

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

PART C: TASARIM VE TEKNOLOJİ

Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology



ISSN: 2147-9526

Year: 2024, Volume: 12 Issue: 1

İmtiyaz Sahibi/ Owner	Prof. Dr. Musa YILDIZ – Gazi Üniversitesi
Yayın Yönetmeni / Publishing Manager	Prof. Dr. Uğur GÖKMEN – Gazi Üniversitesi
Yazışma Adresi / Correspondence Address	fbedergic@gazi.edu.tr
İnternet Adresi / Web Address	https://dergipark.org.tr/tr/pub/gujsc
Yayın Türü /Publication Type	Sürekli / Periodical Yılda dört sayı yayımlanır: Mart, Haziran, Eylül, Aralık Published four issues per year: March, June, September, December
Baş Editör / Editor-in-Chief	Prof. Dr. Adem ACIR – Gazi Üniversitesi
Baş Editör Yardımcısı / Deputy Editor-in-Chief	Doç. Dr. Ramazan ÇAKIROĞLU – Gazi Üniversitesi
Alan Editörleri / Area Editors	Prof. Dr. Murat Tolga ÖZKAN – Gazi Üniversitesi Prof. Dr. Mustafa AKTAŞ – Gazi Üniversitesi Prof. Dr. Mustafa Serdar GENÇ – Erciyes Üniversitesi Prof. Dr. Sait Dünder SOFUOĞLU – Gazi Üniversitesi Prof. Dr. Yusuf Tansel İÇ – Başkent Üniversitesi Doç. Dr. Ahmet AKTAŞ – Gazi Üniversitesi Doç. Dr. Alper CALAM – Gazi Üniversitesi Doç. Dr. İlyas KARASU – Samsun Üniversitesi Doç. Dr. Semih ÖZDEN – Milli Savunma Üniversitesi Doç. Dr. Şenol BAYRAKTAR – Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi Doç. Dr. Şenol ŞİRİN – Düzce Üniversitesi Doç. Dr. Tuğba TABANLIGİL – Gazi Üniversitesi Doç. Dr. Volkan KILIÇLI – Gazi Üniversitesi Dr. Öğr. Üyesi Cevdet Emin EKİNCİ – Fırat Üniversitesi Dr. Öğr. Üyesi Berre KÜMÜK – İskenderun Teknik Üniversitesi Dr. Öğr. Üyesi Bilge İMER – Orta Doğu Teknik Üniversitesi Dr. Öğr. Üyesi Muhammed Ali KOŞAN – Kahramanmaraş İstiklal Üniversitesi

	<p>Dr. Öğr. Üyesi Seyfettin VADİ – Gazi Üniversitesi</p> <p>Dr. Öğr. Üyesi Sinem UZUN – Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi</p> <p>Dr. Öğr. Üyesi Ömer ASLAN – Bandırma Onyedli Eylül Üniversitesi</p> <p>Öğr. Gör. Dr. Emre AYHAN– Gazi Üniversitesi</p> <p>Öğr. Gör. Dr. Halil KARAKOÇ – Hacettepe Üniversitesi</p> <p>Öğr. Gör. Dr. Onur ALTUNTAŞ – Gazi Üniversitesi</p> <p>Öğr. Gör. Dr. Sema GÖKÇE – Gazi Üniversitesi</p> <p>Dr. Munish Kumar GUPTA – Opole University of Technology</p>
Sekretarya / Secretariat	<p>Dr. Öğr. Üyesi Selçuk YAĞMUR– Gazi Üniversitesi</p>
Mizanpaj Editörleri / Layout Editors	<p>Oğuz Kaan ÇİNİCİ – Gazi Üniversitesi</p> <p>Yaren GÜVEN – Gazi Üniversitesi</p>
Teknik Editör / Technical Editor	<p>Medine ÖZKAYA – Gazi Üniversitesi</p>

HAKKINDA

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi ailesinde Part C olarak yer alan Tasarım ve Teknoloji Dergisi, temel mühendislik konularını kapsamakta ve yılda 4 sayı (Mart, Haziran, Eylül, Aralık) yayınlamaktadır. Mühendislik bilimlerindeki en güncel bilimsel ve teknolojik gelişmeleri araştırmacılara, mühendislere ve ilgili kitlelere ulaştırmayı hedefler. Dergi ulusal ve uluslararası düzeyde bilim, teknoloji ve mühendislik alanlarında orijinal araştırma makalelerini veya tarama makalelerini kabul etmektedir. Temel mühendislik alanlarındaki hem deneysel hem de kuramsal çalışmaların yer aldığı dergimiz, mühendisliğin hızla gelişen alanlarına ilişkin makalelerin yayınına öncelik tanır. Tasarım ve Teknoloji Dergisinde makaleler 2020 yılı sonuna kadar Türkçe yayınlamıştır. 2021 yılı başından itibaren ise dergimizin uluslararası tanınırlığını artırmak amacıyla Türkçe'nin yanı sıra İngilizce de makale kabul edilmeye başlanmıştır.

Dergimiz Tübitak-Ulakbim Dergi Dizin İndeksi (Tr Dizin)-Mühendislik ve Temel Bilimler Veri Tabanı, Ebsco, Google Scholar, Doaj, Citefactor indekslerinde taranmaktadır.

ABOUT

Design and Technology Journal is published as a Part C of Gazi University Science Journal and covers basic engineering issues. It publishes 4 issues per year (March, June, September, December). The journal aims to inform researchers, engineers and interested people about the latest scientific and technological developments. It accepts findings and reflections of original research, scientific research articles or up to date review papers with summaries, evaluations, and comparisons. Our journal publishes both experimental and conceptual studies and gives priority to studies on rapidly developing areas of engineering. It aims at focusing on interdisciplinary methods and technologies. Design and Technology Journal accepts papers on engineering fields written in English or Turkish.

Indexing and abstracting: TR Index, Index Copernicus, DOAJ, Google Scholar and CiteFactor

AMAÇ ve KAPSAM

Dergi ulusal ve uluslararası düzeyde ;

- 1- Bilim, teknoloji ve mühendislik alanlarında orijinal bir araştırmayı bulgu ve sonuçlarıyla yansıtan ve bilime katkısı olan araştırma makalelerini
- 2- Yeterli sayıda bilimsel makaleyi tarayıp, konuyu bugünkü bilgi ve teknoloji düzeyinde özetleyen, değerlendirme yapan ve bulguları karşılaştırarak yorumlayan derleme makalelerini yayınlamaktadır.

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi: Tasarım ve Teknoloji” dergisi temel mühendislik konularını kapsayan bir dergidir. Mühendislik bilimlerindeki en güncel bilimsel ve teknolojik gelişmeleri araştırmacılara, mühendislere ve ilgili kitlelere ulaştırmayı hedefler. Dergi ulusal ve uluslararası düzeyde

bilim, teknoloji ve mühendislik alanlarında orijinal bir araştırmayı bulgu ve sonuçlarıyla yansıtan ve bilime katkısı olan araştırma makalelerini veya yeterli sayıda bilimsel makaleyi tarayıp, konuyu bugünkü bilgi ve teknoloji düzeyinde özetleyen, değerlendirme yapan ve bulguları karşılaştırarak yorumlayan tarama makalelerini kabul etmektedir.

Mimarlık, sanat, spor ve sağlık alanları dergimiz kapsamı alanında değildir.

AIMS and SCOPE

The journal accepts studies at national and international level as follows;

1- Research articles reflecting results and findings of original research papers in science, technology and engineering fields.

2- Review articles providing a refined summary of a remarkable number of articles in a contemporary technological and scientific manner, carrying out evaluations, making comparisons and comments.

Gazi University Science Journal: Design and Technology journal is about basic engineering issues. The target audience is researchers and engineers, and the journal aims at informing people with the latest scientific and technological developments. The journal accepts papers reflecting the results of original results in science, technology and engineering fields at the national and international level and research papers that contribute to scientific field or papers that summarize the latest developments on an issue are accepted.

The fields of architecture, art, sport and health are not in the scope of this journal.

İÇİNDEKİLER / CONTENTS

1. **Flow Properties of An Ahmed Body with Different Passive Flow Control Methods** (Araştırma Makalesi), Kemal KOCA, Mustafa ÖZDEN 1
2. **Ticari NAFİLean Polipropilen/Haşhaş (Papaver Somniferum) Sapı Polimer Kompozitinin Mekanik ve Morfolojik Özelliklerine MAPP'nin Etkisi** (Araştırma Makalesi), Gizem KARADİREK, Münir TAŞDEMİR 17
3. **The Effect of Rheum ribes Extract Origin of Elazig Province on Ventilator-Associated Pneumonia and Antioxidant Capacity** (Araştırma Makalesi), Oğuzhan ÖZDEMİR, Nurten YILMAZ, Mustafa Oğuzhan KAYA 25
4. **Tip-2 Nöro-Bulanık Denetleyiciler ile Döner Kanatlı İnsansız Hava Aracının Yörünge Takibi** (Araştırma Makalesi), Yeşim ÖNİZ 40
5. **Siber Güvenlik, Siber Savaş Alanında Seçili Anahtar Kelimeler ile İlgili Araştırmaların Bibliyometrik Analizi** (Araştırma Makalesi), Sehavet NECİYEYEV, Betül PAZARBAŞI 57
6. **Blokzincir Teknolojisi ile Nesnelerin İnterneti Tabanlı (IoT) Sistemlerin Veri Güvenliğinin Sağlanması** (Araştırma Makalesi), Gül Fatma TÜRKER, Kubilay TANYERİ 80
7. **Yarı Denetimli Makine Öğrenmesi Yöntemini Kullanarak Müzik Türlerinin Tespiti** (Araştırma Makalesi), Alp Kaan TURAN, Hüseyin POLAT 92
8. **Robot Tutucu Problemi için Çok Stratejili Aritmetik Optimizasyon Algoritması** (Araştırma Makalesi), Mustafa Yusuf YILDIRIM, Rüştü AKAY 108
9. **Alışılmamış İmalat Yöntemi Seçmek İçin Bir Karar Destek Sistemi Önerisi** (Araştırma Makalesi), Hilal SİNGER, Abdullah Cemil İLÇE 117
10. **A Wide Frequency Range C-V and G-V Characteristics Study in Schottky Contacts with a BODIPY-Pyridine Organic Interface** (Araştırma Makalesi), Leman KARGIN, Yusuf Tansel İÇ 128
11. **Design and Performance Analysis of an Outer-Rotor PMSynRM** (Araştırma Makalesi), Burak YENİPİNAR, Ali SAYGIN, Yusuf SÖNMEZ, Cemal YILMAZ, Cemil OCAK 148
12. **Drug Solubility Prediction: A Comparative Analysis of GNN, MLP, and Traditional Machine Learning Algorithms** (Araştırma Makalesi), Doğucan RESULOĞULLARI, Gökhan ALTAY, Cafer KAYADELEN 157
13. **Investigation of the Effect of Filling Ratio on Mechanical Properties of Pumice Filled Epoxy-Based Composites** (Araştırma Makalesi), Veysel GİDER, Cafer BUDAK 164
14. **Binalarda Enerji Verimliliğinde Son Gelişmeler: Türkiye Örneği** (Derleme Makalesi), Cemre YILDIZ 176

İÇİNDEKİLER / CONTENTS

15. **A Novel Approach to Detection of Alzheimer's Disease from Handwriting: Triple Ensemble Learning Model** (Araştırma Makalesi), Hakan ÖCAL 214
16. **EyeMo: A Solution for Individuals with Disabilities to Use a Computer Through Eye Movements** (Araştırma Makalesi), Hakan YILMAZ, Mehmet ÖZDEM 224
17. **Investigation of Dosimetric Properties of Table Sugar Irradiated With Gamma Rays Using EPR Technique** (Araştırma Makalesi), Gül Bayramiye ÖZMEN, Eren ŞAHİNER 233
18. **Investigation of Metal-Metal Composite Producibility Using Liquid Spherical and Lamellar Graphite Cast Iron by Casting Method** (Araştırma Makalesi), Mustafa ARAT, Hasan HASIRCI 242
19. **Automatic Detection of Epileptic Seizures from EEG Signals using Artificial Intelligence Methods** (Araştırma Makalesi), Ali ÖTER 257
20. **TBF1180 ÇELİĞİN FİBER LAZER UYGULAMALARI** (Araştırma Makalesi), Onur YÜCE, Mehtap HİDİROĞLU, İsmail ERDOĞAN, Nizamettin KAHRAMAN 267
21. **Investigation of The Weldability of PLA Plus Sheets with Different Infill Ratios by Friction Stir Welding** (Araştırma Makalesi), Nergizhan ANAÇ, Oğuz KOÇAR, Cihan ALTUOK 282
22. **Ceramic Particle Reinforced Camshaft Lobes: A Performance Evaluation and Comparative Analysis** (Araştırma Makalesi), Afşın Alper CERİT, Fehmi NAİR, Hafız Muhammad Numan ZAFAR 297
23. **Sürekli Mıknatıslı Akı Anahtarlamalı Motorda Mıknatıs, Stator ve Rotor Geometrilerinin Tork ve Tork Dalgalanmasına Etkisinin İncelenmesi** (Araştırma Makalesi), Sümeyye ÇARKIT, Nurettin ÜSTKOYUNCU, Taner ÇARKIT 308
24. **Determination of Solar Radiation Value by Month Using Artificial Neural Network Model; Ankara, Sivas, Erzurum example** (Araştırma Makalesi), Sinem UZUN, Hatice ARSLANTAŞ 315
25. **Examining The Phase Formation of Aging and Shallow Cryogenic Process Applied to Aluminum Alloys with Thermal Analysis** (Araştırma Makalesi), Gözde ALTUNTAŞ, Bülent BOSTAN 324
26. **Elektro Erozyon Yöntemi ile İşlenen Al2024-T3 Malzemesinin İşleme Parametrelerinin Optimizasyonu** (Araştırma Makalesi), Semih GÜNER, Mustafa YURDAKUL, Emre AYHAN, Yusuf Tansel İÇ 332
27. **Utilizing Alkali Pre- Treated Banana Waste in Sustainable Particleboard Manufacturing** (Araştırma Makalesi), Abdullah BERAM 347

İÇİNDEKİLER / CONTENTS

28. **Optimizing Truss Dynamics: A Multi-Objective Approach to Modify Natural Frequencies and Mode Shapes with Geometric Constraints** (Araştırma Makalesi), Can Ulaş DOĞRUER, Can Barış TOPRAK, Bora YILDIRIM 354
29. **A Software for Optimum Design of Laterally Loaded Bolted Joints** (Araştırma Makalesi), Kadir SARI, Hakan DİLİPAK 366
30. **Yapısal Döküm Parçaların Yorulma Ömrünü Etkileyen Ana Faktörlerin Ağır Ticari Araç Fren Sistemlerinde İncelenmesi** (Araştırma Makalesi), Özgün Cem YILMAZ, Bora GÜNTAY, İbrahim Can GÜLERYÜZ 378
31. **İstanbul Bölgesinde Asit Yağmurlarının Ahşap Yapılarda Renk Tasarımına Etkisi** (Araştırma Makalesi), Nisanur YILDIZ, Beyza Nur KARABAL, Cansu ÖZDER, Musa ATAR 388
32. **Sürtünme Karıştırma Yöntemi ile Al6061/TiB2/B4C/GNL Hibrit Yüzey Kompozitlerin Üretimi ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi** (Araştırma Makalesi), Burcu ŞAHİNGÖZ, Halil KARAKOÇ, Ramazan ÇITAK 405

Flow Properties of An Ahmed Body with Different Passive Flow Control Methods

Kemal KOCA^{1,2,*} , Mustafa ÖZDEN³ 

¹Abdullah Gül University, Engineering Faculty, Department of Mechanical Engineering, Kayseri, Türkiye

²Abdullah Gül University, Engineering Faculty, Department of Mechanical Engineering, KOCA Research Group, Kayseri, Türkiye

³Clemson University, Department of Electrical and Computer Engineering, Real-Time Control and Optimization Laboratory, Clemson, USA

Article Info

Research article

Received: 26/07/2023

Revision: 13/10/2023

Accepted: 08/11/2023

Keywords

Ahmed Body
Vehicle aerodynamics
Passive flow control
Drag reduction
FloEFD

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi

Başvuru: 26/07/2023

Düzeltilme: 13/10/2023

Kabul: 08/11/2023

Anahtar Kelimeler

Ahmed Body
Araç aerodinamiği
Pasif akış kontrolü
Sürüklenme azaltımı
FloEFD

Graphical/Tabular Abstract (Grafik Özet)

The flow topology created on the slant surface and wake region of an Ahmed Body with and without passive flow control strategies was investigated using a numerical simulation using the FloEFD program. / Pasif akış kontrol stratejileri olan ve olmayan bir Ahmed Cisminin eğimli yüzeyi ve iz bölgesi üzerinde oluşturulan akış topolojisi, FloEFD programı kullanılarak sayısal bir simülasyon kullanılarak incelenmiştir.

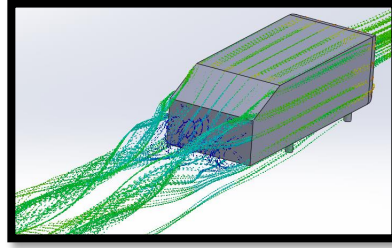


Figure A: The flow topology formed around Ahmed Body / **Şekil A:** Ahmed Gövdesi etrafında oluşan akış topolojisi

Highlights (Önemli noktalar)

- Numerical findings clearly demonstrated that the best performance in terms of drag reduction was achieved when spherical and hemispherical flow control techniques were applied at the rear of the inclined surface of the Ahmed Body. / Sayısal bulgular, sürüklenme azaltımı açısından en iyi performansın, Ahmed Gövdesinin eğimli yüzeyinin arka kısmında küre ve yarı küresel şekilli akış kontrol teknikleri uygulandığında elde edildiğini açıkça ortaya koymuştur.
- Spherical and semi-spherical shaped flow controllers positioned at the rear of the inclined surface resulted in friction reductions of 6% and 7%, respectively. / Eğimli yüzeyin arka kısmında konumlandırılan küresel ve yarı küresel şekilli akış kontrolörleri, sırasıyla %6 ve %7 oranında sürtünme azalmasına neden olmuştur.

Aim (Amaç): The objective of this study is to investigate the flow features formed around Ahmed Body and to apply the passive control methods so as to achieve less drag coefficient. / Bu çalışmanın amacı, Ahmed Cismi çevresinde oluşan akış özelliklerini araştırmak ve daha az direnç katsayısı elde etmek için pasif kontrol yöntemlerini uygulamaktır.

Originality (Özgünlük): Different passive control techniques employed on surface of Ahmed Body at the first time in the literature and it was also first time to utilize FloEFD software in the field of vehicle aerodynamic. / Literatürde ilk kez Ahmed Gövdesinin yüzeyinde farklı pasif kontrol teknikleri kullanılmış ve aynı zamanda FloEFD yazılımından araç aerodinamiği alanında da ilk kez yararlanılmıştır.

Results (Bulgular): The FloEFD numerical findings clearly pointed out that the flow controllers with spherical and semi-spherical shapes placed behind the angled surface reduced friction by 6% and 7%, respectively. / FloEFD sayısal bulguları, açılı yüzeyin arkasına yerleştirilen küresel ve yarı küresel şekilli akış kontrolörlerinin sürtünmeyi sırasıyla %6 ve %7 oranında azalttığını açıkça ortaya koydu.

Conclusion (Sonuç): Consequently, it was pronouncedly seen that different passive control methods enabled of having less drag forces on the Ahmed Body. Further, this was proved with the FloEFD numerical results as well as literature findings. / Sonuç olarak, farklı pasif kontrol yöntemlerinin Ahmed Cismi üzerinde daha az sürüklenme kuvveti oluşturmasına olanak sağladığı açıkça görülmüştür. Ayrıca bu durum FloEFD sayısal sonuçlarının yanı sıra literatür bulgularıyla da kanıtlanmıştır.



