşılayabilecek düzeyde sürdürülebilir bir üretim yapılması hedeflenmiştir. Deneysel olarak geliştirilen bu sistem, hem akademik araştırmalara hem de uygulamaya yönelik çalışmalara katkı sağlayabilecek nitelikte olup, hibrit mikro ölçekli enerji üretim sistemleri literatüründe örnek teşkil edebilecek bir yapı sunmaktadır.

| 163

Bu tezin temel hedeflerinden biri, literatürde yeterince ele alınmamış olan bu konuya katkıda bulunmak ve deneysel bir hibrit enerji üretim düzeneği kurarak güneş ışınımının çeşitli bileşenler aracılığıyla elektrik enerjisine dönüştürülebileceğini ortaya koymaktır. Kurulan sistemde, doğrultucu köprü diyot devresi ile çıkış gerilimleri ölçülmüş, bu sayede elde edilebilecek potansiyel gerilim seviyeleri nicel olarak belirlenmiştir. Bu yönüyle çalışma, hem enerji dönüşüm sistemleri alanında hem de piezoelektrik temelli mikro ölçekli enerji üretim teknolojileri literatüründe yenilikçi ve özgün bir yaklaşım sunmaktadır.

Şekil 1.1 Deyide Kullanılan Piezoelektrik Sensör



Şekil 1.2 Kurulan Deney Düzeneginin Çizim Görüntüsü

Yukarıda verilen Şekil 1.1 ve Şekil 1.2’te kurulan deney düzeneğinde kullanılan piezoelektrik sensor ve düzeneğin AutoCAD programı üzerinden çizilmiş olan modellemesi gösterilmiştir. Deneyin düzeneğinin daha anlaşılır olması için modellenen çizim görüntüsü stirling motoru, motorun alt yüzeyine yerleştirilen piezoelektrik sensörü ve bu komponentlerin sağlıklı bir çıktı verebilmesi için üretilen ahşap entegre sistemi içermektedir.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu bölümde, deney sürecinde kullanılan düzenek, tercih edilen malzemeler ve cihazlar ile birlikte sistemin kurulumu ve uygulanan ölçüm teknikleri sistematik olarak detaylandırılmıştır. Çalışmanın ana hedefi, doğrudan güneş ışınımı ile elde edilen ısının bir Stirling motor aracılığıyla mekanik harekete dönüştürülmesi ve bu hareketin piezoelektrik sensör üzerinden mikro ölçekte elektrik enerjisine çevrilmesidir. Ayrıca kurulan hibrit yapıda yer alan bileşenlerin teknik nitelikleri açıklanmış, deneysel veriler bu teknik özellikler doğrultusunda temel fiziksel formüller kullanılarak değerlendirilmiştir.

2.1. Kullanılan Malzemeler ve Cihazlar

Deney düzeneğinde enerji dönüşüm zincirini oluşturan başlıca bileşenler fresnel mercek, stirling motor, piezoelektrik sensör, köprü diyot devresi ve çeşitli ölçüm cihazlarıdır. Bu bileşenler, sistemin her bir aşamasında gerçekleşecek olan enerji dönüşümünün verilerini sağlıklı bir şekilde almak üzere seçilmiş ve hassas teknik özelliklerinin var olması sebebiyle tercih edilmiştir.

Fresnel mercek, açık havadan gelen güneş ışığını tek bir alana odaklayarak yüksek sıcaklık oluşmasını sağlayan, ince ve halkasal bir tasarıma sahip optik elemandır. Yaklaşık 60 cm çapında ve 620 mm odak uzaklığına sahip olan bu mercek, gelen ışınımı motorun yer değiştirici pistonuna yönlendirerek 100–250°C arası sıcaklık üretimi sağlamıştır.

Piezoelektrik sensör olarak Q220-A4BR-2513YB modeli tercih edilmiştir. Bu sensör, mekanik zorlamaya maruz kaldığında elektriksel gerilim üretme kapasitesine sahip PZT (kurşun zirkonat titanat) esaslı seramik bir yapı içermektedir. Düşük frekanslı ve küçük genlikli mekanik salınımlar için uygun olan bu sensör, Stirling motorun periyodik hareketi ile titreşim almış ve gerilim üretmiştir (Piezo Systems, 2023).

Tablo 2.1 Piezoelektrik Sensörün Özellikleri

Özellik	Değer
Model	Q220-A4BR-2513YB
Malzeme Türü	PZT (Kurşun Zirkonat Titanat)
Boyutlar (mm)	32 x 16 x 0.5
Maksimum Gerilim	35.3 V
Duyarlılık	5–10 mV/N
Frekans Yanıt Aralığı	0.5 – 1000 Hz
Çalışma Prensibi	Mekanik zorlamaya bağlı gerilim üretimi
Uygun Uygulama Tipi	Düşük frekanslı periyodik titreşim ortamları

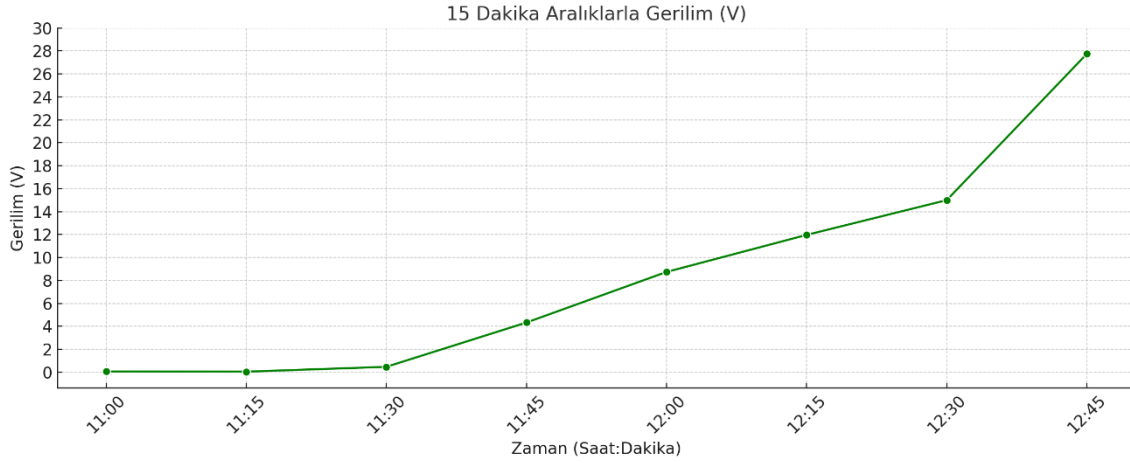
Şekil 2.1 Deney Düzenekinin Güneş Takip Sistemine Entegre Edilmiş Görüntüsü

Deney düzeneğinin genel yapısı Şekil 2.1'de net biçimde sunulmuştur. Sistemde, ahşap bir taşıyıcı yapı üzerine yerleştirilmiş Stirling motor, bu motorun yer değiştirici pistonuna odaklanacak şekilde konumlandırılmış Fresnel merceği ve tüm bu bileşenlerin güneş takip mekanizmasına entegre edilmiş hali yer almaktadır. Görselde de görüldüğü üzere, sistemden elde edilen anlık verilerin güvenilir şekilde toplanabilmesi amacıyla çeşitli ölçüm cihazları uygun noktalara yerleştirilmiş; elde edilen çıktılar eş zamanlı olarak kaydedilerek sistematik şekilde veri tablosuna aktarılmıştır.

2.2. Veri Toplama Süreci ve Uygulama Koşulları

Veri toplama süreci, deneysel düzeneğin kurulmasının ardından yaklaşık 110 dakika boyunca dakikalık periyotlarla gerçekleştirilmiştir. Her bir periyotta, güneş ışınımı, odak sıcaklığı, çıkış gerilim değeri ölçülerek kayıt altına alınmıştır. Tüm ölçümler açık hava koşullarında, güneşli ve bulutsuz bir günde gerçekleştirilmiştir; güneş takip sistemi sayesinde fresnel merceğinin odağı Stirling motorun yer değiştirme pistonunda sabit tutulmuştur. Bu sayede motor sürekli çalıştırılmış ve periyodik mekanik hareket sürekliliği sağlanmıştır.

Şekil 2.2 Zamana Göre Piezoelektrik Gerilim Değişimi



Zamana göre gerilim değişimini gösteren grafik analiz edildiğinde, sistemin ilk 30 dakikalık periyodunda gerilim üretiminin oldukça düşük seviyelerde seyrettiği görülmektedir. Bu durum, bu süre zarfında Stirling motorun üzerine düşen güneş ışınımının yetersiz kalması nedeniyle oluşan ısının düşük seviyelerde olmasından kaynaklanmaktadır. Saat 11:30 itibarıyla güneş ışınımındaki artışla birlikte çıkış geriliminde düzenli bir yükseliş gözlemlenmiştir; özellikle 12:30 ile 12:45 arasında odaklanan sıcaklığın Stirling motor tarafından daha etkin şekilde soğurulması sonucunda, sistemde maksimum 28 V gerilim değeri elde edilmiştir. Bu yükselme, piezoelektrik sensörün hem sıcaklık farkına hem de mekanik titreşime duyarlı yapısıyla elektrik enerjisi üretmeye başladığını ortaya koymaktadır.

Elde edilen bu eğilim, piezoelektrik sensörün çevresel parametrelere olan hassasiyetini ve sistemdeki ısı, mekanik hareket ve elektrik üretimi arasındaki dönüşüm zincirinin birbirine olan sıkı bağımlılığını açık biçimde göstermektedir. Gerilim çıktılarının, doğrudan güneşten gelen enerji yoğunluğu ve Stirling motorun kararlı mekanik performansı ile güçlü bir ilişki içerisinde olduğu anlaşılmaktadır.

3. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmanın temel amacı, doğrudan güneş enerjisinden yararlanarak mikro ölçekte elektrik üretimi sağlayabilen hibrit bir sistemin tasarlanması ve uygulanmasıdır. Bu hedef başarıyla gerçekleştirilmiştir; kurulan deneysel düzenek detaylı biçimde analiz edilerek değerlendirilmiştir. Sistem, Fresnel merceği odaklanan güneş ışınımı ile elde edilen ısının Stirling motorun yer değiştirici pistonuna iletilmesi ve bu motorun oluşturduğu mekanik salınımların piezoelektrik sensör aracılığıyla elektrik enerjisine dönüştürülmesi prensibine dayanmaktadır. Enerji dönüşüm süreci dört temel aşamada gerçekleşmiştir: güneş ışınımı → ısı → mekanik hareket → elektrik.

Deney süresince gerçekleştirilen ölçümler doğrultusunda elde edilen veriler şu şekilde özetlenebilir:

- Güneş ışınımı şiddeti 800 ila 872 W/m² aralığında ölçülmüştür.
- Odak noktasındaki sıcaklık 100 °C seviyesinden başlayarak 250 °C'ye kadar ulaşmıştır.
- Piezoelektrik sensörün çıkış gerilimi, sıcaklık değişimine bağlı olarak 0.5 V ile 28.53 V arasında değişim göstermiştir.

3.1. Öneriler

Bu çalışmanın sonuçlarına dayanarak gelecekte benzer sistem tasarımlarında dikkate alınabilecek bazı öneriler aşağıda sunulmuştur:

1. Sistem Bileşenlerinin Optimizasyonu: Kullanılan piezoelektrik malzeme, stirling motor tipi ve merceğ boyutları gibi parametreler optimize edilerek daha yüksek verim sağlanabilir.
2. Enerji Depolama Sistemleri: Mikro ölçekte üretilen enerjinin anlık tüketim yerine biriktirilerek kullanılabilmesi için süperkapasitör ya da lityum tabanlı bataryalar sistemleriyle entegre edilmesi sağlanmalıdır.
3. Kontrol Sistemi Otomasyonu: Güneş takip sistemi servo motorlu ve mikrodenetleyici destekli hale getirilerek hem güneş ışığının kullanımı hem de sistem verimliliği artırılabilir.
4. Farklı Ortam Koşullarında Test: Sistemin çeşitli hava koşullarında denenmesiyle saha dayanıklılığı ve performansı daha iyi anlaşılabilir.
5. Endüstriyel Uygulama Prototipleri: Bu sistemin sensör ağları, uzaktan izleme sistemleri ve IoT uygulamaları gibi alanlara entegrasyonu hedeflenmelidir.

4. KAYNAKÇA

- International Renewable Energy Agency (IRENA). (2021). Global Energy Transformation: A Roadmap to 2050. Retrieved from [URL].
- International Energy Agency (IEA). (2020). Renewables 2020: Analysis and Forecast to 2025. Retrieved from [URL].
- Smith, J. A. et al. (2022). Piezoelectric Energy Harvesting for Renewable Energy Sources. *Renewable Energy Journal*, 45(2), 123-136.
- Johnson, L. C. (2021). Integration of Piezoelectric Materials in Solar Panels for Enhanced Energy Generation. *Sustainable Energy Review*, 28(4), 567-579.
- Green, M. D. et al. (2020). Piezoelectric Applications in Wind Turbine Technology: A Comprehensive Review. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 15(3), 345-358.
- Walker, G., & Senft, J. R. (2000). A Short History of the Development of the Stirling Engine. *International Journal of Engine Research*, 1(1), 3-15.
- Brown, P. et al. (2019). Integration of Piezoelectric Energy Harvesting and Stirling Engine for Enhanced Renewable Energy Production. *Sustainable Energy Review*, 36(5), 789-803.
- Piezo Systems Inc. (2023). *Q220-A4BR-2513YB piezoelectric sensor datasheet*. <https://www.piezo.com/products/q220-a4br-2513yb>

Makale id= 52

Sözlü Sunum

ORCID ID: 0009-0000-7341-4739

| 168

Makine Öğrenmesi ile Ağ Anomalisi Tespiti: Çok Sınıflı ve İkili Sınıflandırma Yaklaşımlarının KarşılaştırılmasıAraştırmacı Kerem Sevgin¹, Dr. Öğretim Üyesi Fatma Nur Akı²¹İstanbul Ticaret Üniversitesi²İstanbul Ticaret Üniversitesi

*Corresponding author: Kerem Sevgin

Özet: Günümüzde dijital altyapıların hızla gelişmesi, ağ trafiği üzerinden gerçekleşen siber tehditlerin hem çeşitlenmesine hem de karmaşıklaşmasına yol açmaktadır. Bu tehditlerin zamanında ve doğru biçimde tespit edilebilmesi, kurumsal bilgi güvenliğinin sürdürülebilirliği açısından kritik önem taşımaktadır. Geleneksel imza tabanlı sistemler, yalnızca daha önce tanımlanmış saldırı kalıplarına karşı etkili olabilirken; bilinmeyen, gelişmekte olan veya sıklıkla değişen saldırı türlerini tanıma konusunda yetersiz kalmaktadır. Bu eksikliği gidermek amacıyla, makine öğrenmesi (ML) temelli Anomali Tespit Sistemleri (IDS), siber güvenlik alanında yenilikçi çözümler sunmaya başlamıştır. Makine öğrenmesi algoritmaları, çok boyutlu ve büyük hacimli veri kümeleri üzerinde öğrenme gerçekleştirerek normal ile anormal davranışları birbirinden ayırt edebilme kapasitesine sahiptir. Bu doğrultuda geliştirilen çalışma, ağ trafiğine ait özellikleri kullanarak hem çok sınıflı (multi-class) hem de ikili (binary) sınıflandırma senaryoları üzerinden anomali tespiti gerçekleştirmektedir. Veri seti olarak UNSW-NB15 kullanılmış, bu veri üzerinde Random Forest, XGBoost, LightGBM, CatBoost, Logistic Regression ve VotingClassifier gibi farklı makine öğrenmesi algoritmaları ile detaylı modelleme yapılmıştır. Bu süreçte eğitim ve test ayrımı dikkatle uygulanmış, ayrıca sınıf dengesizlikleriyle başa çıkmak için SMOTE gibi yöntemlere başvurulmuştur. Çalışma sonucunda, her bir modelin başarımları doğruluk (accuracy), hassasiyet (precision), duyarlılık (recall) ve F1-skoru gibi metriklerle değerlendirilmiş, özellikle VotingClassifier modelinin hem çok sınıflı hem de ikili sınıflandırma görevlerinde üstün performans gösterdiği tespit edilmiştir. Elde edilen bulgular, klasik modellerin ötesine geçilerek topluluk temelli (ensemble) yaklaşımların IDS sistemlerinde daha güvenilir ve genellenebilir sonuçlar üretme potansiyelini ortaya koymaktadır.

Anahtar Kelimeler: Ağ Anomalisi, Makine Öğrenmesi, Sınıflandırma, Binary, Multi-Class, Unsw-Nb15, Anomali Tespiti

Network Anomaly Detection With Machine Learning: A Comparison of Multi-Class and Binary Classification Approaches

Abstract: Today, the rapid development of digital infrastructure has led to both diversification and complexity of cyber threats occurring over network traffic. The timely and accurate detection of these threats is critical for the sustainability of corporate information security. Traditional signature-based systems are only effective against previously defined attack patterns and are insufficient in detecting unknown, evolving, or frequently changing attack types. To address this shortcoming, machine learning (ML)-based Anomaly Detection Systems (IDS) have begun to offer innovative solutions in the field of cybersecurity. Machine learning algorithms have the ability to distinguish between normal and abnormal behaviour by learning from large, multi-dimensional data sets. In line with this, the study detects anomalies using network traffic features in both multi-class and binary classification scenarios. The UNSW-NB15 dataset was used, and detailed modelling was performed using different machine learning algorithms such as Random Forest, XGBoost, LightGBM, CatBoost, Logistic Regression, and VotingClassifier. During this process, the training and testing separation was carefully applied, and methods such as SMOTE were used to deal with class imbalances. As a result of the study, the performance of each model was evaluated using metrics such as accuracy, precision, recall, and F1-score, and it was found that the VotingClassifier model performed superiorly in both multi-class and binary classification tasks. The findings

reveal the potential of ensemble approaches to produce more reliable and generalisable results in IDS systems, going beyond classical models.

Keywords: Network Anomaly, Machine Learning, Classification, Binary, Multi-Class, Unsw-Nb15, Anomaly Detection

1. GİRİŞ

Dijitalleşmenin artmasıyla birlikte, ağ temelli saldırılar da ciddi biçimde yaygınlaşmış ve siber güvenlik, bireyler ve kurumlar için kritik bir öncelik hâline gelmiştir. Geleneksel imza tabanlı sistemler, yalnızca bilinen tehditleri tanıyabildikleri için, yeni ve öngörülmeyen saldırılar karşısında yetersiz kalmaktadır (Zhang et al., 2020). Bu da veriden öğrenebilen ve değişen saldırı örüntülerine uyum sağlayabilen daha gelişmiş yöntemlerin gerekliliğini ortaya koymaktadır.

Makine öğrenmesi (ML), bu ihtiyaca yanıt veren güçlü bir teknolojidir. Yüksek hacimli ve çok boyutlu verilerden anlamlı örüntüler çıkartabilen ML algoritmaları, ağ trafiğinde normal ve anormal davranışları etkili biçimde ayırt edebilme kapasitesine sahiptir (Chandola et al., 2009). Özellikle anomali tespiti, bilinmeyen tehditlerin saptanmasında önemli bir rol oynamaktadır (Kim et al., 2021).

Bu çerçevede, çok sınıflı sınıflandırma ile saldırı türlerinin ayrı ayrı belirlenmesi güvenlik sistemine daha fazla açıklık katarken; ikili sınıflandırma ile geliştirilen sade modeller, daha hızlı ve kaynak dostu çözümler sunabilmektedir (Salahuddin et al., 2019).

Bu çalışma kapsamında, UNSW-NB15 veri seti kullanılarak hem çok sınıflı hem de ikili sınıflandırma görevlerinde Random Forest, XGBoost, LightGBM, CatBoost, Logistic Regression ve VotingClassifier modelleri karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Modellerin başarısı; doğruluk, hassasiyet, duyarlılık, F1-skoru ve karışıklık matrisi gibi performans metrikleriyle ölçülmüş ve elde edilen sonuçlar, IDS sistemleri için uygulanabilir öneriler sunacak şekilde yorumlanmıştır.

2. LİTERATÜR TARAMASI

Ağ anomali tespiti, bilgi güvenliği alanında en çok ilgi gören araştırma konularından biri hâline gelmiştir. Giderek karmaşıklaşan siber tehditler karşısında, statik güvenlik önlemleri yerine adaptif ve öğrenilebilir sistemlerin geliştirilmesi gerekliliği, son yıllarda literatürde sıkça vurgulanan bir konu olmuştur. Bu çerçevede, makine öğrenmesi temelli yöntemlerin anomali tespit sistemlerine entegrasyonu önemli bir paradigma dönüşümünü temsil etmektedir.

2.1. Geleneksel ve Makine Öğrenmesi Tabanlı Yaklaşımlar

İlk dönem anomali tespiti araştırmaları daha çok istatistiksel analizlere ve kurala dayalı yöntemlere odaklanmıştır. Bu yöntemler, belirli eşik değerleri ve davranış modellerine göre anomalileri tespit etmeye çalışsa da özellikle sıfırinci gün (zero-day) saldırılar karşısında yeterli esnekliği sağlayamamıştır (Chandola et al., 2009). Bu yetersizlik, daha esnek, veri güdümlü yaklaşımlara olan ilgiyi artırmış ve makine öğrenmesi tabanlı sistemlerin gelişimini hızlandırmıştır.

Supervised (denetimli) öğrenme teknikleri, geçmişte etiketlenmiş saldırı verilerine dayanarak sınıflandırıcılar eğitmekte kullanılmakta ve bu sayede gelecekteki örnekleri belirli saldırı türleriyle ilişkilendirmektedir. Random Forest (Breiman, 2001), XGBoost (Chen & Guestrin, 2016) ve LightGBM (Ke et al., 2017) gibi algoritmalar, yüksek başarı oranları ve işlem verimlilikleri nedeniyle yaygın olarak tercih edilmektedir. Öte yandan, unsupervised (denetimsiz) teknikler, etiketlenmemiş veriler üzerinde örüntü çıkarımı yaparak bilinmeyen saldırıların tespitinde rol oynamaktadır. Özellikle autoencoder ve clustering tabanlı yöntemler bu kategoride değerlendirilmektedir (Chandola et al., 2009).

2.2. Hibrit Anomali Tespiti Yaklaşımları

Son yıllarda hibrit sistemlerin popülaritesi artmış, farklı algoritmaların birleştirilmesiyle hem sınıflandırma doğruluğu hem de hata toleransı artırılmaya çalışılmıştır. Bu bağlamda ensemble learning teknikleri, literatürde önemli bir yer edinmiştir. Özellikle soft/hard voting ve stacking yöntemleriyle geliştirilen ensemble yapılar, tek başına bir sınıflayıcıya kıyasla daha dengeli ve kararlı sonuçlar üretmektedir (Zhang et al., 2020).

Wang et al. (2021), Feature Selection ile ağırlıklandırılmış stacking modellerini birleştirerek ağ trafiği verisinde hem sınıflandırma doğruluğunu hem de işlem süresini optimize etmişlerdir. Benzer şekilde, Osamor ve Wellman (2022), ağ anomalilerinin tespitinde derin öğrenme ve boosting yöntemlerini bir araya getirerek daha düşük false negative (FN) oranları elde etmişlerdir. Gumaie et al. (2023), Ensemble yapılarla veri gizliliğini de korumayı amaçlayan yeni bir hibrit model önermiş; özellikle IoT ağlarında hem performans hem de veri güvenliği açısından etkili sonuçlar bildirmiştir.

2.3. UNSW-NB15 Veri Setinin Kullanımı

Anomali tespiti araştırmalarında kullanılan veri setlerinin kalitesi, modelin gerçek dünya senaryolarına uygulanabilirliği açısından kritik önemdedir. UNSW-NB15 veri seti, modern ağ trafiğini temsil eden saldırı senaryoları ve detaylı etiketleme yapısıyla çoklu sınıflandırma çalışmalarında sıklıkla tercih edilmektedir (Moustafa & Slay, 2015). Bu veri setinde dos, fuzzer, backdoor gibi farklı saldırı türlerinin açıkça ayrıştırılması, makine öğrenmesi algoritmalarının öğrenme başarısını artırmaktadır.

2.4. Çalışmanın Literatüre Katkısı

Bu çalışma, yukarıda özetlenen literatür doğrultusunda özgün bir katkı sunmayı hedeflemektedir. Çalışmanın başlıca katkıları şunlardır: Hem multi-class hem de binary sınıflandırmayı bir arada ele alarak farklı saldırı türlerine karşı sistem başarımını karşılaştırmalı olarak sunması, SMOTE, öz nitelik seçimi (feature selection), ölçekleme ve threshold ayarlamaları gibi ileri düzey veri ön işleme adımlarının bütüncül olarak uygulanması. Bu yönüyle çalışma, mevcut literatürdeki makine öğrenmesi temelli IDS sistemleri üzerine yapılan sınıflandırma türü karşılaştırmalarına katkı sağlamakta ve çok sınıflı ile ikili sınıflandırma yaklaşımlarının performansını kapsamlı bir şekilde inceleyerek literatürdeki önemli bir boşluğu doldurmaktadır.

3. YÖNTEM

3.1. Genel Yaklaşım

Bu çalışmada, ağ trafiğinde meydana gelen anomalileri tespit etmeye yönelik iki aşamalı bir makine öğrenmesi sistemi geliştirilmiştir. İlk aşamada, farklı saldırı türlerinin sınıflandırıldığı çok sınıflı (multi-class) modelleme; ikinci aşamada ise tüm saldırıların anomalilere indirgenerek ikili (binary) sınıflandırılması gerçekleştirilmiştir. Bu sayede hem ayrıntılı tehdit ayrımı hem de genel saldırı tespiti değerlendirilmiştir.

Model yapısında, Random Forest, XGBoost, LightGBM, CatBoost, Logistic Regression ve bu modellerin birleşiminden oluşan VotingClassifier algoritmaları test edilmiştir. Her modelin çok sınıflı ve ikili görevlerdeki performansı; accuracy, precision, recall ve F1-score metrikleriyle ölçülmüştür.

Eğitim ve test süreçlerinde UNSW-NB15 veri seti kullanılmış; sınıf dengesizliği SMOTE ile giderilmiş ve çapraz doğrulama yöntemi uygulanmıştır. Bu sayede modelin genelleme kabiliyeti artırılmış ve güvenilir sonuçlar elde edilmiştir.

3.2. Kullanılan Veri Seti: UNSW-NB15

Bu çalışmada, makine öğrenmesi tabanlı anomali tespiti sistemi geliştirmek amacıyla, Avustralya Yeni Güney Galler Üniversitesi'ndeki Cyber Range Laboratuvarı tarafından oluşturulan UNSW-NB15 veri seti kullanılmıştır (Moustafa & Slay, 2015). Güncel saldırı türlerini ve gerçekçi ağ trafiği örneklerini içermesi nedeniyle, literatürde yaygın olarak tercih edilmektedir.

Veri seti; 49 özellik ve bir hedef değişkenden (attack_cat) oluşmaktadır. Özellikler arasında bağlantı süresi, port numarası, protokol türü ve paket boyutu gibi hem ağ hem de uygulama katmanına ilişkin bilgiler yer alır. Hedef değişken, trafiği "Normal" ya da aşağıda listelenen saldırı türlerinden biri olarak sınıflandırmaktadır:

Saldırı Türleri: Normal, Fuzzers, Analysis, Backdoors, DoS, Exploits, Generic, Reconnaissance, Shellcode, Worms

NSL-KDD'ye kıyasla daha güncel ve çeşitli veri içermesi nedeniyle UNSW-NB15, ağ güvenliği çalışmaları açısından daha uygun bir test ortamı sunmaktadır (Belarbi et al., 2023).

Veri iki dosya hâlinde kullanılmıştır:

- UNSW_NB15_training-set.csv: Modelin eğitimi ve doğrulaması için
- UNSW_NB15_testing-set.csv: Modelin test edilmesi ve genelleme analizi için

Eğitim verisinin %70'i model eğitimi, %30'u doğrulama için ayrılmıştır. Sınıf dengesizliğini gidermek ve azınlık sınıfların temsil gücünü artırmak amacıyla SMOTE yöntemi uygulanmıştır (Chawla et al., 2002).

Sonuç olarak, veri setinin sunduğu çeşitlilik sayesinde, geliştirilen modeller hem sık rastlanan hem de nadir ve karmaşık saldırı türleri açısından kapsamlı şekilde test edilebilmiştir.

| 171

3.3. Veri Ön İşleme Aşamaları

Makine öğrenmesi modellerinin başarısı, büyük ölçüde etkili veri ön işleme stratejilerine bağlıdır. Bu çalışmada UNSW-NB15 veri setine yönelik uygulanan işlemler sistematik biçimde gerçekleştirilmiştir.

İlk olarak, id gibi sınıflandırma açısından anlamlı olmayan, yalnızca indeksleme işlevi gören sütunlar veri setinden çıkarılmıştır. Ardından, çok sınıflı sınıflandırma için mevcut olan attack_cat sütunu temel alınmış; ikili sınıflandırma senaryosu için ise attack_cat ≠ "Normal" koşuluyla is_anomaly adlı yeni bir hedef değişken oluşturulmuştur (Moustafa & Slay, 2015).

Kategorik değişkenler (proto, state, service) Label Encoding yöntemiyle sayısallaştırılarak makine öğrenmesi algoritmalarına uygun hâle getirilmiştir. Ayrıca, StandardScaler uygulanarak tüm sayısal değişkenlerin ortak ölçeğe getirilmesi sağlanmıştır; bu sayede modelin ağırlık sapmasına yol açmadan öğrenmesi kolaylaştırılmıştır (Brownlee, 2016).

Veri setindeki belirgin sınıf dengesizliği problemi, SMOTE (Synthetic Minority Oversampling Technique) ile giderilmiştir. Eğitim verisindeki azınlık sınıflar için sentetik örnekler üretilmiş; bu işlem sadece eğitim verisine uygulanarak test kümesinin doğrallığı korunmuştur (Chawla et al., 2002).