Flow Properties of An Ahmed Body with Different Passive Flow Control Methods

Kemal KOCA^{1,2,*} , Mustafa ÖZDEN³

¹Abdullah Gül University, Engineering Faculty, Department of Mechanical Engineering, Kayseri, Türkiye

²Abdullah Gül University, Engineering Faculty, Department of Mechanical Engineering, KOCA Research Group, Kayseri, Türkiye

³Clemson University, Department of Electrical and Computer Engineering, Real-Time Control and Optimization Laboratory, Clemson, USA

Article Info

Research article

Received: 26/07/2023

Revision: 13/10/2023

Accepted: 08/11/2023

Keywords

Ahmed Body
Vehicle aerodynamics
Passive flow control
Drag reduction
FloEFD

Abstract

A numerical simulation by utilizing the FloEFD software was carried out in order to investigate the flow topology formed on slant surface and wake region of an Ahmed Body with and without passive flow control techniques. The effects of those flow controllers on flow at the slant surface and wake region by influencing the flow topology as well as aerodynamic drag coefficient examined carefully. The numerical findings clearly revealed that the best performance in terms of providing the drag reduction obtained when sphere and hemispherical shape flow control techniques were applied at the rear part of slant surface of Ahmed Body. Sphere and hemispherical shape flow controllers positioned at the rear part of slant surface led to have drag reduction of 6% and 7%, respectively. Besides, the results of current study compared with the results obtained from published studies in the literature. It was clearly observed that they are consistent with each other even though they were found by different software.

Ahmed Gövdesinin Farklı Pasif Akış Kontrol Yöntemleriyle Akış Özellikleri

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi

Başvuru: 26/07/2023

Düzeltilme: 13/10/2023

Kabul: 08/11/2023

Anahtar Kelimeler

Ahmed Body
Araç aerodinamiği
Pasif akış kontrolü
Sürüklenme azaltımı
FloEFD

Öz

Ahmed Gövdesinin eğimli yüzeyinde ve iz bölgesinde oluşan akış topolojisini pasif akış kontrol teknikleri ile ve pasif akış kontrol teknikleri olmadan incelemek amacıyla FloEFD yazılımı kullanılarak sayısal bir simülasyon gerçekleştirilmiştir. Bu akış kontrolörlerinin akış topolojisini ve aerodinamik sürüklenme katsayısını etkileyerek eğik yüzey ve iz bölgesindeki akış üzerindeki etkileri dikkatle incelenmiştir. Sayısal bulgular, sürüklenme azaltımı açısından en iyi performansın, Ahmed Gövdesinin eğimli yüzeyinin arka kısmında küre ve yarı küresel şekilli akış kontrol teknikleri uygulandığında elde edildiğini açıkça ortaya koymuştur. Eğimli yüzeyin arka kısmında konumlandırılan küresel ve yarı küresel şekilli akış kontrolörleri, sırasıyla %6 ve %7 oranında sürüklenme azalmasına yol açtı. Ayrıca mevcut çalışmanın sonuçları literatürde yayınlanmış çalışmalardan elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Farklı yazılımlarla bulunsalar da birbirleriyle tutarlı oldukları açıkça görüldü.

1. INTRODUCTION (GİRİŞ)

Enhancing the aerodynamic performance of automobiles especially by reducing the drag forces are important assignments in fluid mechanics community. Those aerodynamic drag forces primarily form at the rear part and blunt nose of vehicles owing to formation of large separation flows. Additionally, the design constraint necessitates body bluffness, which in turn necessitates complex three-dimensional flow in the afterbody. Therefore, drag reduction methods on conventional aerodynamic cars have recently

become of great interest to automakers because they are more repeatable and offer a better understanding of fuel usage to safeguard the environment globally.

Ahmed body was developed by Ahmed et al. [1] and it became a forerunner example for aerodynamic researchers. Similar to concept of crucial geometries presented by Morel [2], along with other bodies such as slanted cylinders, the Ahmed body is considered a crucial geometry [3]. To date, various experimental techniques have been performed on strategies including (i) active, (ii) passive, or (iii) a combination of (i) & (ii) control techniques for

obtaining drag reduction on universal vehicle geometries to gain crucial understanding on the relationship between the pressure drag generation and the complex wake structure [4-6]. The study performed by Bellman et al. [7] clearly revealed that fuel consumption could be reduced by 5% when the aerodynamic drag of ground vehicles decreased by 10%. Active drag reduction methods such as performing synthetic jet actuation [8], employing pulsed jets [9], utilizing steady blowing [10], considering a combination of suction and blowing [11] exhibited extraordinary performance by affecting the wake behind the Ahmed body. However, it could be said that active ones recently have lag behind passive drag reduction methods since the passive ones are comparatively easier to fabricate and enforce. Those techniques consisted of deflector plates [12], contoured transverse grooves [13], vortex generators (VGs) [14]. In addition to extra component, the drag reduction could be performed with geometric modification such as afterbody rounding [15], body cavity [16]. Table 1 covers previous research at low Reynolds numbers belonging to the Ahmed Body.

The novelty of the paper was twofold, (i) V_2 and V_3 were investigated in the first time in the literature with these dimensions and (ii) Besides numerical attempt with ANSYS taken place literature, it was the first time that FloEFD software was utilized, and the results were compared with ANSYS's results taken place in the literature. The aforementioned factors have prompted this work's objective, which is to clarify the aerodynamic performance of several passive flow control varieties on the Ahmed Body.

The rest of paper was arranged as follows: Section 2 identified the material and methods including numerical model, numerical method, and aerodynamic forces. The detailed results were presented in Section 3. The crucial findings were discussed and concluded by comparing the between each other in Section 4.

2. MATERIAL AND METHODS (MATERYAL VE METOD)

2.1. Numerical Model (Sayısal Model)

In this study, the dimensions of the geometries (according to the baseline model) were shown as in Figure 1. The total length of Ahmed Body was 1044 mm. The radius of rounded front part was 100 mm. Moreover, slant angle was selected as 25° . Related to the computational domain as illustrated in Figure 2, the front part of Ahmed Body was positioned 5L away from the domain inlet (L was length of Ahmed Body) and distance from the rear surface to the outlet of domain was 10L. According to the experience of previous studies of current authors [29-31], 10L was enough to see and investigate flow structures occurred at the wake of Ahmed Body. The ground of the computational domain was applied as no-slip condition. Symmetric conditions were applied at both side boundaries and at the top boundary. Both side boundaries were located 5D (D was width of Ahmed Body) away from the Ahmed Body. The inflow velocity coming from the inlet was 40 m/s.

Table 1. Summary of low Reynolds number scaled model experiments over the Ahmed body (Ahmed cismi üzerinde düşük Reynolds sayısı ölçekli model deneylerinin özeti)

Method	Model scale	Reynolds Num.	Slant Angle	Reference
Numerical	1	8322	25°	[17]
Numerical	1/5.33	14000	0°	[18]
Experimental	1/4	14000	$25^\circ, 35^\circ$	[19]
Experimental	1/4	26000	25°	[20]
Experimental	1/5.3	17000	$0^\circ, 25^\circ, 35^\circ$	[21]
Exp.+Num.	1/4	14800	25°	[22]
Numerical	1/0.288	8275	0°	[23]
Exp.+Num.	1/4	14800	25°	[24]
Numerical	1	10000	0°	[25]
Experimental	1/0.25	17000	0°	[26]
Experimental	1/4	14800	$25^\circ, 30^\circ, 35^\circ$	[27]
Experimental	1/11	340, 410	0°	[28]

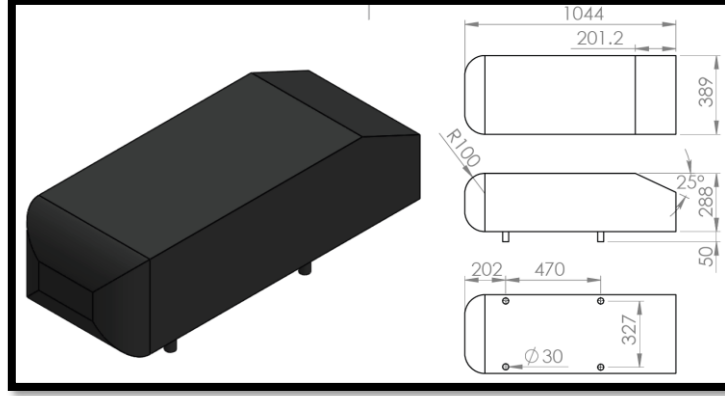


Figure 1. Technical sketch and dimensions of Ahmed body (baseline model), dimensions in mm (Ahmed gövdesinin teknik çizimi ve boyutları (temel model), mm cinsinden boyutlar)

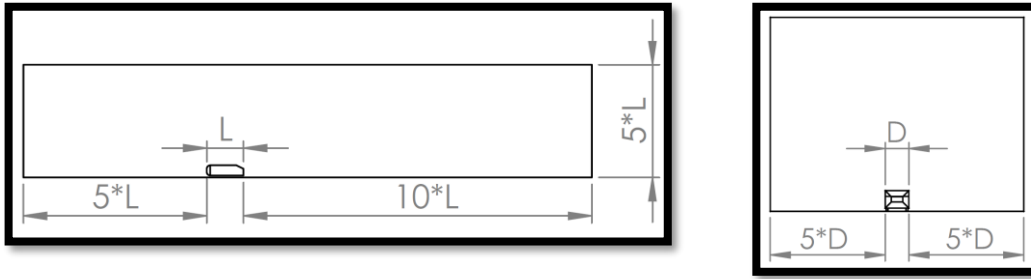


Figure 2. A schematic of computational domain, dimensions in mm (Hesaplama alanının şeması, boyutlar mm cinsindedir)

The simulation employed three-dimensional continuity and momentum equations-based on the finite volume method. The discretized algebraic equations were solved using bounded second-order implicit time. The general form of the Continuity and Momentum equations can be presented as:

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

$$\rho \left(\frac{\partial v_x}{\partial \tau} + V_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + V_y \frac{\partial v_x}{\partial y} + V_z \frac{\partial v_x}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left[(\mu + \mu_t) \frac{\partial v_x}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[(\mu + \mu_t) \frac{\partial v_x}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[(\mu + \mu_t) \frac{\partial v_x}{\partial z} \right] + S_{Tx} \quad (2)$$

$$\rho \left(\frac{\partial v_y}{\partial \tau} + V_x \frac{\partial v_y}{\partial x} + V_y \frac{\partial v_y}{\partial y} + V_z \frac{\partial v_y}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left[(\mu + \mu_t) \frac{\partial v_y}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[(\mu + \mu_t) \frac{\partial v_y}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[(\mu + \mu_t) \frac{\partial v_y}{\partial z} \right] + S_{Ty} \quad (3)$$

$$\rho \left(\frac{\partial v_z}{\partial \tau} + V_x \frac{\partial v_z}{\partial x} + V_y \frac{\partial v_z}{\partial y} + V_z \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left[(\mu + \mu_t) \frac{\partial v_z}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[(\mu + \mu_t) \frac{\partial v_z}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[(\mu + \mu_t) \frac{\partial v_z}{\partial z} \right] + S_{Tz} \quad (4)$$

In the literature, the small blade and the cylindrical roughness element were utilized to control the wake flow as vortex generators by several researchers [32-34]. In this current study, both cylindrical and hemispherical round roughness element were employed to both on slant and rear surface of Ahmed Body as shown in Figure 3. While the hemispherical roughness elements have a lower volume and a more straightforward construction than cylindrical roughness elements, they can also create comparable small-scale coherent vortices. According to their locations and shapes, those different roughness elements were configured as V_1, V_2, V_3 and V_4 . Apart from vortex generators, the deflector configurations were attached the leading part of slant surface, and they were referred as V_5, V_6 and V_7 .

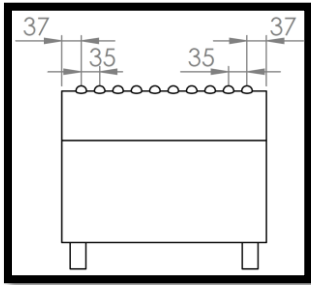
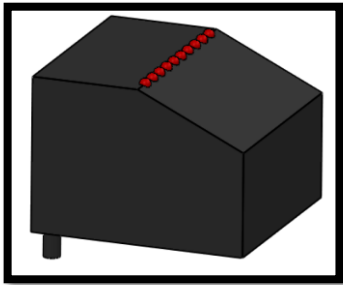
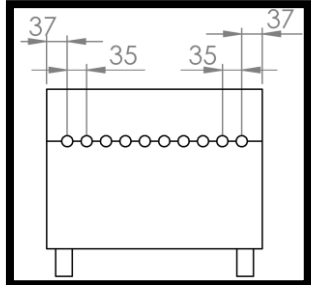
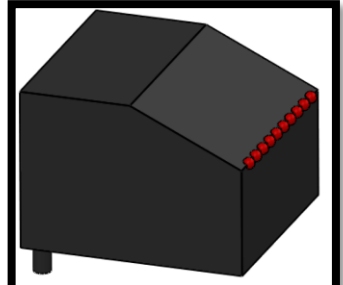
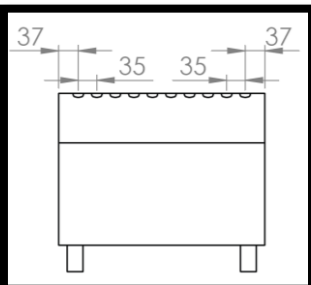
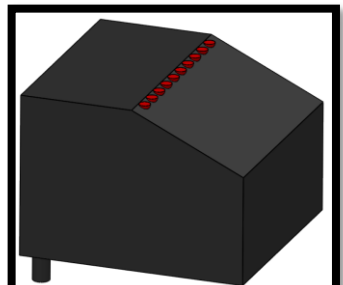
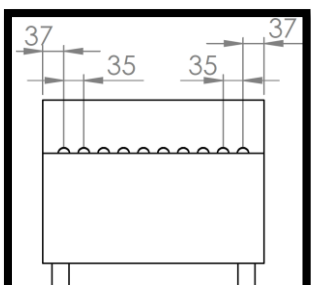
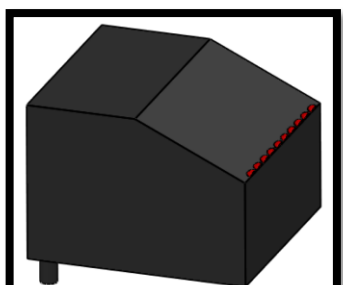
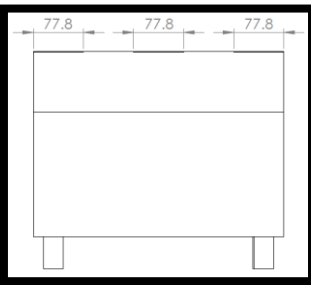
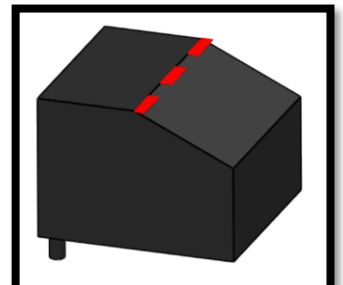
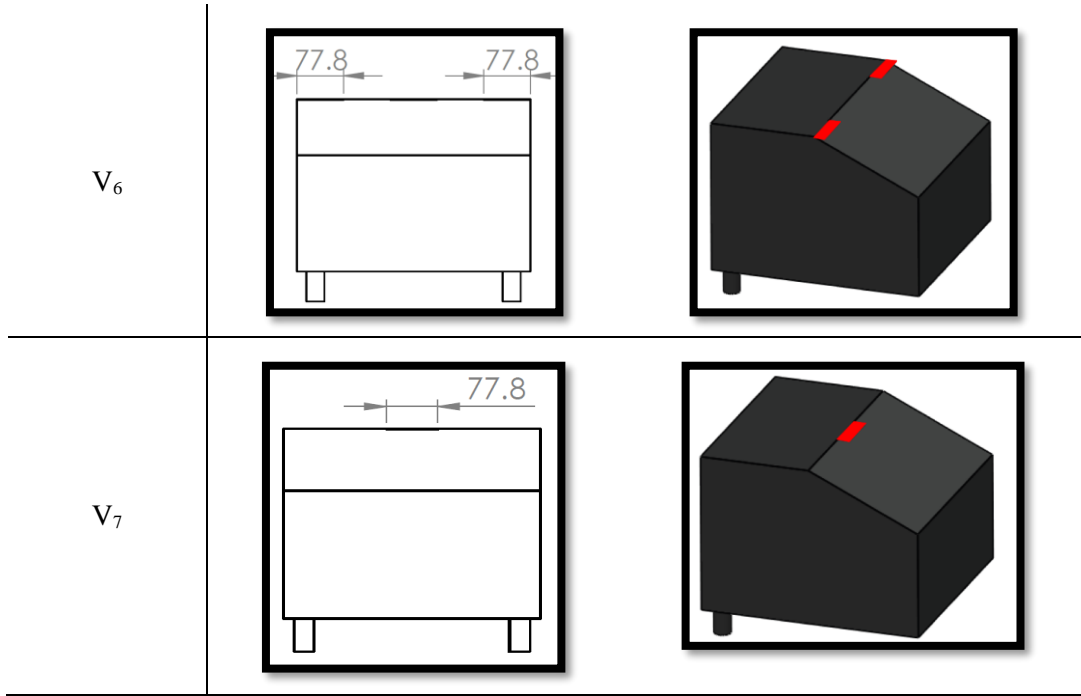
Configuration	Technical sketch	Solid model
V ₁		
V ₂		
V ₃		
V ₄		
V ₅		

Figure 3. The location of flow controllers on slant surface of Ahmed Body, dimensions in mm (Akış kontrolörlerinin Ahmed Gövdenin eğimli yüzeyindeki konumu, mm cinsinde boyutlar)



Continuation of Figure 3 (Şekil 3'ün devamı)

2.2. Numerical Method (Sayısal Yöntem)

The mesh structure is one of the key elements in numerical techniques that determines the accuracy of the answer. It plays a direct role in the accuracy of the solution. In this current study, FloEFD software was utilized for numerical analysis. In FloEFD software, the program organizes the mesh structure with its own algorithm and obtains results that are almost independent from the network [35]. As technically speaking, the rectangular computational domain is constructed automatically (but can also be altered manually) to contain the solid body and have boundary planes orthogonal to the Cartesian coordinate system's given axes. Following that, the computational mesh is built in multiple steps. To begin, a simple mesh is created. The computational domain is separated into slices by the basic mesh planes, which are obviously orthogonal to the Cartesian coordinate system axes. The basic mesh cells intersecting the solid/fluid interface are then uniformly split into smaller cells in order to capture the solid/fluid interface with mesh cells of the appropriate size (relative to the basic mesh cells). The solutions were completed in steady-state utilizing the SIMPLE algorithm scheme for pressure-velocity coupling, the least square cell-based approach for gradient, and the

second-order upwind method for all other parameters on spatial discretization. Concerning the measure of distance from the first grid cell, y^+ value was about 1. The solutions converged as all residuals reached to 10^{-5} .

Analyzes can be performed without the need for geometry editing in FloEFD software, whereas CFD software users need to prepare the geometry for analysis before solving at different software. The results of the program are compared with other software as well as experimental results in the literature and acceptable results are ensured. The different numerical models were adopted to investigate three-dimensional flow in previous study of the current authors [36]. In this current study, k- ϵ was selected as the turbulence model for simulations. A separate model specific to the program was created as a result of making arrangements with the experimental data on the standard k- ϵ model, which is also found in other CFD software in the program. The contact surfaces of the wheels of the Ahmed Body are defined as walls. Velocity is defined separately for each case in the X direction as vector. In Figure 4, the image of the network structure obtained from the software was presented.

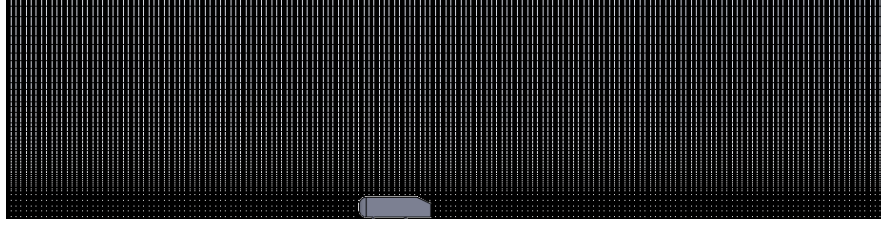


Figure 4. Grid and mesh structures used in the current study (Mevcut çalışmada kullanılan grid ve ağ yapıları)

In addition to the flow analyzes performed in this current study, the aerodynamic drag force created on the Ahmed Body by the flow events was also investigated. In this context, the drag coefficient (C_D) data for the different speeds of the Ahmed Body of all configurations were found with the following equation:

$$C_D = \frac{F_D}{0.5 \rho V^2 A} \quad (5)$$

where F_D , ρ , V and A indicated the aerodynamic drag force, air density, the velocity and projection area of Ahmed Body, respectively. The density is 1.15 m/s^2 and the area is 8.5 m^2 . As pointed out before, velocity was 40 m/s .

3. RESULTS (SONUÇLAR)

In this part, the results of velocity graphs, turbulence distribution contours and drag coefficients of the Ahmed Body obtained from the numerical simulation will be discussed. Additionally, three-dimensional contours will be created, and streamlines will be investigated to better understand the flow structures occurring in the front and rear of the Ahmed Body.

3.1. Velocity Distributions (Hız Dağılımları)

Turbulence statistics, Reynolds stress and velocity distributions play crucial roles in the fluid mechanics of understanding the flow phenomena [37-45]. The results of velocity distribution around the Ahmed Body were illustrated in Figure 5. For the baseline model, the velocity decreased at the wake of the body demonstrated as blue region. In particular, it was clearly pointed out that there was huge velocity deficit at the slant surface of the body when VG and deflector were utilized for V_1 , V_5 and V_7 configurations. Those flow controllers caused the flow to separate at front of the slant surface. Then, the separated flow reattached the rear part of the body, resulting in presence a huge wake region. Furthermore, there was a longitudinal vortex located at the center of wake region. It was seen that

those flow structures were comparatively broadened than other configurations. Apart from those tips, the length of wake region was also taller than other configurations. It was obviously foreseen that V_1 , V_5 and V_7 configurations exhibited more dominant role on velocity distribution from slant surface to wake region of Ahmed Body.

3.2. Turbulence Intensities (Türbülans Yoğunlukları)

In aerodynamic literature, the following definitions describe the turbulence intensity, also known as turbulence level:

$$I = \frac{u'}{U} \quad (6)$$

$$u' = \sqrt{\frac{1}{3}(u_x'^2 + u_y'^2 + u_z'^2)} \quad (7)$$

where u' was the root mean square of the turbulent velocity fluctuations and U is the mean velocity. In Figure 6, the distribution of turbulence intensity was demonstrated for different configurations. One could observe that the turbulence intensity zone at the wake region of the Ahmed Body exactly corresponded to velocity contribution contours. It was clearly seen that there was a shape transition between turbulence intensity contours when different flow control configurations were applied. As discussed at velocity distribution contours, higher turbulence intensity regions were observed at the slant surface and wake region for V_1 , V_5 and V_7 configurations. The flow controllers at those configurations caused the flow to be energized, resulting in existing more turbulent velocity fluctuations. Another observation that could be drawn from Figure 6 was that wake shape of Ahmed Body was obviously distinguishable. As a matter of fact, the wake shapes belonging to the V_1 , V_5 and V_7 configurations were larger than the other configurations. It spread out more along the flow velocity. It clearly depicted that the turbulence intensity affected more region at the wake part as those configurations were employed.

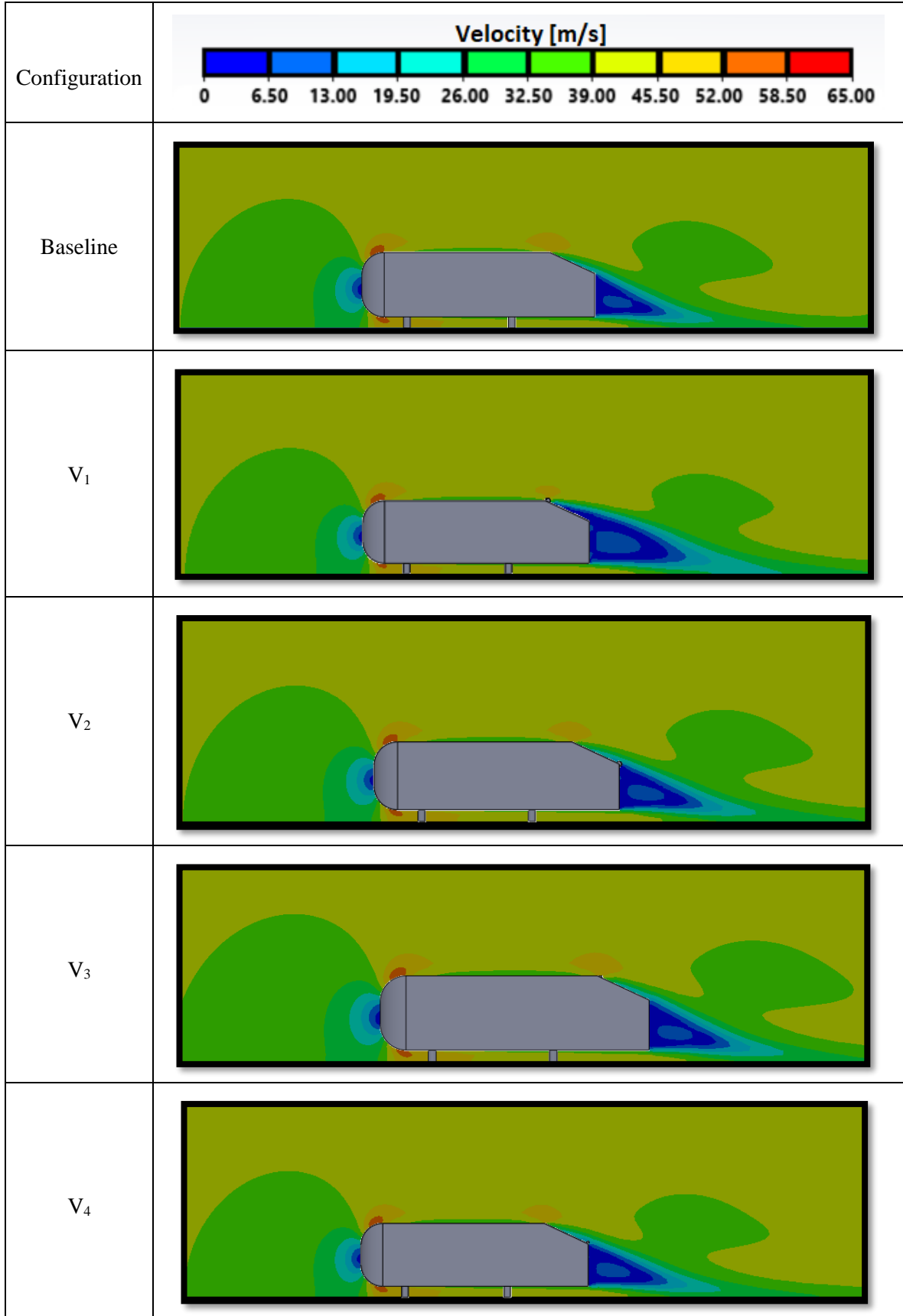
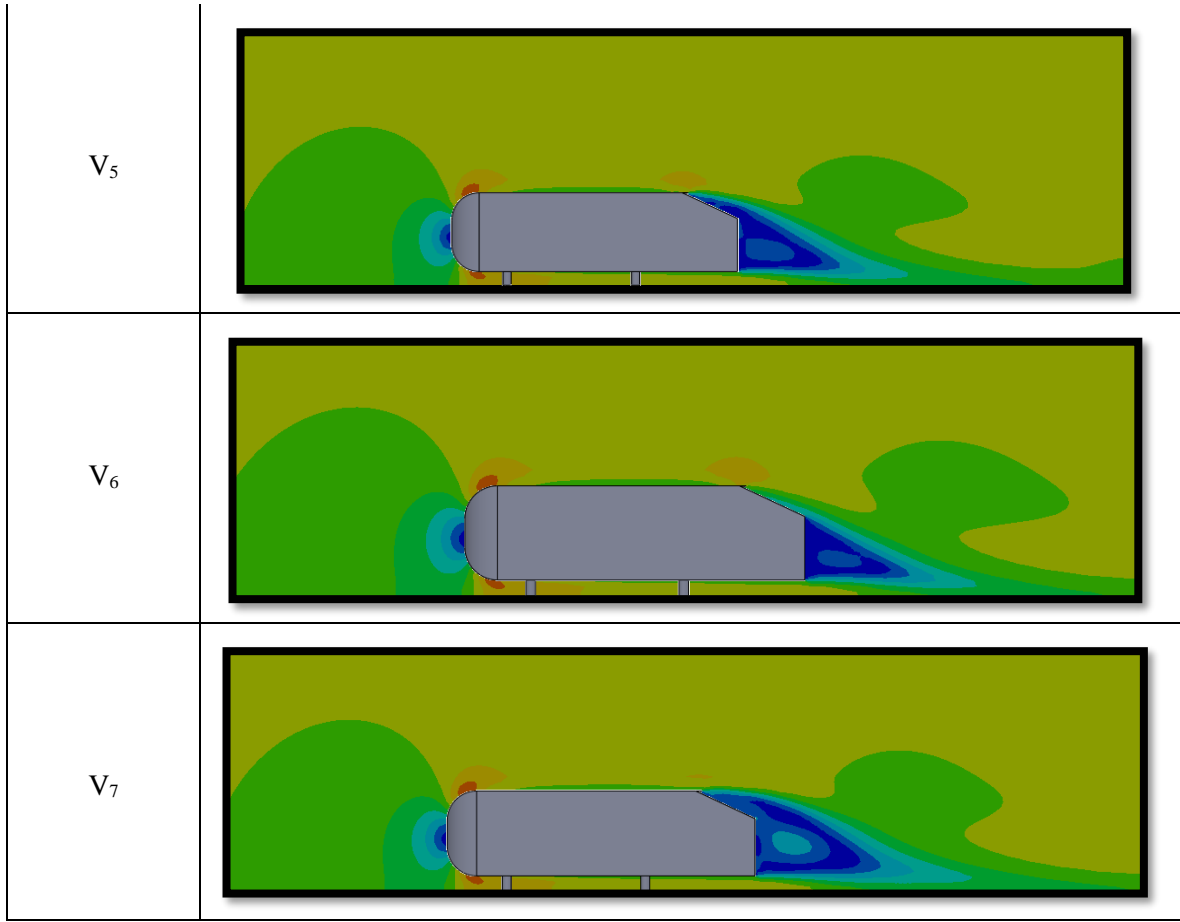


Figure 5. Velocity distribution for various configurations (Çeşitli konfigürasyonlar için hız dağılımı)



Continuation of Figure 5 (Şekil 5'in devamı)

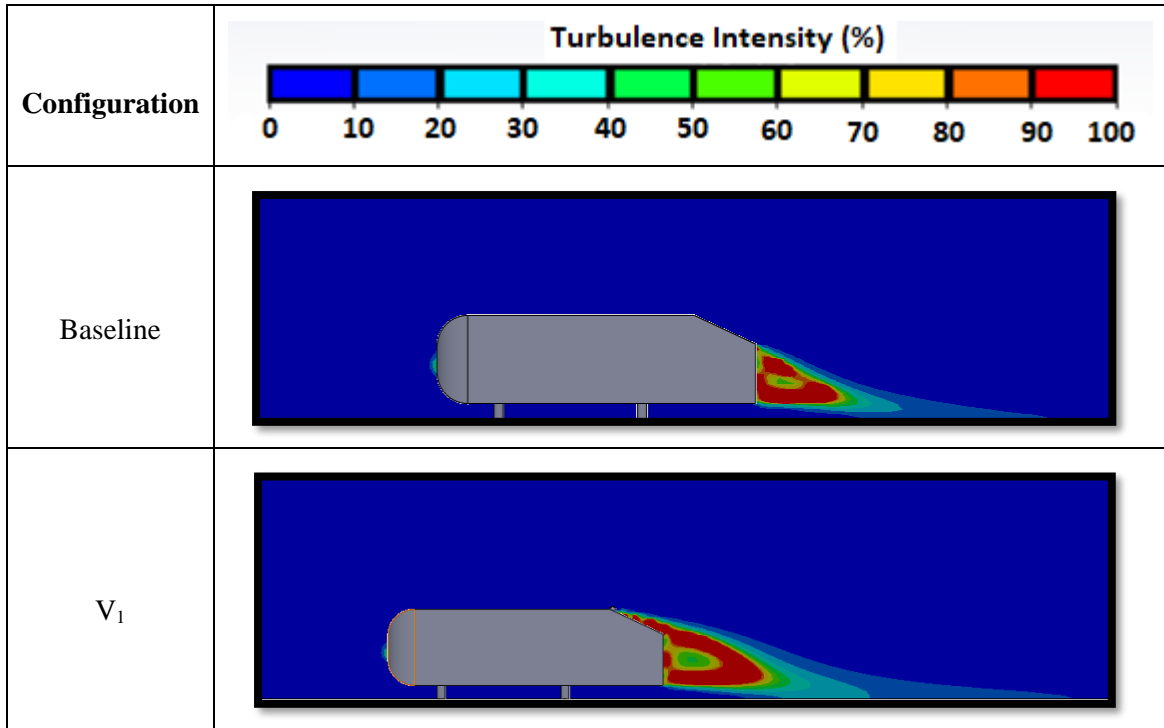
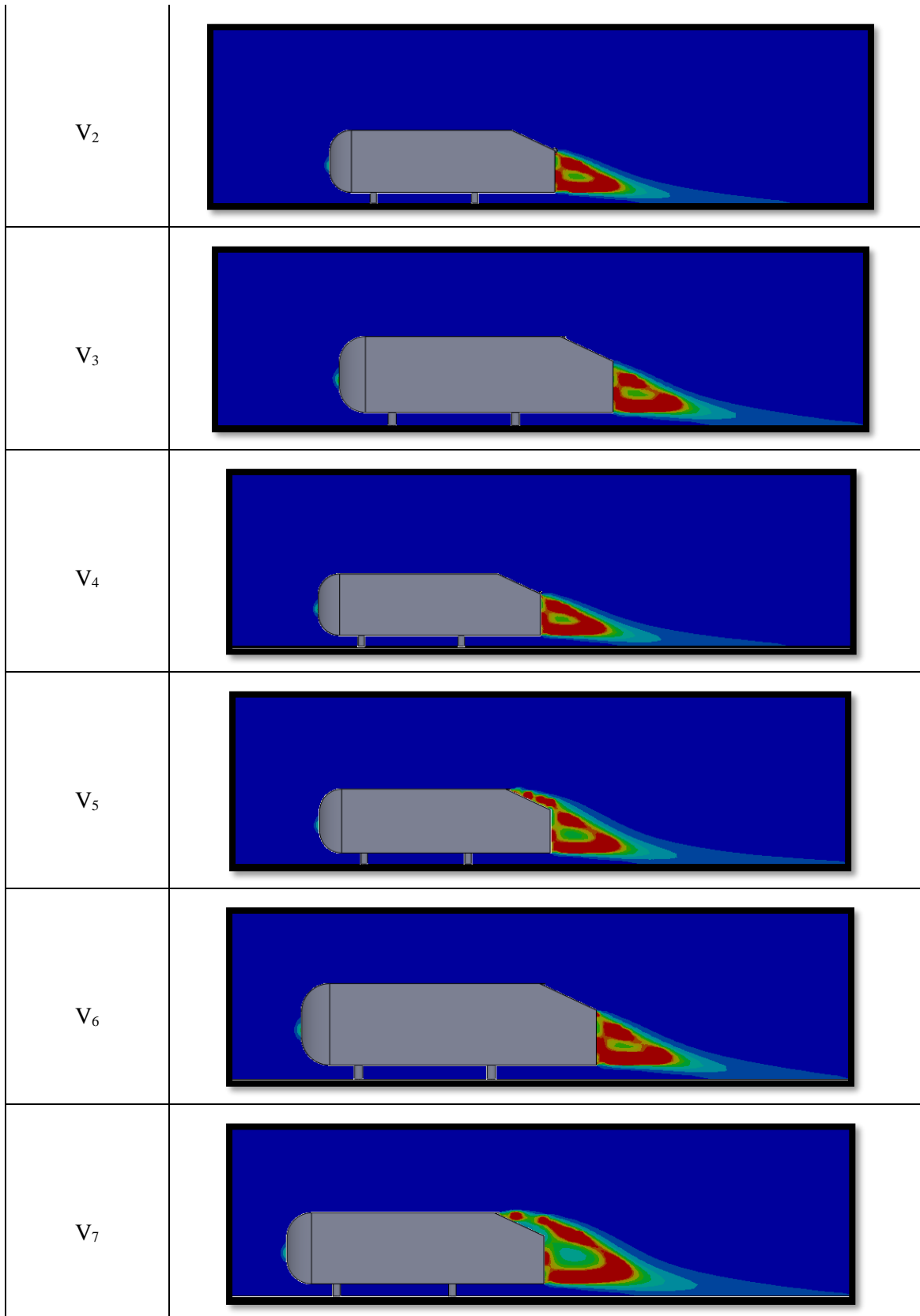


Figure 6. Turbulence intensity distribution for various configurations (Çeşitli konfigürasyonlar için türbülans yoğunluğu dağılımı)



Continuation of Figure 6 (Şekil 6'nın devamı)

3.3. Flow Topologies and Streamline Contours (Akış Topolojileri ve Akım Çizgisi Konturları)

To better clarify the velocity and turbulence intensity contours, the streamlines images of

baseline models belonging to the Ahmed Body presented by current study and the study of Kamacı and Kaya [46] were demonstrated in Figure 7. In particular, as focus on the wake part of Ahmed body for both images, a main recirculation vortex

occurred, indicating that a well harmony appeared at two results under the same conditions.

For all images of current study, the images were focused on the wake region of Ahmed Body to see how the proposed flow controllers affected the region and which type of flow topology occurred. For baseline model in Figure 8, it was clearly seen that there was flow recirculation at the center of wake region. I was most probably occurred due to the flow separation at the slant surface. Moreover, tip vortices occurred at each tip of slant surface, and those flow structures moved along the flow direction by increasing its intensity region. For the flow control configurations, it was clearly understood that the flow structures at the wake changed enormously. Related to the V_1 configuration, the flow was energized much more when the sphere shape flow controller at the front part of slant surface was employed.

Also, circulation region at the near wake bigger than other configurations. Related to the V_2 configuration, the sphere shape flow controller at the rear part of slant surface also affected the flow structure at the wake. However, the size of circulation region at the near wake was less than those occurred configuration of V_1 . Additionally, it was accumulated towards to the rear part of the slant surface, resulting in existing distinguishable two zones. Another observation could be seen that the tip vortices belonging to the baseline and V_2 configurations were relatively regular than those occurred at V_1 configuration. Apart from the

streamline contours, the vector contours were also important and reliable in terms of explaining flow topology of wake and slant region of Ahmed Body as illustrated in Figure 9. As mentioned in study performed by Yang et al. [47], utilizing passive flow controllers on slant surface caused the small vortices to form on that region and those structures suppressed the flow separation of formation of laminar separation bubble, resulting in presence less drag forces at Ahmed Body. V_1 and V_2 configurations clearly pointed out that different velocity regions existed around the Ahmed Body. This inherently ensured the various pressure regions to form at the same regions. It was foreseen that the pressure deficit in those regions clearly indicated the presence of less drag forces for the Ahmed Body.