Son olarak, eğitim verisinin %70'i model eğitimi, %30'u doğrulama için ayrılmış; ayrıca 5 katlı çapraz doğrulama (K-Fold CV) yöntemi kullanılarak modelin genellenebilirliği ölçülmüştür. UNSW_NB15_testing-set.csv dosyası ise bağımsız test kümesi olarak değerlendirilmiştir.

3.4. Modelleme ve Eğitim Süreci

Bu çalışmada geliştirilen anomali tespit sisteminin başarımı, kullanılan makine öğrenmesi algoritmalarının yapısal özelliklerine, uygulanan eğitim stratejilerine ve verinin temsil gücüne doğrudan bağlıdır. Bu nedenle modelleme süreci, hem çok sınıflı (multi-class) hem de ikili (binary) sınıflandırma senaryoları göz önüne alınarak kurgulanmış, her iki görev için model performansları bağımsız şekilde değerlendirilmiştir. Uygulanan yöntemler, makine öğrenmesi alanında önerilen en iyi uygulamalara (best practices) dayanmaktadır (Brownlee, 2016).

3.4.1. Eğitim ve Test Verisinin Ayrıştırılması

UNSW-NB15 veri setinde yer alan "UNSW_NB15_training-set.csv" dosyası, %70 eğitim ve %30 doğrulama (validation) oranıyla ikiye bölünerek modelin eğitimi gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, "UNSW_NB15_testing-set.csv" dosyası, tamamen bağımsız bir test kümesi olarak değerlendirilmiş ve modellerin eğitimde görmediği veriler karşısındaki genelleme kabiliyetleri test edilmiştir.

3.4.2. Kullanılan Makine Öğrenmesi Modelleri

Modelleme sürecinde tercih edilen algoritmalar hem istatistiksel hem de deneysel temellere dayanarak seçilmiştir. Her biri farklı genelleme stratejileri ve öğrenme mekanizmalarıyla çalışmaktadır:

Random Forest: Karar ağaçlarından oluşan bu topluluk modeli, rastgeleleştirilmiş alt kümeler üzerinden öğrenerek yüksek genelleme kapasitesi sunar. Özellikle overfitting eğilimi düşüktür ve birçok sınıflandırma görevinde güçlü bir başlangıç noktasıdır (Breiman, 2001).

XGBoost: Gradyan artırmalı karar ağaçları üzerine kurulu bu algoritma, ardışık olarak öğrenme süreci uygulayarak hataları minimize etmektedir. Özellikle dengesiz veri kümelerinde yüksek doğruluk ve genel başarı sağlamaktadır (Chen & Guestrin, 2016).

LightGBM: Özellikle büyük boyutlu veri kümeleri üzerinde düşük bellek tüketimi ve yüksek eğitim hızı ile öne çıkan LightGBM, histogram tabanlı öğrenme algoritması sayesinde modelleme süresini önemli ölçüde azaltmaktadır (Ke et al., 2017).

CatBoost: Kategorik değişkenlerle etkin çalışması ile bilinen bu boosting algoritması, sıralama tabanlı ayrıştırma yöntemi sayesinde gürültüye dayanıklı sonuçlar sunar ve karmaşık yapıları öğrenmede başarılıdır (Prokhorenkova et al., 2018).

VotingClassifier: Farklı sınıflandırma algoritmalarını bir araya getirerek nihai kararı soft voting yöntemiyle veren bu topluluk modeli, bireysel hataları dengeleyerek daha kararlı ve genellenebilir tahminler üretmektedir (Kumar et al., 2024).

Logistic Regression: Doğrusal sınıflandırıcı olan lojistik regresyon, modelin yorumlanabilirliğini artırırken, eşik değeri (örneğin: threshold = 0.75) manipülasyonu ile yanlış pozitiflerin azaltılmasında etkili bir filtreleme aracı olarak kullanılmıştır (Bishop, 2006).

Bu modeller, hem çok sınıflı attack_cat hedef değişkeniyle hem de ikili is_anomaly hedef değişkeniyle bağımsız olarak eğitilmiş ve her bir sınıflandırma görevine özgü başarı metrikleriyle değerlendirilmiştir.

3.4.3. Eğitim Stratejileri ve Teknik Uygulamalar

Eğitim süreci Python ortamında yürütülmüş; başta Scikit-learn, XGBoost, LightGBM, CatBoost ve imbalanced-learn olmak üzere pek çok açık kaynak makine öğrenmesi kütüphanesinden faydalanılmıştır. Model başarımını optimize etmek amacıyla şu eğitim stratejileri uygulanmıştır:

Rastgelelik Sabitleme: Deneysel tekrarların tutarlılığı için tüm rastgele işlemler belirli bir random_state değeri ile yürütülmüştür.

K-Fold Cross Validation: Hiperparametre ayarlarının güvenilirliğini sağlamak amacıyla k=5 katlı çapraz doğrulama kullanılmıştır.

SMOTE Uygulaması: Eğitim verisi üzerinde SMOTE algoritması uygulanarak azınlık sınıflar için yapay örnekler üretilmiş, bu sayede sınıf dengesizliklerinin model başarımı üzerindeki etkisi azaltılmıştır (Chawla et al., 2002).

Metrik İzleme ve Görselleştirme: Tüm modeller için doğruluk, hassasiyet, duyarlılık ve F1-skoru metrikleri hesaplanmış, karışıklık matrisi görselleştirmeleri ile hata türleri analiz edilmiştir.

3.5. Multi-Class Sınıflandırma Sonuçları

UNSW-NB15 veri seti kullanılarak, attack_cat sütunundaki dokuz saldırı türünü tanımaya yönelik çok sınıflı sınıflandırma gerçekleştirilmiştir. Kullanılan algoritmalar: Random Forest, XGBoost, LightGBM, CatBoost, Logistic Regression ve VotingClassifier'dır. Tüm modeller aynı eğitim/test verisiyle değerlendirilmiş; accuracy, precision, recall, F1-skoru ve confusion matrix metrikleri kullanılmıştır. Sınıf dengesizliği nedeniyle macro ve weighted ortalamalara odaklanılmıştır (Chicco & Jurman, 2020).

Sonuçlara göre, VotingClassifier en yüksek ortalama başarıyı sağlamış; ensemble yapısı sayesinde dengesiz sınıflarda dahi kararlı tahminler sunmuştur. LightGBM ve CatBoost, yüksek precision ve recall değerleri ile öne çıkmıştır. CatBoost'un kategorik veri uyumu bazı karmaşık saldırılarda avantaj sağlamıştır.

XGBoost bazı sınıflarda iyi performans gösterse de, nadir örneklerde overfitting eğilimi göstermiştir. Random Forest, istikrarlı sonuçlar üretmiş ancak boosting modellere göre bazı metriklerde geride kalmıştır. Logistic Regression ise karmaşık yapıları yakalamada zayıf kalmış, ancak yüksek yorumlanabilirliğiyle referans model olarak değerlendirilmiştir (Bishop, 2006).

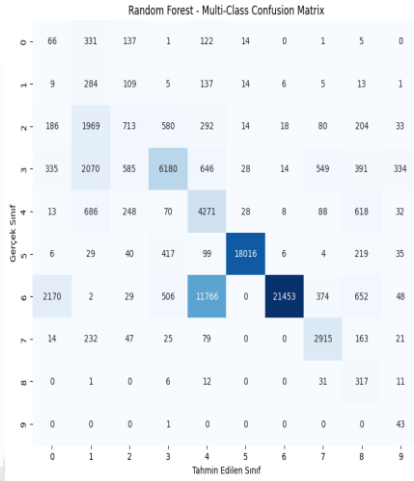
Nicel Bulguların Sunumu

Çok sınıflı sınıflandırma sonuçlarına ilişkin tüm modellerin doğruluk ve alt metrikleri Tablo 3'te sayısal olarak, Şekil 8'de ise grafiksel olarak özetlenmiştir:

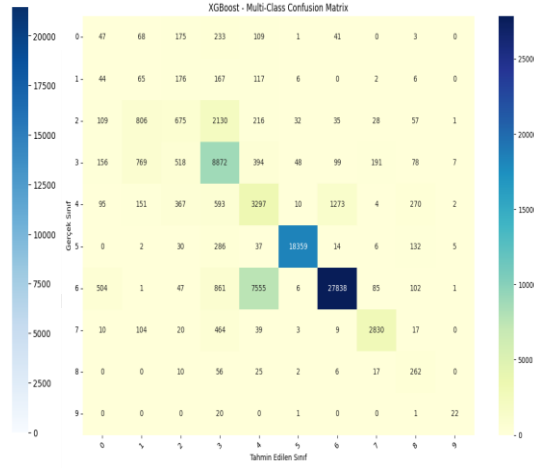
Tablo 1: attack_cat Hedef Değişkenine Göre Model Karşılaştırma Metrikleri

Model	Accuracy	Precision	Recall	F1-score
Random Forest	83.24	83.81	83.24	83.17
XGBoost	87.31	87.75	87.31	87.23
LightGBM	88.20	88.86	88.20	88.10
CatBoost	88.49	88.91	88.49	88.38
VotingClassifier	89.10	89.44	89.10	89.01
Logistic Regression	83.94	84.54	83.94	83.80

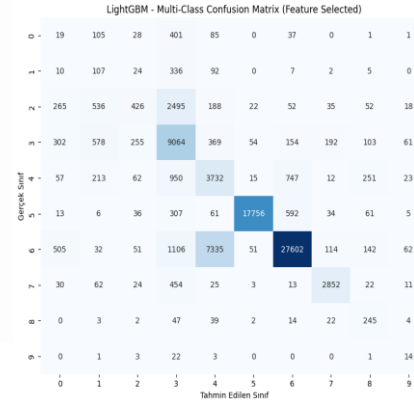
a)



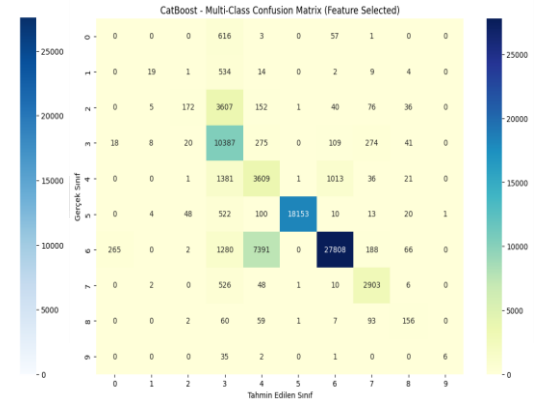
b)

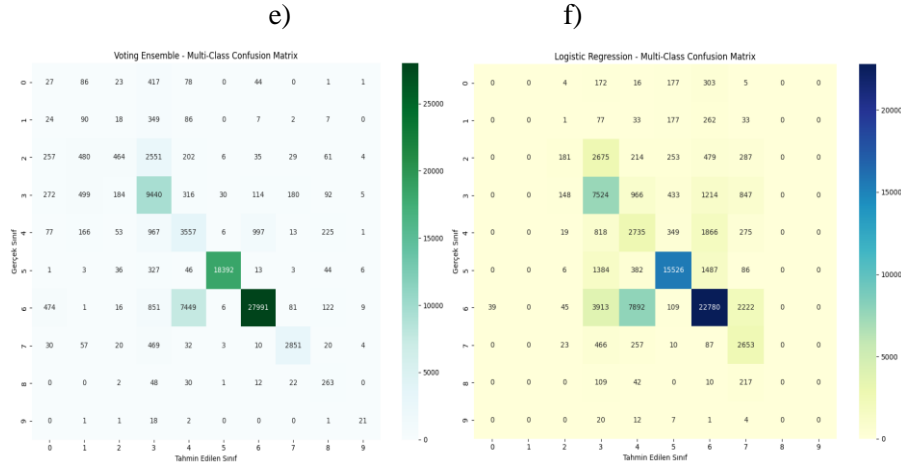


c)



d)





Şekil 1. Multi-Class sınıflandırma sonuçlarına ait karışıklık matrisleri: (a) Random Forest, (b) XGBoost, (c) LightGBM, (d) CatBoost, (e) VotingClassifier, (f) Logistic Regression

Elde edilen bulgular, özellikle ensemble model yapılarının sınıf dengesizliği durumlarında bile başarılı sonuçlar üretebildiğini ortaya koymuştur. Ayrıca boosting tabanlı modellerin karmaşık örüntüleri tanıma başarısı, ağ trafiğindeki saldırı türlerinin ayrıştırılmasında önemli bir avantaj sunmuştur. Logistic Regression gibi basit yapıli algoritmalar ise performanstan çok sistemin analiz edilebilirliğine katkı sağlamıştır.

4.2.2. Binary Sınıflandırma Sonuçları

Bu bölümde, UNSW-NB15 veri seti kullanılarak yürütülen ikili sınıflandırma deneylerine ilişkin bulgular sunulmaktadır. Çok sınıflı “attack_cat” değişkeni, “Normal” dışındaki tüm değerler için is_anomaly = 1, “Normal” için ise is_anomaly = 0 olacak şekilde ikili yapıya dönüştürülmüştür. Böylece model, yalnızca normal ve anormal trafik ayırmasına odaklanmıştır.

Random Forest, XGBoost, LightGBM, CatBoost, Logistic Regression (Threshold = 0.75) ve VotingClassifier (Soft Voting) algoritmaları, SMOTE ile dengelenmiş eğitim verisiyle eğitilmiş ve bağımsız test kümesi üzerinde değerlendirilmiştir. Başarı metrikleri olarak doğruluk, hassasiyet, duyarlılık, F1-skoru ve karışıklık matrisi kullanılmış; özellikle FP ve FN oranlarının güvenlik açısından etkileri dikkate alınmıştır (Saito & Rehmsmeier, 2015).

Performans Bulgularının Yorumu

VotingClassifier modeli, düşük FN oranı sayesinde saldırıları atlamadan tespit etme konusunda en iyi sonuçları vermiştir. Ensemble yapının katkısıyla XGBoost’un örüntü öğrenme kabiliyeti bu başarıda etkili olmuştur.

LightGBM, FP oranlarını azaltmada öne çıkmış; precision ve F1-skoru bakımından güçlü bir performans göstermiştir. Histogram temelli bölme yaklaşımı, doğruluğu ve işlem verimliliğini bir arada sunmuştur (Ke et al., 2017).

CatBoost, dengeli veri yapısında stabil sonuçlar sunmuş ve orta sıklıktaki saldırıları başarıyla ayırt etmiştir. Hassasiyet ve duyarlılık metriklerinde LightGBM’e yakın sonuçlar elde edilmiştir (Prokhorenkova et al., 2018).

XGBoost, az rastlanan saldırıları yakalama açısından yüksek duyarlılık göstermiş; ancak precision değerinin düşüklüğü, yanlış alarm oranını artırmıştır.

Random Forest, genel doğrulukta stabil performans sergilemiş; fakat boosting algoritmalarına kıyasla daha düşük hassasiyet ve duyarlılık sunmuştur. Buna rağmen FP/FN oranları dengeli seyretmiştir.

Logistic Regression modeli karmaşık saldırı örüntülerinde zorlanmış; ancak eşik değeri 0.75'e ayarlandığında FP oranları düşürülmüş ve yanlış alarmlar azaltılmıştır.

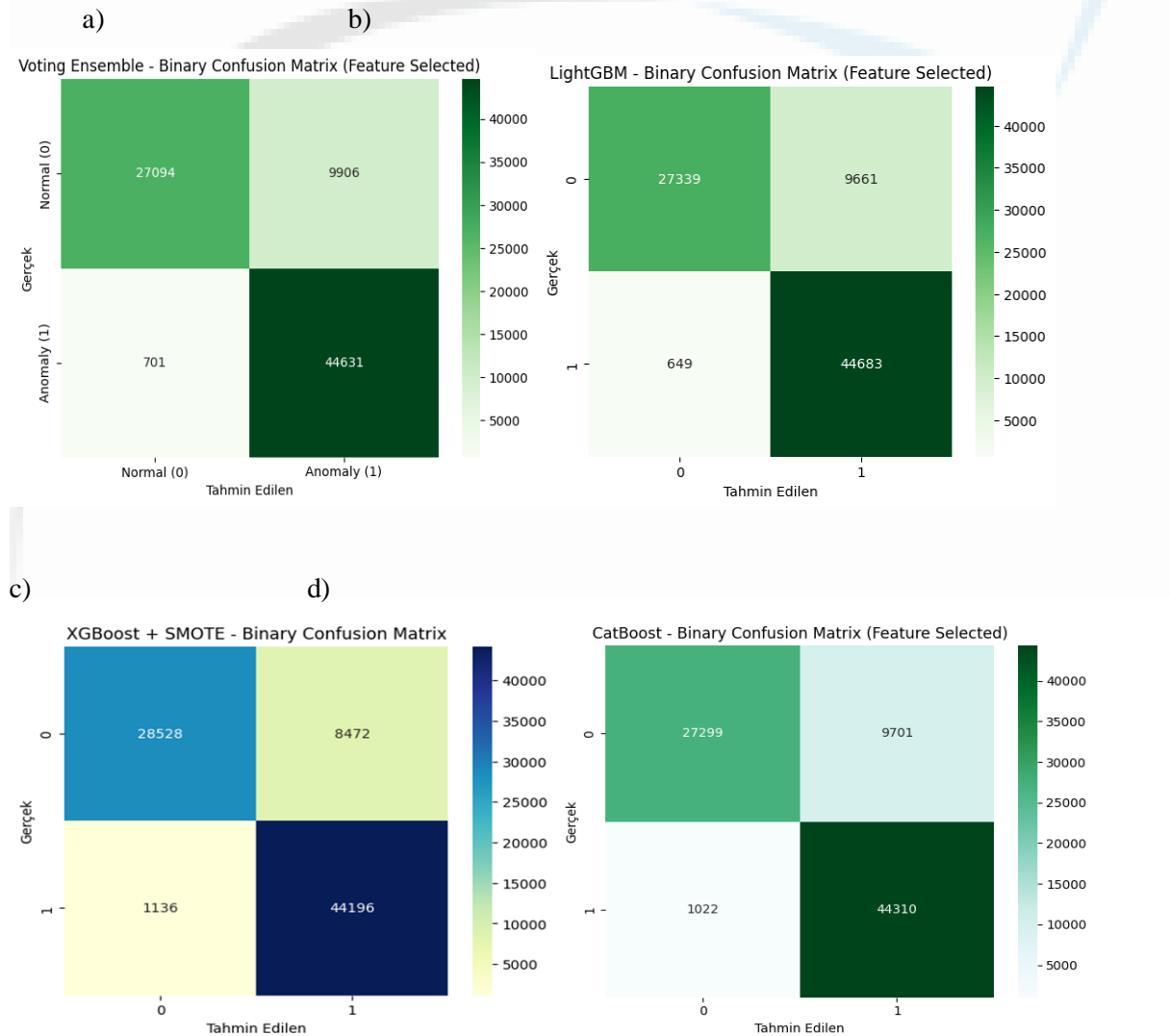
Nicel Bulgular ve Görsel Sunum

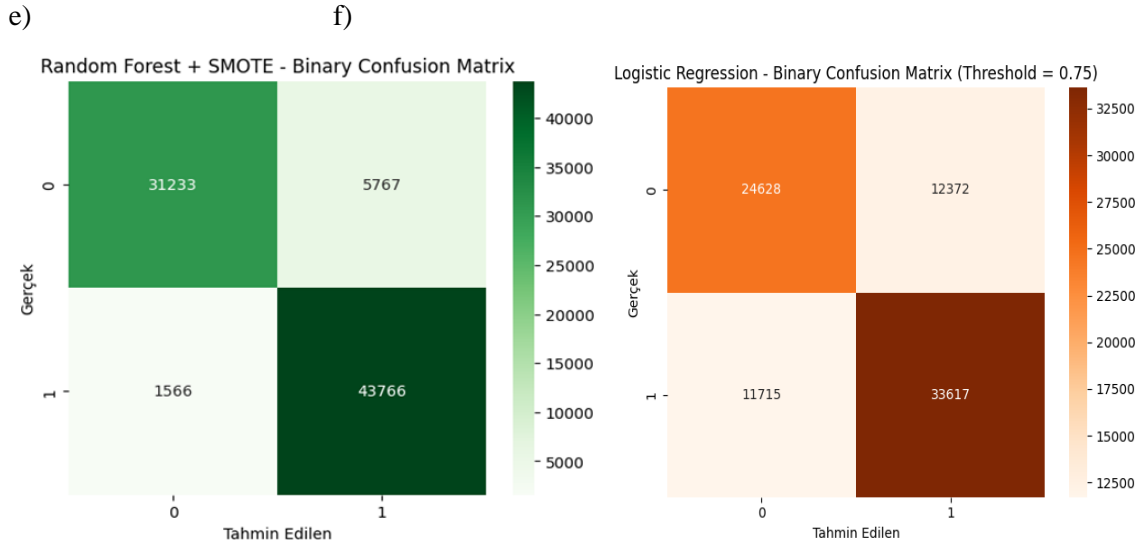
Aşağıdaki tabloda her bir modelin başarımleri karşılaştırmalı olarak verilmiştir:

Tablo 2: is_anomaly Hedef Değişkenine Göre Model Karşılaştırma Metrikleri

Model	Accuracy	Precision	Recall	F1-score
Random Forest	91.09	88.36	96.55	92.27
XGBoost	88.33	83.91	97.49	90.20
LightGBM	87.48	82.23	98.57	89.66
CatBoost	86.98	82.04	97.74	89.21
Voting Ensemble	87.12	81.84	98.45	89.38
Logistic Regression	70.74	73.10	74.15	73.62

Ayrıca her model için confusion matrix görselleri, tahmin performansının hangi sınıflarda daha başarılı veya hatalı olduğunu ayrıntılı şekilde ortaya koymaktadır:





Şekil 4. Binary sınıflandırma sonuçlarına ait Confusion matrisleri: (a) VotingClassifier, (b) LightGBM, (c) XGBoost, (d) CatBoost, (e) Random Forest, (f) Logistic Regression

Sonuçlar göstermektedir ki, FN (False Negative) oranlarını baskılamak için VotingClassifier öne çıkarken, FP (False Positive) oranlarını azaltmak amacıyla Logistic Regression ve LightGBM modelleri etkili olmuştur. Bu gözlemler, ilerleyen bölümde geliştirilecek olan hibrit yapının mimarisine de yön vermiştir.

5. SONUÇ VE GELECEK ÇALIŞMALAR

Bu çalışma, ağ trafiğindeki anomalilerin tespiti için makine öğrenmesine dayalı bir yaklaşım sunmuş ve UNSW-NB15 veri seti üzerinde hem çok sınıflı hem de ikili sınıflandırma senaryolarında değerlendirme yapılmıştır. Random Forest, XGBoost, LightGBM, CatBoost, Logistic Regression ve bu modellerin birleşiminden oluşan VotingClassifier algoritmaları test edilmiştir.

Çok sınıflı sınıflandırmada, her saldırı türü ayrı bir sınıf olarak ele alınmış ve VotingClassifier genel doğruluk ile dengesiz sınıflardaki istikrarıyla öne çıkmıştır. LightGBM ve CatBoost algoritmaları da sınıflar arası ayırt edicilikte güçlü performans göstermiştir. Logistic Regression ise sınırlı örüntü yakalama kabiliyetine rağmen yorumlanabilirlik açısından avantaj sağlamıştır.

İkili sınıflandırmada, $attack_cat \neq 'Normal'$ koşuluyla oluşturulan $is_anomaly$ etiketi üzerinden trafik anomali tespiti yapılmıştır. VotingClassifier, hem yüksek hassasiyet hem de duyarlılık oranlarıyla dikkat çekmiş, LightGBM ve CatBoost ise FP ve FN değerlerinde denge kurarak başarılı sonuçlar üretmiştir. Logistic Regression modeli, eşik ayarı ile FP'yi düşürse de FN'yi artırmıştır.

Sonuçlar, IDS sistemlerinde yalnızca doğruluk değil, özellikle FP ve FN metriklerinin kritik önem taşıdığını göstermektedir. Yanlış negatifler sistem güvenliğini, yanlış pozitifler ise yönetici iş yükünü etkileyerek farklı riskler doğurmaktadır (Kim et al., 2023; Zhang et al., 2020).

VotingClassifier ve LightGBM modellerini birleştiren iki aşamalı hibrit sistemlerin geliştirilmesini, FP/FN davranışlarını öğrenen geri besleme tabanlı yapay zekâ çözümlerinin entegrasyonunu, sıfır-gün saldırılarına karşı dayanıklılık testlerini (Belarbi et al., 2023), zamana duyarlı örüntü tespiti için LSTM gibi mimarilerin kullanımını ve farklı veri setleriyle karşılaştırmalı analizleri içerecektir.

KAYNAKÇA

- Breiman, L. (2001). Random forests. *Machine Learning*, 45(1), 5–32.
- Belarbi, O., Spyridopoulos, T., Anthi, E., Mavromatis, I., Carnelli, P., & Khan, A. (2023). Federated deep learning for intrusion detection in IoT networks. *arXiv preprint arXiv:2306.02715*.
- Chen, T., & Guestrin, C. (2016). XGBoost: A scalable tree boosting system. In *Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining* (pp. 785–794).
- Implementation of Ensemble Machine Learning with Voting Classifier in Imbalanced Data. (2024). *Journal of Electrical and Electronics Engineering and Medical Informatics*, 6(1), 63–70.
- Ke, G., Meng, Q., Finley, T., Wang, T., Chen, W., Ma, W., ... & Liu, T. Y. (2017). LightGBM: A highly efficient gradient boosting decision tree. In *Advances in Neural Information Processing Systems* (pp. 3146–3154).
- Kim, J., Kim, J., & Kim, H. (2023). Improving false-positive reduction in network intrusion detection using hybrid ensemble learning. *International Journal of Computer Networks & Communications*, 15(2), 55–67.
- Prokhorenkova, L., Gusev, G., Vorobev, A., Dorogush, A. V., & Gulin, A. (2018). CatBoost: Unbiased boosting with categorical features. In *Advances in Neural Information Processing Systems* (pp. 6638–6648).
- Zhang, Y., Wang, L., & Jin, R. (2020). Enhanced anomaly detection using ensemble-based techniques. *Journal of Cybersecurity Research*, 5(1), 45–57.

Makale id= 24

Sözlü Sunum

ORCID ID: 0000-0001-8611-3724

| 178

Şeker Pancarı Verimi ile Ndvı Değerleri Arasındaki İlişkinin Belirlenmesi**Doç.Dr. Mert Dedeoğlu¹**¹Selçuk Üniversitesi

Özet: Bitkisel üretimde kültür bitkisi gelişimi, vejetasyon dönemi boyunca periyodik olarak izlenmeli ve takip edilmeli, gerektiğinde önlemler alınmalıdır. Bu nedenle bitki gelişiminin gerçek zamanlı, konumsal ve doğru bir şekilde belirlenmesi günümüzde hassas tarım için büyük önem taşımaktadır. Bu çalışmada, Konya ili Çumra ilçesinde bölgesel çiftçi uygulamalarını temsil eden 10 farklı şeker pancarı (*Beta vulgaris*) parselinin 2023 yılı ortalama verim değerleri ile aynı döneme ait Temmuz, Ağustos ve Eylül aylarına ait Sentinel 2 görüntülerinden türetilen NDVI indeks değerleri arasındaki istatistiksel ilişki araştırılmıştır. Bu çalışma ile Sentinel 2 görüntülerinden türetilen NDVI değerlerinin verim tahminindeki başarısı periyodik olarak test edilmiş ve Temmuz ayı NDVI değerlerinin erken verim tahminlerinde $r^2=83$ ile kullanılabileceği belirlenmiştir. Benzer şekilde şeker pancarının ileri vejetasyon dönemi olan kök olgunlaşma döneminde Ağustos görüntüleri $r^2=72$ ile güvenilir bir şekilde kullanılabilirken, olgunlaşma dönemini temsil eden Eylül ayında anlamlı bir ilişki belirlenmemiştir. Çalışma sonucunda, şeker pancarının Temmuz ayı görüntülerinden elde edilen NDVI değerlerinin yorumlanmasıyla, vejetasyon gelişiminin erken dönemlerinde ürün veriminin tahmin edilebileceği ve gerekli kültürel önlemlerin alınmasında fikir verici olarak kullanılabileceği önerilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Konya, Ndvı, Sentinel 2, Şeker Pancarı, Verim

Determination of the Relationship Between Ndvı Values and Sugar Beet Yield

Abstract: In plant production, cultigen development should be monitored and followed periodically throughout the vegetation period and precautions should be taken when necessary. Therefore, real-time, spatial and accurate determination of plant development is of great importance for precision agriculture today. In this study, the statistical relationship between the 2023 average yield values of 10 different sugar beet (*Beta vulgaris*) parcels representing regional farmer practices in Çumra district of Konya and the NDVI index values derived from Sentinel 2 images of July, August and September of the same period was investigated. With this study, the success of NDVI values derived from Sentinel 2 images in yield estimations was tested on a periodic basis and it was determined that NDVI values of July could be used with $r^2=83$ for early yield estimations. Similarly, August images could be used reliably with $r^2=72$ during the root maturation period, which is the advanced vegetation phase of sugar beet, but no significant relationship was determined in September, which represents the ripening period. As a result of the study, it was suggested that by interpreting the NDVI values obtained from the July images of sugar beet, product yield can be estimated in the early stages of vegetation development and can be used as an idea to take the necessary cultural measures.