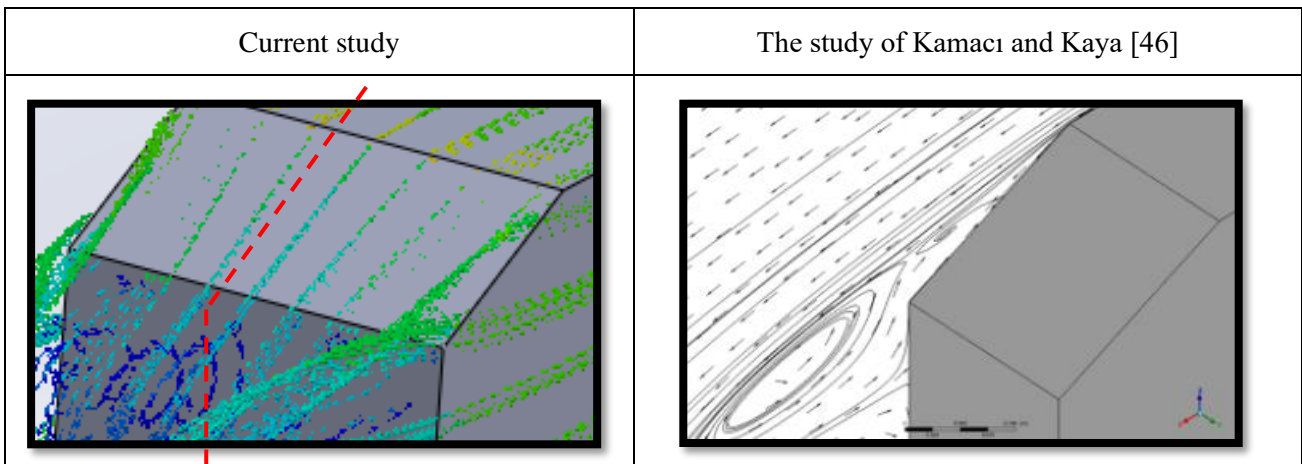


Figure 7. Streamline contours for baseline models at 40 m/s (40 m/s'de temel modeller için akım çizgisi konturları)

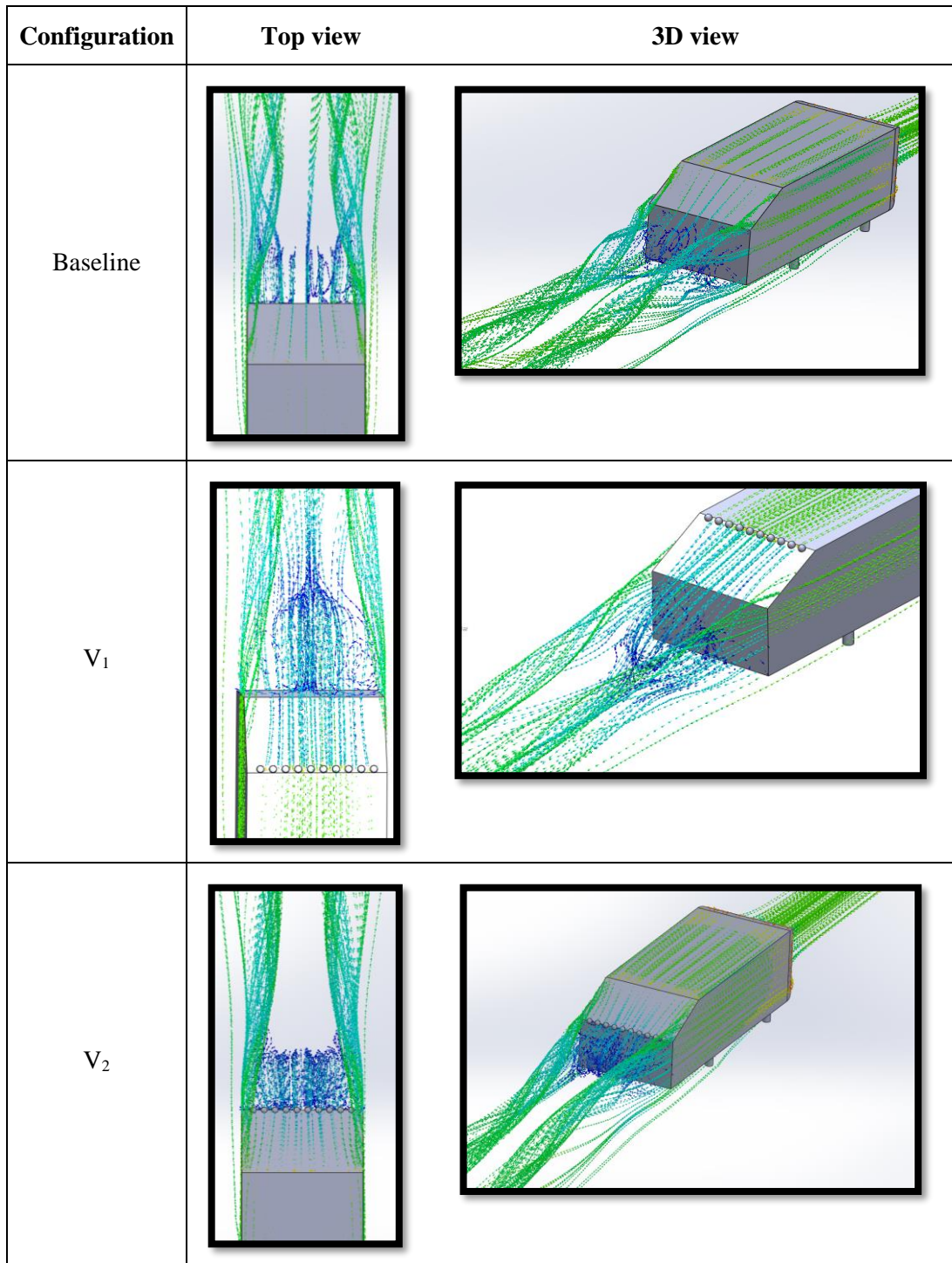


Figure 8. Streamlines for various configurations (Çeşitli konfigürasyonları için akım çizgileri)

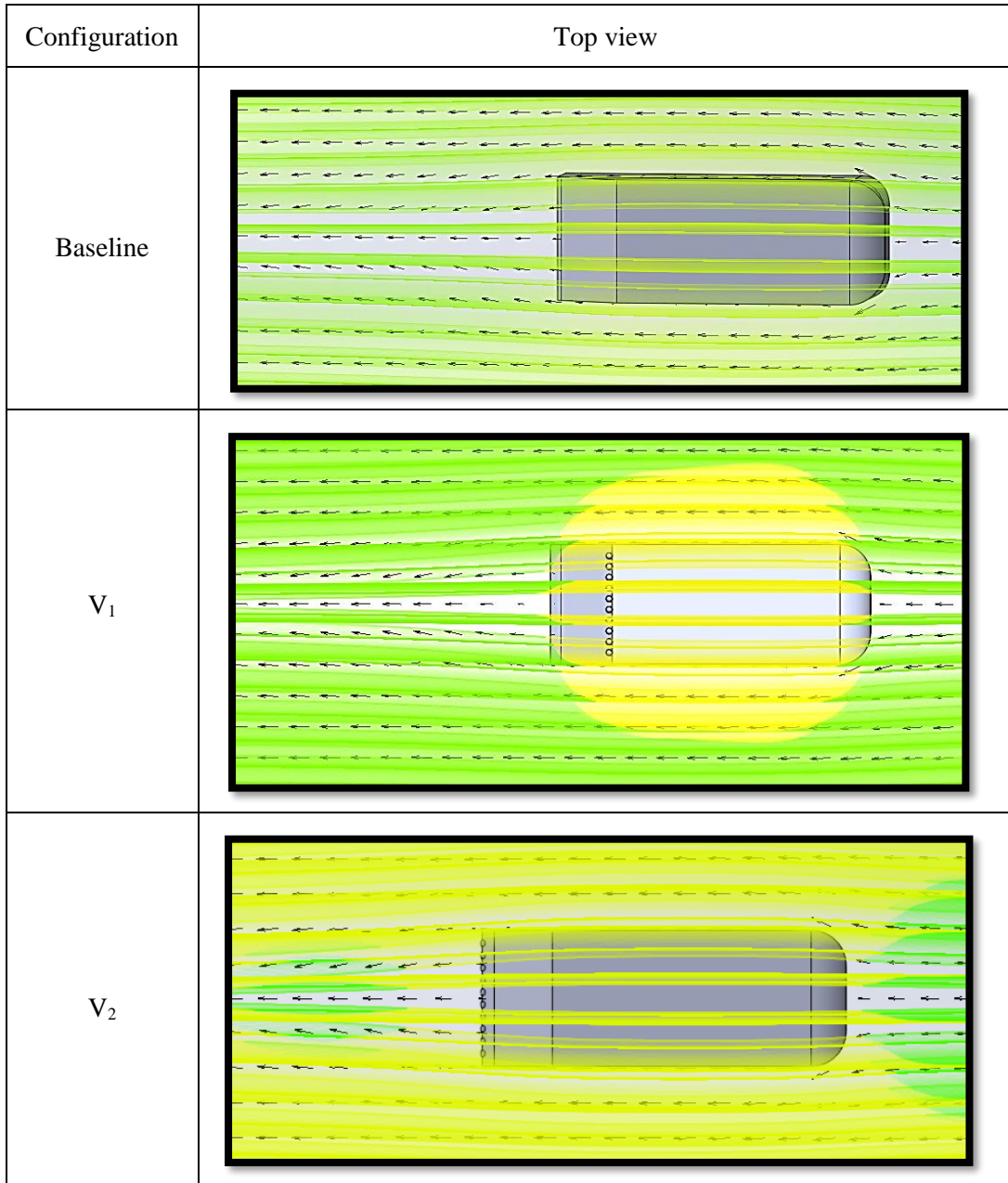


Figure 9. The flow topology of wake and slant region of Ahmed Body (Ahmed Gövdesinin iz ve eğik bölgesinin akış topolojisi)

3.4. Aerodynamic Drag Coefficient (Aerodinamik Sürükleme Katsayısı)

The results of drag coefficients belonging to all configurations at 40 m/s were ensured as illustrated in Figure 10. The different drag coefficient results at the same flow velocity presented by Kamacı & Kaya [46] and Yang et al. [47] were also compiled and put the same figure in terms of comparing the results of current study. The first striking observation from the figure is that all result were close to each other. However, the results obtained from FloEFD were relatively less than those obtained from the ANSYS software. Related to the literature results [46-47], C_D value reduced

enormously when the flow controllers were employed. The same observations hold for the current study since there was reduction at the C_D value with utilizing flow control techniques. Related to the proposed method of the current study, V_2 configuration exhibited well performance in terms of drag reduction when the sphere shape flow control was applied at the rear part of the slant surface of Ahmed Body. Another critical observation could be drawn when focused on the results of current and Yang's study [47]. Utilizing both FloEFD and ANSYS software revealed that the best performance in term of drag reduction at the Ahmed Body was provided when hemispherical shape flow control method (V_4 configuration) was

implemented at the rear part of the slant surface. This also displayed that the result obtained from different software consisted with each other well.

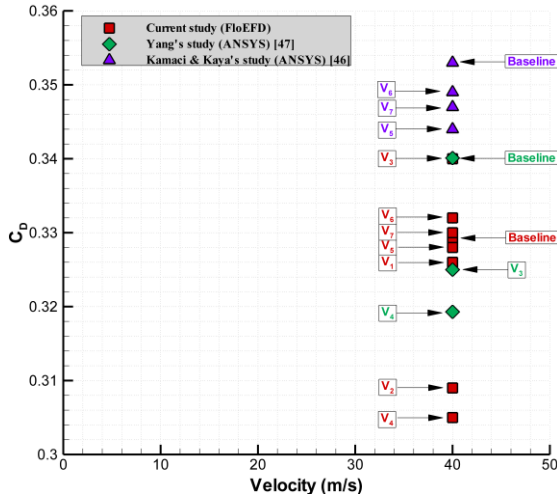


Figure 10. Aerodynamic drag coefficient results from current and literature studies (Güncel ve literatürdeki çalışmalardan elde edilen aerodinamik sürüklenme katsayısı sonuçları)

Apart from the aerodynamic drag coefficient results, their percent change to the baseline model was shown in Figure 11. Contrast to Figure 10, the results of only current and Yang's study [47] were provided since they exhibited better solution in terms of reduction in drag. The observation from this figure clearly highlighted that the reduction in drag occurred more when V_4 configuration with hemispherical shape flow control technique was employed at the rear part of slant surface of Ahmed Body. Moreover, the percent variation in drag of V_4 obtained from the FloEFD software was 7%, whilst this value ensured by ANSYS software was 6%.

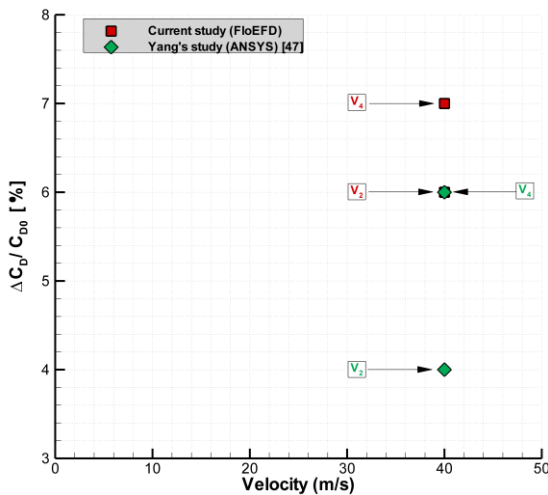


Figure 11. Change in aerodynamic drag coefficient of the Ahmed Body (Ahmed Gövdesinin aerodinamik sürüklenme katsayısındaki değişimi)

4. CONCLUSIONS (SONUÇLAR)

This study numerically investigated the flow topology of slant surface and wake region of Ahmed Body as well as its aerodynamic drag coefficients for uncontrolled and controlled cases at 40 m/s. As flow control mechanisms, sphere – hemispherical shape vortex generators as well as deflector were selected. The current results of baseline and flow control configurations were compared with the previously published numerical results in the literature. The critical findings were as follows:

- Among all configurations, it was seen that V_1 , V_5 and V_7 influenced the flow structures at the slant surface and wake region of Ahmed Body. When especially focused on velocity and turbulent intensity contours, the flow controllers led the flow to have more energy, resulting in existing small vortices. Those flow structures occurred at the front part of slant surface and moved towards to the wake region of Ahmed Body.

- When observed all aerodynamic drag coefficient results, it was clearly proved that the results of the proposed flow control of this study and V_4 configurations exhibited superior performance in reducing drag coefficient compared to the other configurations. The proposed model of this study (V_2 configuration) reduced the drag about 6%.

- Concerning the different numerical solvers, the results obtained from both the FloEFD and ANSYS software were consistent with each other. Additionally, the percent variation in reducing drag obtained from the FloEFD software was higher than compared to those provided by ANSYS.

This study is expected to shed a lot of light on the bluff body and vehicle aerodynamics. Hereby, the vehicles which are greener and consumed lower fuel can be provided by means of those more effective, innovative flow control techniques.

DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS (ETİK STANDARTLARIN BEYANI)

The author of this article declares that the materials and methods they use in their work do not require ethical committee approval and/or legal-specific permission.

Bu makalenin yazarı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

AUTHORS' CONTRIBUTIONS (YAZARLARIN KATKILARI)

Kemal KOCA: He analyzed numerical simulation results and performed the writing process.

Sayısal simülasyon sonuçlarını analiz ederek yazma işlemini gerçekleştirdi.

Mustafa ÖZDEN: He performed the literature study and conducted the numerical simulation in detail.

Literatür çalışmasını gerçekleştirdi ve sayısal simülasyonu detaylı bir şekilde gerçekleştirdi.

CONFLICT OF INTEREST (ÇIKAR ÇATIŞMASI)

There is no conflict of interest in this study.

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

REFERENCES (KAYNAKLAR)

- [1] Ahmed, S. R., Ramm, G., Faltin, G. Some salient features of the time-averaged ground vehicle wake. SAE transactions. 1984; 473-503.
- [2] Morel, T. The effect of base slant on the flow pattern and drag of three-dimensional bodies with blunt ends. In Aerodynamic drag mechanisms of bluff bodies and road vehicles, 1978; 191-226.
- [3] Zigunov, F., Sellappan, P., Alvi, F. Reynolds number and slant angle effects on the flow over a slanted cylinder afterbody. Journal of Fluid Mechanics. 2020; 893: A11.
- [4] Zhang, B. F., Zhou, Y., To, S. Unsteady flow structures around a high-drag Ahmed body. Journal of Fluid Mechanics. 2015; 777: 291-326.
- [5] Grandemange, M., Gohlke, M., Cadot, O. Turbulent wake past a three-dimensional blunt body. Part 1. Global modes and bi-stability. Journal of Fluid Mechanics. 2013; 722: 51-84.
- [6] Genç, M. S., Koca, K., Demir, H., Açikel, H. H. Traditional and new types of passive flow control techniques to pave the way for high maneuverability and low structural weight for UAVs and MAVs. Autonomous Vehicles. 2020; 131-160.
- [7] Bellman, M., Agarwal, R., Naber, J., Chusak, L. Reducing energy consumption of ground vehicles by active flow control. In Energy Sustainability. 2010; 785-793.
- [8] Kourta, A., Leclerc, C. Characterization of synthetic jet actuation with application to Ahmed body wake. Sensors and Actuators A: Physical. 2013; 192: 13-26.
- [9] Joseph, P., Amandolese, X., Edouard, C., Aider, J. L. Flow control using MEMS pulsed micro-jets on the Ahmed body. Experiments in fluids. 2013; 54: 1-12.
- [10] Zhang, B. F., Liu, K., Zhou, Y., To, S., Tu, J. Y. Active drag reduction of a high-drag Ahmed body based on steady blowing. Journal of Fluid Mechanics. 2018; 856: 351-396.
- [11] Brunn, A., Nitsche, W. Active control of turbulent separated flows over slanted surfaces. International Journal of Heat and Fluid Flow. 2006; 27(5): 748-755.
- [12] Fourrié, G., Keirsbulck, L., Labraga, L., Gilliéron, P. Bluff-body drag reduction using a deflector. Experiments in Fluids. 2011; 50: 385-395.
- [13] Mariotti, A., Buresti, G., Gaggini, G., Salvetti, M. V. (2017). Separation control and drag reduction for boat-tailed axisymmetric bodies through contoured transverse grooves. Journal of Fluid Mechanics. 2017; 832: 514-549.
- [14] Aider, J. L., Beaudoin, J. F., Wesfreid, J. E. Drag and lift reduction of a 3D bluff-body using active vortex generators. Experiments in fluids. 2010; 48: 771-789.
- [15] Rossitto, G., Sicot, C., Ferrand, V., Borée, J., Harambat, F. Influence of afterbody rounding on the pressure distribution over a fastback vehicle. Experiments in Fluids. 2016; 57: 1-12.
- [16] Evrard, A., Cadot, O., Herbert, V., Ricot, D., Vigneron, R., Détery, J. Fluid force and symmetry breaking modes of a 3D bluff body with a base cavity. Journal of Fluids and Structures. 2016; 61: 99-114.
- [17] Minguez, M., Pasquetti, R., Serre, E. High-order LES of the flow over a simplified car model: On the influence of the Reynolds number. European Journal of Computational Mechanics/Revue Européenne de Mécanique Numérique. 2009; 18(7-8): 627-646.
- [18] Kang, N., Essel, E. E., Roussinova, V., Balachandar, R. Effects of approach flow conditions on the unsteady three-dimensional wake structure of a square-back Ahmed body. Physical Review Fluids. 2021; 6(3): 034613.
- [19] Tunay, T., Firat, E., Sahin, B. Experimental investigation of the flow around a simplified ground vehicle under effects of the steady crosswind. International Journal of Heat and Fluid Flow. 2018; 71: 137-152.
- [20] Venning, J., McQueen, T., Jacono, D. L., Burton, D., Thompson, M., Sheridan, J. Aspect ratio and the dynamic wake of the Ahmed body. Experimental Thermal and Fluid Science. 2022; 130: 110457.