Keywords: Konya, Ndvı, Sentinel 2, Sugar Beet, Yield

INTRODUCTION

In the last 20 years, the total volume of investments in the agricultural sector has increased by 80%. The aim of these investments is to achieve at least a 70% increase in productivity by 2050 to meet the increasing needs of the world population, considering the fact that cultivated areas will decrease (FAO, 2023). Today, it is predicted that technologies known as the Internet of Things and described as digital agricultural tools will play an important role in achieving this increase. The Internet of Things paradigm

offers a new perspective for agricultural production by providing real-time and field (ecology)-specific management of cultivated areas. Indeed, digital agricultural tools, whose popularity and functionality are increasing with Agriculture 4.0, provide significant potential in smart and precision agricultural applications by providing real-time environmental data and enable long-term increases in productivity in an environmentally friendly manner. As a matter of fact, the need for rapid and accurate decision making in agricultural areas has led to the increased adoption of both remote sensing technologies (Mulla, 2013) and spectral indices (Jones et al, 2017; Keating and Thorburn, 2018) in precision agriculture. Vegetation Indices refer to obtaining a unitless value about the status of vegetation by applying mathematical operations to the reflection values of different wavelengths in the electromagnetic spectrum (Khunrattanasiri, 2023). The working principle of vegetation indices is basically based on the presence of chlorophyll, which is directly related to green leaf area and plant biomass, and the determination of their responses to biotic/abiotic factors (Li et al., 2014). The most widely used vegetation index is the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) (Huang et al. 2021). In the study, the regression relationship between the 2023 yield values of 10 different sugar beet parcels in the Çumra district and the NDVI values derived from the Sentinel 2 satellite data for July, August and September of the same period was investigated. In this way, it was aimed to determine the appropriate period for yield estimation with NDVI.

MATERIALS AND METHODS

General Characteristics of the Study Area

The study was carried out in 10 different sugar beet fields selected in Çumra district of Konya province (Figure 1). Location information and yield values of the fields are presented in Table 1. Çumra district is the region where sugar beet cultivation is most intensive in Konya Closed Basin. Physiographically, it is a homogeneous and flat alluvial plain structure. The altitude of the research area above sea level is 1010 m. The annual average rainfall in the region is 296.8 mm, the annual average temperature is 11.4 °C, and the annual evaporation amount is 996.60 mm.

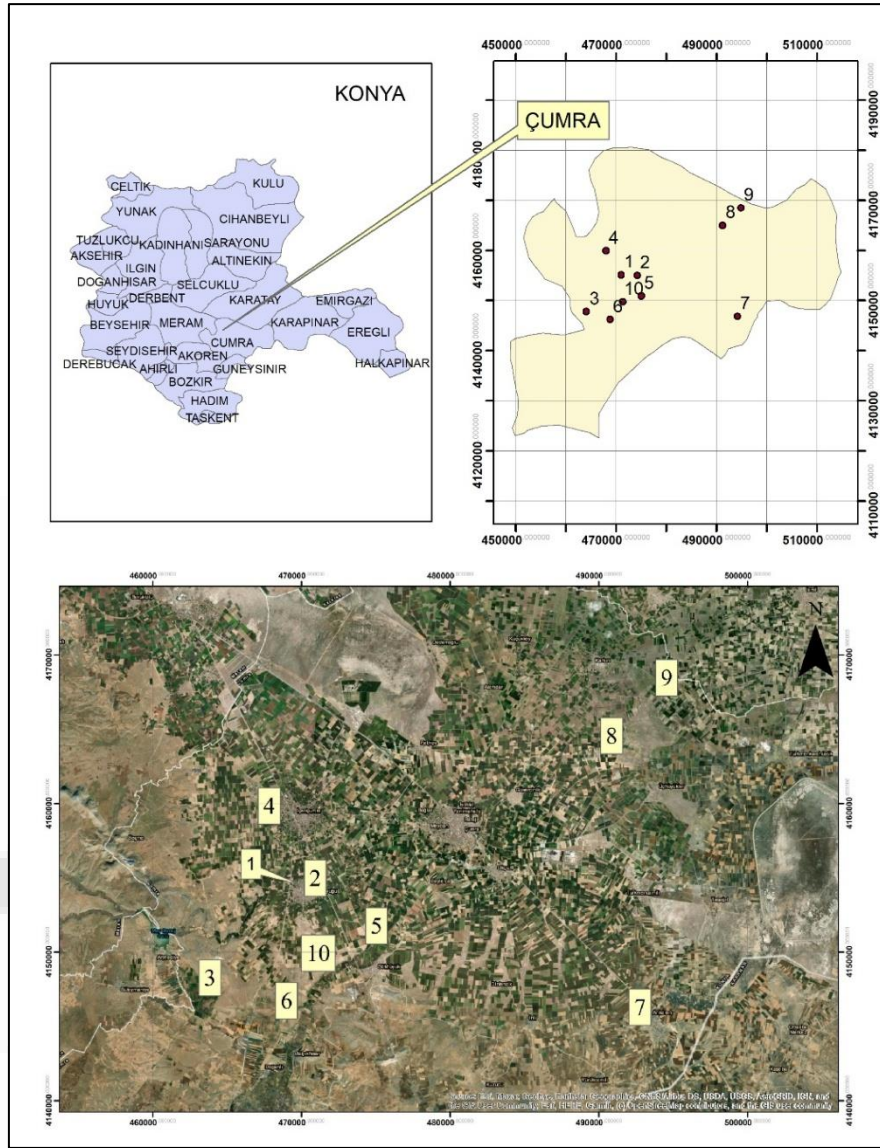


Figure 1. Location map of study area

Table 1. Location and yield values of sugar beet plots

Parcel No	Village	Yield tone/da	X coordinate	Y coordinate
1	Alibeyhüyüğü	4.79	32.6676	37.5432
2	Alibeyhüyüğü	4.79	32.4621	37.5522
3	Alibeyhüyüğü	5.9	32.5908	37.4792
4	İçeriçumra	6.12	32.6357	37.585
5	Alibeyhüyüğü	6.13	32.7156	37.5126
6	Alibeyhüyüğü	7.5	32.6491	37.4631
7	Karkin	7.7	32.9169	37.6768
8	Karkin	8.5	32.896	37.6287
9	Karkin	8.9	32.9364	37.6642
10	Alibeyhüyüğü	10.1	32.6739	37.4954

Acquisition of Satellite Images and Index Application

In the research, Sentinel 2 Level -2A satellite images dated 16 July, 19 August and 22 September 2023, which are freely available from the European Space Agency (ESA) servers (<https://scihub.copernicus.eu/>), were used. The specified dates were selected as the images that represent the closest time intervals to the field studies, have the lowest cloud cover rate and the most appropriate geometric distillation. Sentinel - 2A is a new generation remote sensing platform with (1) a temporal resolution of less than a week, (2) multi-band spatial resolution ranging from 10 m to 60 m and (3) narrow bands in the red and red edge spectral regions that provide reliable inferences in agricultural monitoring research (Pasqualotto et al., 2019). At the same time, Level-2A images, which include subatmospheric reflectance (Top-Of-Atmosphere) values, are presented with geometric and atmospheric corrections (Drusch et al. 2012). Sentinel 2 satellite image band features are presented in Table 2.

Table 2. Sentinel 2A sensor spectral bands and features

Bands	Function	Wavelength (nm)	Bandwidth (nm)	Spatial Resolution (m)
1	Aerosol	443	27	60
2	Blue	490	98	10
3	Green	560	45	10
4	Red	665	38	10
5	Vegetation red-edge	705	19	20
6	Vegetation red-edge	740	18	20
7	Vegetation red-edge	783	28	20
8	Near infrared (NIR)	842	145	10
8a	Vegetation red-edge	865	33	20
9	Water vapor	945	26	60
10	SWIR	1380	75	60
11	SWIR	1610	143	20
12	SWIR	2190	242	20

In the study, Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) was used to estimate early-term sugar beet yield values in 3 different periods using Sentinel 2A satellite images. NDVI is a reliable algorithm that has been widely used in many past studies in estimating temporally variable %N contents of different plant species (Cabrera-Bosquet et al., 2011), determining green density (Verhulst et al., 2009), monitoring plant development (Mezera et al., 2017), yield estimations (Lambert et al., 2018) and vegetation classification studies. Therefore, the use of NDVI was found appropriate for the purpose of the study and its success in sugar beet yield estimation was tested periodically. The NDVI equation is presented below.

$$NDVI = (NIR - RED) / (NIR + RED) = NDVI = (B8 - B4) / (B8 + B4)$$

ESA-SNAP image processing program was used to derive NDVI values from Sentinel 2A satellite images (Figure 2).

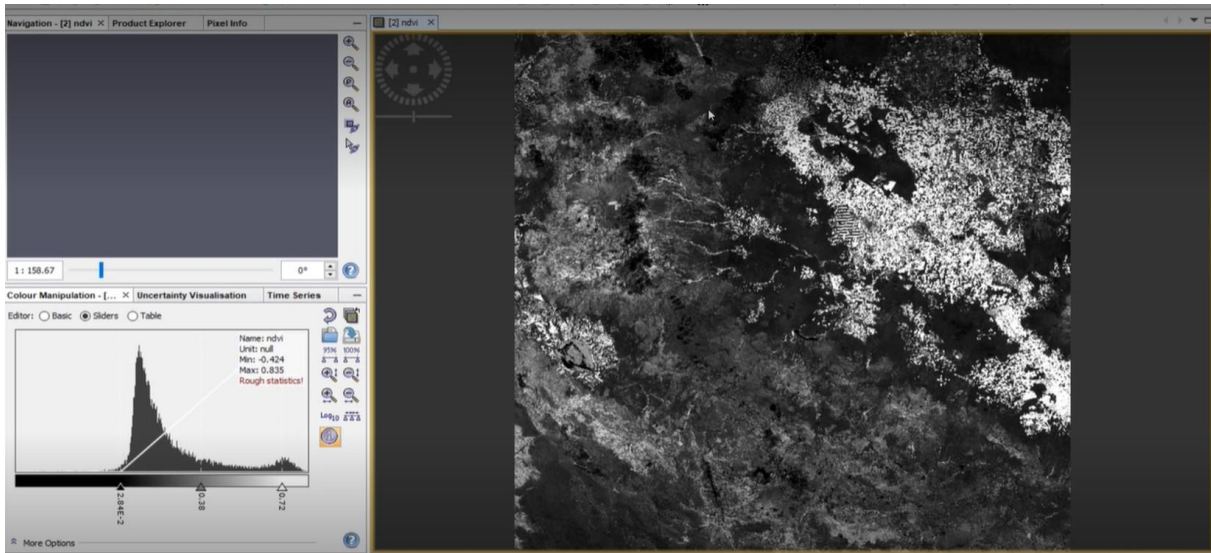


Figure 2. NDVI data produced on 19/08/2023

Production of parcel index values and statistical analysis

In the study, the average NDVI values of the test plots were calculated using the “Zonal Statistics” tool of the ArcGIS 9.3 (ESRI, 2010) program. In this way, vegetation index values representing each sugar beet plot were derived. The regression relationship between the average index values determined on a parcel basis and the plot average yields was determined with the MS Excel program.

RESULTS AND DISCUSSION

In the study, the possibilities of using VNIR images belonging to different periods in early yield estimation evaluation were investigated. In fact, the aim of the study is to determine the yield estimation success during the vegetation period with NDVI values derived from Sentinel-2 images of sugar beet plants that can represent the grower conditions. For this purpose, the average NDVI values and parcel yields calculated for each parcel were determined and presented in Table 3.

Table 3. Average yield and NDVI values

July			August			September		
Pacel No	Yield tone/da	NDVI	Pacel No	Yield tone/da	NDVI	Pacel No	Yield tone/da	NDVI
1	4.79	0.285	1	4.79	0.678	1	4.79	0.579
2	4.79	0.211	2	4.79	0.674	2	4.79	0.579
3	5.90	0.397	3	5.9	0.733	3	5.9	0.576
4	6.12	0.578	4	6.12	0.742	4	6.12	0.697
5	6.13	0.625	5	6.13	0.818	5	6.13	0.682
6	7.50	0.731	6	7.5	0.875	6	7.5	0.571
7	7.70	0.734	7	7.7	0.816	7	7.7	0.581
8	8.50	0.848	8	8.5	0.813	8	8.5	0.678
9	8.90	0.768	9	8.9	0.815	9	8.9	0.680
10	10.10	0.834	10	10.1	0.877	10	10.1	0.675

According to the findings, the highest relationships between NDVI and yield values (Figure 3) were determined in satellite images belonging to July (83%) and August (72%). This situation was associated with the plant vegetation density reaching the highest value in July in parcels showing optimum development, and it was determined that NDVI values decreased in parcels that did not show sufficient development during this period due to the effect of subsoil reflection.

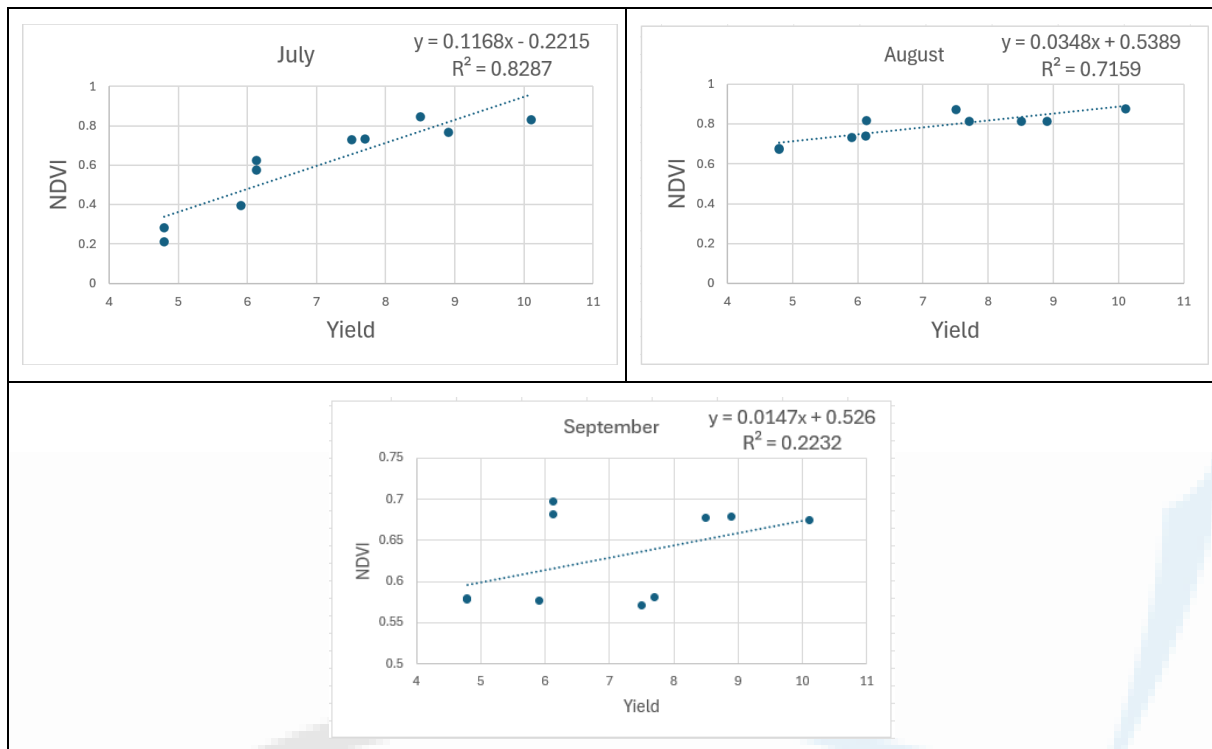


Figure 3. Comparison of average yield and NDVI values

The NDVI values for August vary in a narrow range between 0.68-0.88 and show a 72% relationship with yield values. However, the linear relationship determined in July could not be achieved on this date. This situation was evaluated by reflecting the effects of cultural practices applied before August in the NDVI values of sugar beet fields, and it was determined that management practices contributed to the similar development of the upper plant parts in different plots, but their effect on yield values was not at the same level. The factors affecting plant spectral reflectance and index values may be due to differences in management practices, and it is known that they are directly related to many soil properties that affect productivity (Zhou et al., 2018; Dedeoğlu et al., 2021). The lowest relationship between NDVI and yield values (28%) was determined in the satellite image of September. It is known that new leaf formation in sugar beet decreased during this period and most leaves covering a large surface area became old (Faberio et al., 2003). This situation causes NDVI values to decrease and a significant statistical relationship cannot be established with sugar beet yield.

CONCLUSIONS

High-resolution multispectral satellite images are used today as an important part of remote sensing systems in the management and monitoring of agricultural production areas. With these systems, the spectral reflectance data obtained at different vegetation stages of plants can be functionalized with different vegetation indices to improve the high accuracy of estimation of plant yield, quality and stress factors, especially plant development status. In this study, the feasibility of location-based yield estimation was investigated using index values derived from Sentinel 2 images at different vegetation periods of sugar beet, which has strategic and sociological importance for our country. With this study, the success of NDVI values derived from satellite images in yield estimations was tested on a periodic basis and it was determined that Sentinel images and NDVI values belonging to July could be used with $r^2 = 83$ for early yield estimations. As a result of the study, it was suggested that the product yield could be estimated early in large areas by interpreting the NDVI values obtained from July images of sugar beet, the effect of cultural practices could be evaluated by comparing different parcels and could be used as a basis for planning by decision makers. At the same time, the satellite images used in the study are of foreign origin and are of historical time, which is an expensive approach for research to be conducted

with real-time programming and imaging processes. For this reason, it has been suggested that priority should be given to the planning studies of remote sensing sensors, especially the IMECE satellite platform, to be developed within the scope of the “National Space Program” in our country.

REFERENCES

- Cabrera-Bosquet L, Molero G, Stellacci, A, Bort J, Nogues, S, Araus J, 2011. NDVI as a potential tool for predicting biomass, plant nitrogen content and growth in wheat genotypes subjected to different water and nitrogen conditions. *Cereal Res. Comm.* 39(1): 147-159.
- Dedeoglu, M. 2020. “Estimation of critical nitrogen contents in peach orchards using visible-near infrared spectral mixture analysis”. *Journal of Near Infrared Spectroscopy*, 28(5), 315-327.
- Drusch M, Del Bello U, Carlier S, Colin O, Fernandez V, Gascon F, Hoersch B, Isola C, Laberinti P, Martimort P, Meygret A, Spoto F, Sy O, Marchese F, Bargellini P, 2012. Sentinel-2: ESA's optical high-resolution mission for GMES operational services. *Remote Sensing of Env.* 120(2012): 25-36.
- ESRI ArcMap version 9.3 (2010) ESRI Inc. Redlands, CA
- Faberio C, Martin de Santa Olalla F, Lopez R, Dominguez A, 2003. Production and quality of the sugar beet cultivated under controlled deficit irrigation conditions in a semi-arid climate. *Agric. Water Manage.* 62: 215-227.
- FAO. 2023. “The State of Food Security and Nutrition in the World 2023: Safeguarding against Economic Slowdowns and Downturns”. Available online: <https://www.wfp.org/publications/2023-state-food-security-and-nutrition-world-sofi-safeguarding-against-economic>
- Huang, S., Tang, L., Hupy, J. P., Wang, Y., & Shao, G. (2021). A commentary review on the use of normalized difference vegetation index (NDVI) in the era of popular remote sensing. *Journal of Forestry Research*, 32(1), 1-6.
- Jones, J. W., Antle, J. M., Basso, B., Boote, K. J., Conant, R. T., Foster, I., Wheeler, T. R. 2017. “Brief history of agricultural systems modeling”. *Agricultural systems*, 155, 240-254.
- Keating, B. A., Thorburn, P.J. 2018. “Modelling crops and cropping systems—Evolving purpose, practice and prospects”. *European Journal of Agronomy*, 100, 163-176.
- Khunrattanasiri, W. (2023). Application of remote sensing vegetation indices for forest cover assessments. In *Concepts and Applications of Remote Sensing in Forestry* (pp. 153-166). Singapore: Springer Nature Singapore.
- Lambert M, Traoré PCS, Blaes X, Baret P, Defourny P, 2018. Estimating smallholder crops production at village level from Sentinel-2 time series in Mali's cotton belt. *Remote Sensing of Environment*. 2018(216): 647-657.
- Li, F., Mistle, B., Hu, Y., Chen, X., Schmidhalter, U. 2014. “Reflectance estimation of canopy nitrogen content in winter wheat using optimised hyperspectral spectral indices and partial least squares regression”. *European Journal of Agronomy*, 52, 198-209.
- Mezera J, Lukas V, Elbl J, 2017. Evaluation of crop yield spatial variability in relation to variable rate application of fertilizers. *MendelNet*. 24(1): 17-37.
- Mulla, D. J. 2013. “Twenty five years of remote sensing in precision agriculture: Key advances and remaining knowledge gaps”. *Biosystems engineering*, 114(4), 358-371.
- Pasqualotto N, Delegido J, Van Wittenberghe S, Rinaldi M, Moreno J. 2019. Multi-crop green LAI estimation with a new simple Sentinel-2 LAI index (SeLI). *Sensors*, 19(4):904.
- Verhulst N, Govaerts B, Sayre KD, Deckers J, François IM, Dendooven L, 2009. Using NDVI and soil quality analysis to assess influence of agronomic management on within-plot spatial variability and factors limiting production. *Plant and Soil*. 317(1): 41-59.

Zhou, X., Yamaguchi, Y., & Arjasakusuma, S. (2018). Distinguishing the vegetation dynamics induced by anthropogenic factors using vegetation optical depth and AVHRR NDVI: A cross-border study on the Mongolian Plateau. *Science of the Total Environment*, 616, 730-743.



Makale id= 54

Sözlü Sunum

ORCID ID: 0000-0002-0110-4982, 0000-0001-9896-9220

| 186

Gelişmekte Olan Ülkeler İçin Senkromodalite Konseptinin Uygulanabilirliği ve Sürdürülebilirliği**Dr. Ali Atilla Arisoy¹, Prof.Dr. Ilgın Gokasar¹**
¹Boğaziçi University

*Corresponding author: Ilgın Gökaşar

Özet: Lojistik maliyetleri, herhangi bir kargonun üretici ve tüketici arasındaki fiyat farkının artmasındaki önemli sebeplerden biridir. Yakın zamanda yaşanan COVID-19 pandemisi ve jeopolitik riskler, mevcut lojistik sistemlerinin ve çözümlerinin sürdürülebilir olmadığını ve maliyetlerin yükseleceğini ya da öngörülemez bir hale geleceğini göstermektedir. Lojistik sektörü uzmanları ve politika yapımcılar inovatif ve sürdürülebilir çözümler geliştirme çalışmalarına devam etmektedir. Senkromodalite yakın zamanda ortaya konulan önemli planlama konseptlerinden bir tanesidir. Bu konseptte, tedarik zincirindeki tüm paydaşlar birbirleriyle gerçek zamanlı veri üzerinden, gerçek zamanlı planlama yapabilmekte ve gerektiği durumlarda planlamasını veriye dayalı kararlarla değiştirebilmektedir. Bu konsept ile gerçekleştirilen lojistik operasyonların ekonomik ve sürdürülebilirlik açısından potansiyel faydaları kayda değerdir. Ancak bu konseptin uygulanabilirliği, lojistik operasyonların gerçekleştiği yerlerdeki ekonomik kapasiteye göre oldukça tartışmalıdır. Bu çalışmada ekonomik açıdan daha kısıtlı kaynaklara sahip gelişmekte olan ülkeler için senkromodalite konseptinin uygulanabilirliği ve sürdürülebilirliği tartışıldı. Lojistik uzmanlarla yapılan görüşmelere ve literatürdeki çalışmalara göre, konseptin uygulanabilirliğinin artırılabilmesi için nelere ihtiyaç olduğu tespit edildi ve çözüm önerileri sunuldu.

Anahtar Kelimeler: Lojistik, Senkromodalite, Sürdürülebilirlik, Kaynak Optimizasyonu

Practicality and Sustainability of the Synchromodality Concept for Developing Countries

Abstract: ABSTRACT: Logistics costs can cause significant price hikes between producers and consumers for any type of cargo. The recent COVID-19 pandemic and geopolitical risks have shown that current logistics systems and solutions are not sustainable, and that logistics costs are expected to increase further or become unpredictable. Logistics sector experts and policymakers are working on developing innovative and sustainable solutions. Synchromodality is one of the key logistics planning concepts that has recently emerged. According to this concept, all stakeholders in the supply chain can engage in real-time planning using real-time data, and, if necessary, adapt their plans with data-driven decisions. The potential benefits of logistics operations based on this concept are significant in terms of economic and sustainability aspects. However, the concept's practicality is highly debatable, as it depends significantly on the economic capacity of the regions where logistics operations are located. This study discusses the practicality and sustainability of the synchromodality concept for developing countries with limited economic resources. Based on interviews with logistics experts and available literature, the necessary requirements for increasing the concept's practicality are identified, and solutions are proposed.

Keywords: Logistics, Synchromodality, Sustainability, Resource Optimization

Introduction and Background

Logistics costs increase the price gap between producers and consumers for any cargo type. Before COVID-19, problems in logistics infrastructure systems have been either ignored or went unnoticed. With the pandemic the weaknesses in these systems have been revealed (Grzelakowski, 2022). As long as these issues are not resolved, the price gap is expected increase unsustainably. Given current

geopolitical risks, policymakers and industry experts are working on developing innovative and sustainable concepts and solutions. One of these recent concepts is the synchronomodality concept.

Synchronomodality is a concept that has emerged around 2010 in the Netherlands (Agbo and Zhang, 2017). This concept primarily promotes the use of real-time data, such as availability, cost, and network conditions to switch between transportation modes in a dynamic manner. It also promotes the utilization of efficient, eco-friendly and sustainable transportation systems (Tavasszy et al., 2015). The mentioned data is provided by every single stakeholder of the supply chain such as shipper and logistics service providers. Therefore, collaboration between these stakeholders is also being promoted with this concept (Jesus et al., 2023). Studies show that strategies based on the synchronomodality concept can provide significant benefits in terms of emission and cost reduction (Alaei et al., 2024). However, there are critical barriers that can impact the potential benefits of this concept, especially in developing countries where the economic resources are very limited and the available logistics infrastructure is not at a desired level. Lack of a clear and universal definition, the need for trust among stakeholders, and the requirement of a high initial investment for this concept's success are some of these barriers (Brochado et al., 2024; Song et. al., 2023).

In this study, the practicality and sustainability aspects of the synchronomodality concept for implementing this concept in developing countries is investigated. Available studies regarding this subject in the literature are evaluated. Additionally, insights provided by logistics experts and policy makers that are located in developing countries are utilized. The requirements for increasing the concept's practicality are identified, and potential solutions are proposed.

Logistics Sector Perspective for Synchronomodality Concept

Academic researchers are exploring the benefits of the synchronomodality concept. However, a gap exists between the literature and the logistics sector. Most research findings are difficult to implement in real life. Real-life constraints and vague definitions of this concept are some of the key reasons. Additionally, companies often focus on short-term costs which further increases the gap (Rentschler et al., 2022). Researchers are working to identify these barriers and their root causes that will minimize the gap and efficient methodologies for implementing this concept can be presented.

A major real-life limitation is the lack of high-quality real-time data provided by supply chains stakeholders. The synchronomodality concept promotes effective use of real-time data, provided by every stakeholder of the supply-chain (Alaei et al., 2024). Increasing the availability of high-quality data can allow for both short- and long-term logistics planning (Palander and Vesa, 2022). The logistics professionals can make use of the provided data by organizing their deliveries and changing their routes and modes if a better option becomes available. According to interviews with the logistics experts, data privacy is a critical concern when sharing data with other stakeholders (Arisoy et al., 2025). Other studies confirm this concern for almost all stakeholders (Brochado et al., 2024). These stakeholders need assurance that their provided data will not lead to data-leakage or be exploited by their competitors. This lack of trust is a significant barrier to effective data sharing which can reduce the potential benefits of this concept greatly. Therefore, a collaborative mindset among all stakeholders. A centralized authority that provides necessary assurances for these stakeholders is recommended. Policymakers must work on these regulations that incentivize effective and high-quality data sharing.

Another significant practical constraint is the economic aspect. Synchronomodality concept aims to shift the logistics operations toward more efficient and sustainable transportation modes, such as railroad systems (Cerabona et al., 2024). Shifting the preference of logistics planners to more efficient and sustainable systems can offer significant economic and environmental benefits with lower transportation costs. However, the logistics duration is an important factor for logistics experts, especially for goods that can quickly perish. Food products such as berries, meat and fish, can be given as examples for these highly perishable goods (van Staden et al., 2024). While railroad systems are much more efficient and sustainable, their increased duration can cause the logistics experts to avoid these modes even if sufficient railroad systems are available or incentives are provided. Therefore, the time cost for the logistics planners, based on the product being carried, must be considered. For policy makers, decreasing the transportation cost with sustainable modes can increase the public support with lower price hikes between the producer and consumer. Additionally, provided data can be used as a guide by policymakers

for planning new sustainable system investments. In order for stakeholders to share and store this data efficiently, a significant initial investment is required (Zhao et al., 2024). Network improvements, data centers and optimizing the transportation and network system integrations can add up to a significant amount. This can be a significant challenge, especially for policymakers operating in developing countries with limited financial resources.

The synchronomodality concept's definition is constantly evolving (Jesus et al., 2023). The fact that there is no concrete and universal description of synchronomodality is a significant barrier for the real-life implementation of planning methodologies based on this concept. The proposed descriptions focus on certain aspects of a logistics operation. While the concept is originated from environmental concerns, most proposed descriptions and solutions focus on the economic aspect (Rentschler et al., 2022). According to the available studies in the literature, the practical implementation aspect receives even less attention. Definitions that aim to cover this aspect must be developed in collaboration with logistics sector experts and/or policymakers. Strategies proposed based on these developed descriptions must be evaluated. Simulation tools can be used for this purpose. The evaluation outcomes must then be validated with the logistics experts. Not involving these stakeholders may result in a concept description that is beneficial and preferable in theory but nearly impossible to implement.

Perspective of the Developing Countries for Synchronomodality Concept

According to the available literature and the interviews conducted with logistics experts, concerns of these experts are collected and presented in Table 1. Policymakers proposed role for addressing these concerns and the expected benefits are also presented in this table. Further details are presented in this section.

Table 1. Solutions for the concerns of logistics sector experts' in developing countries.

Logistics Experts' Concern	Role of Policymaker	Expected Benefit
Data privacy	Acting as a central and neutral hub that stores and utilizes the provided data by the logistics experts.	Optimize the utilization of available infrastructure by policy makers in short-term. Being able to select the best option for new infrastructure projects in the long-term, using the collected data and ML approaches.
Time costs	Provide additional capacity for logistics operations between the requested OD points.	Minimize the time costs and maximize the utilization of the available infrastructure.
Economic costs	If the carried cargo is suitable, provide incentives, such as lower tax, for logistics experts.	Increase the level of preference of sustainable and efficient transportation modes.
Cost of real-time data sharing	Request daily scheduling data from logistics sector experts, which is easier and cheaper to manage.	Increase the amount and quality of collected data. Increase the public support for planning strategies based on the synchronomodality concept.