- [21] Essel, E., Das, S., Balachandar, R. Effects of rear angle on the turbulent wake flow between two in-line Ahmed bodies. *Atmosphere*. 2020; 11(4): 328.
- [22] Tunay, T., Yaniktepe, B., Sahin, B. Computational and experimental investigations of the vortical flow structures in the near wake region downstream of the Ahmed vehicle model. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2016; 159: 48-64.
- [23] Bruneau, C. H., Mortazavi, I., Gilliéron, P. Passive control around the two-dimensional square back Ahmed body using porous devices. *Journal of Fluid Engineering*. 2008; 130: 1-12.
- [24] Tunay, T., Sahin, B., Akilli, H. Experimental and numerical studies of the flow around the Ahmed body. *Wind and Structures*. 2013; 17(5): 515-535.
- [25] Podvin, B., Pellerin, S., Fraigneau, Y., Evrard, A., Cadot, O. Proper orthogonal decomposition analysis and modelling of the wake deviation behind a squareback Ahmed body. *Physical Review Fluids*. 2020; 5(6): 064612.
- [26] Cadot, O., Evrard, A., Pastur, L. Imperfect supercritical bifurcation in a three-dimensional turbulent wake. *Physical Review E*. 2015; 91(6): 063005.
- [27] Tunay, T., Sahin, B., Ozbolat, V. Effects of rear slant angles on the flow characteristics of Ahmed body. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2014; 57: 165-176.
- [28] Grandemange, M., Cadot, O., Gohlke, M. Reflectional symmetry breaking of the separated flow over three-dimensional bluff bodies. *Physical review E*. 2012; 86(3): 035302.
- [29] Demir, H., Özden, M., Genç, M. S., Çağdaş, M. Numerical investigation of flow on NACA4412 aerofoil with different aspect ratios. In *EPJ Web of Conferences*. 2016; 114: 02016.
- [30] Özden, M., Genç, M. S., Koca, K. Investigation of the effect of hidden vortex generator-flap integrated mechanism revealed in low velocities on wind turbine blade flow. *Energy Conversion and Management*. 2023; 287: 117107.
- [31] Özden, M., Koca, K. Öndeki Aracın Akışına Maruz Kalan Otobüsün Üzerinde Oluşan Aerodinamik Etkinin Sayısal Olarak İncelenmesi. *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fen Bilimleri Dergisi*. 2023; 39(1): 116-125.
- [32] Özden, M., Genç, M. S., Koca, K. Passive Flow Control Application Using Single and Double Vortex Generator on S809 Wind Turbine Airfoil. *Energies*. 2023; 16(14): 5339.
- [33] Genc, M. S., Koca, K., Acikel, H. H. Investigation of pre-stall flow control on wind turbine blade airfoil using roughness element. *Energy*. 2019; 176: 320-334.
- [34] Pujals, G., Depardon, S., Cossu, C. Drag reduction of a 3D bluff body using coherent streamwise streaks. *Experiments in fluids*. 2010; 49: 1085-1094.
- [35] User guide of FloEFD, Siemens Digital Industries Software, SIEMENS, <https://plm.sw.siemens.com/en-US/simcenter/fluids-thermal-simulation/floefd/>
- [36] Karasu, İ., Özden, M., Genç, M. S. Performance assessment of transition models for three-dimensional flow over NACA4412 wings at low Reynolds numbers. *Journal of Fluids Engineering*. 2018; 140(12): 121102.
- [37] Koca, K., Genc, M. S., Veerasamy, D., Özden, M. Experimental flow control investigation over suction surface of turbine blade with local surface passive oscillation. *Ocean Engineering*. 2022; 266: 113024.
- [38] Genç, M. S., Özkan, G., Özden, M., Kırış, M. S., Yıldız, R. Interaction of tip vortex and laminar separation bubble over wings with different aspect ratios under low Reynolds numbers. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*. 2018; 232(22): 4019-4037.
- [39] Koca, K., Genç, M. S., Ertürk, S. Impact of local flexible membrane on power efficiency stability at wind turbine blade. *Renewable Energy*. 2022; 197: 1163-1173.
- [40] H Demir, MS Genç, An experimental investigation of laminar separation bubble formation on flexible membrane wing, *European Journal of Mechanics-B/Fluids*. 2017; 65: 326-338.
- [41] Genç, M. S., Koca, K., Açikel, H. H., Özkan, G., Kırış, M. S., Yıldız, R. Flow characteristics over NACA4412 airfoil at low Reynolds number. In *EPJ web of conferences*. 2016; 114: 02029
- [42] Karasu, I., Genc, M. S., Acikel, H. H., Akpolat, M. T. An experimental study on laminar separation bubble and transition over an aerofoil at low Reynolds number. In *30th AIAA applied aerodynamics conference*. 2012; 3030.
- [43] Koca, K., Genç, M. S., Özkan, R. Mapping of laminar separation bubble and bubble-induced vibrations over a turbine blade at low Reynolds numbers. *Ocean Engineering*. 2021; 239: 109867.
- [44] Koca, K., Genç, M. S., Açikel, H. H., Çağdaş, M., Bodur, T. M. Identification of flow phenomena over NACA 4412 wind turbine

airfoil at low Reynolds numbers and role of laminar separation bubble on flow evolution. *Energy*. 2018; 144: 750-764.

- [45] Koca, K., Genç, M.S., Açıkkel, H.H. Rüzgar Türbini Kanadı Üzerindeki Yüzey Pürüzlülüğü Etkisinin Deneysel İncelenmesi. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*. 2016; 31(ÖS2): 127-134.
- [46] Kamacı, C., Kaya, K. Numerical Investigation of Aerodynamic Properties of Ahmed Body for Different Rear Slanted Surface Configurations. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*. 2021; 28: 469-475.
- [47] Yang, X., Hu, Y., Gong, Z., Jian, J., Liu, Z. Numerical study of combined drag reduction bases on vortex generators and riblets for the ahmed body using IDDES methodology. *Journal of Applied Fluid Mechanics*. 2021; 15(1): 193-207.

Ticari NAFİLean Polipropilen/Haşhaş (Papaver Somniferum) Sapı Polimer Kompozitinin Mekanik ve Morfolojik Özelliklerine MAPP'nin Etkisi

Gizem KARADİREK¹  Münir TAŞDEMİR^{1*} 

¹Marmara Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, 34840 Maltepe İSTANBUL

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 28/09/2023
Düzeltilme: 27/11/2023
Kabul: 29/11/2023

Anahtar Kelimeler

Polipropilen
Kenevir
Haşhaş sapı
Mekanik özellikler
Kompozit malzeme

Article Info

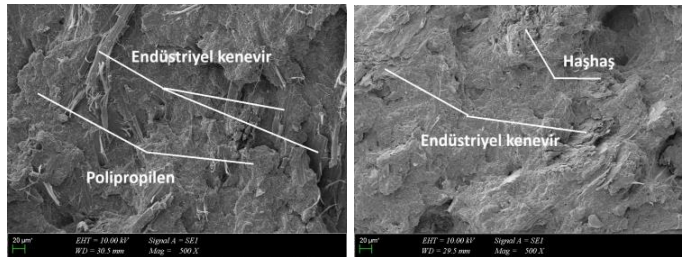
Research article
Received: 28/09/2023
Revision: 27/11/2023
Accepted: 29/11/2023

Keywords

Polypropylene
Hemp
Poppy Stalk
Mechanical properties
Composite material

Grafik Özet (Graphical/Tabular Abstract)

Bu çalışmada polipropilen/haşhaş sapı polimer kompoziti maleik anhidrit aşıllı polipropilen (MAPP) ile uyumlaştırılmaya çalışılmıştır. / In this study, an attempt was made to compatibilization the polypropylene/poppy stalk polymer composite with maleic anhydride grafted polypropylene (MAPP).



Şekil A: PP/HH/MAPP polimer kompozitinin mikroyapı fotoğrafı / Figure A: Microstructure photograph of PP/HH/MAPP polymer composite

Önemli noktalar (Highlights)

- Polimer kompozit / Polymer Composite
- Atık değerlendirme / Waste Recycling
- Uyumlaştırma / Compatibilization

Amaç (Aim): Bu çalışmada atık olan haşhaş saplarının polimerlerde dolgu malzemesi olarak değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Ayrıca mekanik ve morfolojik özelliklerine değişik oranlarda maleik anhidrit aşıllı polipropilenin etkisi belirlenmiştir. / In this study, it was aimed to use waste poppy stalks as a filling material in polymers. Additionally, the effect of maleic anhydride grafted polypropylene at different rates on its mechanical and morphological properties was determined.

Özgünlük (Originality): Ticari olarak üretilen %20 kenevir katkılı polipropilen içerisine atık olan kenevir bitkisinin sapları öğütülerek katılmıştır. Polipropilen ve haşhaş partikülleri arasındaki uyumluluğu sağlamak için kompozitin içerisine değişik oranlarda MAPP eklenmiştir. / Waste hemp plant stems were ground and added into commercially produced 20% hemp-containing polypropylene. MAPP was added to the composite at different rates to ensure compatibility between polypropylene and poppy particles.

Bulgular (Results): PP/HH/MAPP polimer kompozitinde sadece %20 oranında haşhaş ilavesiyle elastiklik modülü, çekme mukavemeti, kopma mukavemeti ve sertlik değerlerinin yükseldiği buna karşılık kopma uzama ve darbe mukavemeti değerlerinin ise düştüğü tespit edilmiştir. / It was determined that with the addition of only 20% poppy in the PP/HH/MAPP polymer composite, the elastic modulus, tensile strength, breaking strength and hardness values increased, while the breaking elongation and impact strength values decreased.

Sonuç (Conclusion): Selülozik bazlı ve fazla uzama davranışı göstermeyen haşhaş saplarının ilavesiyle % uzama değeri düşmüştür. Diğer taraftan kenevir ve haşhaş enerjisi fazla absorbe edemediğinden darbe mukavemeti değerinde de düşüşe sebebiyet vermiştir. Kompozitin içerisine MAPP ilavesiyle değerlerde ciddi değişimler gözlemlenmiştir. / The % elongation value decreased with the addition of poppy stalks, which are cellosic-based and do not show much elongation behavior. On the other hand, since hemp and poppy cannot absorb much energy, it has caused a decrease in impact strength value. Significant changes in the values were observed with the addition of MAPP into the composite.



Ticari NAFILean Polipropilen/Haşhaş (Papaver Somniferum) Sapı Polimer Kompozitinin Mekanik ve Morfolojik Özelliklerine MAPP'nin Etkisi

Gizem KARADİREK¹ Münir TAŞDEMİR^{1*}

¹Marmara Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, 34840 Maltepe İSTANBUL

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 28/09/2023
Dizeltme: 27/11/2023
Kabul: 29/11/2023

Anahtar Kelimeler

Polipropilen,
Kenevir,
Haşhaş sapı,
Mekanik özellikler,
Kompozit malzeme

Öz

Bu çalışmada; NAFILean-PF2 555 (%20 kenevir katkılı PP) ticari ismi ile üretilen polipropilene Afyonkarahisar/Sinanpaşa ilçesinden temin edilen haşhaş sapları %20 oranında katılmıştır. Uyumluluk maddesi olarak maleik anhidrit aşılı polipropilen (MAPP) %5-10 ve 15 oranlarında katılarak çift vidalı ekstruderde karıştırılmış ve granül halinde üretilmiştir. Mekanik ve morfolojik özelliklerine değişik oranlarda MAPP ilavesinin etkisi araştırılmıştır. Ekstrüzyon makinesinde elde edilen granüller kurutulmuş ve enjeksiyon makinesinde standartlara uygun şekilde test numuneleri basılmıştır. Elde edilen polimer kompozitinin mekanik değerlerinin belirlenmesi için elastiklik modülü, çekme mukavemeti, kopma mukavemeti, kopma uzaması, darbe mukavemeti ve sertlik testleri yapılmıştır. Ayrıca kenevir ve haşhaş saplarının dağılımlarını belirlemek için taramalı elektron mikroskopisi (SEM) ile fotoğrafları çekilmiştir. Analizler sonucunda %20 kenevir katkılı PP (NAFILean-PF2 555) içerisinde haşhaş ve MAPP ilavesiyle; elastiklik modülü, çekme mukavemeti, kopma mukavemeti, kopma uzaması, darbe mukavemeti ve sertlik değerlerinin nasıl değiştiği belirlenmiştir. SEM incelemesi sonucunda kenevir ve haşhaş partiküllerinin homojen dağıldığı tespit edilmiştir

Effect of MAPP on Mechanical and Morphological Properties of Commercial NAFILean Polypropylene/Poppy (papaver somniferum) Stalks Polymer Composite

Article Info

Research article
Received: 28/09/2023
Revision: 27/11/2023
Accepted: 29/11/2023

Keywords

Polypropylene,
Hemp,
Poppy stalk,
Mechanical properties,
Composite material

Abstract

In this study; poppy stalks collected from the Afyonkarahisar/Sinanpaşa district were added to the polypropylene produced with the trade name NAFILean-PF2 555 (20% hemp added PP) at a rate of 20%. Maleic anhydride grafted polypropylene (MAPP), which was added as a compatibility agent, was added at 5-10 and 15% ratios, mixed in a twin screw extruder, and produced as granules. The effect of the addition of MAPP at different rates on its mechanical and morphological properties was investigated. The granules obtained in the extruder were dried and the test samples were molded in the injection machine in accordance with the standards. In order to determine the mechanical values of the obtained polymer composite, modulus of elasticity, tensile strength, breaking strength, elongation at break, impact strength, and hardness tests were carried out. In addition, photographs were taken with scanning electron microscopy (SEM) to determine the distribution of hemp and poppy stems. As a result of the analysis, with the addition of poppy stalks and MAPP in 20% hemp-added PP (NAFILean-PF2 555); It was determined how the modulus of elasticity, tensile strength, breaking strength, elongation at break, impact strength and hardness values changed. As a result of SEM examination, it was determined that hemp and poppy particles were homogeneously dispersed.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Farklı özelliklere sahip iki veya daha fazla malzeme bir araya getirildiğinde oluşan malzeme kompozit olarak adlandırılır [1]. Sentetik lifler yenilenebilir olmayan ve pahalı liflerdir. Kompozit malzemeleri

oluşturan maddeler birbiri içerisinde çözünmeyen ve yeni bir bileşik oluşturmayan malzemelerdir. Temelde iki bileşen vardır. Bunlar matris ve takviye malzemesidir. Matrisin öncelikli görevi takviye malzemesini belirli bir formda tutmak ve onları mekanik ve çevresel hasarlardan korumaktır.

Takviye malzemesinin görevi ise mukavemet ve sertlik gibi mekanik özelliklerin artırılmasıdır [2]. Mevcut endüstriyel uygulamada, sentetik elyaflar (cam, bazalt, karbon vb.) yerine ekolojik doğal dolgu maddelerinin kullanımı son yıllarda oldukça revaçtadır [3-6]. Keten, pamuk, kenevir ve ahşap türü doğal lignoselülozik lifler yenilenebilir, tamamen veya kısmen geri dönüştürülebilir ve biyolojik olarak parçalanabilir yapıdadır. Elyaflar arasında doğal elyaflar takviye malzemesi olarak büyük önem kazanmıştır. Artan küresel enerji krizi ve ekolojik riskler nedeniyle, doğal elyafların polimerik malzemelere ilavesi ile kompozit malzeme oluşturmak araştırmacıların ilgisini çekmektedir. Günümüzde bu doğal selülozik yapıdaki malzemeler polimerler ile karıştırılarak çevre dostu, hafif, sürdürülebilir ve yüksek dayanımlı kompozitler elde edilmektedir. Bunlara ek olarak maliyetlerinin düşük olması ve kolay üretilmeleri de kullanım sebeplerini artırmaktadır [7-12]. Tarımsal atıklar ile kompozit levha üretimi son zamanlarda çeşitli uygulamalarda kullanım alanı bulmuştur. Ayçiçeği bitkisinin sapı, çeşitli tahıl atıkları, çay atıkları, fındık, badem ve ceviz gibi kabuklar vb levha uygulamalarında kullanılmaktadır. Haşhaş bitkisi Türkiye’de üretilmektedir. Bu bitkinin kapsülleri işlendikten sonra oluşan atıkların tekrar kullanımı üzerine yeterli araştırmalar yapılmamıştır [13]. Haşhaş (*papaver somniferum*) L.,Rhoadales grubunun Papaveraceae ailesindedir. Bu aile de Papaver cinsi içerisinde yer almaktadır. Latince Papaver gelincik anlamına gelmektedir. Somniferum ise rüya görmek anlamına gelmektedir. Haşhaş; tarlalarda, kırlarda kendiliğinden yetişen gelincikle akrabadır [14]. Haşhaş çeşitli yetiştirme tekniklerine göre boyları 30-180 cm arası olabilmektedir. Haşhaş bitkisinin tüysüz sapı ve dalları vardır. Bu düz saplar gri-yeşil bir mumsu tabakayla kaplıdır. Aşağıdaki şekilde haşhaş bitkisinin fotoğrafı verilmiştir.



Şekil 1. Haşhaş bitkisi (poppy plant) [14]

Bu çalışmada; NAFILean-PF2 555 (%20 kenevir katkı PP) ticari ismi ile üretilen polipropilene Afyonkarahisar/Sinanpaşa ilçesinden toplanılan haşhaş sapsapları %20 oranında katılmıştır. Uyumluluk maddesi olarak MAPP ise %5-10 ve 15 oranlarında katılarak çift vidalı ekstruderde karıştırılmış ve granül halinde üretilmiştir. Mekanik ve morfolojik özelliklerine değişik oranlarda maleik anhidrit aşılı polipropilen ilavesinin etkisi araştırılmıştır.

2. MATERYAL VE METOD (MATERIALS AND METHODS)

2.1. Kullanılan Malzemeler (Used Materials)

Polipropilen içerisine farklı oranlarda katılan haşhaş ve MAPP ile beş farklı grup üretilmiştir. Üretilen PP/HH/MAPP polimer kompozitinin karışım oranları Tablo 1’ de verilmiştir. Bu çalışmada kullanılan polipropilen (PP) Automotive Performance Materials (Dijon/Fransa) firmasının NAFILean-PF2 555 (%20 kenevir katkı) ticari koduyla ürettiği üründür. PP’nin erime akış indeksi (190°C/5 kg) 11,6 g/10dk’dır. Yoğunluğu 0,98 g/cm³, elastiklik modül değeri 2650 MPa ve Izod darbe mukavemeti değeri ise 7,5 kJ/m²’dir. Haşhaş partiküllerinin polipropilen matrise yapışmasını sağlamak amacıyla katılan maleik anhidrit aşılı polipropilenin ticari ismi Bondyram 1001 CN’dir. Bu ürün Polyram Plastic Industries LTD şirketinden temin edilmiştir. Yoğunluğu 0,90 g/cm³, MFI değeri 100 g/10 dak (190 °C-2,16kg) ve erime sıcaklığı ise 160°C’dir. Bu çalışmada kullanılan haşhaş sapsapları Afyonkarahisar Sinanpaşa ilçesinden temin edilmiştir. Atık olan bu ürünün yeniden değerlendirilmesi amaçlanmıştır.

Tablo 1. PP/HH/MAPP polimer kompozitinin ağırlıkça karışım oranları (Mixing ratios by weight of PP/HH/MAPP polymer composite)

Gruplar	PP (%) (%20 hemp)	Haşhaş (papaver somniferum) sapı (%)	MAPP (%)
1	100	-	-
2	80	20	-
3	75	20	5
4	70	20	10
5	65	20	15

2.2. Numune Hazırlama (Sample Preparation)

Haşhaş sapları önce Şekil 1’de verilen markasız bir kırıcıda kırılarak boyutları küçültülmüştür. Daha sonra Akyol marka öğütücüde ince olarak öğütülmüştür. Polipropilen, haşhaş sapı ve MAPP elektro. mag M1071P tipi kurutma fırınında 105°C’de 24 saat süresince kurutma işlemine tabi tutulmuştur. Daha sonra tüm ürünler Devotrans marka V-Tipi karıştırıcıda 15 dakika boyunca karıştırılmış ve çift vidalı ekstrüderde 30-35 bar basınç altında, 30 dev/dak vida dönüş hızında ve 180-210 °C arasındaki sıcaklıklarda karıştırılmıştır. Karışım sonrasında 105 °C’ de yine 24 saat boyunca kurutma fırınında kurutulmuştur. Enjeksiyon makinesinde test numuneleri 180-210 °C sıcaklık, 120-130 bar basınç ve 30 dev/dk devirde test numuneleri basılmıştır. Aşağıda Şekil 1’de haşhaş saplarının öğütme aşamaları, Şekil 2’de PP/HH/MAPP polimer kompozitinin numune kalıplama aşamaları ve Tablo 2’de ise PP/HH/MAPP polimer kompozitinin kalıplama parametreleri verilmiştir.



Haşhaş sapları (Poppy stalks) Kırma cihazı (Crushing device) Kırılmış ürün (Crushed product)



Öğütme cihazı (Grinding device) Öğütülmüş ürün (Milled product)

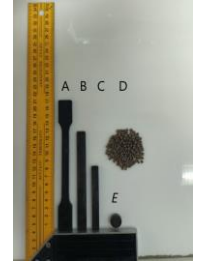
Şekil 1. Haşhaş saplarının öğütülme aşamaları (Grinding stages of poppy stalks)



Ürünler (Products)

Kurutma (Drying)

Enjeksiyon (Injection)



Enjeksiyon (Injection)

Test numuneleri* (Test samples)

*Test numune örnekleri (A; Çekme testi numunesi, B; Eğme testi numunesi, C; Çentik darbe testi numunesi, D; MFI testi numunesi, E; Nem, aşınma testleri numunesi) Test sample samples (A; Tensile test sample, B; Bending test sample, C; Notch impact test sample, D; MFI test sample, E; Moisture, wear test sample)

Şekil 2. PP/HH/MAPP polimer kompozitinin numune hazırlama aşamaları (Sample preparation stages of PP/HH/MAPP polymer composite)

Tablo 2. PP/HH/MAPP polimer kompozitinin kalıplama parametreleri (Molding parameters of PP/HH/MAPP polymer composite)

İşlem	Ekstrüzyon	Enjeksiyon
Sıcaklık (°C)	180-210	180-210
Basınç (bar)	50-55	700-750
Kalıpta tutma süresi (sn)	-	15
Vida hızı (dev/dk)	65-70	-
Kalıp sıcaklığı (°C)	-	35-40

2.3 Test Yöntemleri (Test Methods)

Bu çalışmada değerlerin belirlenmesi için yapılan testlerde beş adet numune kullanılmış ve ortalamaları verilmiştir. Zwick Z010 marka çekme test makinesi kullanılarak çekme testleri yapılmıştır. Bu test ASTM D638 standartlarına göre 50 mm/dk çekme hızında gerçekleştirilmiştir. Çentikli Izod darbe testleri Zwick marka darbe test cihazı ile ASTM D256 yöntemine göre oda sıcaklığında yapılmıştır. Sertlik testi Zwick sertlik

ölçüm cihazı ile ASTM D2240 yöntemine göre yapılmıştır. Darbe test numunelerinin kırık yüzeyleri Quorum sc 7620 marka kaplama cihazında altın/paladyum alaşımı ile kaplanmıştır. Kaplama süresi 180 sn ve uygulanan elektrik akımı ise 20 mA'dır. Daha sonra numuneler 10 kV altında Zeiss EVO MA 10 marka SEM ile incelenmiştir. Bu çalışmada kullanılan test cihazları Şekil 3'de verilmiştir.



Çekme cihazı
(Tensile device)

Darbe cihazı
(Impact device)

Sertlik cihazı
(Hardness device)



Kaplama cihazı
(Coating device)

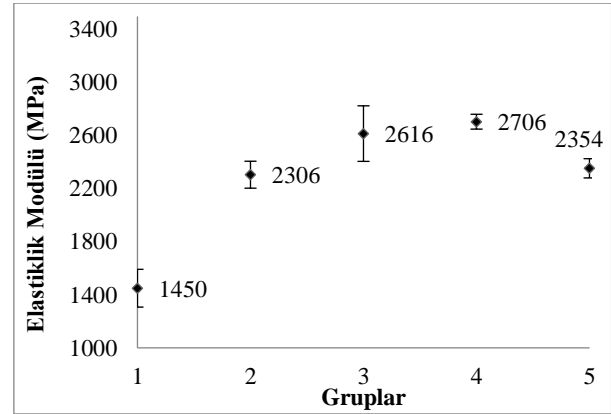
SEM
(SEM)

Şekil 3. PP/HH/MAPP polimer kompozitinin mekanik ve morfolojik özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan cihazlar (Devices used to determine the mechanical and morphological properties of PP/HH/MAPP polymer composite)

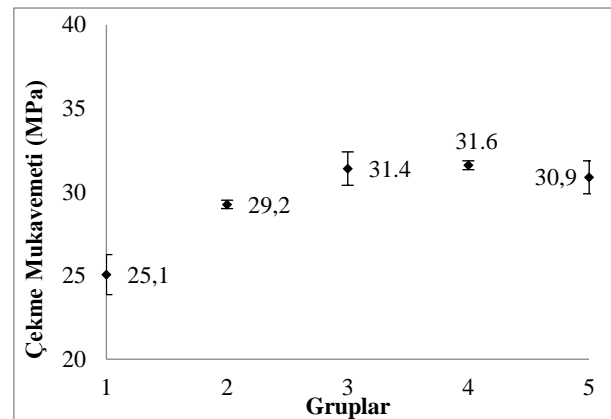
3. BULGULAR (RESULTS)

%20 kenevir katkılı Polipropilen içerisine haşhaş sapı ve maleik anhidrid aşıllı polipropilen ilavesi ile oluşturulan polimer kompozitine uygulanan çekme testi sonucu elde edilen elastiklik modülü değeri Şekil 4-A'da verilmiştir. Grafik incelendiğinde polipropilenin elastiklik modül değerinin 1450 MPa olduğu görülmektedir. Kompozit içerisine %20 haşhaş sapı ilavesi ile bu değer 2306 MPa'ya çıktığı görülmektedir. Kompozit içerisine %20 haşhaş sapı ve %5 MAPP ilavesinde değerin 2616 MPa'ya çıktığı ve %10 MAPP ilavesinde ise 2706 MPa'ya çıktığı görülmektedir ki bu değer en yüksek elastiklik modül değeridir. Polipropilenin elastiklik modül değerini bu grup ile kıyasladığımızda % 87 oranında artış tespit edilmiştir. %15 MAPP ilavesinde ise değer 2354 MPa'ya düşmüştür. Zilan Teke ve arkadaşlarının yapmış oldukları bir çalışmada da benzer sonuç bulunmuştur.

Polipropilen içerisine kattıkları karbonize edilmiş ve edilmemiş selülozik bazlı portakal kabuğu tozlarının oranı arttıkça elastiklik modül değerinin de arttığını belirlemişlerdir [15]. Bir başka çalışmada Nadir Ayrılmış [16] ve arkadaşları polipropilen içerisine kattıkları kayın ağacı toz oranının artmasıyla elastiklik modül değerinin de arttığını rapor etmişlerdir. Şekil 4-B'ye bakıldığında polipropilen içerisine haşhaş sapı ve maleik anhidrid aşıllı polipropilen katılmasıyla elde edilen çekme mukavemeti değeri görülmektedir. Grafik incelendiğinde polipropilenin çekme mukavemeti değerinin 25,1 MPa olduğu görülmektedir. Kompozit içerisine %20 haşhaş sapı katılmasıyla değerin 29,2 MPa'ya çıktığı görülmektedir. Kompozit içerisine %20 haşhaş sapı ve %5 MAPP ilavesinde değerin 31,4 MPa'ya çıktığı ve %10 MAPP ilavesinde ise 31,6 MPa'ya çıktığı görülmektedir ki bu değer de en yüksek çekme mukavemeti değeridir. Polipropilenin çekme mukavemeti değerini bu grup ile kıyasladığımızda % 26 oranında artış tespit edilmiştir. %15 MAPP ilavesinde ise çekme mukavemeti 30,9 MPa'ya düşmüştür.

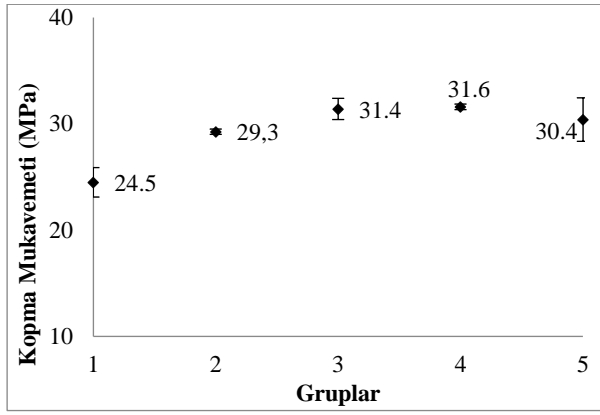


A

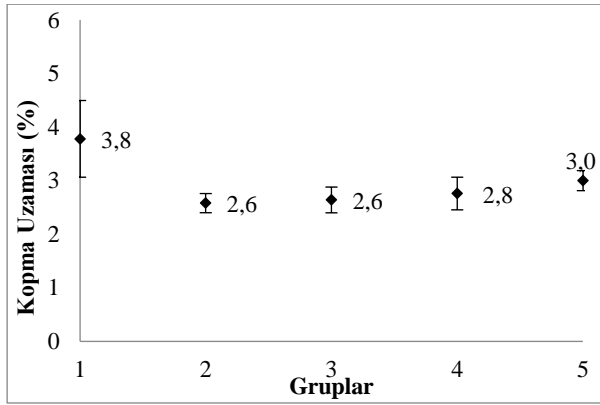


B

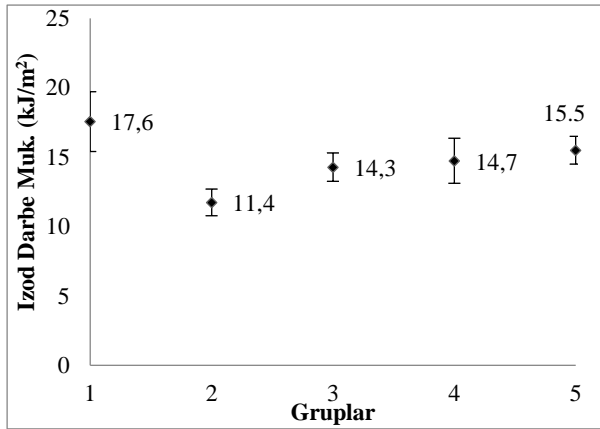
Şekil 4. PP/HH/MAPP polimer kompozitinin mekanik özelliklerinin grafiksel gösterimi (Graphical representation of mechanical properties of PP/HH/MAPP polymer composite)



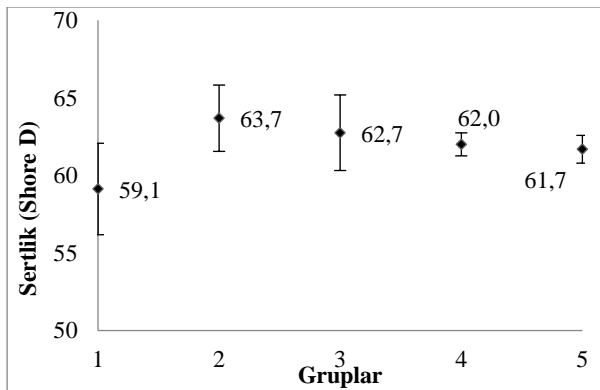
C



D



E

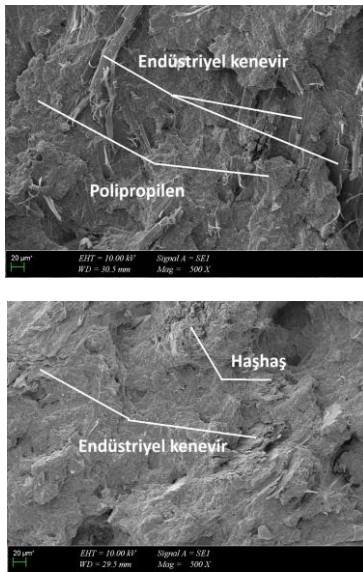


F

Şekil 4. (devamı)

Elif Ulutaş ve arkadaşları polipropilen içerisine kattıkları selulozik bazlı pirinç kabuklarının oranının artışıyla çekme mukavemeti değerinin de arttığını tespit etmişlerdir [17]. Şekil 4-C'ye bakıldığında polipropilen içerisine haşhaş sapı ve MAPP ilavesiyle elde edilen kopma mukavemeti değeri görülmektedir. Grafik incelendiğinde polipropilenin kopma mukavemeti değerinin 24,5 MPa olduğu görülmektedir. Kompozit içerisine %20 haşhaş sapı katılmasıyla değer 29,3 MPa'ya çıktığı görülmektedir. Kompozit içerisine %20 haşhaş sapı ve %5 MAPP ilavesinde değer 31,4 MPa'ya çıktığı ve %10 MAPP ilavesinde ise 31,6 MPa'ya çıktığı görülmektedir ki bu değer de en yüksek kopma mukavemeti değeridir. Polipropilenin kopma mukavemeti değerini bu grup ile kıyasladığımızda % 29 oranında artış tespit edilmiştir. %15 MAPP ilavesinde ise kopma mukavemeti 30,4 MPa'ya düşmüştür. Elif Ulutaş ve arkadaşları polipropilen içerisine kattıkları selulozik bazlı pirinç kabuklarının oranının artışıyla kopma mukavemeti değerinin de arttığını tespit etmişlerdir [17]. Başka bir çalışmada Beril Eker Gümüş ve arkadaşları [18] yüksek yoğunluklu polietilen içerisine katılan enginar yaprağı toz oranının artışıyla kopma mukavemet değerinin de arttığını tespit etmişlerdir. Şekil 4-D'ye bakıldığında polipropilen içerisine haşhaş sapı ve MAPP ilavesiyle elde edilen kopma uzaması değeri görülmektedir. Grafik incelendiğinde polipropilenin kopma uzamasının %3,8 olduğu görülmektedir. Kompozit içerisine %20 haşhaş sapı katılmasıyla değer 2,6'ya düştüğü ve %5 MAPP ilavesinde değer değişmediği görülmektedir. Bu iki grup en az uzama gösteren grupları oluşturmuştur. Polipropilenin uzama değerini bu grupların uzama değerleriyle kıyasladığımızda %31,6'lık bir düşüş olmuştur. %10 MAPP ilavesinde ise uzama değeri % 2,8'e çıkmış. %15 MAPP ilavesinde ise kopma uzama değerinin %3'e çıktığı tespit edilmiştir. Zilan Teke ve arkadaşlarının yapmış oldukları çalışmada da % uzama değerinin düştüğünü belirlemişlerdir [15]. Şekil 4-E'ye bakıldığında polipropilen içerisine haşhaş sapı ve MAPP ilavesiyle elde edilen çentikli izod darbe mukavemeti değeri görülmektedir. Grafik incelendiğinde polipropilenin darbe mukavemeti değerinin 17,6 kJ/m² olduğu görülmektedir. Kompozit içerisine %20 haşhaş sapı katılmasıyla değer 11,4 kJ/m²'ye düştüğü bu düşüşün polipropilenin değeriyle kıyaslandığında %35 oranında olduğu tespit edilmiştir. Kompozit içerisine %20 haşhaş sapı ve %5 MAPP ilavesinde

değerin bir miktar artarak $14,3 \text{ kJ/m}^2$ ve %10 MAPP ilavesinde ise $14,7 \text{ kJ/m}^2$ ye çıktığı görülmektedir. %15 MAPP ilavesinde ise darbe mukavemeti değeri $15,5 \text{ kJ/m}^2$ ölçülmüştür. Maruf Billah ve arkadaşlarının [19] yapmış oldukları bir çalışmada polipropilen içerisine kattıkları rattan fiberlerini MAPP ile uyumlaştırarak matrise tutunmalarını sağlamışlar ve dolayısıyla darbe mukavemetinde artış elde etmişlerdir. Diğer taraftan selülozik bazlı dolgu kullanımında dolgu miktarının artışıyla darbe mukavemetinin düştüğünü belirten çalışmalar vardır [16, 20-22]. Şekil 4-F'ye bakıldığında polipropilen içerisine haşhaş sapı ve MAPP ilavesiyle elde edilen sertlik değeri görülmektedir. Grafik incelendiğinde polipropilenin sertlik değerinin 58,1 Shore D olduğu görülmektedir. Kompozit içerisine %20 haşhaş sapı katılmasıyla değer 637 Shore D'ye çıktığı görülmektedir. Bu değer elde edilen en yüksek sertlik değeridir. Polipropilen ile kıyaslandığından sertlik değeri % 7,8 oranında artmıştır. Kompozit içerisine %20 haşhaş sapı ve %5 MAPP ilavesinde sertlik değeri 62,7 Shore D, %10 MAPP ilavesinde 62 Shore D ve %15 MAPP ilavesinde ise sertlik değeri 61,7 Shore D olarak ölçülmüştür. Zilan Teke ve arkadaşlarının yapmış oldukları bir çalışma ile benzerlik göstermektedir [15]. Şekil 5' de PP/HH/MAPP polimer kompozitinin mikroyapı fotoğrafları verilmiştir. SEM fotoğraflarına bakıldığında PP matrisi, kenevir ve haşhaş partikülleri net olarak gözükmemektedir. Kenevir ve haşhaş partiküllerinin matris içerisinde homojen olarak dağıldığı ve aglomerasyona uğramadığı anlaşılmaktadır.



Şekil 5. PP/HH/MAPP polimer kompozitinin mikroyapı fotoğrafları (Microstructure photographs of PP/HH/MAPP polymer composite)

4.SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada ticari olarak üretilen %20 kenevir katkılı polipropilen içerisine atık olan kenevir bitkisinin sapları öğütülerek katılmıştır. Polipropilen ve haşhaş partikülleri arasındaki uyumluluğu sağlamak için kompozitin içerisine değişik oranlarda MAPP eklenmiştir. Elde edilen polimer kompozitinin elastiklik modülü, çekme mukavemeti, kopma mukavemeti, kopma uzaması, sertlik ve Izod darbe mukavemeti değerleri belirlenmiştir. Bunlara ek olarak mikroyapı görüntüleri incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre; PP/HH/MAPP polimer kompozitinde sadece %20 oranında haşhaş ilavesiyle elastiklik modülü, çekme mukavemeti, kopma mukavemeti ve sertlik değerlerinin yükseldiği buna karşılık kopma uzama ve darbe mukavemeti değerlerinin ise düştüğü tespit edilmiştir. Selülozik bazlı ve fazla uzama davranışı göstermeyen haşhaş saplarının ilavesiyle % uzama değeri düşmüştür. Tabii burada haşhaş saplarının rijit karakterde olması da % uzama değerinin düşmesine etkindir. Diğer taraftan kenevir ve haşhaş enerjiyi fazla absorbe edemediğinden darbe mukavemeti değerinde de düşüşe sebebiyet vermiştir. Kompozitin içerisine MAPP ilavesiyle yukarıda bahsedilen değerlerde ciddi değişimler gözlemlenmiştir. Örneğin kompozitteki MAPP oranının %5 ve 10 oranında artmasıyla elastiklik modülü, çekme mukavemeti, kopma mukavemeti, darbe mukavemeti ve % uzama değerleri artmıştır. Buna karşılık sertlik değerinde düşüş olmuştur. %15 MAPP ilavesinde ise elastiklik modülü, çekme mukavemeti, kopma mukavemeti ve sertlik değerleri düşmüş buna karşılık darbe mukavemeti ve %uzama değerleri ise artmıştır. Bu değişimler MAPP'nin elastomerik yapısından kaynaklanmaktadır. SEM analizi sonucu elde edilen mikroyapılar incelendiğinde kenevir ve haşhaş partiküllerinin homojen bir şekilde dağıldığı gözlemlenmiştir.

ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazarları çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

The authors of this article declares that the materials and methods they use in their work do not require ethical committee approval and/or legal-specific permission.

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

Gizem KARADİREK: Deneyleyleri yapmış, sonuçlarını analiz etmiş ve maklenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

She conducted the experiments, analyzed the results and performed the writing process.

Münir TAŞDEMİR: Deneyleyleri yapmış, sonuçlarını analiz etmiş ve maklenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

He conducted the experiments, analyzed the results and performed the writing process.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

There is no conflict of interest in this study.

REFERENCES (KAYNAKLAR)

[1] Aguele F.O., Madufor C.I., Adekunle K.F., Comparative study of physical properties of polymer composites reinforced with uncarbonised and carbonised coir, *Open Journal of Polymer Chemistry*, 4(3), (2014), 73-82.

[2] Tholiya P., Deshmukh S.P., Property evaluation of hemp bagasse fiber composite- A review, *International Journal of Engineering Applied Sciences and Technology*, 6(1), (2021), 376-382.