Compared to developed countries, the developing countries have much less available economic resources for constructing new infrastructure. In these developing countries the majority of the logistics operations are done with road transportation (Singh et al., 2008). This mode of transportation has its advantages, such as flexible scheduling and being able to reach remote locations (Inkinen and Hämäläinen, 2020). However, especially for long-distance operations, utilization of road transport

vehicles causes rapid increases in economic and environmental costs. Even further, truck allocation with real-time data dependent decision making is very complex and can lead to reduced logistics performance in terms of higher duration and economic costs (Alaei et al., 2025). Therefore, shifting to more efficient and sustainable modes, such as railroad transportation, can provide significant economic and environmental benefits for logistics experts operating in developing countries (Rong et al., 2025).

For developing countries, the sustainability aspect of the synchronomodality concept can be handled by prioritizing the optimization of the available infrastructure. Instead of constructing entirely new systems, such as new railroad routes, the focus should be on how to operate the available sustainable and efficient transportation infrastructure in an optimized manner. For instance, instead of real-time data sharing that requires a significant infrastructural investment, logistics planners can share their short-term logistics schedules with the policymakers. These data then can be utilized by these centralized and neutral policymakers to provide additional sustainable transportation capacity between the requested origin-destination (OD) points (e.g., additional freight train trips) for these operations. In the long-term, the policymakers can use machine-learning (ML) approaches for detecting patterns in the provided data by the logistics sector experts. Using these patterns, new sustainable transportation infrastructure projects can be developed.

In addition to providing the extra logistics capacity for sustainable transport modes, the role of the elements of these modes must be revised as well. Instead of just utilizing the hubs of these modes for logistics operations, new roles, such as utilizing these hubs as business, social and cultural hubs, must be assigned. By doing so further public support can be obtained for logistics strategies based on the synchronomodality concept.

The type of carried cargo is a concern that must be addressed as well. If the transported cargo is not suitable to be carried by slow but efficient and sustainable modes, then the policymakers should not enforce regulations for it. The correct incentives, such as lowered tax rates, increasing the available capacity of between the requested OD points, must be provided for adequate cases only.

Policymakers have a much more critical role than the logistics experts in developing countries. Every solution presented in this section requires strong communication between the policymakers and the logistics sector, searching for ways to optimally utilize the available infrastructure, and a collaborative mindset (Ceulemans et al., 2024). Due to limited resources that prevent entirely new infrastructure projects, these requirements are much more critical success factors if the logistics strategies based on the synchronomodality concept are to succeed. Without being able to properly implement these strategies, and revising the definition of the synchronomodality concept, the concept will always remain as just a great idea on paper but impossible to realize its benefits in real-life.

Conclusion and Discussion

The need for new and innovative solutions and concepts for the field of supply chain and logistics is at an all time high. With the current weaknesses that have been highlighted during the COVID-19 pandemic, the price gaps between the producers and consumers may lead unsustainable levels. Logistics experts and policymakers are working on this subject continuously.

One of the most important recent concepts is the synchronomodality concept. With the synchronomodality concept, logistics planning and operations are conducted using real-time data provided by every stakeholder of the supply chain. Strategies based on this concept promise significant economic and environmental benefits (Ferjani et al., 2024). However, the practicality aspect remains as the weakest point of this concept. The definition of the synchronomodality concept is evolving over time, particularly regarding its economic, environmental, and sustainability aspects. The practicality aspect which is not much focused on, is also required to be addressed as well. This is especially important for logistics operations that take place in developing countries with limited economic resources.

Vague definitions, economic constraints, data privacy and doubts of the concept's hypothetical benefits are some of the major barriers between the literature and the real-life implementation for the synchronomodality concept. To fully realize the promised benefits of this approach, the following requirements are detected based on the literature reviews and discussion with logistics experts operating in developing countries:

1. A universally accepted definition for this concept is essential. This definition must serve as a foundation for logistics experts and policymakers while developing strategies based on the proposed definition for this concept.
2. The practicality aspect of this concept must be addressed in its definition. Various constraints of the countries or locations where the logistics operations take place (e.g., economic, infrastructure capacity) and the properties of the transported goods (e.g., food, durable products) must be included in this definition as well.
3. The developed strategies based on the proposed concept definitions must be validated by experts from the field. Without this step, the proposed concepts and solutions will remain as strong theoretical solutions by impractical in real-life application.

References

- Agbo, A. A., & Zhang, Y. (2017). Sustainable freight transport optimisation through Synchronodal Networks. *Cogent Engineering*, 4(1), 1421005. <https://doi.org/10.1080/23311916.2017.1421005>
- Alaei, S., AMINI, S., & Mommens, K. (2025, April 25). *Trucks allocation in logistics service providers' depots within a synchronodal transport network: A Bayesian Optimization Approach*. Document Server at UHasselt. <http://hdl.handle.net/1942/45983>
- Alaei, S., Durán-Micco, J., & Macharis, C. (2024). Synchronodal transport re-planning: An agent-based simulation approach. *European Transport Research Review*, 16(1). <https://doi.org/10.1186/s12544-023-00624-y>
- Arisoy, A. A., Jeevaraj, S., Gokasar, I., Deveci, M., Kadry, S., & Liu, Z. (2025). Railway prioritized food logistics in developing countries using fuzzy decision making under interval-valued pythagorean fuzzy environment. *Applied Soft Computing*, 175, 113066. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2025.113066>
- Brochado, Â. F., Rocha, E. M., & Costa, D. (2024). A modular IOT-based architecture for Logistics Service Performance Assessment and real-time scheduling towards a synchronodal transport system. *Sustainability*, 16(2), 742. <https://doi.org/10.3390/su16020742>
- Cerabona, T., Cristaldo, L. A., Bouab, I., Petitdemange, E., Lorca, X., & Lauras, M. (2024). Simulation-based framework for assessing synchronodal transportation solutions in low-density ecosystems. *IFIP Advances in Information and Communication Technology*, 261–276. https://doi.org/10.1007/978-3-031-71743-7_17
- Ceulemans, E., Cardenas, I., van Hassel, E., & Vanelslander, T. (2024). Synchronodal transport vs. conventional hinterland transport: A stakeholder theory analysis. *Transport Reviews*, 45(1), 1–25. <https://doi.org/10.1080/01441647.2024.2403471>
- Ferjani, A., El Yaagoubi, A., Boukachour, J., & Duvallet, C. (2024). An optimization-simulation approach for Synchronodal Freight Transportation. *Multimodal Transportation*, 3(3), 100151. <https://doi.org/10.1016/j.multra.2024.100151>
- Grzelakowski, A. (2022). The covid 19 pandemic – challenges for maritime transport and Global Logistics Supply Chains. *TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, 16(1), 71–77. <https://doi.org/10.12716/1001.16.01.07>
- Inkinen, T., & Hämäläinen, E. (2020). Reviewing Truck Logistics: Solutions for achieving low emission road freight transport. *Sustainability*, 12(17), 6714. <https://doi.org/10.3390/su12176714>
- Jesus, M. C., van Hassel, E., & Vanelslander, T. (2023). Real-life synchronodality challenges: A qualitative study in Flanders. *Sustainability*, 15(24), 16836. <https://doi.org/10.3390/su152416836>
- Palander, T., & Vesa, L. (2022). Data-driven optimization of forestry and wood procurement toward carbon-neutral logistics of forest industry. *Forests*, 13(5), 759. <https://doi.org/10.3390/f13050759>

- Rentschler, J., Elbert, R., & Weber, F. (2022a). Promoting sustainability through synchromodal transportation: A systematic literature review and future fields of research. *Sustainability*, *14*(20), 13269. <https://doi.org/10.3390/su142013269>
- Rentschler, J., Elbert, R., & Weber, F. (2022b). Promoting sustainability through synchromodal transportation: A systematic literature review and future fields of research. *Sustainability*, *14*(20), 13269. <https://doi.org/10.3390/su142013269>
- Rong, C., Li, X., Zhang, G., & Wang, X. (2025). Analysis on the adjustment of transportation structure and the logistics transformation of railway freight. *Railway Sciences*, *4*(1), 82–96. <https://doi.org/10.1108/rs-09-2024-0040>
- Singh, A., Gangopadhyay, S., Nanda, P. K., Bhattacharya, S., Sharma, C., & Bhan, C. (2008). Trends of greenhouse gas emissions from the road transport sector in India. *Science of The Total Environment*, *390*(1), 124–131. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2007.09.027>
- Tavasszy, L. A., Behdani, B., & Konings, R. (2015). Intermodality and synchromodality. *SSRN Electronic Journal*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.2592888>
- van Staden, H. E., Yee, H., & Boute, R. N. (2024). Evaluating the cost-emissions trade-offs of a modal shift in intermodal and synchromodal transportation planning. *IMA Journal of Management Mathematics*. <https://doi.org/10.1093/imaman/dpae010>
- Zhao, mingli, Ni, S., Du, Z.-G., MA, xiaolong, Liu, Y., & Zhang, J. (2024). A flexible collaboration transport mode of Cross-Modal Regional Rail Transit. *SSRN Electronic Journal*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4862062>

Makale id= 55

Sözlü Sunum

ORCID ID: 0000-0001-9896-9220, 0009-0000-6709-8768

| 192

Kentsel Sokak Dönüşümünde Konsensüs Oluşturma: Yaşanabilir Şehirler İçin Katılımcı Planlama**Prof.Dr. Ilgın Gokasar¹, Rest.Asst. Volkan Yıldız¹**
¹Boğaziçi University

*Corresponding author: Ilgın Gökaşar

Özet: Şehirleri daha sağlıklı, kapsayıcı ve renkli hale getirmek, giderek daha fazla sokakların araçlardan çok insanları önceliklendiren mekânlara dönüştürülmesine bağlıdır. Farklı paydaşlar arasında geniş bir uzlaşmaya ulaşmak, başarılı ve kalıcı bir kentsel dönüşüm için hayati öneme sahiptir. Konsensüs oluşturma yalnızca güven inşa etmekle kalmaz, aynı zamanda yeniden tasarlanan sokakların toplumsal değerleri ve ihtiyaçları yansıtmasını sağlar. Daha sağlıklı sokaklar hava kalitesini iyileştirebilir, aktif hareketliliği teşvik edebilir ve genel refahı destekleyebilirken, canlı kamusal alanlar yaratıcılığı besler ve daha güçlü bir aidiyet duygusu oluşturur. Bu stratejiler, toplulukların işlevsel ve davetkar hissedilen çevreleri ortaklaşa şekillendirmelerine yardımcı olur. Katılım süreçleri şeffaflığı artırır ve karar alma süreçlerinde daha geniş bir perspektif yelpazesinin dikkate alınmasını sağlar. Küçük ölçekli müdahaleler bile kamusal alanların algılanma ve kullanılma biçiminde önemli değişiklikler tetikleyebilir. Konsensüs oluşturmaya merkeze alan planlamacılar ve karar vericiler, daha sağlıklı yaşam tarzlarını, sosyal etkileşimi ve yerel kimliği destekleyen sokak dönüşüm stratejileri geliştirebilir. Çevresel hedefler, sosyal kapsayıcılık ve kültürel mirasın korunması arasında denge kurmayı amaçlayan topluluklar, bu yaklaşımlardan fayda sağlayabilir. Bu bildiri, söz konusu ilkelerin pratikte nasıl uygulanabileceğini gösteren proje ve uygulama örneklerini sunmayı, uzun vadeli planlama çerçevelerine entegre edildiğinde daha geniş etkiler yaratma potansiyelini vurgulamayı amaçlamaktadır.

Anahtar Kelimeler: Konsensüs Oluşturma; Kentsel Sokak Dönüşümü; Katılımcı Planlama**Consensus Making in Urban Street Transformation: Participatory Planning for Livable Cities**

Abstract: Creating cities that are healthier, more inclusive, and more colorful increasingly relies on transforming streets into places that prioritize people over cars. Reaching broad consensus among diverse stakeholders is essential for successful and lasting urban transformation. Consensus making not only builds trust but also ensures that redesigned streets reflect community values needs. Healthier streets can improve air quality, promote active movement, and support well-being, while vibrant public spaces inspire creativity and a deeper sense of place. These strategies help communities shape environments that function effectively and feel inviting. Participation processes enhance transparency and capture a wider range of perspectives in decision-making. Even modest interventions can encourage significant changes in how public spaces are perceived and used. By focusing on consensus making, planners and policymakers can develop street transformation strategies that support healthier lifestyles, social connection, and local identity. Communities seeking to balance environmental goals, social inclusion, and heritage conservation can benefit from adopting such approaches. The paper aims to present examples of projects and practices demonstrating how these principles can be applied in practice, highlighting their potential for broader impact when integrated into long-term planning frameworks.

Keywords: Consensus Making; Urban Street Transformation; Participatory Planning**INTRODUCTION**

Cities around the world face challenges as they try to become healthier, more inclusive, and more vibrant places to live. In the past, traffic engineers, relying on their education and experience, have primarily been responsible for planning and designing urban streets and have often tended to prioritize motor

vehicle needs over more people-focused uses (Jones et al., 2008). Today, urban streets are now recognized as critical spaces that can either reinforce social inequalities or foster community well-being. Reimagining streets to prioritize people over cars is a vital step toward building sustainable and adaptable urban environments.

First of all, creating healthier streets delivers a wide range of benefits. Improved air quality reduces exposure to pollutants. Knowing that 4.2 million premature deaths were estimated to have occurred globally in 2019 as a result of ambient (outdoor) air pollution, it becomes clear that improving the energy efficiency of buildings and making cities greener and more compact, and thus energy efficient, must be a priority in urban planning (World Health Organization, 2024). In addition, well-designed infrastructure supports active forms of transport such as walking and cycling. Improving conditions for walking and cycling is essential for public health, as it encourages people to integrate regular physical activity into their daily routines (Pucher & Dijkstra, 2003). Such changes could enhance residents' physical and mental well-being and can stimulate local economies by attracting foot traffic and creating vibrant public spaces.

As the topic turns to vibrant public spaces, designing them is essential for encouraging creativity, cultural expression, and a sense of belonging. A street is one of the most visible areas in an urban area and can encourage community engagement (Hassen & Kaufman, 2016). Flexible design elements can accommodate events and informal gatherings. Artistic interventions such as murals and installations can enliven public areas. Murals serve as powerful storytelling tools that address themes like neighborhood history, social equity, wildlife conservation, and cultural heritage, transforming neglected spaces into open-air galleries that both beautify the city and foster a sense of pride and belonging (Jeong & Hu, 2025). Amenities such as comfortable seating, lighting, and landscaping enhance the usability and atmosphere of public spaces. Furniture, including elements like seating, streetlamps, and rubbish bins, not only supports various activities in outdoor spaces but also shapes the visual character and aesthetic appeal of the Street (Lesan & Gjerde, 2021).

Human-centered design has emerged as an effective approach to guide these transformations, helping cities respond to demographic shifts, environmental pressures, and evolving mobility needs. While traditional planning often relied on top-down decisions, there is a growing recognition that more collaborative methods are necessary to create lasting, widely supported change. This understanding has brought participatory planning and consensus making to the forefront of contemporary urban strategies.

PARTICIPATORY PLANNING AND ROLE OF CONSENSUS MAKING

Participatory planning involves engaging a wide range of stakeholders in shaping decisions about urban spaces. It seeks to balance technical expertise with local knowledge, ensuring that planning outcomes are both practical and responsive to lived experience. In order to guarantee that the results represent the needs and goals of the community, the public is actively involved in the planning process through the use of participatory planning (Smith, 1973). Rather than relying solely on top-down processes, this approach encourages collaboration among residents, businesses, civic institutions, and policymakers to develop solutions that reflect the community's needs and values. This inclusive approach helps uncover important issues and opportunities that might otherwise be missed. Calls for citizen participation at specific stages of the planning process reveal how diverse perspectives and interests come together, with motivations for involvement varying across different groups (Inch, 2014). By facilitating dialogue among these actors, participatory planning contributes to more transparent, democratic, and accountable decision-making.

Within this framework, consensus making is a key element that ensures plans are widely supported and sustainable over time. Consensus decisions can still emerge even if the knowledgeable individuals are unaware whether their views are held by the majority or minority, or how their information relates to others who may hold different perspectives (Dyer et al., 2008). Building on this dynamic, consensus based processes strengthen trust, foster a sense of shared ownership, and help align projects with local aspirations. They also create opportunities for dialogue between groups with different priorities or experiences, which can reveal hidden tensions or competing expectations that need to be addressed transparently. When participatory processes are ineffective and leave citizens feeling marginalized or excluded, these tensions can intensify, making open dialogue and careful attention even more essential

(Legacy, 2017). Additionally, participatory methods increase transparency and accountability, allowing diverse perspectives to inform the design and management of public space and encouraging more equitable outcomes. By involving stakeholders directly in planning processes, these methods not only build trust and ownership but also help overcome resistance to change and create momentum for implementation. Stakeholder engagement centers on communication, as organizations increasingly identify their stakeholders, create dialogue to uncover relevant issues, and respond accordingly, making this approach a vital aspect of sustainability (Bruce-Iri & Shelley, 2010). Taken together, these efforts illustrate how inclusive engagement can gradually transform both attitudes and practices in urban planning. At a practical level, even modest efforts can lead to meaningful changes in how urban environments are perceived and used, laying the foundation for more ambitious transformation initiatives and reinforcing a culture of collaboration in urban governance.

STREETFORUM

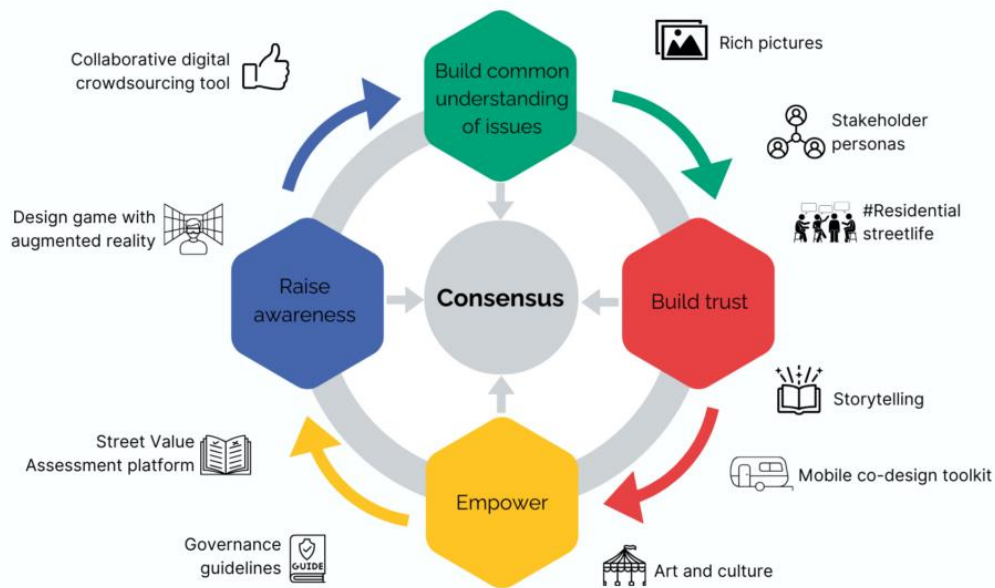
An illustrative example is the StreetForum project, a European research and innovation initiative dedicated to transforming car-dominated streets into accessible, people-centered environments. This project demonstrated how participatory tools and methods can be combined to engage diverse stakeholders in reimagining public spaces and building consensus for urban streets.

One important dimension of this approach is building a common understanding of issues. It is on the streets that we leave the familiar circles of family, neighbors, and friends to enter a broader world of strangers outside our usual experience (Rosin, 1998). By creating opportunities for different groups to share their perspectives, experiences, and priorities, the project helped participants identify shared challenges and develop a clearer picture of the factors shaping their local environment. This collective understanding laid the groundwork for more focused discussions about potential solutions and trade-offs.

Another key element was building trust among participants. Through sustained dialogue and collaborative activities, StreetForum created spaces where people felt comfortable expressing their views and listening to others. Governments, in particular, appear to view the link between public engagement and increased trust as something that can be taken for granted (Petts, 2008). This trust could play crucial role in reducing skepticism and establishing the planning process as credible and legitimate.

The project also aimed to empower communities to take an active role in shaping their streets. Empowerment typically refers to the process through which individuals achieve more autonomy and control over their decisions and living circumstances (Perkins & Zimmerman, 1995). By giving residents and local stakeholders tools and opportunities to contribute ideas and test interventions, StreetForum strengthened their capacity to influence decisions and advocate for changes that reflected their needs.

Finally, raising awareness was an essential part of the process. Investing in strategies to raise awareness of restorative aspects of the environment is valuable, as it can improve attention and well-being for most people today (Lin et al., 2014). The project highlighted the potential of streets as shared public spaces rather than purely transport corridors, helping participants and the wider community see the value of more inclusive, human-centered design approaches.

Figure 8. Four Columns of StreetForum (StreetForum, 2025)

POLICY RECOMMENDATIONS

Developing effective street transformation strategies requires policy frameworks that balance multiple objectives. Especially after the COVID-19 pandemic, the situation has become more important than ever to support the safe, healthy, and sustainable growth of cities, underscoring the need for politicians and urban planners to refocus their attention on more user-oriented planning and regeneration of urban areas (Montella et al., 2022). To achieve sustainable transformation, decision makers should integrate consensus making and participatory methods into regulatory processes to ensure that planning reflects community input and builds trust among stakeholders. Clear goals for health promotion, social inclusion, and heritage conservation need to be established to guide project priorities and resource allocation. Providing specialized funding and capacity-building programs to support community-led projects can enhance local ownership. Additionally, evaluating impact through indicators such as improved air quality, increased active mobility, and stronger community engagement can help track progress and inform future policies. By embedding these principles into long-term strategies, communities could live in a more livable environments in the future.

CONCLUSION

Consensus making is essential for shaping urban streets that promote healthier lifestyles, social connection, and a sense of place. Participatory planning empowers communities, builds trust, and improves the legitimacy and sustainability of transformation efforts. By adopting consensus based strategies and learning from real-world examples, cities can create more inclusive and vibrant urban environments for everyone. Moreover, investing in processes that actively engage diverse stakeholders not only enhances the quality of decision-making but also builds long-term commitment to shared goals. When residents feel heard and see their contributions reflected in tangible changes, they are more likely to support and sustain improvements over time. Ultimately, this work is guided by the understanding that lasting transformation is only possible when communities, institutions, and individuals come together with a shared purpose, demonstrating that humankind could achieve more collectively than any individual could alone.

Acknowledgements

This study is funded by the projects: EN-UAC, Grant Nr: 99950070, <https://www.smartmobilityhubs.eu>), StreetForum (Transforming streets into accessible urban oases through consensus building with digital and analog tools, EN-UAC Innovation Action). It is also

supported by the Scientific and Technological Research Council of Turkey (TUBİTAK) Project number 123N051.

REFERENCES

- Bruce-Iri, P., & Shelley, R. (2010). *Assessing stakeholder engagement*. https://www.researchgate.net/publication/285151789_Assessing_stakeholder_engagement
- Dyer, J. R. G., Ioannou, C. C., Morrell, L. J., Croft, D. P., Couzin, I. D., Waters, D. A., & Krause, J. (2008). Consensus decision making in human crowds. *Animal Behaviour*, *75*(2), 461–470. <https://doi.org/10.1016/J.ANBEHAV.2007.05.010>
- Hassen, N., & Kaufman, P. (2016). Examining the role of urban street design in enhancing community engagement: A literature review. *Health & Place*, *41*, 119–132. <https://doi.org/10.1016/J.HEALTHPLACE.2016.08.005>
- Inch, A. (2014). Ordinary citizens and the political cultures of planning: In search of the subject of a new democratic ethos. *Planning Theory*, *14*(4), 404–424. <https://doi.org/10.1177/1473095214536172>;WEBSITE:WEBSITE:SAGE;JOURNAL:JOURNAL:PLTA;WGROU:STRING:PUBLICATION
- Jeong, H., & Hu, Y. (2025). The role of public murals in street vitality. *Cities*, *165*, 106085. <https://doi.org/10.1016/J.CITIES.2025.106085>
- Jones, P., Marshall, S., & Boujenko, N. (2008). Creating More People-Friendly Urban Streets Through ‘Link and Place’ Street Planning and Design. *IATSS Research*, *32*(1), 14–25. [https://doi.org/10.1016/S0386-1112\(14\)60196-5](https://doi.org/10.1016/S0386-1112(14)60196-5)
- Legacy, C. (2017). Is there a crisis of participatory planning? *Planning Theory*, *16*(4), 425–442. <https://doi.org/10.1177/1473095216667433>;WEBSITE:WEBSITE:SAGE;JOURNAL:JOURNAL:PLTA;WGROU:STRING:PUBLICATION
- Lesan, M., & Gjerde, M. (2021). Sidewalk design in multi-cultural settings: a study of street furniture layout and design. *Urban Design International*, *26*(1), 21–41. <https://doi.org/10.1057/S41289-020-00121-X/FIGURES/19>
- Lin, Y. H., Tsai, C. C., Sullivan, W. C., Chang, P. J., & Chang, C. Y. (2014). Does awareness effect the restorative function and perception of street trees? *Frontiers in Psychology*, *5*(AUG), 93716. <https://doi.org/10.3389/FPSYG.2014.00906/BIBTEX>
- Montella, A., Chiaradonna, S., Mihiel, A. C. de Saint, Lovegrove, G., Nunziante, P., & Rella Riccardi, M. (2022). Sustainable Complete Streets Design Criteria and Case Study in Naples, Italy. *Sustainability 2022, Vol. 14, Page 13142*, *14*(20), 13142. <https://doi.org/10.3390/SU142013142>
- Perkins, D. D., & Zimmerman, M. A. (1995). Empowerment theory, research, and application. *American Journal of Community Psychology*, *23*(5), 569–579. <https://doi.org/10.1007/BF02506982>
- Petts, J. (2008). Public engagement to build trust: false hopes? *Journal of Risk Research*, *11*(6), 821–835. <https://doi.org/10.1080/13669870701715592>
- Pucher, J., & Dijkstra, L. (2003). Promoting Safe Walking and Cycling to Improve Public Health: Lessons from The Netherlands and Germany. *American Journal of Public Health*, *93*(9), 1509–1516. <https://doi.org/10.2105/AJPH.93.9.1509>;ISSUE:ISSUE:10.2105/AJPH.2003.93.ISSUE-9;PAGE:STRING:ARTICLE/CHAPTER
- Rosin, T. (1998, June). *The Street as Public Commons: A cross-cultural comparative framework for studying waste and traffic in India*. <https://dlc.dlib.indiana.edu/dlcrest/api/core/bitstreams/f272c38a-5630-4723-911a-49a039b2938b/content>
- Smith, R. W. (1973). A theoretical basis for participatory planning. *Policy Sciences*, *4*(3), 275–295. <https://doi.org/10.1007/BF01435125/METRICS>

World Health Organization. (2024, October 24). *Ambient (outdoor) air pollution*.
[https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health)



Makale id= 65

Sözlü Sunum

ORCID ID: 11

| 198

Konya İlinde Hane Halklarının Bal ve Diğer Arı Ürünleri Tüketimi Üzerine Bir Araştırma**Araştırmacı Lokman Kayhan¹**
¹Selçuk Üniversitesi

Özet: Bu çalışma, Konya ili merkez ilçelerinde (Karatay, Meram, Selçuklu) yaşayan hane halklarının bal ve diğer arı ürünlerine ilişkin tüketim alışkanlıklarını sosyo-demografik ve ekonomik değişkenler bağlamında incelemek amacıyla tanımlayıcı-kesitsel bir desenle yürütülmüştür. %90 güven düzeyi ve %5 örnekleme hatasıyla belirlenen 300 katılımcıya yüz yüze anket uygulanmış; veriler SPSS ortamında betimsel istatistikler, çapraz tablolar ve ki-kare testleriyle analiz edilmiştir. Bulgular, örneklemin %53,7'sinin erkek, %46,3'ünün kadın olduğunu; 36–55 yaş aralığındaki evli ve en az ortaöğretim mezunu bireylerin baskın paya sahip bulunduğunu göstermiştir. Katılımcıların %35'i balı “bazen”, %23,3'ü “sıklıkla” tüketmekte, %34,3'ü ise hiç tüketmemektedir. Yıllık tüketim miktarında 11–15 kg bandı (%21) öne çıkarken bal tüketimi gelir düzeyiyle istatistiksel olarak anlamlı ilişki sergilemiştir ($\chi^2 = 38,8$; $p < 0,001$). Örnekleme en çok tercih edilen bal türü kara kovan (%51,3), en yaygın form ise petek çiçek balı olmuştur. Satın alma kanallarında market (%24,7) ile geleneksel pazar (%24,0) neredeyse eşit paya sahiptir; doğrudan üretici alımları %16 ile üçüncü sırada yer almıştır. Bal dışındaki arı ürünlerine yönelik bilgi düzeyi düşük seyretmiş; “az biliyorum” yanıtı polen, arı sütü ve propoliste toplamın üçte birinden fazlasını oluşturmuştur. Aylık gıda harcaması arttıkça bal harcamasının da yükseldiği belirlenmiş ($\chi^2 = 61,7$; $p < 0,001$) ve balın üst gelir segmentlerinde “fonksiyonel gıda” kimliği kazandığı sonucuna varılmıştır. Sonuçlar, bal tüketiminin fiyat, güven ve köken üçgeninde şekillendiğini; bilgi eksikliğinin özellikle diğer arı ürünlerinde talebi sınırladığını ortaya koymaktadır. Bu bağlamda üretici birlikleri, yerel yönetimler ve sağlık otoritelerinin fiyat istikrarı, izlenebilirlik ve tüketici eğitimi odaklı bütünsel stratejiler geliştirmesi önerilmektedir.

Anahtar Kelimeler: Bal Tüketimi, Arı Ürünleri, Tüketici Davranışı, Sosyo Ekonomik Faktörler, Konya

A Study On the Consumption of Honey and Other Bee Products of Households in Konya Province

Abstract: This study was conducted with a descriptive-cross-sectional design in order to examine the consumption habits of households living in the central districts of Konya province (Karatay, Meram, Selçuklu) regarding honey and other bee products in the context of socio-demographic and economic variables. A face-to-face survey was applied to 300 participants determined with a 90% confidence level and 5% sampling error; the data were analyzed in SPSS environment with descriptive statistics, cross-tables and chi-square tests. The findings showed that 53.7% of the sample was male, 46.3% was female; the dominant share was made up of individuals aged between 36 and 55 who were married and had at least a secondary education degree. 35% of the participants consumed honey “sometimes”, 23.3% “often” and 34.3% never. While the 11–15 kg band (21%) stood out in the annual consumption amount, honey consumption exhibited a statistically significant relationship with income level ($\chi^2 = 38,8$; $p < 0,001$). The most preferred type of honey in the sample was black hive (51.3%), and the most common form was comb flower honey. In purchasing channels, market (24.7%) and traditional market (24.0%) had almost equal shares; direct producer purchases ranked third with 16%. The level of knowledge about bee products other than honey was low; the response of “I know little” constituted more than one third of the total for pollen, royal jelly and propolis. It was determined that honey expenditure increased as monthly food expenditure increased ($\chi^2 = 61,7$; $p < 0,001$) and it was concluded that honey gained the identity of “functional food” in upper income segments. The results show that honey consumption is shaped in the triangle of price, trust and origin; lack of knowledge limits the demand especially for other bee products. In this context, it is recommended that producer unions, local governments and health authorities develop integrated strategies focused on price stability, traceability and consumer education.

Keywords: Honey Consumption; Bee Products; Consumer Behavior; Socio-Economic Factors; Konya.

Giriş

Günümüzde bireylerin sağlıklı yaşam sürme arayışları ile birlikte doğal ve fonksiyonel gıda ürünlerine olan yönelim artmakta, bu yönelim toplumun her kesimini etkileyen bir tüketim davranışı dönüşümünü beraberinde getirmektedir. Arı ürünleri, bu dönüşümde temel rol oynayan, biyolojik değeri yüksek ve geleneksel tıpta da yeri olan doğal ürünler arasında yer almaktadır (Tolon, 1997; Silici, 2015; Karlıdağ & Keskin, 2020). Arı sütü, propolis, polen, arı ekmeği ve bal gibi ürünler, yalnızca besin olarak değil, aynı zamanda fonksiyonel bileşenleri ile de insan sağlığı üzerinde olumlu etkiler yaratmaktadır. Antibakteriyel, antioksidan, antiinflamatuvar ve bağışıklık sistemini güçlendirici etkileri yapılan birçok bilimsel araştırmada doğrulanmaktadır (Arslan vd., 2017; Altuntaş, 2023; Demirci, 2024).

Türkiye, sahip olduğu iklimsel çeşitlilik ve bitki örtüsü sayesinde arıcılık faaliyetleri açısından büyük bir potansiyele sahip olmasına rağmen özellikle bölgesel düzeyde yürütülen sınırlı sayıda çalışma, tüketici alışkanlıkları, bilgi düzeyleri ve tercihlerine ilişkin derinlemesine bilgi sunmakta yetersiz kalmaktadır (Yurt, 2022). Bu bağlamda Konya ili, hem bitkisel üretim hem de hayvancılık açısından Türkiye'nin önemli üretim merkezlerinden biri olmasına rağmen, bal ve diğer arı ürünleri tüketimi üzerine yapılmış bütüncül, veriye dayalı ve sosyo-ekonomik boyutları içeren detaylı çalışmalar sınırlı düzeydedir (Tapkı & Demirci, 2024).

Literatür çalışmalarında tüketicilerin arı ürünleri hakkında yeterli bilgiye sahip olmadığı, bu ürünleri daha çok bağışıklık sistemini güçlendirmek amacıyla tükettiği, ancak propolis, arı sütü ve arı ekmeği gibi ürünlerin yeterince tanınmadığı vurgulanmaktadır (Aktürk, 2017; Ağırsaygın, 2023; Doğruöz, 2023). Bunun yanında tüketicilerin ürünlere olan güven düzeyi, satın alma davranışları, kullanım sıklıkları ve tüketim düzeylerinin belirlenmesine yönelik çalışmalara ihtiyaç vardır (Tapkı & Demirci, 2024; İzol, 2023).

Araştırmanın Amacı

Bu araştırmanın temel amacı, Konya ilinde yaşayan hane halklarının bal ve diğer arı ürünlerini tüketim düzeylerini, tercihlerini ve bu tercihlere yön veren sosyo-ekonomik ve demografik faktörleri ortaya koymaktır. Arı ürünlerinin sağlık ve beslenme açısından artan önemine karşın, tüketici nezdindeki kullanım biçimlerinin, bilgi düzeylerinin ve satın alma davranışlarının bölgesel bağlamda yeterince analiz edilmediği gözlemlenmektedir. Bu eksiklikten hareketle araştırma, tüketicilerin bal, propolis, arı sütü, polen ve arı ekmeği gibi arı ürünlerine olan yaklaşımını anlamayı, bu ürünleri hangi sıklıkta ve hangi motivasyonlarla tükettiklerini, ürünlere ulaşım kaynaklarını ve tercih ettikleri satın alma kanallarını ortaya koymayı hedeflemektedir.

Araştırma kapsamında arı ürünleri tüketimi ile bireylerin sağlık algıları, beslenme hassasiyetleri ve ekonomik durumları arasında ilişki kurulması amaçlanmaktadır. Bu sayede, bireysel tercihlere yön veren faktörlerin yanı sıra arı ürünlerinin halk sağlığına katkısının ve toplumsal düzeydeki bilinç düzeyinin analiz edilmesi planlanmaktadır. Anket çalışmalarıyla elde edilecek nicel verilerin istatistiksel olarak analiz edilmesiyle, arı ürünlerinin tüketimini etkileyen temel değişkenler tanımlanacak ve sektörel gelişmelere katkı sunabilecek öneriler geliştirilecektir.

Bu bölümde, araştırmanın bilimsel temellere dayalı olarak planlanması ve yürütülmesine olanak sağlayan model, evren ve örneklem tanımlamaları, veri toplama sürecinde kullanılan araçlar ve verilerin analiz yöntemlerine ayrıntılı olarak yer verilmiştir. Çalışma, Konya ilinde hane halklarının bal ve diğer arı ürünlerine yönelik tüketim alışkanlıklarının belirlenmesine odaklanan tanımlayıcı-kesitsel bir araştırmadır. Gerek örneklem seçimi gerekse analiz yöntemleri, sosyo-ekonomik ve demografik değişkenler bağlamında tüketim davranışlarının anlaşılmasına hizmet edecek biçimde yapılandırılmıştır.

Materyal ve Yöntem

Bu çalışma, Konya ilinde hane halklarının bal ve diğer arı ürünlerine yönelik tüketim alışkanlıklarının belirlenmesine odaklanan tanımlayıcı-kesitsel bir araştırmadır. Gerek örneklem seçimi gerekse analiz yöntemleri, sosyo-ekonomik ve demografik değişkenler bağlamında tüketim davranışlarının anlaşılmasına hizmet edecek biçimde yapılandırılmıştır.

Araştırmanın Modeli ve Yaklaşımı

Bu araştırma, tanımlayıcı ve nedensel karşılaştırmalı desen temelinde yapılandırılmış olup, veri toplama süreci yüz yüze anket tekniği kullanılmıştır. Araştırmanın temel varsayımı, bireylerin tüketim davranışlarının belirli demografik ve ekonomik değişkenler doğrultusunda anlamlı şekilde farklılaştığı yönündedir.

Araştırmanın Evren ve Örneklemi

Araştırmanın evrenini, Konya ilinin merkez ilçeleri olan Karatay (308.983), Meram (346.366) ve Selçuklu (622.846) da ikamet eden hane halkları oluşturmaktadır. Örneklem büyüklüğü, Ana Kitle Oranlarına Dayalı Kümelenendirilmemiş Tek Aşamalı Basit Tesadüfi Olasılık Örneklem yöntemi kullanılarak hesaplanmıştır. Bu hesaplama sırasında, %90 güven düzeyi, %5 hata payı ve olayın gerçekleşme olasılığı (p) ile gerçekleşmeme olasılığı (q) %50 olarak kabul edilmiş ve ilgili formüle göre örneklem büyüklüğü 273 hane olarak belirlenmiştir. Buna göre Karatay (65), Meram (74) ve Selçuklu (134) haneden oluşmaktadır. Çalışmada ise tesadüfi örneklem yöntemi ile 250 evli 50 bekâr olmak üzere 300 kişi belirlenmiş ve veriler yapılandırılmış anketlerle yüz yüze görüşülerek uygulanmıştır. Araştırma evrenini temsil eden bireylerin yaş, cinsiyet, eğitim durumu, meslek ve gelir düzeyi gibi sosyo-demografik değişkenleri kayıt altına alınmıştır.

Elde edilen veriler, bilgisayar ortamına aktarılarak SPSS programı aracılığıyla analiz edilmiştir. Çalışmada frekans, yüzde, ortalama, standart sapmaları belirlenmiş ve ki-kare (χ^2) testi uygulanmıştır

Araştırma Bulguları

Demografik Özelliklerin Dağılımı

Cinsiyet dağılımı erkeklerin sınırlı bir çoğunlukla (%53,7) öne çıktığını, kadınların ise hatırı sayılır bir temsile sahip olduğunu göstermektedir (Tablo 1);

Tablo 11. Cinsiyet Dağılımı

Kategori	Frekans	Yüzde
erkek	161	53.7
kadın	139	46.3

Yaş dağılımına bakıldığında, 36-45 ve 46-55 yaş aralıkları kümülatif olarak örneklemin %62'sini oluşturmaktadır (Tablo 2).

Tablo 12. Yaş Dağılımı

Kategori	Frekans	Yüzde
18-25	32	10.7
26-35	58	19.3
36-45	115	38.3
46-55	71	23.7
56-65	15	5.0
65 yaş üzeri	9	3.0

Medeni hâl değişkeni, evli katılımcı oranının %84,7'ye ulaşmasıyla balın aile bağlamında değer gören bir gıda maddesi olduğunu pekiştirmektedir (Tablo 3)

Tablo 13. Medeni Hâl

Kategori	Frekans	Yüzde
Evli	254	84.7
Bekâr	46	15.3

Eğitim verisi ise örneklemin neredeyse yarısının ortaöğretim, üçte birinin üniversite mezunu olduğunu, ilköğretim ve okulsuz kesimin toplamda %21,6'da kaldığını göstermektedir (Tablo 4).

Tablo 14. Öğrenim Durumu

Kategori	Frekans	Yüzde
Ortaöğretim	139	46.3
Üniversite	96	32.0
İlköğretim	40	13.3
Okulsuz	25	8.3

Bal tüketim sıklık verileri, “bazen” yanıtının %35’le ilk sırada yer aldığını, “tüketmiyorum” cevabının neredeyse aynı payı (%34,3) elde ettiğini göstermektedir (Tablo 5).

Tablo 15. Bal Tüketim Sıklığı

Kategori	Frekans	Yüzde
Bazen	105	35.0
Tüketmiyorum	103	34.3
Sıklıkla	70	23.3
Her zaman	22	7.3

Yıllık bal miktarları değerlendirildiğinde, 11–15 kg aralığının %21, 6-10 kg aralığının %18.0 0-5 kg aralığının ise %15,3 olduğu verilmiştir (Tablo 6).

Tablo 16: Yıllık Bal Tüketim Miktarı

Kategori	Frekans	Yüzde
11–15 kg	63	21.0
6–10 kg	54	18.0
0–5 kg	46	15.3
16–20 kg	25	8.3
≥20 kg	18	6.0
Bildirilmemiş	94	31.3

Tüketici tercihlerinde ise kara kovan balının %51,3, çiçek (petek) balının %30,7 ve çam (süzme) balının %23,7’lik payı ise bölgesel ürün çeşitliliğinin Konya pazarında karşılık bulunduğunu göstermektedir (Tablo 7).

Tablo 17. Tüketici Tercihlerinin Analizi

Değişken	Kategori	Frekans	Yüzde
Bal Türü	Kara kovan	154	51.3
	Fenni kovan	52	17.3
	Belirtmedi	94	31.3
Bal Formu	Çiçek (Petek)	92	30.7
	Çam (Süzme)	71	23.7
	Çiçek (Süzme)	25	8.3
	Çam (Petek)	19	6.3
	Belirtmedi	93	31.0
	Market	74	24.7
	Pazar	72	24.0
Satın Alma Yeri	Üretici	48	16.0
	İnternet/TV	11	3.7
	Belirtmedi	95	31.7

Polen, arı sütü ve propolis için “az biliyorum” yanıtının her üç üründe de %34–39 bandında seyrettiği görülmektedir. “Hiç bilmiyorum” ve “sadece duydum” kategorilerinin polende %30’un, propoliste %40’ın üzerine çıktığı dikkate alındığında, fonksiyonel gıda segmentinin potansiyel pazar payının düşük bilinç düzeyi nedeniyle gerçekleşmediği anlaşılmaktadır. “Bilgiliyim” ve “çok iyi bilgiliyim” oranlarının toplamda %25 bandını aşamaması, bilgilendirme kampanyalarının ölçeğinin artırılması gerektiğini vurgulamaktadır (Tablo 8).

Tablo 18. Tüketicilerin Bilgi ve Bilinç Düzeyleri

Ürün	Hiç bilmiyorum %	Sadece duydum %	Az biliyorum %	Bilgiliyim %	Çok iyi bilgiliyim %
Polen	12.3	18.0	39.3	24.7	3.7
Arı Sütü	17.0	23.0	34.7	21.3	4.0
Propolis	19.7	21.0	35.0	21.0	3.3

Gelir düzeyi ile bal tüketimi arasındaki ilişki, tüketici ekonomisi teorisinin öngördüğü biçimde pozitif yönlü gerçekleşmektedir. Yapılan ki-kare testi, ≥ 35 000 TL gelir bandındaki hanelerin balı “sıklıkla” veya “her zaman” tüketme olasılığının düşük ve orta gelir gruplarına kıyasla anlamlı şekilde yüksek olduğunu ortaya koymaktadır (Tablo 9).

Tablo 19. Tüketim Davranışlarını Etkileyen Sosyo-Ekonomik Faktörler

Gelir (bin TL)	Tüketmiyor	Bazen	Sıklıkla	Her zaman
≤ 25	18	9	0	0
25 - 35	28	19	4	2
≥ 35	57	77	66	19

$$\chi^2 = 38.8, p < 0.001$$

Satın alma kanallarının dağılımının market kanalı, standart ambalajlı, marka güvenceli ürünleri raflarında bulundurması sayesinde %24,7 pay alırken, pazar kanalı %24,0 ile geleneksel yüz yüze alışveriş kültürünün hâlen güç kaybetmediğini göstermektedir (Tablo 10).

Tablo 20. Tüketicilerin Satın Alma Tercih Yerleri

Yer	Frekans	Yüzde
Market	74	24.7
Pazar	72	24.0
Üretici (doğrudan)	48	16.0
İnternet/TV	11	3.7
Belirtmedi	95	31.7

Bal harcaması ile toplam gıda harcaması arasındaki ilişki 0–200 TL bal harcaması seviyesinin 5 000 TL altı gıda bütçesinde yoğunlaşması, alt gelir kesimlerinin balı ya hiç tüketmediğini ya da sembolik düzeyde kullandığını göstermektedir (Tablo 11).

Tablo 11. Bal ve gıda harcaması arasındaki ilişki

Gıda Harcaması (TL)	0–200 Bal	201–500 Bal	501–750 Bal	≥751 Bal
≤ 5 000	10	1	0	0
5 001-10 000	27	11	2	1
10 001 -15 000	12	31	5	3
≥ 15 001	15	53	27	2

$$\chi^2 = 61.7, p < 0.001$$

Sonuçlar

Bu araştırma, Konya ili merkez ilçelerinde yaşayan hane halklarının bal ve diğer arı ürünlerine ilişkin tüketim alışkanlıklarını sosyo-demografik, ekonomik ve davranışsal açılardan ayrıntılı biçimde ortaya koymak amacıyla tanımlayıcı-kesitsel bir tasarımla yürütülmüştür. Çalışmada %90 güven düzeyi ve %5 örnekleme hatasıyla belirlenen 300 katılımcıdan yüz yüze anket tekniğiyle veri toplanmış, ham veriler SPSS ortamında frekans, yüzde, çapraz tablo ve ki-kare testleriyle analiz edilmiştir.

Elde edilen bulgular, Konya kentsel nüfusunda bal tüketim davranışının özellikle orta yaşlı, evli ve ortaöğretim-üniversite düzeyinde eğitime sahip bireylerde yoğunlaştığını göstermektedir.

Tüketim sıklığı incelendiğinde hanelerin %35'inin balı "bazen", %23,3'ünün "sıklıkla" ve %7,3'ünün "her zaman" tükettiği; buna karşın %34,3'lük geniş bir kesimin "tüketmiyorum" yanıtı verdiği görülmüştür.

Yıllık tüketim miktarları incelendiğinde 11–15 kg bandının %21 ile başat olduğu, 6–10 kg aralığının %18 ve 16 kg üzerinin ise %14,3'te kaldığı saptanmıştır. Tüketim hacminin yükselişi doğrudan gelir artışıyla paralellik göstermiş; ≥35 000 TL gelire sahip hanelerde düzenli tüketici oranı istatistiksel olarak anlamlı biçimde artmıştır

Bal türü tercihlerinde %51,3 ile kara kovan balı birincil sırada yer alırken, petek bal (%30,7) ve süzme bal ise (%23,7) olmuştur.

Satın alma yerlerine bakıldığında modern perakende (market) ile geleneksel pazarın yaklaşık eşit paylara sahip olması Konya kentinde formel ve enformel tedarik zincirlerinin dengede işlediğini, üreticiye doğrudan erişime dayalı “yerel güven” motivasyonunun varlığını koruduğunu işaret etmektedir.

Diğer arı ürünlerine ilişkin bilgi düzeyi genel olarak düşük seyretmiştir. Katılımcıların “polen”, “arı sütü” ve “propolis” için en sık verdikleri yanıt “az biliyorum” olurken “hiç bilmiyorum” ve “sadece duydum” kategorileri toplamda üçte birden fazladır.

Sağlık-ekonomi etkileşimini değerlendirmek üzere aylık gıda ve bal harcamaları arasındaki ilişki incelenmiş, harcama düzeyi yükseldikçe bal için ayrılan bütçenin anlamlı biçimde arttığı saptanmıştır.

Literatür

- Ağırsaygın, M., 2023, Arı ürünleri karışımında yüzey yanıt yöntemi ile bileşen optimizasyonu: Fonksiyonel özellikleri ve raf ömrü niteliklerinin belirlenmesi, Kastamonu Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, Kastamonu.
- Aktürk, S., 2017, Faktör analizi ile Türkiye'nin kentsel alanlarında arı ürünleri tüketim bilinci ve tüketici davranışlarını etkileyen faktörlerin belirlenmesi, Ordu Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, Ordu.
- Altuntaş, Ü., 2023, Türkiye'ye ait arı sütü, propolis ve polen gibi arı ürünlerinin biyoaktif bileşenler, sağlık etkileri ve enkapsülasyonu açısından karakterizasyonu, İstanbul Teknik Üniversitesi, Doktora Tezi, İstanbul.
- Arslan, A. S., Birben, N., Tatlı Seven, P., Seven, İ., 2017, Arı Ürünleri ve Hayvan Beslemede Kullanımı, Uludağ Arıcılık Dergisi, Cilt 17, Sayı 2, 93–104, doi:10.31467/uluaricilik.372898.
- Demirci, A., 2024, Arı Ürünlerinin Nanoteknoloji ve Nanobiyoteknoloji Alanlarında Kullanım Olanakları, Bartın Üniversitesi Uluslararası Fen Bilimleri Dergisi, Cilt 7, Sayı 2, 151–156, doi:10.55930/jonas.1607047.
- Doğruöz, M., 2023, Adana, Mersin, Osmaniye illerinde tüketicilerin arı ürünlerine karşı tutumları ve güvenlerinin incelenmesi, Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, Osmaniye.
- İzol, E., 2023, Bazı arı ürünlerinin (bal, polen, propolis, arı sütü ve arı ekmeği) LC/MS-MS ile sekonder metabolitlerinin ve biyolojik aktivitelerinin belirlenmesi, Atatürk Üniversitesi, Doktora Tezi, Erzurum.
- Karlıdağ, S. & Keskin, M., 2020, Arı Ürünlerine Genel Bir Bakış, Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, Cilt 3, Sayı 1, 58–63.
- Silici, S., 2015, Arı Poleni ve Arı Ekmeği, Uludağ Arıcılık Dergisi, Cilt 14, Sayı 2, 99–105, doi:10.31467/uluaricilik.376901.
- Tapkı, N. & Demirci, S., 2024, Ankara İlinde Memur Tüketicilerin Arı Ürünleri Tüketimi ve Tüketim Tercihleri, KSÜ Tarım ve Doğa Dergisi, Cilt 27, Sayı 6, 1484–1494, doi:10.18016/ksutarimdog. vi.1446463.
- Tolon, B., 1997, Apiterapi; Arı Ürünlerinin İnsan Sağlığındaki Önemi, Hayvansal Üretim, Cilt 37, Sayı 1, 73–83.
- Yurt, B., 2022, COVID-19 salgını döneminde sağlık çalışanlarının arı ürünleri kullanımı ve bilgi düzeyinin değerlendirilmesi: Çankırı ili örneği, Ankara Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, Ankara.

Makale id= 39

Sözlü Sunum

ORCID ID: 0000-0003-1209-8095

| 205

Atık Puzolanların Zemin Parkesinde Kullanılma Olanaklarının Araştırılması**Doç.Dr. Bayram Poyraz¹ , Araştırmacı Bilal Erkek¹**
¹Düzce Üniversitesi

*Corresponding author: Bilal Erkek

Özet: Bu çalışma kapsamında atık pomza taşının kilitli yer parke taşlarında agrega yerine kullanım olanakları araştırılmıştır. Bu amaçla bir tekstil işletmesinden tedarik edilen pomza taşları, agrega yerine, belli oranda kullanılarak betona ilave edilmiştir. İlave edilen olan pomza taşlarının oranları, 0-4 µm, 4-8 µm ve 8-16 µm aralıklarında kullanılan agregaya % 10'u oranında değiştirmek suretiyle kilitli yer parke taşlarının içine ilave edilmiştir. Bulunduğu şartlar göz önüne alınarak üretilen parke taşları, su ve tuzlu su havuzu olmak üzere iki farklı kür havuzunda bekletilerek kürlenmesi sağlanmıştır. Üretilen taşların mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla basınç dayanımı ve fiziksel özelliklerini belirlemek amacıyla su emme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan analizler için ortaya çıkan sonuçların değerlendirilmesi TS 2824 EN 1338 "Zemin döşemesi için beton kaplama blokları-Gerekli şartlar ve deney metodları" standardına göre gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonunda yer parke taşlarının mekanik özelliklerine olumlu olarak etki ettiği belirlenmiş olup, su emme oranlarına ise önemli oranda etkilemediği belirlenmiştir. Çalışmanın atık yönetimi ve çevresel sürdürülebilirliğe katkı sağlaması düşünülmektedir.

Anahtar Kelimeler: Pomza Taşı, Kilitli Parke Taşı, Mekanik Özellikler**Investigation of On Possibilities of Using Waste Pozzons in Interlocking Concrete Block**

Abstract: In this study, the possibility of using waste pumice stone instead of aggregate in interlocking paving stones was investigated. For this purpose, pumice stones supplied from a textile company were added to the concrete instead of aggregate in a certain ratio. The ratios of the added pumice stones were changed by 10% to the aggregate used in the ranges of 0-4 µm, 4-8 µm, and 8-16 µm, and added to the interlocking paving stones. Considering the conditions, the paving stones produced were kept in two different curing pools, namely water and saltwater pools, and cured. In order to determine the mechanical properties of the produced stones, water absorption tests were carried out to determine their compressive strength and physical properties. The evaluation of the results obtained for the analyses was carried out according to the TS 2824 EN 1338 "Concrete covering blocks for floor covering-Required conditions and test methods" standard. At the end of the study, it was determined that waste pumice had a positive effect on the mechanical properties of paving stones, but it did not significantly affect their water absorption rates. It is thought that the study will contribute to waste management and environmental sustainability.

Keywords: Pumice Stone, Interlocking Paving Stone, Mechanical Properties**1. GİRİŞ**

En genel tanımıyla ise sürdürülebilirlik, ürün ve hizmetlerin ekolojik dengeyi göz önüne alarak, çevresel kirliliğe neden olmayacak kaynakların kullanımıyla üretilmesi sürecidir. Sürdürülebilirlik denildiğinde akla ilk gelen malzemelerden biri yapı malzemeleridir. Yapı malzemelerinin, mekanik, fiziksel ve termal performansı yüksek; estetik ve uygun maliyetli olmasının yanında, özellikle çevre ve insan sağlığına zarar vermeyen malzemeler olması beklenmektedir [1-2].

Endüstriyel faaliyetlerin artması malzeme alanındaki gelişmeleri de olumlu etkilemiş; ve malzeme biliminin gelişmesiyle pek çok yapı malzemesi kullanıla gelmiş olmaktadır. Bu yapı malzemelerinden biri de kilitli parke taşlarıdır (KPT). KPT uygulamaları, sokaklar ve araç park alanları gibi yüzeylere döşenerek yapılan kaplama uygulamaları olup; kullanılacak alanda düz bir zemin oluşturulması açısından önem arz etmektedir. Bu kapsamda, KPT'ler üzerinde farklı yapılara sahip, atık veya geri dönüştürülebilir malzemeler ilave edilmesi üzerine araştırmalar devam etmektedir.

KPT uygulamalarında maliyeti düşürmek amacıyla pek çok atık madde kullanılmakta olup, bu malzemelerden biri de uçucu küldür. Durmuş ve Şimşek, kilitli parke taşında %10, %20, %30 ve %40 oranlarında çimento yerine uçucu kül (U.K) ikame ederek, UK'lerin KPT'lerde çimento yerine kullanılabilme potansiyelini araştırmıştır. Yapılan çalışma sonucunda, UK'nin erken yaş dayanımında, tuzlu suda bekletilen beton numunelerinde yarmada çekme dayanımının daha yüksek olduğu; ancak aşınma kaybını artırdığı ve su emme oranını azalttığı belirlenmiştir. Bir diğer çalışmada, beton kilitli parke taşında agrega yerine atık mermerler kullanılmıştır [3]. Bu çalışmada, beton kilitli parke taşlarında atık mermerler beş farklı (%20, %40, %60, %80 ve %100) karışım oranında kullanılmıştır. Çalışma sonuçları incelendiğinde; su emme oranı, basınç dayanımı ve aşınma direnci deney verilerinin standartlar içerisinde kaldığı görülmüştür. Yarmada çekme dayanımı deneyinin sonuçları incelendiğinde ise; %20, %40 ve %60 oranında mermer agregası bulunan numunelerin yeterli dayanıma sahip olduğu; ancak %80 ve %100 oranında hazırlanan numunelerin dayanımının yetersiz olduğu belirlenmiştir. Köksal ve ark., taban külünün KPT üzerinde kullanılabilirliğini araştırmak amacıyla %10, %20 ve %30 oranlarında taban külünü çimento yerine ikame ederek yarmada çekme, birim ağırlık, aşınma, donma-çözünme ve su emme özelliklerini incelemişlerdir [4]. Çalışma sonunda, %20'lik taban külü içeren KPT'lerin aşınma ve donma-çözünme davranışlarına karşı olumsuz etkilenmediğini gözlemlemişlerdir. Uygunoğlu ve ark. ise, çimento yerine UK; agrega yerine ise atık beton ve mermer kullanarak KPT üretmişlerdir [5]. Yapılan çalışma sonucunda, %10–20 oranında uçucu kül eklenen KPT'lerin mekanik olarak daha olumlu sonuçlar gösterdiği belirlenmiştir. Bir diğer çalışmada ise Cerqueira ve ark., %30 oranında işlenmiş atık cam tozu ile kum kullanarak KPT üretimi yapmışlardır [6]. Bu çalışmada olumlu mekanik değerler elde edilmiştir. Başka bir çalışmada ise, Koganti ve ark., cam tozu, seramik tozu ve kömür tozu gibi atıkların KPT'de kullanılabilirliğini araştırmışlardır [7]. Çalışma sonunda, kömür tozunun uygun olmadığı; ancak diğer tozların %10–20 oranlarında kullanılabilir olduğu ifade edilmiştir.

Daha önce de ifade edildiği gibi, endüstriyel atıkların geri kullanımıyla sürdürülebilirlik felfesi kapsamında pomza taşının, KPT üretiminde bağlayıcı kullanılarak ve bağlayıcı kullanılmadan, agrega yerine kullanım olanakları üzerinde yeterli araştırmaların mevcut olmadığı belirlenmiştir. Bu amaçla bu çalışmada literatürde oluşan bu boşluk doldurulmaya çalışılmıştır.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

2.1. Materyal

Çimento: KPT üretiminde bağlayıcı olarak CEM II/A-M (P-LL) 42,5 R tipi portland kompoze çimentosu kullanılmıştır. Çimento, TS EN 197-1 standardına uygun olup yüksek erken dayanım özelliğine sahiptir.

Agrega: Agregada olarak doğal kırmataş agrega kullanılmıştır. Agregalar üç farklı tane boyutuna ayrılmıştır: 0–4 mm (ince agrega), 4–8 mm (orta agrega) ve 8–16 mm (iri agrega).

Pomza Taşı: Kot fabrikasında taşlandırma malzemesi olarak kullanılmış ve proses sonrasında atık olarak ortaya çıkmış olan pomza taşı kullanılmıştır.

Su: Dinlendirilmiş musluk suyu kullanılmıştır.