[3] Kaştan A., Yalçın Y., Talaş Ş., Nano katkıların polimerlerin sürtünme katsayısına etkisi, *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Müh. Bilimleri Dergisi*, 16 (2016) 231-243.

[4] Thakur V.K., Thakur M.K., Processing and characterization of natural cellulose fibers/thermoset polymer composites, *Carbohydrate Polymers*, 109 (2014) 102–117.

[5] Mishra S., Mohanty A.K., Drzal L.T., Misra M., Parija S., Nayak S.K., Tripathy S.S. Studies on mechanical performance of biofibre/glass reinforced polyester hybrid composites, *Composite Science Technology*, 63 (2003) 1377–1385.

[6] Holbery J., Houston D., Natural-fibre-reinforced polymer composites in automotive applications, *Journal of the Minerals Metals & Materials Society (JOM)*, 58 (2006) 80–86.

[7] Bodros E., Baley C., Study of the tensile properties of stinging nettle fibres, *Materials Letters*, 62(14) (2008) 2143-2145.

[8] Alam M.M., Ahmed, T., Haaque M.M., Gafur M.A., Kabir A.H., Mechanical properties of natural fiber containing polymer composites, *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 48(1) (2009) 110-113.

[9] Sui G., Fuqua, M.A., Ulven C.A., Zhong W.H., A plant fiber reinforced polymer composite prepared by a twin-screw extruder, *Bioresource Technology*, 100(3) (2009) 1246-1251.

[10] Joshi S.V., Drzal L.T., Mohanty A.K., Arora S., Are natural fiber composites environmentally superior to glass fiber reinforced composites ?, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 35(3) (2004) 371-376.

[11] Aslan Y., Albrechtsen Y., Taşdemir M., The effect of foaming on mechanical and morphological properties of polypropylene, *Bitlis Eren University Journal of Science*, 11(3) (2022) 784-790.

[12] Gümüş B.E., Yağcı Ö., Erdogan, C.D., Taşdemir M., Dynamical mechanical properties of polypropylene composites filled with olive pit particles, *Journal of Testing and Evaluation*, 47 (4), (2019).

[13] Küçüktüvek M., (2015) Alkaloid fabrikası katı atıklarından kompozit lenha üretim imkanlarının araştırılması, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara

[14] <https://arastirma.tarimorman.gov.tr/tokatarastirma/Belgeler/Lifletler/HA%C5%9EHA%C5%9E%20TARIMI.pdf> [erişim: 2023]

[15] Teke Z., Sırtıkara M., Şahin K.A., Taşdemir M., The Investigation of the effects of carbonized and uncarbonized orange peel powder on the mechanical properties of polypropylene, *The Int. Conference on Materials Science, Mechanical and Automotive Eng. and Tech.*, June 21-23 (2019) Cappadocia Türkiye.

[16] Ayrılmış N., Taşdemir M., Akbulut T., Water absorption and mechanical performance of PP/HIPS hybrid composites filled with wood flour, *Polymer Composites*, 38(5), (2017), 863-869.

[17] Ulutaş E., Taşdemir M., Koçak E.D., Investigation of mechanical properties of recycled polypropylene/rice huks polymer composite, *The*

Int. Conference on Materials Science, Mechanical and Automotive Eng. and Tech., June 21-23 (2019), 49-53, Cappadocia Türkiye.

[18] Gümüş B.E., Yağcı Ö., Taşdemir M., High-density polyethylene/artichoke leaf powder polymer composites: dynamic mechanical, morphological and thermal properties, Iranian Polymer Journal, 31, (2022), 787-797.

[19] Billah M.M., Rabbi M.S., Hasan A., Injection molded discontinuous and continuous rattan fiber reinforced polypropylene composite: Development, experimental and analytical investigations, Results Mater., 13, (2022), 1-12.

[20] Zulkifli N.I., Samat N., Anuar H., Zainuddin N., Mechanical properties and failure modes of recycled polypropylene/microcrystalline cellulose composites, Mater. Des. 69, (2015), 114-123.

[21] Zaini M. J., Fuad M.Y.A., Ismail Z., Mansor M.S., Mustafah J., The effect of filler content and size on the mechanical properties of polypropylene/oil palm wood flour composites, Polymer, Int, 40(1), (1996), 51-55.

[22] Bengtsson, M., Oksman K., The use of silane technology in crosslinking polyethylene/wood flour Composites, Composites Part A: applied science and manufacturing, 37(5), (2006), 752-765.

The Effect of *Rheum ribes* Extract Origin of Elazig Province on Ventilator-Associated Pneumonia and Antioxidant Capacity

Oğuzhan ÖZDEMİR^{1,*}  Nurten YILMAZ²  Mustafa Oğuzhan KAYA³ 

¹ Batman University, Technical Sciences Vocational School, Department of Veterinary Science, 72060, BATMAN

² Cukurova University, Karaisalı Vocational School, Department of Crop and Animal Production, 1770, ADANA

³ Kocaeli University, Faculty of Science and Literature, Department of Chemistry, 41380, KOCAELİ

Article Info

Research article

Received: 23/05/2023

Revision: 04/07/2023

Accepted: 06/08/2023

Keywords

Rheum ribes
Ventilator associated
pneumonia
Antimicrobial activity,
Antioxidant capacity

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi

Başvuru: 23/05/2023

Düzeltilme: 04/07/2023

Kabul: 06/08/2023

Anahtar Kelimeler

Rheum ribes
Ventilatör ilişkili pnömoni
Antimikrobiyal aktivite
Antioksidan kapasite

Graphical/Tabular Abstract (Grafik Özet)

In contrary to the use of classical antibiotics in ventilator-associated pneumonia, the application of natural herbal agents leads to significant results. / Ventilatör ilişkili pnömoni'nin klasik antibiyotiklerin kullanımının aksine, doğal bitkisel ajanların uygulanması önemli sonuçlar doğurur.

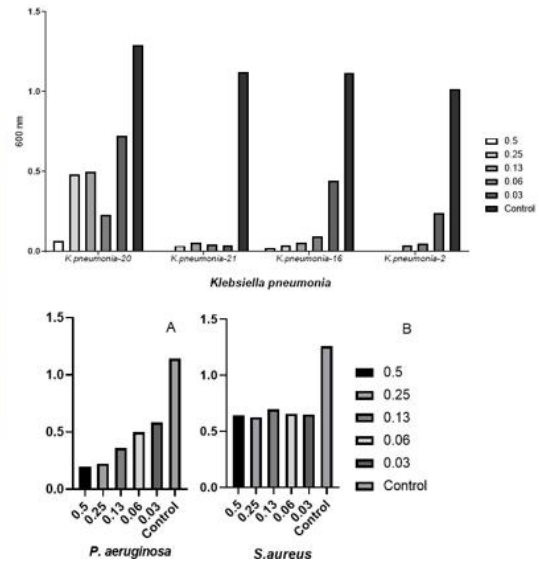


Figure A: Effects of *R.ribes* on VAP pathogens / **Şekil A:** *R.ribes*'in VAP patojenlerine etkileri

Highlights (Önemli noktalar)

- Ventilator-associated pneumonia may be caused by bacteria whose antibiotic resistance is difficult to break. / Ventilatör ilişkili pnömoni antibiyotik direnci kırılması zor bakteri kökenli olabilir.
- Interest in natural agents has increased in cases where antibiotics are inadequate. / Antibiyotiklerin yetersiz kaldığı durumlarda doğal ajanlara olan ilgi artmıştır.
- *R.ribes* is a medicinal plant with many health beneficial effects. / *R.ribes* birçok sağlığa faydalı etkisi olan tıbbi bir bitkidir.

Aim (Amaç): The possible effects of *R. ribes* extract as an alternative to classical antibiotic treatment of ventilator-associated pneumonia were investigated. / Ventilatör ilişkili pnömoni'nin klasik antibiyotik tedavisine alternatif olarak *R. ribes* ekstraktı uygulanıp olası etkileri araştırıldı.

Originality (Özgünlük): *R. ribes* extract was applied as an alternative to classical antibiotic treatment of ventilator-associated pneumonia, one of the most critical hospital complications of our century./ Çağın en kritik hastane komplikasyonlarından Ventilatör ilişkili pnömoni'nin klasik antibiyotik tedavisine alternatif olarak *R. ribes* ekstraktı uygulandı.

Results (Bulgular): *R.ribes* extract showed a strong antimicrobial and antioxidative effect. / *R.ribes* ekstresi güçlü bir antimikrobiyal ve antioksidatif etki göstermiştir.

Conclusion (Sonuç): *R.ribes* extract may be used as a supportive treatment for ventilator-associated pneumonia. / *R.ribes* ekstresi Ventilatör ilişkili pnömoni ile ilgili tedavi yöntemlerini destekleyici olarak kullanılabilir.



The Effect of *Rheum ribes* Extract Origin of Elazig Province on Ventilator-Associated Pneumonia and Antioxidant Capacity

Oğuzhan ÖZDEMİR^{1,*} Nurten YILMAZ² Mustafa Oğuzhan KAYA³

¹ Batman University, Technical Sciences Vocational School, Department of Veterinary Science, 72060, BATMAN

² Cukurova University, Karaisalı Vocational School, Department of Crop and Animal Production, 1770, ADANA

³ Kocaeli University, Faculty of Science and Literature, Department of Chemistry, 41380, KOCAELİ

Article Info

Research article

Received: 23/05/2023

Revision: 04/07/2023

Accepted: 06/08/2023

Keywords

Rheum ribes

Ventilator associated

pneumonia

Antimicrobial activity,

Antioxidant capacity

Abstract

Ventilator-associated pneumonia (VAP) is one of the most important infections in the intensive care unit (ICU) and contributes to increased mortality and morbidity in patients. In this study, we aimed to evaluate *Rheum ribes* (Elazig/Turkey) extract on bacterial isolates obtained from VAP patients the antimicrobial effects (agar well diffusion, MIC test) and antioxidant capacity (DPPH, FRAP and metal chelation). As a result of the analysis, the highest antimicrobial effect of *R.ribes* was observed in *Klebsiella pneumoniae*-2 (*K.pneumoniae*) and *K.pneumoniae*-21 isolates, with zone diameters of 19.32 and 18.45 mm, respectively. Apart from these, *Staph. aureus.*, *K. pneumoniae*-20, *K. pneumoniae*-16 and *Pseudomonas aeruginosa* (*P. aeruginosa*) were detected with zone diameters of 18.32, 15.14, 14.56 and 13.54 mm, respectively. *R. ribes* extract showed 98.3% and 94.88% inhibitory effect at 0.5 ppm in *K.pneumoniae* isolates 16 and 20 while, it showed 100% inhibitory effect on the highest isolates 21 and 2. *S. aureus* showed a high inhibition effect of 50.36% at 0.25 ppm, and *P. aeruginosa* isolate at a rate of 82.82% at 0.5 ppm. Besides, DPPH, FRAP and metal chelation analyzes revealed a strong antioxidant effect. DPPH inhibition effect, FRAP analysis and chelating activity values of iron ions (Fe^{2+}) for the antioxidant effects of *R.ribes* extract were determined as 17.22%, 1.18 and 2.14%, respectively. As a result, strong effect and antioxidant capacity of *R. ribes* extract on pathogenic bacteria have been determined, and its beneficial properties can be deepened by in vivo and clinical studies.

Elazığ İli Orijinli *Rheum ribes* Ekstraktının Ventilatör İlişkili Pnömoni ve Antioksidan Kapasite Üzerine Etkisi

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi

Başvuru: 23/05/2023

Düzeltilme: 04/07/2023

Kabul: 06/08/2023

Anahtar Kelimeler

Rheum ribes

Ventilatör ilişkili pnömoni

Antimikrobiyal aktivite,

Antioksidan kapasite

Öz

Ventilatör ilişkili pnömoni (VİP), yoğun bakım ünitesindeki (YBÜ) en önemli enfeksiyonlardan biridir ve hastalarda mortalite ve morbidite artışına katkıda bulunur. Bu çalışmada *Rheum ribes* (Elazığ/Türkiye) ekstraktının VİP hastalarından elde edilen bakteri izolatları üzerinde antimikrobiyal etkilerini (agar kuyu difüzyonu, MİK testi) ve antioksidan kapasitesini (DPPH, FRAP ve metal şelatlama) değerlendirmeyi amaçladık. Analiz sonucunda *R.ribes*'in en yüksek antimikrobiyal etkisi 19.32 mm zon çapı ile *Klebsiella pneumoniae*-2 (*K.pneumoniae*) ve 18.45 mm zon çapı ile *K.pneumoniae*-21 izolatında gözlemlendi. Bunların dışında *Staph. aureus.*, *K. pneumoniae*-20, *K. pneumoniae*-16 ve *Pseudomonas aeruginosa* (*P. aeruginosa*) sırasıyla 18.32, 15.14, 14.56 ve 13.54 mm zon çapları ile tespit edildi. *R. ribes* ekstraktı *K.pneumoniae* izolatları 16 ve 20'de 0,5 ppm'de %98,3 ve %94,88 inhibitör etki gösterirken, en yüksek izolatlar 21 ve 2'de %100 inhibitör etki göstermiştir. *S. aureus* %50,36 gibi yüksek bir inhibisyon etkisi göstermiştir. 0,25 ppm'de ve *P. aeruginosa* 0,5 ppm'de %82,82 oranında izole edilmiştir. Ayrıca DPPH, metal şelatlama ve FRAP analizleri incelendiğinde güçlü bir antioksidan etki göstermiştir. *Ribes* ekstraktının antioksidan etkileri için DPPH inhibisyon etkisi, demir iyonlarının (Fe^{2+}) şelatlama aktivitesi, FRAP analizi ve değerleri sırasıyla %17,22, %1,18 ve %2,14 olarak belirlendi. Sonuç olarak, *R. ribes* ekstraktının patojenik bakteriler üzerindeki güçlü etkisi ve antioksidan kapasitesi belirlenmiş olup, *in vivo* ve klinik çalışmalarla faydalı özellikleri derinleştirilebilir.

1. INTRODUCTION (GİRİŞ)

Infectious diseases, from past to present, are one of the most important factors that threaten human health. Lower respiratory tract infections are a common cause of death in developing countries and represent an important source of morbidity worldwide [1]. A significant health issue, pneumonia is characterized by substantial morbidity and both short- and long-term mortality. Additionally, it is the major cause of infectious diseases that affect people of all ages globally. It is an acute respiratory infection that impairs breathing by causing edema in the lungs' alveoli, pus accumulation, and fluid accumulation [2-3]. For empirical treatment, choosing antibiotics that cover the main bacterial causes of disease is the main focus. Antimicrobial resistance poses a challenge to both these temporary and permanent treatments, indicating that they will be more and more at risk over the next few decades [4]. The majority of bacterial pathogens that cause pneumonia such as *Staphylococcus aureus*, *Streptococcus pneumoniae*, *Escherichia coli*, *Klebsiella pneumoniae*, *Pseudomonas aeruginosa*, and *Acinetobacter* species. The most prevalent organisms in the globe that cause community-acquired pneumonia are *S. pneumoniae* and *S. aureus* [2].

In the context of ICU-acquired pneumonia, VAP is characterized as lung parenchymal infection in patients subjected to invasive mechanical ventilation for at least 48 hours. Atelectasis, aspiration, venous thromboembolic event, pulmonary edema, acute respiratory distress syndrome and delirium are other adverse events that might potentially lengthen hospital stays and increase morbidity and mortality [5]. VAP is just one of several adverse events. Although microbiological technologies have recently advanced, the epidemiology and diagnostic standards for VAP are still debatable. making treatment, prevention, and outcome studies difficult to interpret [6-7].

The main goal in the treatment of diseases aims to create a medication that has a lower effective dose and greater efficacy. The development of synthetic drugs often results in side effects such as angioedema, gastric irritation, ulceration, headache, hyperglycemia, hemolytic anemia, liver failure, and problems with immunodeficiency as well as others. Therefore, it is increasingly being thought about using natural medicines, which are typically regarded as safe, as an alternative therapeutic modality with little pharmacological response and side effects. There are numerous reports of the use

of natural compounds extracted from herbs as successful antibiotics [8]. These compounds, such as curcumin, resveratrol, epigallo-catechin-3-gallate (EGCG), lycopene, capsaicin, genistein, sulforaphane are among the most researched [9-10].

Rheum ribes grows wild in China, India, Iran and Turkey. In Turkey, it grows especially around Southern and Eastern Anatolia. *R. ribes* it is the only rheum species growing wild in Turkey [11]. *R. ribes* is called "uçkun, usgun or iskin" in Turkey. In the GC-MS component analyzes of *R.ribes*, important chemical contents such as palmitic acid (67.7%), 1-octadecanol (4.3%), vitamin E (3.85%) were determined [12-13]. In addition, approximately 30 major components were detected in the analysis of *R. Ribes* stem methanol extracts by HPLC-ESI-QTOF-MS. Among these components, the most researched health-related ones are gallic acid (m/z 169.0157), salicylic acid (m/z 137.026), epigallocatehin (m/z 305.0681), epigallocatechin gallate (m/z 457.083), cis-resveratrol (m/z 227.0707), genistein (m/z 271.0608), quercetin (m/z 303.0499), rutin (m/z 609.1495), kaempferol-7-O-glucoside (m/z 449.1086) and emodol anthraquinones (m/z 271.0608) [14]. Many plant species grown in Turkey are consumed by the people of the region to alleviate or eliminate the symptoms of various diseases [14]. The studies investigating the therapeutic efficacy of *R. ribes* are mainly concerned with its antimicrobial and antiradical properties [15-16]. Although the therapeutic properties of *R. ribes* grown in many regions have been investigated, there is no adequate study on ventilator-associated pneumonia of *R. ribes* originating from Arıcak district of Elazığ province. Previously, our team conducted research on gram-negative and positive bacteria related to *R. ribes* [17] and *Lavandula angustifolia* [18]. The beneficial effects of herbal materials led to the investigation of pathogenic pneumonia bacteria and antioxidant structures of *R. ribes* plant. Therefore, in this study, it was aimed to determine the antimicrobial effects of methanol-chloroform extract of *R. ribes* obtained from VAP patients by agar well diffusion test and antioxidant capacity with different techniques on some pneumonia pathogens from Elazığ province Arıcak district.

2.MATERIALS AND METHODS (MATERİYAL VE METOD)

2.1. *R.ribes* Extracts Obtaining (R.ribes Ekstraktlarının Elde Edilmesi)

3. *Rheum ribes* plant, (38°32'52.7"N-40°05'29.9"E) coordinates of was collected in Elazığ Province of Turkey (Saman Town,

Aricak County). The collected *R.ribes* was immediately taken to -80°C cold chain, until analysis done. The area where the plant was

collected and the images of the plant are given in Figure 1.



Figure 1. Arıcak / Saman town localization of *Rheum ribes* (Rheum ribes'in Arıcak / Saman köyü lokalizasyonu)

The collected *R. ribes* samples were extracted by modifying the Tufekci [19] method. The residues were cleaned by washing with distilled water. Then, 150 grams of plant stem was weighed and kept in an oven at 60°C for 24 hours. Then, IKA (A10) was ground in the mill with the help of mechanical grinder. 100 grams of the ground sample was taken and 500 mL of Methanol-Chloroform (1:1 v/v) was added to it and kept in a desiccator for 3 days. At the end of the 3rd day, extracts Whatman No. It was filtered with 2 filter papers and evaporated at 35°C . Thus, the entire solvent was removed and the extract was obtained. As a result, it was prepared from this extract with distilled water at a final concentration of 10 ppm [19].

2.2. Pathogenic Microorganisms (Patojen Mikroorganizmalar)

Pseudomonas aeruginosa and *Klebsiella pneumoniae* and *Staphylococcus aureus* isolates grown in tracheal aspiration cultures (TAK) of patients receiving mechanical ventilation therapy in Çukurova University Faculty of Medicine Reanimation unit (respectively 21 *Pseudomonas*, 21

Klebsiella, 6 *Staphylococcus* were identified in Çukurova University Hospital Central Laboratory) It was sent to the Microbiology Laboratory for 8 months (November 2016 to June 2017). All samples were first investigated for morphological and biochemical features, including gram staining, motility, and catalase. After adding 15% glycerol to a 1.5 mL microtube containing tryptic soy broth, the isolated strains were transferred there and kept at -80°C . This study was approved by the local ethics committee (protocol no: 54/2016). All critically ill patients diagnosed with VAP who needed invasive ventilation for at least 48 hours were included in the study. The diagnosis of pneumonia was made using new or progressive infiltration on a chest X-ray with at least two of the following criteria: fever leukocytosis ($\text{WBC} > 12000$ cells/mL), ($T > 38^{\circ}\text{C}$) or hypothermia ($T < 35.5^{\circ}\text{C}$) or leukopenia ($\text{WBC} < 4000$ cells/mL, or positive tracheal culture [20-21].