Kimyasal katkı maddesi: Kimyasal katkı maddesi olarak karışımların modifikasyonu amacıyla bağlayıcının agrega yüzeyiyle olan etkileşimini güçlendirmek, mikroyapı homojenliğini artırmak ve nihai dayanımı iyileştirmek amacıyla belirli oranlarda karışıma dahil edilmiştir. Bu amaçla TEOS kullanılmıştır. TEOS Sigma-Aldrich (Almanya) firmasından tedarik edilmiştir.

2.2. Metod

2.2.1. KPT üretimi

Üretimde temiz ve kirli olmak üzere iki tip pomza kullanılmıştır. Temiz pomza agregaları, sulu ortamda üç aşamalı yıkama, ardından alkol bazlı yıkama ve son olarak 100 °C’de 24 saat boyunca etüvde kurutma işlemlerine tabi tutulmuştur. Kirli pomza agregaları ise yalnızca sulu yıkamadan geçirilmiş, herhangi bir kurutma veya alkol işlemi uygulanmamıştır.

Üretim sürecinin başlangıcında, iri ve orta boyutlu (0–4 mm, 4–8 mm, 8–16 mm) doğal agregalar ile aynı büyüklükte ve oranda temiz veya kirli pomza agregaları birlikte beton mikserini haznesine yerleştirilmiştir. Bu bileşenler, beton mikseri içerisinde 30 saniye süreyle karıştırılarak ön homojenizasyon sağlanmıştır. Ardından, karışım suyunun yarısı mikser içerisine ilave edilmiş ve 1 dakika süreyle karıştırmaya devam edilmiştir. Takiben çimentonun tamamı, ince agregaya ve suyun kalan yarısı mikser haznesine eklenmiş ve bu aşamada 3 dakika süreyle karıştırma işlemi uygulanmıştır. Karışımın daha homojen hale gelmesini sağlamak amacıyla, mikser durdurulmuş ve yaklaşık 30 saniye boyunca demir çubuk yardımıyla manuel karıştırma yapılmıştır. Bu işlem sonrasında mikser tekrar çalıştırılmış ve karışım 3 dakika daha karıştırılmıştır. (Şekil 2.1).

Karışımın işlenebilirliğini belirlemek amacıyla, döküm işleminden önce taze beton üzerinde slump (kıvam) deneyi gerçekleştirilmiştir. Deney, TS EN 12350-2 standardına uygun olarak yapılmış ve karışımın kıvam sınıfı belirlenmiştir. Sonrasında, döküm yapılmıştır. Döküm öncesinde kullanılan kalıpların tamamı yağlanmış, böylece karışımın kalıba düzgün yerleşmesi ve numunelerin kalıptan hasarsız çıkarılması sağlanmıştır (Şekil 2.1).



Şekil 2.1. Numune Hazırlama Süreci (a) Pomza katkılı beton karışımının mikserde hazırlanması, (b) Kıvam tayini için slump testi uygulanması, (c) Numune kalıplarının kalıp yağı ile hazırlanması.

Hazırlanan karışımlar, deney numunelerinin üretimi amacıyla kalıplara düzgün ve eşit şekilde yerleştirilmiştir. Her bir reçete için uygulanan döküm süreci belirli bir sistematik doğrultusunda gerçekleştirilmiştir. İlk olarak, kalıpların yaklaşık yarısı bir kürek yardımıyla doldurulmuş ve ardından tokmak kullanılarak 25 kez sıkıştırma işlemi uygulanmıştır. Daha sonra kalıplar tamamen doldurulmuş ve ikinci bir tokmaklama işlemi 15 kez tekrarlanmıştır. Bu aşamayı takiben, her bir kalıp titreşim masasına yerleştirilmiş ve vibrasyon işlemi gerçekleştirilmiştir. Son olarak, yüzeyde oluşan boşlukların giderilmesi amacıyla her kalıba yeniden karışım ilave edilmiş ve tokmakla 15 kez daha sıkıştırma uygulanmıştır. Bu işlemler sonucunda karışımın kalıplara yerleştirilme süreci tamamlanmıştır.



Şekil 2.2. Farklı boyutlardaki numune kalıpları: (a) 7×7×7 cm küp kalıp, (b) 20×10×8 cm dikdörtgen prizma kalıp, (c) 10×10×10 cm küp kalıp.

Kalıptan çıkarılan numuneler, Ref, CTP, ÇKP, ÇTPK ve ÇKPK olarak isimlendirilmiş ardından, yaklaşık 24 saat boyunca oda koşullarında ($\sim 23 \pm 2$ °C) ilk prizini alması amacıyla bekletilmiştir. Bu sürenin ardından numuneler kalıplarından çıkarılmış ve iki farklı ortamda su ve tuzlu-su olmak üzere iki farklı ortamda kür işlemine tabi tutulmuştur.

Standart Kürde numuneler musluk suyu içerisinde 7 gün boyunca bekletilmiş olup; tuzlu su küründe ise %3 oranında sodyum klorür (NaCl) çözeltisi su içerisinde aynı şekilde 7 gün süreyle kürlenmiştir. Bu işlemlerin ardından numuneler dış ortamdan çıkarılarak, ilgili mekanik, fiziksel ve morfolojik testlere tabi tutulmuştur.



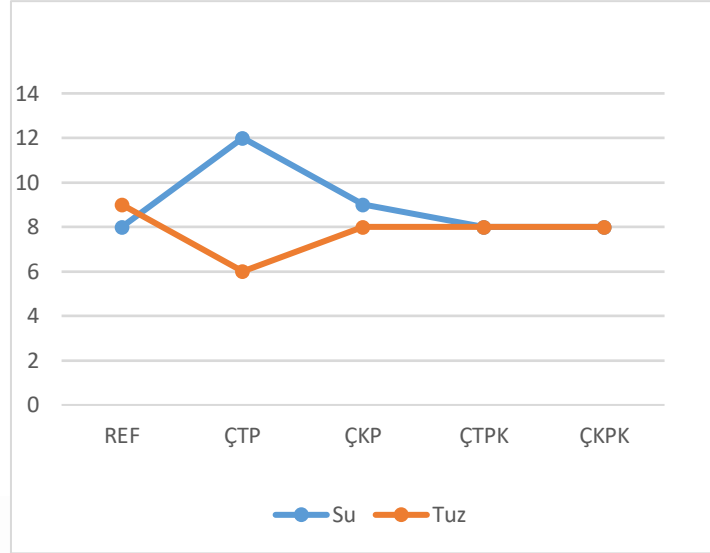
Şekil 2.3. Kür havuzu

Kürlenme prosedüründen çıkarılan numunelere mekanik ve fiziksel özelliklerini belirlemek amacıyla basınç dayanımı ve su emme analizi yapılmıştır.

3. BULGULAR

3.1. Su Absorpsiyon

KPT'lere ait su emme (absorpsiyon) testleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen değerler Şekil 3.1'de verilmiştir.

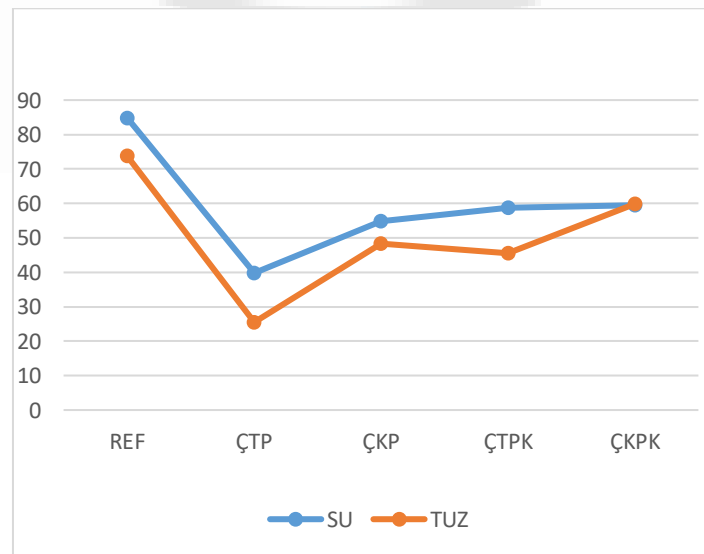


Şekil 3.1. KPT'lerin su ve tuz kürlünde belirlenen su absorpsiyon oranları

Şekil 3.1.'de görüldüğü üzere, referans numune (REF) su kürlünde %8, tuz kürlünde %9 oranında su absorpsiyonu göstermiştir. Kimyasal katkı içermeyen temiz pomza (ÇTP) içeren numunede su absorpsiyon oranı %12 ile en yüksek seviyededir. Bu durum, pomzanın yüksek gözenekliliğinden kaynaklı olarak suyu daha fazla absorbe ettiğini göstermektedir. Kimyasal katkı içermeyen kirli pomza (ÇKP) içeren numunelerde ise bu oran %9 civarına düşmektedir. Kimyasal katkı eklenen gruplarda (ÇTPK ve ÇKPK) ise hem su hem de tuz kürlünde su absorpsiyon değerleri %8 olarak ölçülmüştür. Bu durum, kimyasal katkıların betonun gözenek yapısını düzenleyerek su emme oranlarını azalttığını ve suya karşı daha dayanıklı bir yapı oluşturduğunu ortaya koymaktadır. Elde edilen bulgular, kimyasal katkıların özellikle su geçirimsizliğini azaltmada etkili olduğunu göstermektedir. Bu nedenle, kimyasal katkılı karışımların özellikle dış ortam koşullarına maruz kalacak uygulamalarda tercih edilmesi önerilmektedir.

3.2. Basınç dayanımı

KPT'lere ait basınç dayanımı testleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen değerler Şekil 3.2'de verilmiştir.



Şekil 3.2. Farklı karışımlara ait su ve tuz kürlünde ölçülen basınç dayanımı değerleri

Şekil 3.2.'te farklı karışımlara ait su ve tuz kürlerinde ölçülen basınç dayanımı değerleri sunulmuştur. Referans numune (REF) her iki kür ortamında da en yüksek basınç dayanımını göstererek (su küründe yaklaşık 85 MPa, tuz küründe 75 MPa) geleneksel karışımın üstün performansını ortaya koymuştur. Temiz pomza içeren ÇTP numunesi, düşük basınç dayanımı ile dikkat çekmiş ve bu durum pomzanın yüksek gözenekliliğine bağlı olarak karışımın kompaktlığının azaldığını düşündürmüştür. Kirli pomza (ÇKP) ve kimyasal katkı içeren karışımlar (ÇTPK ve ÇKPK), özellikle su küründe dayanımı artırmış ve gözenekli yapıyı dengeleyerek taşıma kapasitesini geliştirmiştir. En belirgin artış, kimyasal katkı ile birlikte kullanılan kirli pomzada (ÇKPK) gözlenmiş, bu da katkının bağlayıcılığı artırarak iç yapıyı iyileştirdiğini göstermektedir. Genel olarak, kimyasal katkılar pomza kaynaklı zayıflıkları telafi ederek basınç dayanımında olumlu etkiler sağlamıştır.

4. SONUÇLAR

Bu çalışma kapsamında, farklı pomza tipleri ve kimyasal katkılarla hazırlanan kilit parke taşı örnekleri üzerinde kimyasal, fiziksel, mekanik ve morfolojik analizler gerçekleştirilmiştir. Elde edilen başlıca bulgular ve çıkarımlar aşağıda sunulmuştur;

- Su Absorpsiyon Testi sonuçlarına göre, kimyasal katkılı numunelerde (ÇTPK ve ÇKPK) su emme oranlarının düşürülerek daha stabil değerlere ulaştığı görülmüştür. Bu durum, kimyasal katkının gözenekleri doldurarak su geçirimini azalttığını göstermektedir.
- Basınç Dayanımı testlerinde elde edilen veriler incelendiğinde, özellikle kimyasal katkılı temiz pomza (ÇTPK) örneklerinde daha yüksek dayanım değerlerinin elde edildiğini göstermiştir. Bu durumda kimyasal katkının bağ yapısını güçlendirdiğini desteklemektedir.
- Sonuç olarak KPT'de kullanılan pomzanın agrega yerine kullanıldığında, gözenekli yapısının yarattığı mekanik dayanımdaki yetersizliği, ilave edilen kimyasal katkının kullanımıyla tolere edildiği görülmüştür.

KAYNAKLAR

- [1] M. Duran and M. Sağlam, "Sürdürülebilirlik ve sürdürülebilir kalkınma kavramlarının değerlendirilmesi," *Süleyman Demirel Üniversitesi Vizyoner Dergisi*, 6(13), 52–66, 2015.
- [2] M. Güler, "Sürdürülebilir kalkınma ve çevre," *Ankara Üniversitesi SBF Dergisi*, 65(2), 101–118, 2010.
- [3] G. Durmuş and M. Şimşek, "Farklı kür koşullarının uçucu kül katkılı beton kilitli parke taşlarının özelliklerine etkisi," *İnönü Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 9(1), 45–52, 2008.
- [4] H. Köksal, S. Koyuncu, and A. Kaplan, "Taban külünün kilitli beton parke taşı üretiminde kullanımı," *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 23(3), 407–415, 2010.
- [5] H. Uygunoğlu, E. Topçu, and T. Demirci, "Atık mermer ve betonun kilitli parke taşı üretiminde değerlendirilmesi," *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 18(5), 225–232, 2012.
- [6] A. B. Cerqueira, J. A. Labrincha, and V. M. Ferreira, "Utilization of recycled glass in paving blocks," *Construction and Building Materials*, 22(4), 562–568, 2008.
- [7] S. B. Koganti, S. Maheswaran, and K. Ganesan, "Utilization of industrial wastes in concrete paving blocks," *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, 6(6), 268–273, 2017.

Makale id= 9

Sözlü Sunum

ORCID ID: 0009-0007-8564-9229

| 211

Pom Malzemenin Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynağı

**Dr. Öğretim Üyesi Şenol Mert¹ , Araştırmacı Muhammet Numan Oynak¹ ,
Araştırmacı Mehmet Emir Budak¹ , Araştırmacı Murat Ayaz¹ ,
Öğr. Gör. Dr Sevda Mert¹**
¹Düzce üniversitesi

*Corresponding author: Muhammet Numan Oynak

Özet: Polioksümetilen (POM) önemli bir mühendislik plastiğidir. POM, mekanik, elektrik, otomotiv, inşaat ve biyomedikal alanlar gibi çeşitli endüstriyel sektörlerde geniş uygulama alanı bulmuştur. Polioksümetilen, sertliği, boyutsal kararlılığı ve korozyon direnci nedeniyle genellikle metallerin doğrudan yerine kullanılır. POM, rulmanlar, dişliler, konveyör bant bağlantıları, aşınma yüzeyleri, sürünmeye dayanıklı muhafazalar ve emniyet kemerleri, güvenlik sistemleri gibi mühendislik bileşenlerinin üretiminde yaygın olarak kullanılır. Ayrıca aerosol kapları, benzin kapakları, kimyasal püskürtücüler, sabun dağıtıcılar ve boya karıştırma küreklerinin üretiminde de kullanılır. Sürtünme Karıştırma Kaynağı (SKK) ve Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynağı (SKNK), günümüzde, herhangi bir yapıştırıcı veya harici ısıtıcıya ihtiyaç duyulmaması ve tüketilemeyen aletlerin kullanılması nedeniyle diğer birleştirme tekniklerine göre önemli bir avantaj elde etmiştir. Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynağı yöntemi, Sürtünme Karıştırma Kaynağı yönteminden türetilmiş ve son zamanlarda sadece otomobil sektöründe değil aynı zamanda diğer endüstri kollarında da oldukça dikkat çeken yeni bir kaynak yöntemidir. Geleneksel kaynak işlemiyle kaynaklanması zor olan polimer malzemelerin kaynaklanmasında SKNK yöntemi kullanılır. Farklı araştırmacıların çalışmaları, bu yöntem için takım geometrisinin, takım devir sayısının, takım dalma derinliği ve karıştırma süresinin bağlantının çekme kuvveti üzerine büyük etkisi olduğunu göstermiştir. Bu deneysel çalışmada, 4 mm kalınlığındaki POM levhaların SKNK ile bindirme bağlantıları yapılmıştır. Farklı karıştırma sürelerinde yapılan bu çalışmada, çekme kuvvetini maksimum yapan optimum karıştırma süresi belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynağı (Sknk), Takım, Polioksümetilen (Pom), Çekme Testi, Parametre.

Friction Stir Spot Welding of Pom Material

Abstract: Abstract: Polyoxymethylene (POM) is an important engineering plastic. POM is widely used in mechanical, automotive, electrical and electronic industries as well as in the biomedical field. Polyoxymethylene is commonly used as a direct replacement for metals due to its stiffness, dimensional stability and corrosion resistance. POM is widely used for the manufacture of engineering components such as bearings, gears, conveyer belt links, wear surfaces, creep resistant housings, and safety systems like seat belts. It is also used for the production of aerosol containers, gas caps, chemical sprayers, soap dispersers and paint mixing paddles. Friction Stir Welding (FSW) and Friction Stir Spot Welding (FSSW), nowadays, have gained a significant advantage over other joining techniques due to the ease of operation, with no need for any adhesives or external heaters and the use of non-consumable tools. The Friction Stir Spot Welding method is a derivative of the Friction Stir Welding process, which is a new process that recently has received considerable attention from the automotive and other industries. FSSW method is used to weld polymer materials that are difficult to weld with conventional welding

processes. The studies of different researchers have shown that tool geometry, tool rotation speed, tool penetration depth and stirring time have a great impact on the tensile force. In this experimental study, 4 mm thick POM sheets were done lap joints with FSSW. In the study conducted at different stirring times, the optimum stirring time that maximizes the tensile strength was determined.

Keywords: Friction Stir Spot Welding (Fssw), Tool, Polyoxymethylene (Pom), Tensile Test, Parameter.

1. GİRİŞ

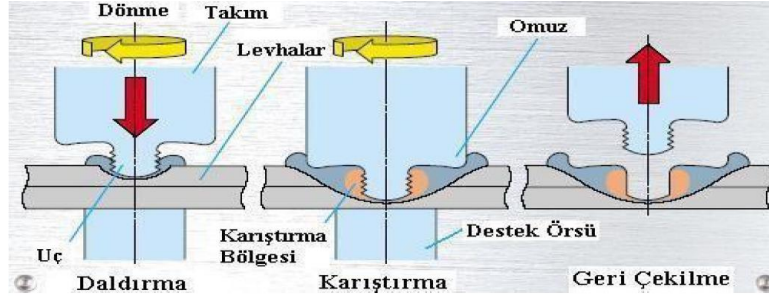
Polioksümetilen (POM), daha yaygın olarak asetal veya markalı adı Delrin olarak bilinir. Düşük sürtünme, yüksek sertlik ve mükemmel boyutsal kararlılık sunan bir mühendislik plastiğidir. Delrin, son derece hassas parçalar oluşturmak için yaygın olarak kullanılan yarı kristal mühendislik sınıfı bir termoplastiktir. Genel olarak, Delrin etkileyici boyutsal kararlılık özelliği sağlar. Yüksek mukavemetli, geniş çalışma sıcaklığı aralığı (-40°C ila 120°C) ve mükemmel mekanik özellikleriyle bilinir. Delrin, ayrıca yataklar, dişliler, pompalar ve sayaçlar gibi çok amaçlı endüstriyel ekipmanlarda da kullanılabilir. Asetal'in mükemmel mekanik özellikleri onu son derece önemli ve çok yönlü hale getirir. Çoğu metalde veya diğer plastiklerde olmayan benzersiz bir özellik dağılımı sunar. Delrin plastik, mukavemet değerleri yüksek ve serttir, darbeye, sürünmeye, aşınmaya, sürtünmeye ve yorulmaya dayanıklıdır. Ayrıca yüksek hassasiyetli işleme sırasında, mükemmel boyutsal kararlılığıyla da bilinir. Asetal ayrıca oda sıcaklığında neme, benzene, çözücülere ve çok çeşitli diğer nötr kimyasallara dayanabilir. Tasarım açısından, ekstrüde POM ile yapılan parçalar doğal olarak parlak bir yüzey kaplamasına sahiptir. Diğer malzemeler yerine asetal seçmek için birçok neden vardır. Diğer plastiklerle karşılaştırıldığında, asetal daha iyi darbe ve kimyasal direnç, daha yüksek mukavemet sunar. Ayrıca daha düşük bir sürtünme katsayısına sahiptir. Asetal bazı metalleri de geride bırakır. Bu malzemeyle üretilen parçalar daha yüksek bir mukavemet-ağırlık oranına, daha iyi bir korozyon direncine sahiptir ve parça birleştirme için daha fazla fırsat sunar. Asetal ile karşılaştırılabilir bir metale göre daha ince ve hafif parçaları daha hızlı ve daha düşük bir fiyat ile üretebilirsiniz. Delrin plastik, hemen hemen her büyük üretim sektöründe bulunabilir. Otomotiv endüstrisinde, yaygın uygulamalar arasında ağır yük taşıyan dişliler, yakıt sistemi bileşenleri, hoparlör ızgaraları ve emniyet kemeri donanımı gibi güvenlik sistemi bileşenlerinde kullanılır. Delrin ayrıca yataklar, dişliler, pompalar ve sayaçlar gibi çok amaçlı endüstriyel ekipmanlarda da kullanılabilir. Güçlü, kararlı, çok yönlüdür ve mükemmel mekanik özellikleri onu birçok endüstride çok çeşitli uygulamalar için iyi bir seçim haline getirir [1].

Asetal, poliasetal ve poliformaldehid olarak da bilinen POM (Polioksümetilen), yüksek sertlik, düşük sürtünme ve mükemmel boyut kararlılığı gerektiren hassas parçalarda kullanılan bir mühendislik termoplastiğidir. Sağlam ve alevlere dayanıklı bir plastik olması sebebiyle dişli, yuva, pencere kılavuzu, hoparlör ızgarası, fermuar, çakmak, aerosol vanası, emniyet kemeri ve mobilya bileşenlerinde kullanılır. Polioksümetilen 1920 yılında, Hermann Staudinger tarafından keşfedilmiştir. 1952 yılında, MacDonald'ın (DuPont) yakaladığı başarıyı takiben ticarileştirilmiştir. 1959 yılında, Dal Magore tarafından icat edilen, sıcak ortamda kararlı olan bir POM homopolimerinin üretimi gerçekleştirilmiştir. 1962 yılında ise, Celanese tarafından icat edilen bir POM kopolimerinin üretimi gerçekleştirilmiştir [2]. Polioksümetilen (POM) ve Polipropilen (PP) malzemeleri otomotiv sektöründe oldukça sık kullanılan seri imalat termoplastiklerindedir [3]. Polioksümetilen önemli bir mühendislik plastiğidir. Polioksümetilen, rulmanlar, dişliler, konveyör bant bağlantıları, aşınma yüzeyleri, sürünmeye dayanıklı muhafazalar ve emniyet kemeri, güvenlik sistemleri gibi mühendislik bileşenlerinin üretiminde yaygın olarak kullanılır. Ayrıca aerosol kapları, benzin kapakları, kimyasal püskürtücüler, sabun dağıtıcılar ve boya karıştırma küreklerinin üretiminde de kullanılır. POM, mükemmel mekanik mukavemet, aşınma, yorulma direnci ve kalıplanabilirliğe sahip en önemli mühendislik termoplastikleri grubuna girer. POM, mekanik, elektrik, elektronik, otomotiv, inşaat ve biyomedikal alanlar gibi çeşitli endüstriyel sektörlerde geniş uygulama alanı bulmuştur. Ancak, düşük darbe tokluğu, çentiğe karşı hassasiyeti, düşük UV direnci, düşük ısı iletkenliği ve düşük ısı direnci uygulama aralığını sınırlar. Polioksümetilen (POM), sertliği, boyutsal kararlılığı ve korozyon direnci nedeniyle genellikle metallerin doğrudan yerine kullanılır. Erime sıcaklığı T_m 183 °C'dir. Mühendislik polimeri olarak polioksümetilen POM, bir dizi mükemmel özellik ile karakterize edilen başlıca mühendislik termoplastiklerinden biridir. POM, mükemmel sürtünme, aşınma özelliği, boyutsal kararlılık ve kimyasal kararlılığa sahip, son

derece kristalli, yüksek performanslı bir polimerdir ve bunların hepsi onu otomotiv, elektronik ve hassas makine endüstrilerinde kendi kendini yağlayan mekanik parçalar üretmek için yaygın olarak kullanılmasını beraberinde getirmiştir [4].

Sürtünme karıştırma nokta kaynağı (SKNK), sürtünme karıştırma kaynağından (SKK) türetilmiştir ve otomotiv sektöründe oldukça dikkat çekmektedir [5-7]. SKNK yöntemi 1993 yılında Mazda tarafından icat edilmiş, tamamen yeni ve ergime olmaksızın bindirme bağlantısı gerçekleştirilen bir katı faz kaynak yöntemidir [8-17]. Sürtünme karıştırma nokta kaynağı (SKNK), perçinli montajların ve direnç nokta kaynağının yerini alabilecek, geleneksel sürtünme karıştırma kaynağının (SKK) çok önemli bir türevidir. Bu teknik, geleneksel kaynak işlemlerine kıyasla, yüksek kaliteli bağlantılar sağlar. SKNK, titanyum, alüminyum, magnezyum gibi çeşitli metal türlerini birleştirmek için kullanılan yeni bir teknolojidir. Ayrıca, geleneksel kaynak işlemiyle kaynaklanması zor olan polimer malzemelerin kaynaklanmasında da kullanılır [18]. Plastik malzemelerin birleştirme ve kaynak tekniklerindeki, gelişme ve modernizasyon, bilimsel araştırma ve endüstri alanında büyük bir ilgi görmüştür. Sürtünme karıştırma kaynağı ve sürtünme karıştırma nokta kaynağı, günümüzde, herhangi bir yapıştırıcı veya harici ısıtıcıya ihtiyaç duyulmaması ve tüketilemeyen aletlerin kullanılması nedeniyle diğer birleştirme tekniklerine göre önemli bir avantaj elde etmiştir [19]. Otomotiv endüstrisinde alüminyum sacların birleştirilmesinde direnç nokta kaynağı ile yapılan bağlantı sonucunda oluşan hataların giderilmesi için geliştirilen SKNK, başarılı bir şekilde, alüminyum [20], magnezyum [21], çelik levhalara [22] uygulanmaktadır. Ayrıca, yapılan araştırmalar, SKNK'nın yüksek mukavemetli, ileri yüksek mukavemetli ve ultra yüksek mukavemetli çelikler gibi çeşitli çelikler için de kullanıldığını belirtmektedir [23]. Otomotiv endüstrisinde alüminyum sacların birleştirilmesinde direnç nokta kaynağı sonucunda oluşan hataların giderilmesi için geliştirilen SKNK, başarılı bir şekilde, alüminyum, magnezyum, çelik levhalara uygulanmaktadır. SKNK ile plastikler üzerine yapılan ilk çalışmalar yakın geçmişte gerçekleştirilmiş, bu yöntemin polimer esaslı malzemelere de uygulanabilirliği kanıtlanmıştır ve konu ile ilgili ilk yayınlar bilim dünyası ile paylaşılmıştır. SKNK yönteminin metal malzemelere ilaveten plastik malzemelere de uygulanabilmesi, yöntem önemli bir avantaj kazandırmıştır [8, 12, 15, 24]. Sonrasında ise çeşitli polimer malzemelerin SKNK yöntemi ile birleştirilerek optimum parametrelerin saptanabilmesi için yurt dışında ve yurt içinde çeşitli çalışmalar yapılmıştır. SKNK yönteminin hem metal malzemelere hem de plastik malzemelere uygulanabilmesi, yöntemi akademik dünyada ve de sektörde ilgi konusu haline getirmiştir [5, 8, 10-12, 15, 24-38]. SKNK, bindirme tipi bağlantılarda sağlam birleştirmeler elde etmek için büyük bir potansiyel sergilemiştir [39]. Sürtünme karıştırma nokta kaynağı (SKNK), sürtünme karıştırma kaynağı (SKK) tekniğine dayanan yeni bir kaynak yöntemidir [40] ve SKNK ilk olarak Mazda firması tarafından, önce Mazda RX-7 model spor arabaların, sonrasında ise RX-8 model spor arabaların üretiminde kullanılmıştır [8].

Yeni bir kaynak yöntemi olan SKNK'nın, otomotiv, havacılık ve diğer sektörlerdeki uygulamaları için üzerinde yoğun çalışmalar yapılmaktadır [41-43]. Sürtünme karıştırma nokta kaynağı, çevre dostu, yüksek verimli bir katı hal kaynak tekniğidir [44]. Son yıllarda geliştirilen kaynak yöntemleri, direnç nokta kaynağı gibi özellikle otomotiv sanayisinde halen kullanılmakta olan kaynak yöntemlerinin yerini almaya adaydır. Bu anlamda, direnç nokta kaynağının alternatif kaynak yöntemi SKNK olarak ifade edilmektedir [5]. SKNK yöntemi, SKK yönteminin nokta halinde dikiş üreten bir versiyonudur. SKNK tekniği, geleneksel ergitmeli kaynak teknikleri ile karşılaştırıldığında en önemli avantajlarından biri, ana metalin ergimeden kaynak işleminin gerçekleşmesidir [45]. SKNK yönteminin, SKK yönteminde kullanılan kaynak takımına benzer bir takımla, daldırma, karıştırma ve geri çekilme olarak belirtilen üç kademede gerçekleştirilen bir uygulaması vardır [9, 10, 28, 30, 46-50]. Bu üç aşama adım adım sırasıyla aşağıdaki gibidir Şekil 1 [8].

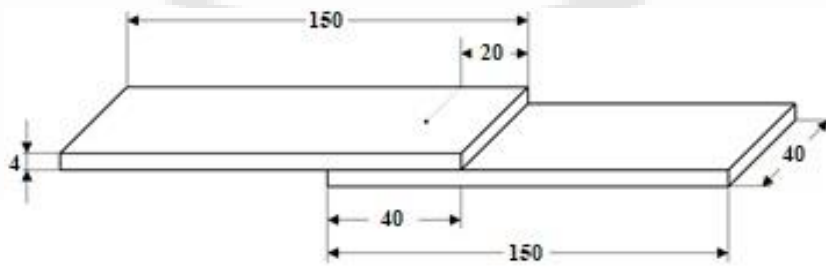


Şekil 1. Sürtünme karıştırma nokta kaynağı yönteminin üç adımı [8]

Yapılan bu deneysel çalışmada, sürtünme karıştırma nokta kaynağı (SKNK) yöntemi, Polioksümetilen (POM) numunelerin kaynaklı bağlantılarını elde etmek için kullanılmıştır. Kaynak noktalarının oluşturulması için bu deneysel çalışmaya özel uygun kaynak takımı ve numunelerin tezgah tablasına bağlanması için ise bu çalışmaya özel uygun bağlama aparatı önce tasarlanmış sonrasında da imal edilmiştir. Sürtünme karıştırma nokta kaynağı ile birleştirilen numunelere, çekme testleri uygulanarak, kaynaklı bağlantıların çekme kuvveti değerleri belirlenmiştir. Farklı karıştırma süresi değerlerinde yani farklı birleştirme süresi değerlerinde deneysel çalışmalar yapılmıştır. Bu deneysel çalışmalar sırasında dalma derinliği, dalma hızı ve devir sayısı parametreleri ise sabit tutulmuştur. Bağlantının dayanımını maksimum seviyeye çıkararak, maksimum çekme kuvveti ve optimum karıştırma süresi belirlenmiştir.

2. DENEYSEL ÇALIŞMA

Yapılan bu deneysel çalışmada, kaynaklı bağlantıların oluşturulması için numuneler ekstrüzyon ürünü olarak üretilmiş Polioksümetilen (POM) levhadan, şerit testere tezgahında uygun geometride kesilerek çıkarılmıştır. Sonrasında, kaynaklı bağlantıların oluşturulması için kullanılacak numuneler, freze tezgahında 150x40x4 mm boyutlarında ve standartlara uygun şekilde ölçülerine getirilerek hazırlanmıştır. Üretilecek kaynaklı bağlantılara, bindirme pozisyonunda, sürtünme karıştırma nokta kaynağı yöntemi gerçekleştirilmiştir. SKNK yöntemini numunelere uygulamak ve kaynaklı bağlantılarını oluşturmak için POM kaynak numunelerinin bindirme pozisyonu Şekil 2’de verilmiştir.



Şekil 2. Kaynaklı bağlantıların oluşturulması için POM numunelerinin bindirme pozisyonu

Yapılan bu deneysel çalışmada, tezgah tablasına POM kaynak numunelerini bağlayıp kaynak noktalarını oluşturmak için bağlama aparatı da tasarlanmıştır. Bu bağlama aparatı, kaynaklı bağlantıları oluştururken gözlemlemeye imkan verecek bir şekilde, bu çalışma için özel olarak tasarlanıp, imal edilmiştir. 4140 çelik malzeme kullanılarak torna tezgahında imal edilen, sürtünme karıştırma nokta kaynak takımı, kaynaklı parçaların üretilmesinde kullanılmıştır. Kullanılacak takımın ölçüleri belirlenirken, yapılan literatür araştırmasında, kullanılan takımlar incelenmiştir ve bu takımlara ait ölçüler arasındaki oranlar dikkate alınmıştır. Numunelerin bindirme mesafesi 40 mm olacak şekilde ayarlanmış ve tezgah tablasına, tasarlanıp imal edilen bağlama aparatı ile bağlanmıştır. Bindirme bağlantısı konumundaki parçaların, 40x40 bindirme bölgesinin merkezine, tasarlanıp imal edilmiş kaynak takımı ile daldırma, karıştırma ve geri çekilme aşamaları sırasıyla uygulanmıştır. Üretilen

numunelere mekanik testlerden çekme testleri uygulanmıştır ve elde edilen tüm veriler yorumlanmıştır. Çekme kuvvetini maksimum yapan optimum karıştırma süresi parametresi, diğer bir deyişle optimum birleştirme süresi parametresi tespit edilmiştir. Deneysel çalışmalarda kaynak noktalarının oluşturulmasında kullanılan konik kaynak takımı ve bağlama aparatının fotoğrafları Şekil 3'te görülmektedir.



Şekil 3. Bu deneysel çalışma için tasarlanıp üretilen konik kaynak takımı ve bağlama aparatı

POM kaynak numunelerinin, tezgah tablasına bağlama aparatı ile sabitlenmiş şeklinin fotoğrafı Şekil 4'te görülmektedir. Kaynaklı noktaları oluşturulurken, yapılan işlemleri görsel olarak takip edebilmek için, yapılan tasarıma özen gösterilmiştir. Yapılan ön çalışmalar neticesinde, belirlenen parametreler kullanılarak, SKNK işlemleri freze tezgahında gerçekleştirilmiştir. Parçaların bindirme mesafesi 40 mm'dir. Bindirme bağlantısı konumundaki parçaların, 40x40 bindirme bölgesinin merkezine, tasarlanıp üretilen konik kaynak takımı ile, sürtünme karıştırma nokta kaynak yönteminin daldırma, karıştırma ve geri çekilme aşamaları sırasıyla uygulanmıştır. Kaynak takımı, numunelere belirlenen dalma hızında, dalma derinliğinde, devir sayısında ve karıştırma süresinde, daldırılmıştır. İstenilen dalma derinliğine ulaşıncaya belirlenen karıştırma süresinden sonra geri çekilmesi yine aynı hız ile gerçekleştirilmiş ve parçalardan uzaklaştırılmıştır. Kaynak bağlantıları, yani kaynak noktaları oluşturulan parçalar, hemen sökülmemiş, soğuması için beklenmiştir.



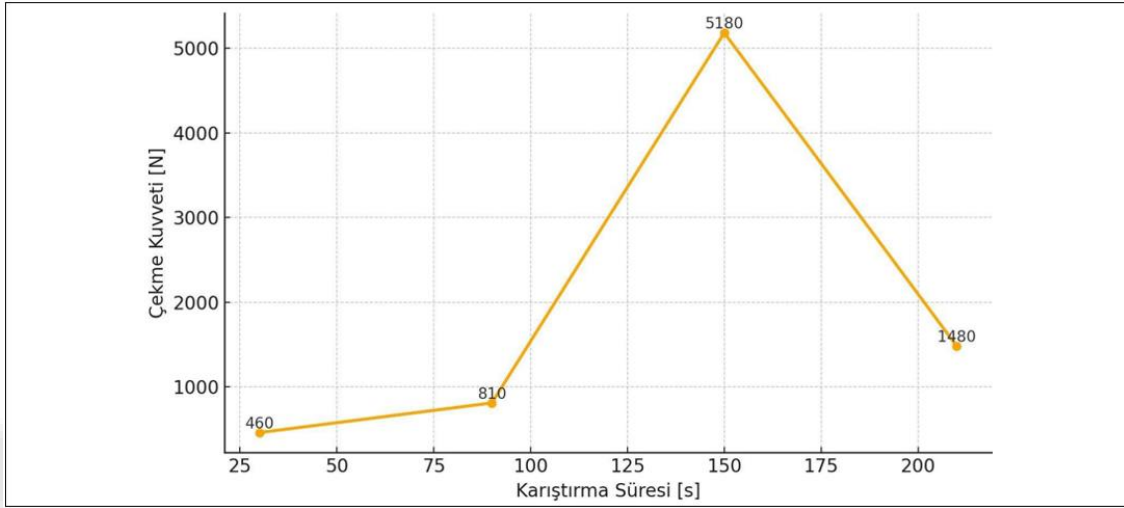
Şekil 4. POM kaynak numunelerinin, tezgah tablasına bağlama aparatı ile sabitlenmesi

Yapılan ön çalışmalar neticesinde, belirlenen dalma derinliği, dalma hızı, devir sayısı için, farklı karıştırma yani birleştirme sürelerinin, kaynak bağlantısının dayanımına etkileri belirlenmiştir. Yapılan ön çalışmalar dikkate alınarak, seçilen 7 mm dalma derinliği, 100 mm/dak dalma hızı ve 1500 d/d devir sayısı sabit tutularak, 30, 90, 150 ve 210 sn farklı karıştırma yani birleştirme sürelerinde yapılan deneysel çalışmada, kaynaklı bağlantılar oluşturulmuştur. Bağlantının yeterli dayanıma sahip olup olmadığı, mekanik testlerden çekme testleri ile tespit edilmiştir. Elektromekanik ve bilgisayar kontrollü bir çekme test cihazı kullanılarak, kaynaklı bağlantılara standartlara uygun olarak çekme testleri

uygulanmıştır. Elde edilen çekme kuvveti değerleri karşılaştırılarak, hangi karıştırma yani birleştirme süresinde maksimum çekme kuvveti değerine ulaşıldığı belirlenmiştir.

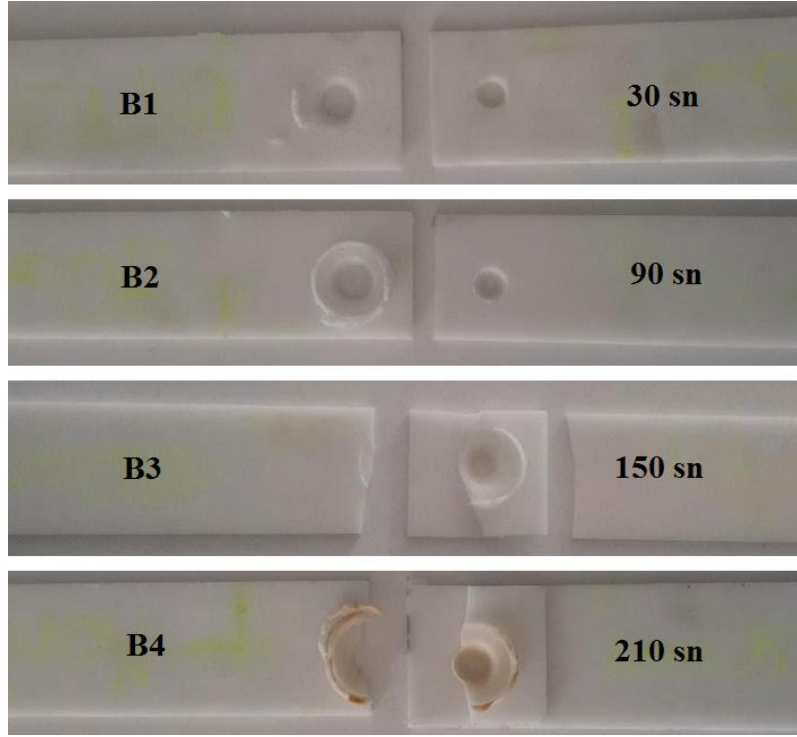
3. DENEYSEL SONUÇLAR

Bu deneysel çalışmada, yapılan ön çalışmalardan yola çıkılarak, 7 mm dalma derinliği, 100 mm/dak dalma hızı ve 1500 d/d devir sayısı sabit tutularak, karıştırma süresinin diğer bir deyişle birleştirme süresinin değişiminin, çekme kuvvetine olan etkisi araştırılmıştır. Yapılan deneysel çalışma için farklı karıştırma süreleri belirlenmiştir. 30, 90, 150 ve 210 sn'lik değişen karıştırma sürelerinde yapılan deneylerde, elde edilen çekme kuvveti değerleri Şekil 5'te verilmiştir. Karıştırma süresi parametresi arttıkça, çekme kuvvetinin belirli bir değere kadar düzenli olarak arttığı ve maksimum bir çekme kuvveti değeri yakalandıktan sonra ise düşüş gösterdiği tespit edilmiştir. Karıştırma süresi yani birleştirme süresi parametresini, belirli bir değerden sonra daha fazla artırmanın, çekme kuvveti değerini daha fazla artırmadığı, hatta tam aksine çekme kuvvetinin düşmesine neden olduğu belirlenmiştir. Böylece bu deneysel çalışma için, çekme kuvvetini maksimum yapan, optimum karıştırma süresi diğer bir deyişle optimum birleştirme süresi belirlenmiştir.



Şekil 5. 100 mm/dak kaynak takımı dalma hızı, 1500 d/d takım devir sayısı ve 7 mm takım dalma derinliği için, çekme kuvveti üzerine karıştırma süresinin etkisi

POM malzeme kullanılarak oluşturulan sürtünme karıştırma nokta kaynağı numunelerinin, çekme deneyi sonrası fotoğrafları Şekil 6'da verilmiştir. Farklı karıştırma diğer bir deyişle birleştirme süreleri için, sürtünme karıştırma nokta kaynağı uygulanmış parçaların kaynak bölgelerinin gözle yapılan incelemelerinde, tüm numunelerde, kaynak noktasına ait karakteristik görünümün meydana geldiği belirlenmiştir. Kaynak işlemi sırasında yumuşayan plastik malzemenin, farklı karıştırma yani birleştirme sürelerine bağlı olarak farklı oranlarda, kaynak takımı etrafına sıvandığı gözlemlenmiştir. Numunelerin çekme deneyi sonrasında ait fotoğrafları incelendiğinde, numunelerin kopma bölgelerinin görünümü, elde edilen çekme kuvveti değerlerini birebir desteklemektedir.



Şekil 6. Çekme deneyi sonrası POM sürtünme karıştırma nokta kaynağı numuneleri

Bu deneysel çalışmada, 7 mm dalma derinliği, 100 mm/dak dalma hızı, 1500 d/d devir sayısı ve 30 sn karıştırma yani birleştirme süresinde oluşturulan kaynaklı numunede, malzemenin yumuşamasını sağlayacak, istenen optimum sıcaklık değerlerine ulaşamadığı anlaşılmıştır. Bu sürenin yetersiz bir birleştirme süresi olduğu, B1 nolu numuneden çok net bir şekilde görülmektedir, elde edilen 460 N çok düşük çekme kuvveti değeri, bu durumu açıkça desteklemektedir. 7 mm dalma derinliği, 100 mm/dak dalma hızı, 1500 d/d devir sayısı ve 90 sn karıştırma yani birleştirme süresinde oluşturulan kaynaklı numunede de malzemenin yumuşamasını sağlayacak, istenen optimum sıcaklık değerlerine yine ulaşamadığı B2 nolu numuneden yine çok net bir şekilde görülmektedir, elde edilen 810 N düşük çekme kuvveti değeri, bu durumu açıkça desteklemektedir. Kaynak bölgesinde yumuşayan plastik malzeme, B1 ve B2 nolu numunelerin kaynağı sırasında, omuz altından dışa doğru oldukça fazla kaçış yaparak, kaynak bölgesinin etrafında bir miktar yükseldiği görülmektedir. Yapılan kaynaklar sırasında da, kaynak bölgesinden oldukça fazla malzemenin uzaklaştığı gözlemlenmiştir. Kaynak havuzu içinde kalması gereken ve dayanım değerlerine katkı yapması gereken malzemenin dışa oldukça fazla çıkış yapmasının, dayanım değerini olumsuz yönde etkilediği anlaşılmıştır.

Yapılan bu deneysel çalışmada, 7 mm dalma derinliği, 100 mm/dak dalma hızı, 1500 d/d devir sayısı ve 150 sn karıştırma yani birleştirme süresinde oluşturulan kaynaklı numunede çekme kuvvetini 5180 N değerle maksimum yapan optimum karıştırma yani birleştirme süresinin 150 sn olduğu belirlenmiştir. En yüksek çekme kuvveti değerinin elde edildiği sürtünme karıştırma nokta kaynağı numunesi B3 nolu numunedir. Yapılan bu deneysel çalışmada, kaynak için malzemede, en uygun yumuşama durumunu sağlayacak istenen optimum sıcaklık değerlerine 150 sn karıştırma süresinde yani birleştirme süresinde ulaşıldığı anlaşılmıştır, B3 nolu numunenin kopma bölgeleri incelendiğinde, kopmanın şeklinden malzemenin adeta kopmaya karşı direndiği açıkça görülmektedir. Kopma şeklinden ve elde edilen çekme kuvveti değerlerinden, B3 nolu numunede daha yüksek çekme kuvvetine ulaşmayı destekleyen önemli veriler ve görüntüler elde edilmiştir. B3 nolu numunenin ikiden fazla parçaya ayrıldığı, kopmaya karşı B1, B2 ve B4 nolu numunelere kıyasla daha fazla direnç gösterdiği net bir şekilde görülmektedir. Kullanılan POM malzemenin özelliklerinden dolayı, yüksek sertlik ve gevrek bir yapıya sahip olması nedeniyle, hiçbir kaynaklı numunede sünek uzama lifleri, kopma öncesi büzülme ve kesit daralması görülmemiştir, kopma bölgeleri parlaktır. Kopma şekli, sert ve gevrek malzemelerin tipik kopma

özelliklerini birebir göstermektedir. Kaynak sırasında, kaynak havuzundaki yumuşayan plastik malzeme, omuz altından dışa doğru çok az kaçış yaparak, kaynak bölgesinin etrafında oldukça az miktarda yükseldiği görülmektedir. Yapılan kaynak sırasında ise kaynak bölgesinden çok az miktarda malzemenin uzaklaştığı gözlemlenmiştir. Kaynak havuzu içinde kalması gereken ve dayanım değerlerine katkı yapması gereken malzemenin, dışa kaçışının çok az miktarda olmasının, dayanım değerini olumlu yönde etkilediği anlaşılmıştır, bu deneysel çalışmada elde edilen 5180 N maksimum çekme kuvveti değeri bu durumu çok net olarak desteklemektedir. Numunelerin tamamı incelendiğinde de görüleceği üzere, kopmaya daha fazla direnen B3 nolu numunede, maksimum çekme kuvveti değerine ulaşılmıştır. Numunelerin kopma şekilleri ve kopma bölgeleri incelendiğinde de görüleceği gibi, kopmaya daha fazla direnen B3 nolu numunede, dayanım değerini maksimum yapan en yüksek çekme kuvvetinin elde edildiği optimum karıştırma yani birleştirme süresi değerine ulaşılmıştır.

Yapılan bu deneysel çalışmada, 7 mm dalma derinliği, 100 mm/dak dalma hızı, 1500 d/d devir sayısı ve 210 sn karıştırma yani birleştirme süresinde yapılan deneysel çalışmada ise, oluşturulan kaynaklı numunede, kaynak için en uygun yumuşama değerlerini sağlayacak istenen optimum sıcaklık değerlerine ulaşamadığı anlaşılmıştır. Bu durum çekme kuvveti değerini olumsuz yönde etkilediği görülmüştür. Malzemenin yumuşamasını sağlayacak istenen optimum sıcaklık değerlerine kısmen ulaşabildiği B4 nolu numunenin kaynak bölgesinde yumuşayan plastik malzeme, omuz altından dışa doğru fazla miktarda kaçış yaparak, kaynak bölgesinin etrafında yukarı doğru yükseldiği görülmektedir. Yapılan kaynak sırasında da, kaynak havuzundan fazla miktarda malzemenin uzaklaştığı gözlemlenmiştir. Kaynak havuzu içinde kalması gereken ve mukavemet değerlerine katkı yapması gereken malzemenin dışa kaçışının fazla olmasının, dayanım değerini olumsuz yönde etkilediği anlaşılmıştır. Elde edilen 1480 N değerindeki nispeten düşük çekme kuvveti değeri bu durumu açıkça desteklemektedir.

4. SONUÇLAR

Hazırlanan POM kaynak numunelerinde, kaynak noktalarının oluşturulmasında, bu deneysel çalışma için özel olarak tasarlanarak imal edilmiş konik bir kaynak takım ve yine bu çalışma için özel olarak tasarlanarak imal edilmiş bağlama aparatı kullanılmıştır. SKNK yönteminin uygulandığı bu deneysel çalışmada, oluşturulan kaynaklı bağlantılarda, birleştirme yani karıştırma süresi değişiminin, çekme kuvvetine önemli oranda etkisi olduğu ortaya konulmuştur. Belirli bir dalma derinliği, dalma hızı ve devir sayısı için, farklı karıştırma süresi değerleri kullanılarak, çekme kuvvetini maksimum yapan optimum karıştırma yani birleştirme süresi belirlenmiştir. Yapılan ön çalışmalar neticesinde, 7 mm dalma derinliği, 100 mm/dak dalma hızı ve 1500 d/d devir sayısı sabit tutularak, farklı karıştırma sürelerinde yapılan deneysel çalışmada, çekme kuvvetini 5180 N değerle maksimum yapan optimum karıştırma yani birleştirme süresinin 150 sn olduğu belirlenmiştir. En yüksek çekme kuvveti değerinin elde edildiği SKNK numunesi B3 nolu numunedir. Yapılan bu deneysel çalışmada, kaynak için malzemede, en uygun yumuşama durumunu sağlayacak istenen optimum sıcaklık değerlerine 150 sn karıştırma süresinde yani birleştirme süresinde ulaşıldığı anlaşılmıştır, B3 nolu numunenin kopma bölgeleri incelendiğinde, kopmanın şeklinden malzemenin adeta kopmaya karşı direndiği açıkça görülmektedir. Kopma şeklinden ve elde edilen çekme kuvveti değerlerinden, B3 nolu numunede daha yüksek çekme kuvvetine ulaşmayı destekleyen önemli veriler ve görüntüler elde edilmiştir. B3 nolu numunenin ikiden fazla parçaya ayrıldığı, kopmaya karşı B1, B2 ve B4 nolu numunelere kıyasla daha fazla direnç gösterdiği net bir şekilde görülmektedir. Kullanılan POM malzemenin özelliklerinden dolayı, yüksek sertlik ve gevrek bir yapıya sahip olması nedeniyle, hiçbir kaynaklı numunede sünek uzama lifleri, kopma öncesi büzülme ve kesit daralması görülmemiştir, kopma bölgeleri parlaktır. Kopma şekli, sert ve gevrek malzemelerin tipik kopma özelliklerini birebir göstermektedir. B3 nolu numunede, kaynak havuzunda kalması gereken ve dayanım değerlerine katkı yapması gereken malzemenin, dışa kaçışının çok az miktarda olmasının, dayanım değerini olumlu yönde etkilediği sonucuna varılmıştır, bu deneysel çalışmada elde edilen 5180 N'luk maksimum çekme kuvveti değeri bu sonucu çok net olarak desteklemektedir. Numunelerin kopma şekilleri ve kopma bölgeleri incelendiğinde de görüleceği gibi, kopmaya daha fazla direnen B3 nolu numunede, dayanım değerini

maksimum yapan en yüksek çekme kuvvetinin elde edildiği optimum karıştırma yani birleştirme süresi değerine ulaşılmıştır.

KAYNAKLAR

- [1]. SyBridge Technologies, Know Your Materials: Delrin (Polyoxymethylene), [https://sybridge.com/know-your-materials-delrin-polyoxymethylene/#:~:text=Polioksimetilen%20\(POM\)%2C%20daha%20yayg%C4%B1n,kararlı%C4%B1%C4%B1k%20sunan%20bir%20m%C3%BChendislik%20plasti%C4%9Fidir.](https://sybridge.com/know-your-materials-delrin-polyoxymethylene/#:~:text=Polioksimetilen%20(POM)%2C%20daha%20yayg%C4%B1n,kararlı%C4%B1%C4%B1k%20sunan%20bir%20m%C3%BChendislik%20plasti%C4%9Fidir.) (visit date: 10.06.2025).
- [2]. PAGEV, Polioksimetilen (POM), <https://pagev.org/pom>
Ayrıca:[https://pagev.org/pom/#:~:text=Polioksimetilen%20\(POM\)&text=Sa%C4%9Fflam%2C%20%20%3%A7%C3%B6z%C3%BCc%C3%BC%20ve%20alevlere%20dayan%C4%B1kl%C4%B1,kemeri%20ve%20mobilya%20bile%C5%9Fenlerinde%20kullan%C4%B1l%C4%B1r.](https://pagev.org/pom/#:~:text=Polioksimetilen%20(POM)&text=Sa%C4%9Fflam%2C%20%20%3%A7%C3%B6z%C3%BCc%C3%BC%20ve%20alevlere%20dayan%C4%B1kl%C4%B1,kemeri%20ve%20mobilya%20bile%C5%9Fenlerinde%20kullan%C4%B1l%C4%B1r.) (visit date: 10.06.2025).
- [3]. Güler, H., (2023). POM ve PP Talk %15 Malzemelerin Birbirine Yapışabilirliğinin Artırılmasında Atmosferik Plazma Kullanım Parametrelerinin Belirlenmesi, Doktora Tezi, Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı.
- [4]. ScienceDirect, Polyoxymethylene, <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/polyoxymethylene>
(visit date: 11.06.2025).
- [5]. Mert, Ş., ve Mert, S., (2013). Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynak Yönteminin İncelenmesi, *İleri Teknoloji Bilimleri Dergisi*, Cilt 2, Sayı 1, Sayfa 26-35.
- [6]. Mert, Ş., ve Mert, S., (2013). Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynağı Yönteminde Kullanılan Makina ve Ekipmanların İncelenmesi, *İleri Teknoloji Bilimleri Dergisi (Journal of Advanced Technology Sciences)*, Cilt 2, Sayı 3, Sayfa 121-129.
- [7]. Mert, Ş., ve Mert, S., (2015). Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynak Yönteminin Otomotiv Sektöründeki Yeri, *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 3, Sayfa 432-438.
- [8]. Mert, Ş., (2010). Polipropilen Malzemenin Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynağı ile Birleştirilmesi, Doktora Tezi, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı.
- [9]. Feng, Z., Diamond, S., Santella, M. L., Pan, T. Y., and Li, N., (2004). High Strength Weight Reduction Materials - Friction Stir Welding and Processing of Advanced Materials, Oak Ridge National Laboratory Report, DE-AC05-00OR22725, 101-108.
- [10].Feng, Z., Santella, M. L., David, S. A., Steel, R. J., Packer, S. M., Pan, T., Kuo, M., and Bhatnagar, R. S., (2005). Friction Stir Spot Welding of Advanced High-strength steels-A Feasibility Study, SAE World Congress, Detroit, Michigan, USA.
- [11].Mitlin, D., Radmilovic, V., Pan, T., Chean, J., Feng, Z., and Santella, M. L., (2006). Structure Properties Relations in Spot Friction Welded (Also Known as Friction Stir Spot Welded) 6111 Aluminum, *Materials Science and Engineering*, vol. 441, pp. 79-96.
- [12].Arıcı, A. A., ve Mert, Ş., (2007). Polipropilen Malzemenin Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynağı ile Birleştirilmesi, *PAGEV Plastik Dergisi*, 95, Sayfa 152-162.
- [13].Lin, P. C.,Pan, J., and Pan, T., (2008). Failure Modes And Fatigue Life Estimations of Spot Friction Welds in Lap-Shear Specimens of 6111-T4 Sheets. Part 1: Welds Made by a Concave Tool, *International Journal of Fatigue*, vol. 30, pp. 74-89.
- [14].Lin, P. C.,Pan, J., and Pan, T., (2008). Failure Modes and Fatigue Life Estimations of Spot Friction Welds in Lap-Shear Specimens of 6111-T4 Sheets. Part 2: Welds Made by a Flat Tool, *International Journal of Fatigue*, vol. 30, pp. 90-105.

- [15]. Mert, Ş., ve Arıcı, A. A., (2008). Friction Stir Spot Welding Method Using in Polypropylene Sheet Materials Joining, 12th International Materials Symposium, Pamukkale University, pp 1150-1156, Denizli.
- [16]. Tran, V. X., Pan, J., and Pan, T., (2008). Fatigue Behavior of Aluminum 5754-O and 6111-T4 Spot Friction Welds in Lap-Shear Specimens, *International Journal of Fatigue*, vol. 30, pp. 2175-2190.
- [17]. Tran, V. X., Pan, J., and Pan, T., (2009). Effects of Processing Time on Strengths and Failure Modes of Dissimilar Spot Friction Welds Between Aluminum 5754-O and 7075-T6 Sheets, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 209, pp. 3724-3739.
- [18]. Benyerou, D., Chikh, E., B., O., Khellafi, H., Meddah, H., M., Benhamena, A., Hachelaf, K., and Lounis, A., (2021). Parametric Study of Friction Stir Spot Welding (FSSW) for Polymer Materials Case of High Density Polyethylene Sheets: Experimental and Numerical Study, *Frattura ed Integrità Strutturale*, 55, 145-158.
- [19]. Sidhom, A., A., E., Naga, S., A., R., and Kamal, A., M., (2022). Friction Stir Spot Welding of Similar and Dissimilar High Density Polyethylene and Polypropylene Sheets, *Advances in Industrial and Manufacturing Engineering*, 4, 100076.
- [20]. Fujimoto, M., Koga, S., Abe, N., Sato, Y. S, and Kokawa, H., (2008). Microstructural Analysis of Stir Zone of Al Alloy Produced by Friction Stir Spot Welding, *Science and Technology of Welding and Joining*, vol. 13, no. 7, pp. 663-670.
- [21]. Yin, Y. H., Sun, N., North, T. H., and Hu, S. S., (2010). Hook Formation and Mechanical Properties in AZ31 Friction Stir Spot Welds, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 210 (14), pp. 2062-2070.
- [22]. Khan, M. I., Kuntz, M. L., Su, P., Su, P., Gerlich, A., North, T., and Zhou, Y., (2007). Resistance and Friction Stir Spot Welding of DP600: A Comparative Study, *Science and Technology of Welding and Joining*, vol. 12 (2), pp. 175-182.
- [23]. Ataya, S., Ahmed, M. M. Z., Seleman, M. M. El-S., Hajlaoui, K., Latief, F. H., Soliman, A. M., Elshaghoul, Y. G. Y., and Habba, M. I. A., (2022). Effective Range of FSSW Parameters for High Load-Carrying Capacity of Dissimilar Steel A283M-C/Brass CuZn40 Joints, *Materials*, 15(4), 1394.
- [24]. Arıcı, A. A., and Mert, Ş., (2008). Friction Stir Spot Welding of Polypropylene, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, vol. 27 (18), pp. 2001-2004.
- [25]. Schäfer, H., Blaga, L., A., Stöver, E., and Klusemann, B., (2023). Refill Friction Stir Spot Welding of Thermoplastic Composites: Case Study on Carbon-fiber-reinforced Polyphenylene Sulfide, *Thin-Walled Structures*, 191, 111037.
- [26]. Iftikhar, S., H., Cherupurakal, N., Krishnapriya, R., and Mourad, A., H., I., (2024). Friction Stir Spot Welding of Recycled Scrap Thermoplastics, *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*, 7, 838-848.
- [27]. Sioutis, I., Tserpes, K., Tsiangou, E., Boutin, H., Allegre, F., and Blaga, L., (2023). Experimental Evaluation of Refill Friction Stir Spot Welds (RFSSW) as Crack Arrest Features in Co-consolidated Thermoplastic Laminates, *Composite Structures*, 309, 116754.
- [28]. Kawasaki Heavy Industries Ltd., (2006 and 2013). A New Method For Light Alloy Joining - Friction Spot Joining - Kawasaki Robot, Japan, www.kawasakirobot.com, visit date: 18 March 2006 and 28 March 2013.
- [29]. J. Hinrichs, (2006). "Friction Stir Spot Welding", *Friction Stir Link Inc.*, www.frictionstirlink.com, visit date: 21 March 2006.
- [30]. Mert, Ş., and Arıcı, A. A., (2011). Design of Optimal Joining for Friction Stir Spot Welding of Polypropylene Sheets, *Science and Technology of Welding and Joining*, vol. 16(6), pp. 522-527.

- [31].Yusof, F., Miyashita, Y., Seo, N., Mutoh, Y., and Moshwan, R., (2012). Utilising Friction Spot Joining for Dissimilar Joint Between Aluminium Alloy (A5052) and Polyethylene Terephthalate, *Scienceand Technology of Weldingand Joining*, vol. 17, pp. 544-549.
- [32].Bilici, M., K., and Yukler, A. I., (2012). Effects of Welding Parameters on Friction Stir Spot Welding of High Density Polyethylene Sheets, *Materials and Design*, vol. 33, pp. 545-550.
- [33].Bilici, M., K., and Yukler, A. I., (2012). Influence of Tool Geometry and Process Parameters on Macrostructure and Static Strength in Friction Stir Spot Welded Polyethylene Sheets, *Materials and Design*, vol. 33, pp. 145-152.
- [34].Mostafapour A., and Asad, F. T., (2016). Investigations on Joining of Nylon 6 Plates Via Novel Method of Heat Assisted Friction Stir Welding to Find the Optimum Process Parameters, *Science and Technology of Weldingand Joining*, vol. 21 (8), pp. 660-669.
- [35].Yan, Y.,Shen, Y., Zhang, W., and Guan, W., (2017). Effects of Friction Stir Spot Welding Parameters on Morphology and Mechanical Property of Modified Cast Nylon 6 Joints Produced by Double-Pin Tool, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 92, pp. 2511-2523.
- [36].Çakır, G., Mert, Ş., ve Mert, S., (2017). CNC Tezgahta Polipropilen Malzemeye Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynağının Uygulanması ve Optimum Kaynak Parametrelerinin Belirlenmesi, ISMSIT 2017, 1st International Symposium on Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies, Tokat, Turkey.
- [37].Çakır, G., Mert, Ş., ve Mert, S., (2017). Polipropilen Malzemeye Uygulanan Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynağında Takım Geometrisinin Bağlantı Dayanımına Etkisinin İncelenmesi, ISMSIT 2017, 1st International Symposium on Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies, Tokat, Turkey.
- [38].Goswami, N., K., Pal, K., Bisoyi, R., K., and Nayak, S., S., (2024). Monitoring of Weld Bead Profile in Friction Stir Lap Welding for Polycarbonate Sheets Using Wavelet Packets of Power Signal, *Arabian Journal for Science and Engineering*, <https://doi.org/10.1007/s13369-024-09057-8> Published online: 29 April 2024.
- [39].Çam, G., Javaheri, V., and Heidarzadeh, A., (2022). Advances in FSW and FSSW of dissimilar Al-alloy plates, *Journal of Adhesion Science and Technology*, 27 Jan 2022.
- [40].Xu, R. Z., Ni, D. R., Yang, Q., Xiao, B. L., Liu, C. Z., and Ma, Z. Y., (2018). Influencing Mechanism of Al-Containing Zn Coating on Interfacial Microstructure and Mechanical Properties of Friction Stir Spot Welded Mg-Steel Joint, *Materials Characterization*, 140, 197-206.
- [41].Buffa, G., Fanelli, P., Fratini, L., and Vivio, F., (2014). Influence of Joint Geometry on Micro and Macromechanical Properties of Friction Stir Spot Welded Joints, 11th International Conference on Technology of Plasticity, *Procedia Engineering*, 81 (2014) 2086 - 2091.
- [42].Venukumar, S.,Yalagi, S., and Muthukumaran, S., (2013). Comparison of Microstructure and Mechanical Properties of Conventional and Refilled Friction Stir Spot Welds in AA 6061-T6 Using Filler Plate, *Transactions Nonferrous Metals Society, China*, 23(2013) 2833–2842.
- [43].Malafaia, A. M. S, Milan, M. T., Oliveira, M. F., and Spinelli, D., (2010). Evaluation of Dynamic Defect Detection in FSSW Welded Joints Underfatiguetests, *Procedia Engineering*, 2 (2010) 1823-1828.
- [44].Pradhan, D., K., Sahu, B., Bagal, D., K., Barua, A., Jeet, S., and Prahhan, S., (2022). Application of Progressive Hybrid RSM-WASPAS-grey Wolf Method for Parametric Optimization of Dissimilar Metal Welded Joints in FSSW Process. *Materials Today: Proceedings*, vol. 50, part 5, pp. 766-772.
- [45].Bilici, M. K., Bakır, B., Bozkurt, Y., ve Çalış, İ., (2016). Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynak Tekniği ile Birleştirilen Farklı Alüminyum Levhaların Taguchi Analizi, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 22(1), 17-23.
- [46].Rosendo, T., Mazzaferro, J., Mazzaferro, C., Tier, M., Ramos, F., Reguly, A., Strohaecker, T., dos Santos, J. (2013). Friction Spot Processes - FSSW and FSpW,

http://www.hzg.de/imperia/md/content/gkss/institut_fuer_werkstoffforschung/wmp/poster-apresentacao-gkss2.pdf, visit date: 28 March 2013.

[47].Smith, C. B., Hinrichs, J. F., and Ruehl, P. C., (2006). Friction Stir and Friction Stir Spot Welding, *Friction Stir Link Inc*, www.frictionstirlink.com, visit date: 21 March 2006.

[48].Gerlich, A., Su, P., North, T. H., and Bendzsak, G. J., (2005). Friction Stir Spot Welding of Aluminum and Magnesium Alloys, *Materials Forum*, 29, 290-294.

[49].Awang, M., Mucino, V. H., Feng, Z., and David, S. A., (2005). Thermo-Mechanical Modeling of Friction Stir Spot Welding (FSSW) Process: Use of an Explicit Adaptive Meshing Scheme, *SAE International*, 2005-01-1251.

[50].Lathabai, S., Painter, M. J., Cantin, G. M. D., and Tyagi, V. K., (2006). Friction Spot Joining of an Extruded Al-Mg-Si Alloy, *Scripta Materialia*, 55, 899-902.



Makale id= 41

Sözlü Sunum

ORCID ID: 0009-0004-7523-6533

| 223

Lotka–volterra ve Seir Modellerinin Çözümünde Yapay Sinir Ağı Yönteminin Örtük Euler Yöntemi ile Karşılaştırmalı AnaliziAraştırmacı Ali Güven¹, Doç.Dr. Soner Aydın¹¹İstanbul Teknik Üniversitesi

*Corresponding author: Ali Güven

Özet: Bu çalışmada gerçek dünya uygulamalarında sıkça karşılaşılan, kapalı formda çözümü ya bulunmayan ya da elde edilmesi zor olan adi diferansiyel denklem sistemleri için yapay sinir ağlarına dayalı bir yaklaşım ele alınmış ve bu yaklaşımın çıktıları Implicit Euler yöntemiyle karşılaştırılmıştır. Yapay sinir ağları evrensel yaklaşımcılardır; diferansiyel denklemin tanımlı olduğu aralık boyunca çözüm fonksiyonunu parametrik bir ağ biçiminde temsil ederler. Modellemede, denklemin artık (residual) karelerinin toplamını en aza indiren bir kayıp fonksiyonu kullanılmış, parametreler ardışık gradyan tabanlı optimizasyonla güncellenmiştir. Böylece çözüm, yalnızca seçili noktalarda değil, tüm aralıkta geçerli olan analitik-benzeri bir yaklaşımla elde edilmiştir. Karşılaştırma amacıyla iki adet birinci mertebeden sistem test problemi olarak seçilmiştir. Sistem örnekleri olarak Lotka–Volterra yırtıcı-av modeli ile SEIR (Susceptible–Exposed–Infected–Removed) epidemiyolojik modeli incelenmiştir. Sistem denklemlerinde doğruluk analizi, nüfus bölümlerinin fiziksel tutarlılığı ve korunum yasalarına uyumu açısından, rezidüel hata analizi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, ağ tabanlı yöntemin hesaplama süresi bakımından örtük Euler'e göre daha maliyetli olmasına karşın, tüm test problemlerinde çözüme daha düşük hata ile yakınsadığını göstermektedir. Özellikle, denklemlerin çözümlerinde ani değişim gösterdiği bölgelerde YSA yaklaşımı, ağ parametrelerinin veri-bağımsız optimizasyonu sayesinde daha kararlı ve kesin çözümler üretmiştir. Bu çalışmadaki temel katkı, çok bileşenli iki sistem için yapay sinir ağı yaklaşımının Örtük Euler yöntemi ile kapsamlı ve sistematik bir şekilde karşılaştırmalı olarak analiz edilmesidir. Elde edilen bulgular, diferansiyel denklem sistemlerinin sayısal çözümünde yapay sinir ağlarının, özellikle yüksek doğruluk gerektiren uygulamalarda umut verici bir alternatif oluşturduğunu ortaya koymaktadır.

Anahtar Kelimeler: Yapay Sinir Ağı Yöntemleri, Deneme Çözümleri, Sayısal Yöntemler, Lotka-Volterra Sistemi, Seir Modeli

Comparative Analysis of the Neural Network Method and the Implicit Euler Method in Solving Lotka–volterra and Seir Models

Abstract: In this study, a neural network-based approach is presented for systems of ordinary differential equations (ODEs) frequently encountered in real-world applications, particularly those lacking closed-form solutions or whose exact solutions are difficult to obtain. The performance of this approach is compared with the implicit Euler method. Neural networks serve as universal approximators, representing the solution function parametrically over the domain of the differential equation. In modeling, a loss function minimizing the sum of squared residuals of the differential equation is employed, and parameters are iteratively updated via gradient-based optimization. Consequently, the solution is obtained as an analytical-like approximation valid throughout the entire interval, not merely at selected discrete points. For comparative purposes, two first-order system test

problems were selected: the Lotka–Volterra predator-prey model and the SEIR (Susceptible–Exposed–Infected–Removed) epidemiological model. The accuracy analysis for these systems was performed via residual error analysis, examining both the physical consistency of the population compartments and adherence to conservation laws. Results indicate that although the neural network-based method is computationally more expensive compared to the implicit Euler method, it consistently achieves solutions with lower approximation errors across all test problems. Particularly in regions where solutions exhibit rapid changes, the neural network approach produced more stable and precise solutions due to the data-independent optimization of network parameters. The primary contribution of this study is the comprehensive and systematic comparative analysis between the neural network approach and the implicit Euler method for two multi-component systems. The findings demonstrate that neural networks offer a promising alternative for numerically solving differential equation systems, especially in applications requiring high accuracy.

Keywords: Neural Network Methods, Trial Solutions, Numerical Methods, Lotka-Volterra System, Seir Model

1.GİRİŞ

Diferansiyel denklemler, fizik, mühendislik, biyoloji ve finans gibi pek çok alanda karşılaşılan karmaşık sistemlerin modellenmesi ve analizinde kritik bir rol oynamaktadır. Gerçek hayattaki birçok problemi ifade etmek ve çözmek için sıkça başvurulan bu denklemler, analitik yöntemlerle çözülemeyecek kadar karmaşık olabilir veya hiç çözülemeyebilir. Bu durumlarda, sayısal yöntemler çözümler için yaygın bir alternatif olarak kullanılmaktadır. Ancak sayısal yöntemlerin bazı durumlarda yüksek hesaplama maliyetleri ve doğruluk kısıtları gibi dezavantajları da mevcuttur.[4]

Son yıllarda, makine öğrenimi ve özellikle yapay sinir ağları (YSA), geleneksel sayısal yöntemlere güçlü bir alternatif olarak ortaya çıkmıştır. YSA'nın fonksiyonları evrensel olarak yakalayabilme ve sürekli türevlenebilir çözümler üretebilme yetenekleri, adi diferansiyel denklemlerin çözümünde kullanılması açısından son derece avantajlıdır.[3] Bu yöntemler, hem hesaplama sürelerini kısaltabilme hem de çözüm doğruluğunu artırabilme potansiyeline sahiptir.

Bu çalışma kapsamında, adi diferansiyel denklemlerin ve denklem sistemlerinin yapay sinir ağlarıyla çözümleri ele alınmaktadır. Çalışmanın temel amacı, yapay sinir ağlarının adi diferansiyel denklemler üzerindeki etkinliğini ve avantajlarını sayısal yöntemlerle kıyaslamaktır. Özellikle, farklı tür ve derecedeki denklemler ve sistemler üzerinde sinir ağı yaklaşımı uygulayarak, bu yöntemlerin doğruluk, hız ve çözüm kalitesi açısından performansları detaylı olarak incelenmiştir. Karşılaştırma amaçlı olarak klasik sayısal yöntemlerden biri olan Implicit Euler yöntemi seçilmiştir. Her iki yaklaşım da başlangıç değer problemleri, ikinci dereceden denklemler ve Lotka-Volterra ve SEIR gibi gerçek yaşam modelleri üzerinde değerlendirilmiştir.

Çalışmanın sonuçları, yapay sinir ağlarının diferansiyel denklemlerin çözümünde önemli bir doğruluk avantajı sağladığını göstermektedir. Bununla birlikte, yöntemlerin işlem süreleri ve karmaşıklıkları açısından da kapsamlı bir değerlendirme yapılmış ve her yöntemin uygulama alanları, avantaj ve sınırlamaları detaylı bir şekilde ortaya konmuştur.

2.YAPILAN ÇALIŞMALAR

Bu çalışmada adi diferansiyel denklemlerin çözümü için Yapay Sinir Ağları (YSA) yöntemi kullanılmıştır. YSA yönteminin temelinde, diferansiyel denklemin başlangıç veya sınır koşullarını karşılayan özel bir deneme çözümü oluşturmak vardır. Bu deneme çözümü genel olarak şu formda ifade edilir:

$$y_{deneme}(t) = A(t) + F(t, N(t, p))$$

Burada $N(t, p)$ yapay sinir ağının çıktısını temsil etmekte olup t bağımsız değişkeni, p ise yapay sinir ağının eğitim sırasında optimize edilen parametrelerini ifade eder. $A(t)$ başlangıç veya sınır koşullarını sağlayan fonksiyondur ve $F(t, N(t, p))$ fonksiyonu diferansiyel denklemin formuna göre belirlenir. Yapay sinir ağı parametrelerinin optimizasyonu, belirlenen deneme çözümü ile diferansiyel denklemin gerçek çözümü arasındaki farkın minimize

edilmesiyle gerçekleştirilir. Bu farkın ölçümünde ortalama kare hatası (Mean Squared Error, MSE) kullanılmıştır. Ayrıca bu çalışmada rezidü hata analizi, de sinir ağı tahminlerinin doğruluğunu değerlendirmek için kullanılır. Çalışmada karşılaştırma yapmak amacıyla klasik sayısal yöntemlerden biri olan Implicit Euler yöntemi de uygulanmıştır. Implicit Euler yöntemi aşağıdaki genel formülle ifade edilir:

$$y_{n+1} = y_n + hf(t_{n+1}, y_{n+1})$$

Burada h zaman adımını temsil eder. Bu yöntem, sayısal stabilite açısından avantajlıdır ancak her iterasyonda lineer olmayan bir denklemin çözülmesini gerektirir.

Uygulama sürecinde, SEIR ve Lotka-Volterra modelleri ayrıntılı olarak incelenmiş ve yöntemlerin performansları matematiksel analiz ve simülasyon sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır.

3. UYGULAMALAR

3.1 LOTKA-VOLTERRA MODELİ

Lotka-Volterra denklemler sistemi, av-avcı sistemi olarak da bilinir ve biri avcı, diğeri ise av olarak kabul edilen etkileşim halindeki türlerin zamana bağlı olarak popülasyonlarındaki değişimleri modeller. [2] Bu sistem, iki adet birinci dereceden doğrusal olmayan adi diferansiyel denklemden oluşur. Sistem şu şekilde ifade edilebilir:

$$\begin{aligned}\frac{dy_1}{dt} &= \alpha y_1(t) - \beta y_1(t)y_2(t), \\ \frac{dy_2}{dt} &= \delta y_1(t)y_2(t) - \gamma y_2(t).\end{aligned}$$

Burada α , β , δ ve γ pozitif reel parametrelerdir. α ve δ , sırasıyla av ve avcı türlerinin büyüme oranlarını; β ve γ ise sırasıyla av ve avcı türlerindeki kayıp oranlarını temsil eder. Bu çalışmada parametreler $\alpha = 1.5$, $\beta = \delta = \gamma = 1.0$ ve başlangıç koşulları $y_1(0) = 1.5$, $y_2(0) = 1.0$ alınmıştır.

Denklemler sistemini çözmek için, her bir denklem için bir deneme çözümü oluşturulur. y_{trial1} , y_1 için deneme çözümünü; y_{trial2} ise y_2 için deneme çözümünü temsil edecek şekilde, deneme çözümleri aşağıdaki gibidir:

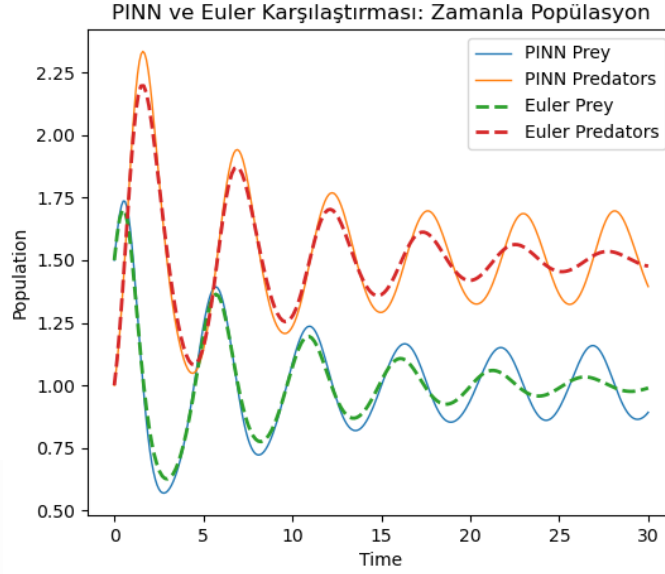
$$\begin{aligned}y_{trial1}(t) &= y_1(0) + tN_1(t, \vec{p}_1) \\ y_{trial2}(t) &= y_2(0) + tN_2(t, \vec{p}_2).\end{aligned}$$

Burada $y_1(0)$ ve $y_2(0)$ verilen başlangıç koşullarıdır. PINN yöntemi, diferansiyel denklemlerin çözümünü öğrenmek üzere tasarlanmış yapay sinir ağları kullanır. Bu çalışmada iki farklı sinir ağı, sırasıyla $y_1(t)$ ve $y_2(t)$ fonksiyonlarını yaklaşık olarak öğrenmek için eğitilmiştir. Eğitim süreci boyunca aşağıdaki artık (residual) ifadeler minimize edilmiştir:

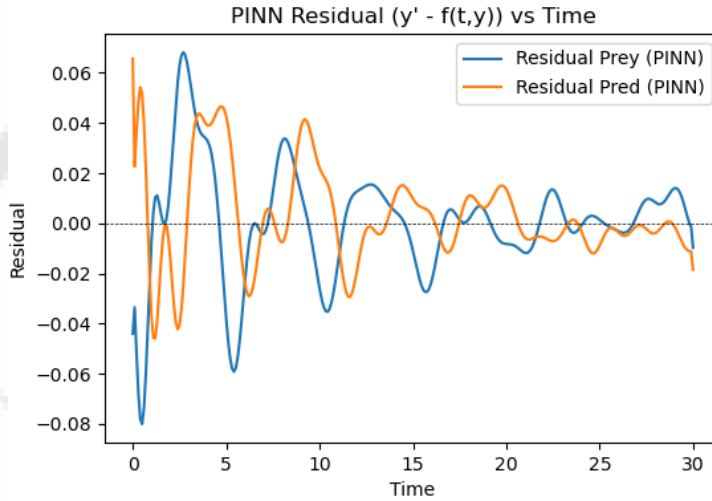
$$\begin{aligned}R_1(t) &= \frac{du}{dt} - (\alpha u - \beta uv) \\ R_2(t) &= \frac{dv}{dt} - (\delta uv - \gamma v).\end{aligned}$$

Burada $u(t)$ ve $v(t)$ sinir ağlarının çıktılarıdır. PINN modeli 0 ile 30 zaman aralığında 3000 epoch boyunca eğitilmiştir. Çözümlerin doğruluğunu değerlendirmek için residual-tabanlı hata analizi uygulanmıştır. Her iki yöntemde de çözüm fonksiyonlarının türevleri sayısal olarak elde edilmiştir ve teorik sistemle karşılaştırılmıştır:

$$\text{Residual}(t) = y'(t) - f(t, y(t))$$



Şekil 1. Lotka-Volterra Modeli Yapay Sinir Ağı ve Implicit Euler



Şekil 2. Lotka-Volterra Modeli Yapay Sinir Ağı Rezidüel Hata Analizi

3.2 SEIR MODELİ

SEIR (Duyarlı, Maruz, Enfekte, Uzaklaştırılmış) modeli, bulaşıcı hastalıkların bölgesel yayılımını modellemek için kullanılan epidemiyolojik bir yöntemdir. Bu model, bir bölgedeki nüfusu dört gruba ayırır. İlk grup, enfekte olma riski taşıyan bireylerin yer aldığı Duyarlı (Susceptible) grubudur. Virüse maruz kalmış ancak henüz enfekte olmamış bireyler Maruz (Exposed) grubuna yerleştirilir. Kişi enfekte olduğunda Enfekte (Infected) grubuna aktarılır. Enfeksiyondan iyileşen ya da hayatını kaybeden bireyler ise Uzaklaştırılmış (Removed) grubuna alınır.

SEIR modeli dört bileşenden oluşur: $S(t)$: Duyarlı (henüz enfekte olmamış) birey sayısını, $E(t)$: Maruz kalan (bulaşmış fakat henüz bulaştırıcı olmayan) birey sayısını, $I(t)$: Enfekte ve bulaştırıcı birey sayısını, $R(t)$: İyileşmiş veya karantinaya alınmış birey sayısını ifade eder.

Model aşağıdaki diferansiyel denklemler sistemi ile tanımlanır:

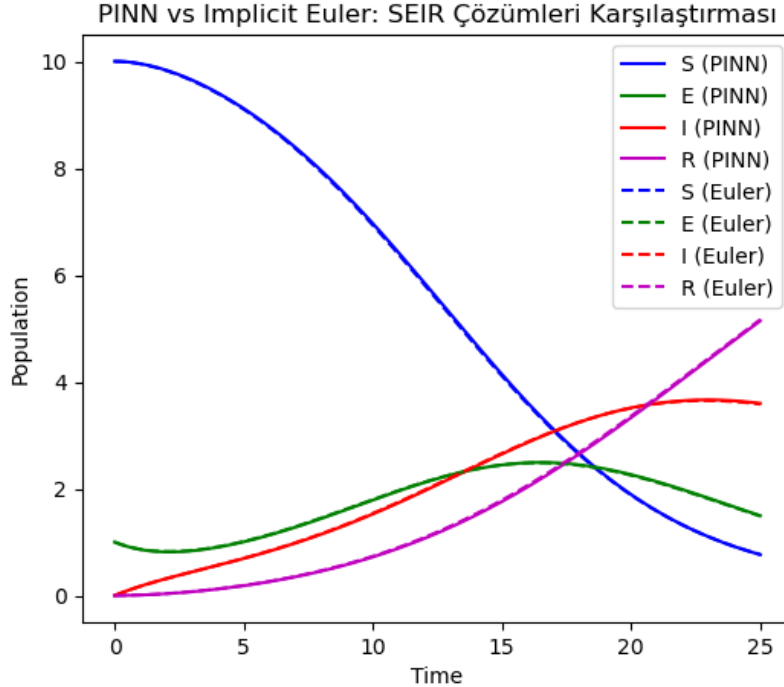
$$\frac{ds}{dt} = -\beta SI,$$

$$\begin{aligned}\frac{dE}{dt} &= \beta SI - \epsilon E, \\ \frac{dI}{dt} &= \epsilon E - \gamma I, \\ \frac{dR}{dt} &= \gamma I.\end{aligned}$$

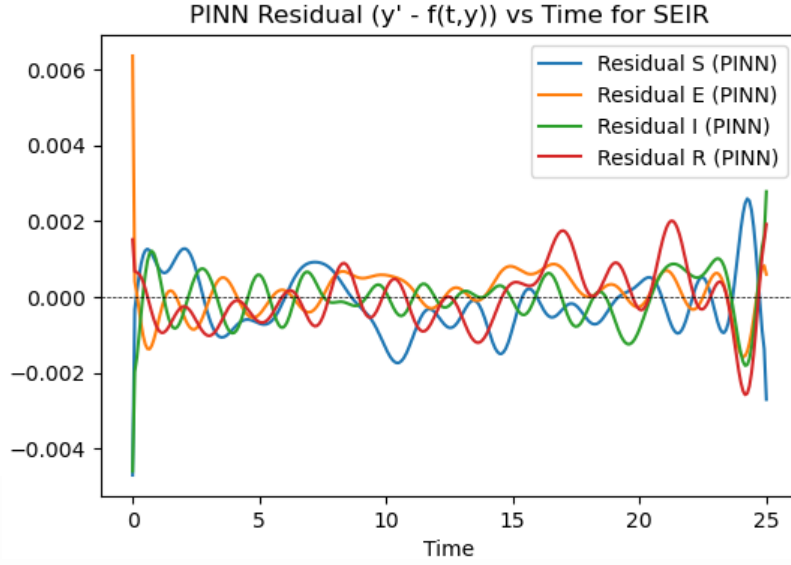
Burada $\beta = 0.05$ (bulaşma oranı), $\epsilon = 0.2$ (enfeksiyon geçiş oranı), $\gamma = 0.1$ (iyileşme oranı). Başlangıç koşulları şu şekildedir: $S(0)=10$, $E(0)= 1$, $I(0) = 0$, $R(0)= 0$. PINN yaklaşımında, her bir değişken için bir tam bağlı yapay sinir ağı (Fully Connected Neural Network, FCNN) tanımlanır. Bu çalışmada her ağ; giriş olarak zamanı alır, çıkış olarak S,E,I,R bileşenlerinden birini verir. Aktivasyon fonksiyonu olarak SinActv kullanılır. Her ağ iki gizli katman ve her katmanda 32 nörondan oluşmaktadır. Ağlar aşağıdaki rezidüel fonksiyonları minimize etmek üzere eğitilir:

$$\begin{aligned}R_S(t) &= \frac{ds}{dt} + \beta SI, \\ R_E(t) &= \frac{dE}{dt} - (\beta SI - \epsilon E), \\ R_I(t) &= \frac{dI}{dt} - (\epsilon E - \gamma I), \\ R_R(t) &= \frac{dR}{dt} - \gamma I.\end{aligned}$$

PINN'in kayıp fonksiyonu bu rezidüellerin karelerinin toplamı olarak tanımlanır ve Solver1D sınıfı aracılığıyla 3000 epoch boyunca minimize edilir. Eğitim sonucunda her $t \in [0,25]$ için S,E,I,R sürekli olarak öğrenilmiş olur.



Şekil 3. SEIR Modeli Yapay Sinir Ağı ve Implicit Euler Çözümü



Şekil 4. SEIR Modeli Rezidüel Hata Analizi

4.SONUÇ

Bu çalışma kapsamında adi diferansiyel denklemlerinin çözümünde yapay sinir ağları (YSA) yöntemi ve Implicit Euler yöntemi karşılaştırılmıştır. Yapılan uygulamalar sonucunda YSA'nın çözüm doğruluğu açısından belirgin bir üstünlüğe sahip olduğu gözlemlenmiştir. Ancak YSA'nın hesaplama süresi, kullanılan sinir ağı parametreleri ve iterasyon sayısına bağlı olarak Implicit Euler yöntemine göre daha uzun sürmektedir.

Lotka-Volterra ve SEIR modellerinde yapılan uygulamalarda YSA'nın özellikle rezidü hata analizinde daha düşük hata değerleri gösterdiği, Implicit Euler yönteminin ise hesaplama hızı ve stabilitesi açısından avantajlı olduğu görülmüştür. Bu sonuçlara göre uygulama alanı ve ihtiyaçlara bağlı olarak her iki yöntemin de farklı senaryolarda tercih edilebilir olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

5.KAYNAKÇA

- [1] Iserles, A. (2009). A first course in the numerical analysis of differential equations (2nd ed.). Cambridge Texts in Applied Mathematics. Cambridge University Press.
- [2] Tan, L. S. , Zainuddin, Z., & Ong, P. (2018). Solving ordinary differential equations using neural networks. AIP Conference Proceedings, 1974(1), 020070. AIP Publishing LLC.
- [3] McCulloch, W. S., & Pitts, W. (1943). A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity. Bulletin of Mathematical Biophysics, 5(4), 115–133.
- [4] Lagaris, I. E., Likas, A., & Fotiadis, D. I. (1998). Artificial neural networks for solving ordinary and partial differential equations. IEEE Transactions on Neural Networks, 9(5), 987–1000. <https://doi.org/10.1109/72.712178>.
- [5] Westrin, M. (2023, January). Solving ordinary differential equations and systems using neural network methods.