Bacterial strain identification and antibiotic susceptibility tests were performed using conventional methods and the VITEK 2 system (bioMérieux SA, France). Acquired resistance profiles of pathogenic bacterial strains such as

Staphylococcus aureus, *Klebsiella pneumoniae*, *Pseudomonas aeruginosa*, and were determined as MDR according to the Centers for Disease Control and Prevention (CDC) and European Center for Disease Prevention Control (ECDC) definition.

2.3. Antimicrobial Activity: strains and media (Antimikrobiyal Aktivite: suşlar ve ortamlar)

The antimicrobial effect of *R.ribes* on indicator microorganisms was investigated by well diffusion agar and MIC assay method were performed according to the methods designed by Bauer et al. [22], and Ericsson and Sherris [23]. The effect of the *R.ribes* was evaluated for pneumoni bacteria *K.pneumonia* (20, 21, 16 and 2 isolates), *S.aureus* and *P.aeruginosa*. MRS Broth (*Lactobacillus* Broth acc. to de Man, Rogosa and Sharp: MRS) Merck 1.10661, MRS Agar (*Lactobacillus* Agar acc. to De Man, Rogosa and Sharpe) Merck 1.10660 were used for growth of lactic acid bacteria, Tryptic Soy Broth (TSB) Merck 1.05459) for pathogenic microorganisms, Mueller Hinton Agar Merck 1.05437 for agar test, Mueller Hinton Broth (Merck 1.10293) for MIC test.

2.3.1. Agar well diffusion test (Agar kuyu difüzyon testi)

Indicator microorganisms were stored at temperature below 5°C. They were removed and reactivated in tryptic soy broth at 37°C for 18 hour. 12 ml of Mueller-Hinton agar (cooled 50 °C after otoclave) was poured into 90 mm Petri dishes and added 1ml fresh culture indicator bacteria with a density of 0.5 Mcfarland left to dry at 37 °C for 30 minutes. 6 mm diameter wells were drilled in frozen agars. 100 µL of *R. ribes* extract was added to the wells and incubated overnight at +4 °C for diffuse [24-25].

The petri dishes were then incubated under optimum conditions. The diameters of the inhibitory zones were measured in millimetres. Mueller Hinton Agar standard method procedure developed by Bauer et al. [22] and Stella and Marin [26] was used to eliminate or reduce variability in this test method. The procedure was adopted by the Clinical and Laboratory Standards Authority (CLSI, former NCCLS) as a consensus standard [27]. In addition, bacterial isolates, *Acinetobacter baumannii*, *Klebsiella pneumoniae* and *Pseudomonas aeruginosa*, were tested for antibiotic resistance/sensitivity (Table 1–3).

Absence of (at least) sensitivity to an antibiotic in three or more antibacterial categories was defined as MDR. MDR pathogens were included in this study.

2.3.2. MIC test (Minimum inhibisyon konsantrasyonu testi)

MICs obtained with spectrophotometric microdilution method for *R. ribes* against indicator microorganisms were measured at 600 nm in a 96-well plate reader (Multiskan™ FC Microplate Photometer, USA), 150 µL of dual-strength MHB and Dual-strength *R. ribes* were added to the first wells, dilutions (1:1 v/v) were then added to the other wells. Then, 30 µL of bacterial suspension of fresh culture indicator bacteria with a density of 0.5 Macfarland was mixed into prepared plates and incubated at optimum temperatures for 18-24 hours. Then, samples density were detected by plate reader MIC was expressed as the highest dilution inhibiting growth (turbidity max in tube is low). Among these MIC dilutions, those with positive detection of nonviable cells > 99% in the medium are considered as MBC [28].

2.4. Antioxidant Analysis Methods (Antioksidan Analiz Yöntemleri)

DPPH, ethanol, trolox, butyl hydroxytoluene (BHT), NaCH₃COO, HCl, 2,4,6-tripyridyl-s-triazine (TPTZ), Ferrozin, FeCl₂ were purchased from Sigma-Aldrich GmbH (Sternheim, Germany). BHT and Trolox were used as standard in antioxidant analysis methods. Since the extract was concentrated, it was diluted 1:25 v/v.

2.4.1. DPPH Free Radical Scavenging Activity (DPPH Serbest Radikal Temizleme Etkinliği)

Basic data on the extracts' antiradical activity is provided by the DPPH assay. Using a modified version of Blois [29] approach, the radical scavenging capacity of the *R. ribes* extract was assessed spectrophotometrically by observing the elimination of DPPH at 517 nm. In the presence of the sample, the bleaching rate of DPPH, a stable free radical, is observed at a distinctive wavelength. DPPH absorbs at 517 nm while it is a radical, but when it is reduced by an antioxidant or another radical species, its absorption drops. In a nutshell, 1.5 mL of *R. ribes* extract in ethanol at various concentrations (15-45 g/mL) were mixed to 0.5 mL of a 0.1 mM solution of DPPH (10⁻³ M) in ethanol. These solutions underwent accurate vortexing and dark incubation. At 517 nm, the absorbance was measured against the blank samples after 30 minutes. The reaction mixture's lower absorbance

denotes a higher level of DPPH free radical scavenging activity.

Standarts (BHT and Trolox) and *R.ribes* extract were compared against the absorbance of blank and then calculated of % inhibition values (Figure-2.A).

2.4.2. Chelating activity of ferrous ions (Fe²⁺) (Demir iyonlarının (Fe²⁺) şelatlama aktivitesi)

By using *R. ribes* extract and the standards, ferrous ions were chelated using the Dinis et al. [30] method. The reaction took place in an aquatic environment. Briefly, 0.4 mL *R.ribes* extract (10 µg/mL) was added to a solution of 0.2 mL FeCl₂ (2 mM). The reaction was initiated by the addition of 0.4 mL ferrozine (5 mM) and the total volume was adjusted to 4 mL with ethanol. Then the mixture was shaken vigorously and left at room temperature for 10 min. Standarts (BHT and Trolox) (10 µg/mL) and *R.ribes* extract were compared against the absorbance of blank (contains FeCl₂ and ferrozine) at 562 nm (Figure-2.B).

2.4.3. FRAP (FRAP testi)

FRAP method (suitable to determine hydrophilic and lipophilic antioxidants) was introduced to determine the total amount of antioxidants by the reduction capacity of iron (III). The oxidant in the FRAP assay was prepared by mixing 2.5 mL 10 mM TPTZ dissolved in 40 mM HCl, 25 mL acetate buffer, 20 mM 2.5 mL FeCl₃ and water. This mixture is called as FRAP reagent. The final solution contained 1.67 mM Fe (III) and 0.83 mM TPTZ [31-32]. *R.ribes* extract (10 µg/mL) and standarts (BHT and Trolox) (10 µg/mL) were added to final solution (1.67 mM Fe (III) and 0.83 mM TPTZ) and incubated in dark for 10 minutes at room temperature. Standarts and *R.ribes* extract were compared against the absorbance of blank at 595 nm (Figure-2.C).

2.5. Total phenolic content (Toplam Fenolik içerik)

The determination of the total amount of phenolic substance is generally carried out by measuring the absorbance of the blue color formed by the reduction of the Folin–Ciocalteu reagent [33]. The color intensity formed is directly proportional to the phenolic substance concentration, and the total amount of phenolic substance can be calculated. Using this method, 0.5 N Folin–Ciocalteu reagent and 10% concentration Na₂CO₃ were prepared. Then, 30 min after pipetting, the absorbance was read at 760 nm. Gallic acid, a phenolic compound, was used in the preparation of the standard graph. Different concentrations of gallic acid, 1–0.031 mg mL⁻¹ (50% percent to each dilution), were prepared with methanol, and their absorbances were read. A graph of absorbance versus concentration was constructed, and the total phenolic contents of the sample were determined as gallic acid equivalent.

2.6. Total flavonoid (Toplam Flavonoid)

The determination of the total flavonoids was achieved by observing the pink color formation, which is directly proportional to the flavonoid concentration. In this method, 10% AlCl₃ was prepared in a fume hood. NaNO₂ and 1 N NaOH were prepared at 5% concentrations. Absorbance was read at 510 nm, 15 min after pipetting.

Rutin was used in the preparation of the standard chart. Different concentrations of the rutin standard were prepared with methanol, and their absorbances were read. A graph of absorbance versus concentration was constructed, and the total flavonoid amounts of the sample were determined as rutin equivalent [34].

Table 1. *Acinetobacter baumannii* Antibiotic resistance/susceptibility testing (*Acinetobacter baumannii* Antibiyotik direnci/duyarlılık testi)

Antibiotic	Resistant abundance	Intermediate abundance	Sensitive abundance
Amikacin	20	9	8
Cefepime	15		3
Ceftazidime	15		4
Ceftriaxone			
Cefuroxime			
Cefuroxime axetil			
Ciprofloxacin	33		4
Colistin	5		25
Ertapenem			
Gentamicin	35		3
Imipenem	33	1	
Levofloxacin	31		3
Meropenem	32	1	4
Netilmicin	29		6
Piperacillin	15	1	1
Piperacillin/Tazobactam	19		1
Tetracycline	8	1	7
Tigecycline		13	22
Tobramycin	22		11
Trimethoprim/sulfamet	29		7
Amoksisilin/Klavulonat			

Resistant abundance, n (%). Intermediate abundance, n (%). Sensitive abundance, n (%)

Tablo 2. *Klebsiella pneumoniae* Antibiotic resistance/susceptibility testing (*Klebsiella pneumoniae* Antibiyotik direnci/duyarlılık testi)

Antibiotic	Resistant abundance	Intermediate abundance	Sensitive abundance
Amikacin	5	11	4
Aztreonam	4		
Ampicillin	16		
Cefepime	13		
Ceftazidime	20		
Ceftriaxone	16		
Cefuroxime	16		
Cefuroxime axetil	12		
Ciprofloxacin	19	1	
Colistin	1		9
Ertapenem	10		6
Gentamicin	11		9
Imipenem	3	4	
Levofloxacin	4		
Meropenem	15		5
Netilmicin	4		
Piperacillin	4		
Piperacillin/Tazobactam	16	3	1
Tetracycline	1		
Tigecycline	3	6	4
Tobramycin	4		
Trimethoprim/sulfamet	20		1
Amoksisilin/Klavulonat	7		
Fosfomicin			2

Resistant abundance, n (%). Intermediate abundance, n (%). Sensitive abundance, n (%)

Tablo 3. *Pseudomonas aeruginosa* Antibiotic resistance/susceptibility testing (*Pseudomonas aeruginosa* Antibiyotik direnci/duyarlılık testi)

Antibiotic	Resistant abundance	Intermediate abundance	Sensitive abundance
Amikacin	10		7
Aztreonam	2		
Ampicillin			
Cefepime	10	5	
Ceftazidime	11	4	5
Ceftriaxone			
Cefuroxime			
Cefuroxime axetil			
Ciprofloxacin	12	1	4
Colistin			11
Ertapenem			
Gentamicin	10		10
Imipenem	5	6	5
Levofloxacin	2		
Meropenem	10	2	4
Netilmicin	2		1
Piperacillin	2		
Piperacillin/Tazobactam	15	2	4
Tetracycline			
Tigecycline			
Tobramycin	3		
Trimethoprim/sulfamet			
Amoksisilin/Klavulonat			
Fosfomycin			

Resistant abundance, n (%). Intermediate abundance, n (%). Sensitive abundance, n (%)Tablo

3.RESULTS (BULGULAR)

In this study, the highest amount of *R.ribes* extract on pneumococcal bacteria was detected in *K.pneumonia*-2 isolate and *K.pneumonia*-21 and (19.32 and 18.45 mm zone diameter, respectively) as shown in Table-4. Antimicrobial effect was

detected in the other two klebsiella isolates (15.14 and 14.56 mm zone diameter, respectively). It was observed that it showed a strong antimicrobial effect in *S.aureus* isolate (18.32 mm zone diameter). Antimicrobial effect was detected in *P.aeruginosa* isolate (13.54 mm zone diameter).

Table-4. Antimicrobial zone diameters of *Rheum ribes* extract on Pneumococ microorganisms (*Rheum ribes* ekstraktının Pnömonokok mikroorganizmaları üzerindeki antimikrobiyal bölge çapları)

Microorganism	Diameter region (mm)
<i>Staph aureus</i>	18.32
<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	13.54
<i>K. pneumonia</i> -20	15.14
<i>K. pneumonia</i> -21	18.45
<i>K. pneumonia</i> -16	14.56
<i>K. pneumonia</i> -2	19.32

The graph of the growth concentrations of *R. ribes* extract applied to 4 isolates of *K. pneumonia* bacteria at 600 nm compared to the control group is given in Figure 2. For all *K.pneumonia* isolates of *R. ribes*, at 0.5 ppm, 100% inhibitory effects of *K.pneumonia* 21 and 2 isolates were determined,

while the highest 16 and 20 isolates were found to have 98.3% and 94.88%, respectively. It was observed that showed a strong inhibition effect at the rate of 50.36% at 0.25 ppm concentration in *S. aureus* (Figure 3A), and 82.82% at 0.5 ppm concentration in *P.aeruginosa* isolate (Figure 3B.).

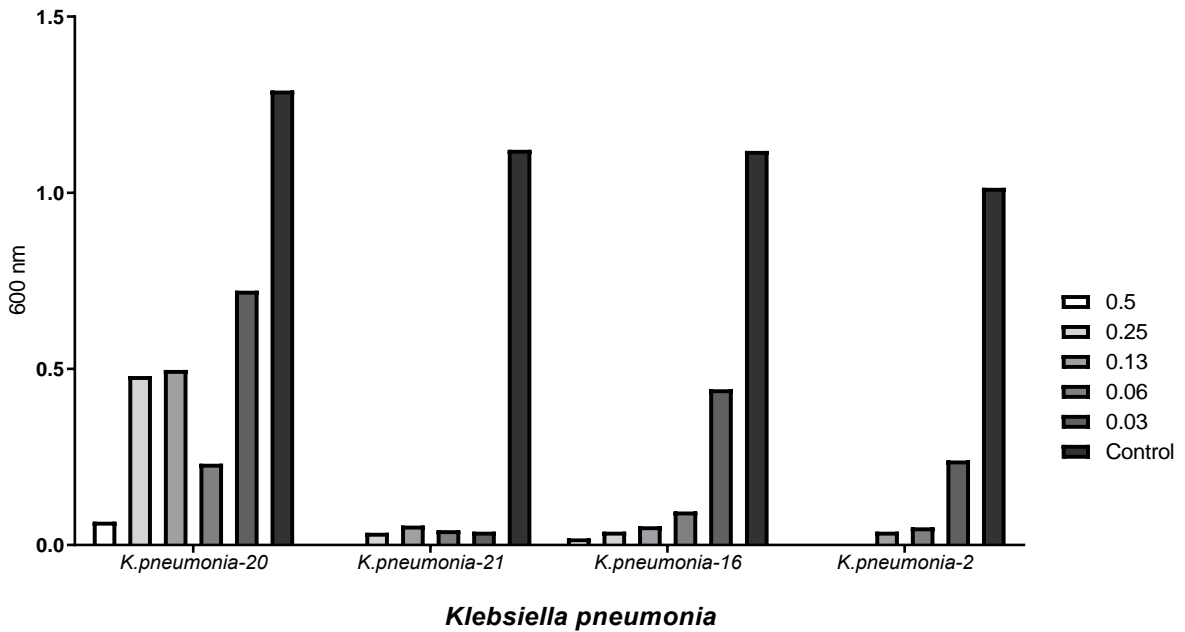


Figure 2. Growth concentrations of *R.ribes* extract doses (14.17-0.89 mg/L) applied to *K.pneumonia* isolates by spectrophotometric (at 600 nm) method compared to the control group. (*K.pneumonia* izolatlarına spektrofotometrik (600 nm'de) yöntemle uygulanan *R.ribes* ekstraktı dozlarının (14,17-0,89 mg/L) büyüme konsantrasyonlarının kontrol grubuyla karşılaştırılması)

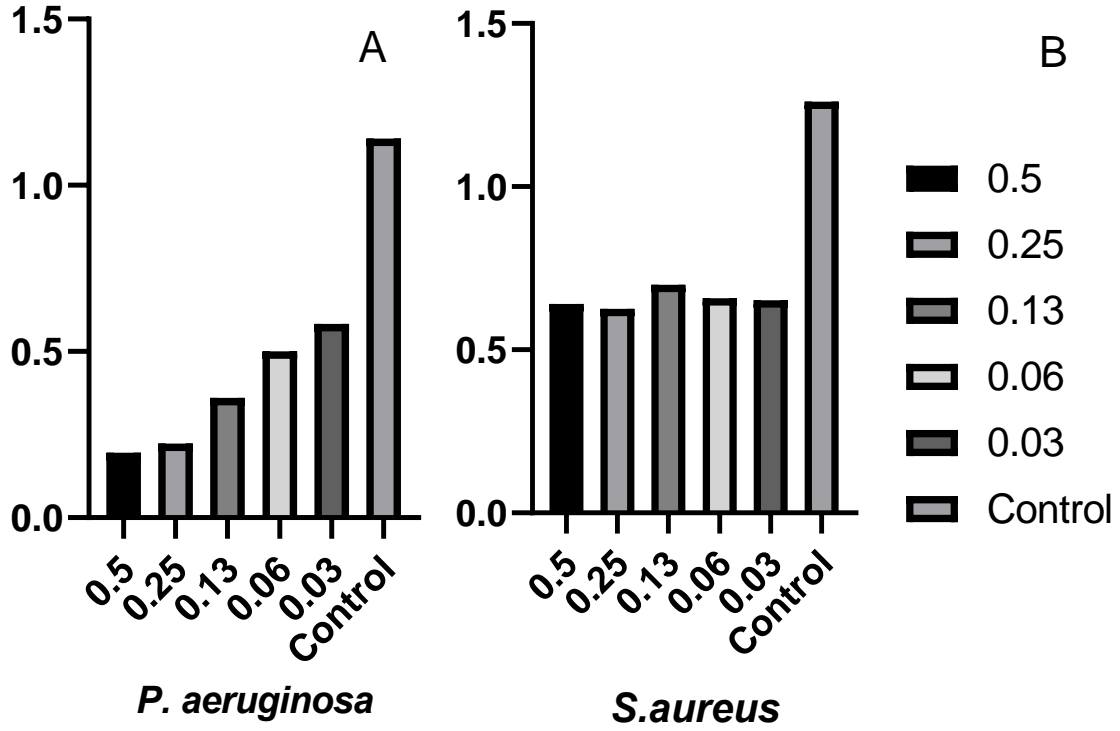


Figure 3. Growth concentrations of *R.ribes* extract doses (14.17-0.89 mg/L) applied to *P.aeruginosa* (PANEL A) and *S. aureus* (PANEL B) isolates by spectrophotometric (at 600 nm) method compared to the control group (*P.aeruginosa* (PANEL A) ve *S. aureus* (PANEL B) izolatlarına spektrofotometrik (600 nm'de) yöntemle uygulanan *R.ribes* ekstraktı dozlarının (14,17-0,89 mg/L) büyüme konsantrasyonlarının kontrol grubuyla karşılaştırılması)

The results are given graphically in Figure 4. analysis of the data revealed that all of the values of *R.ribes* were lower than the values of the standards (Throlox and BHT), but close to the standard. DPPH

inhibition effect (PANEL A), FRAP analysis (PANEL B) and chelating activity values of iron ions (Fe^{2+}) (PANEL C) for the antioxidant effects of *R.ribes* extract were determined as 17.22%, 1.18 and 2.14%, respectively.

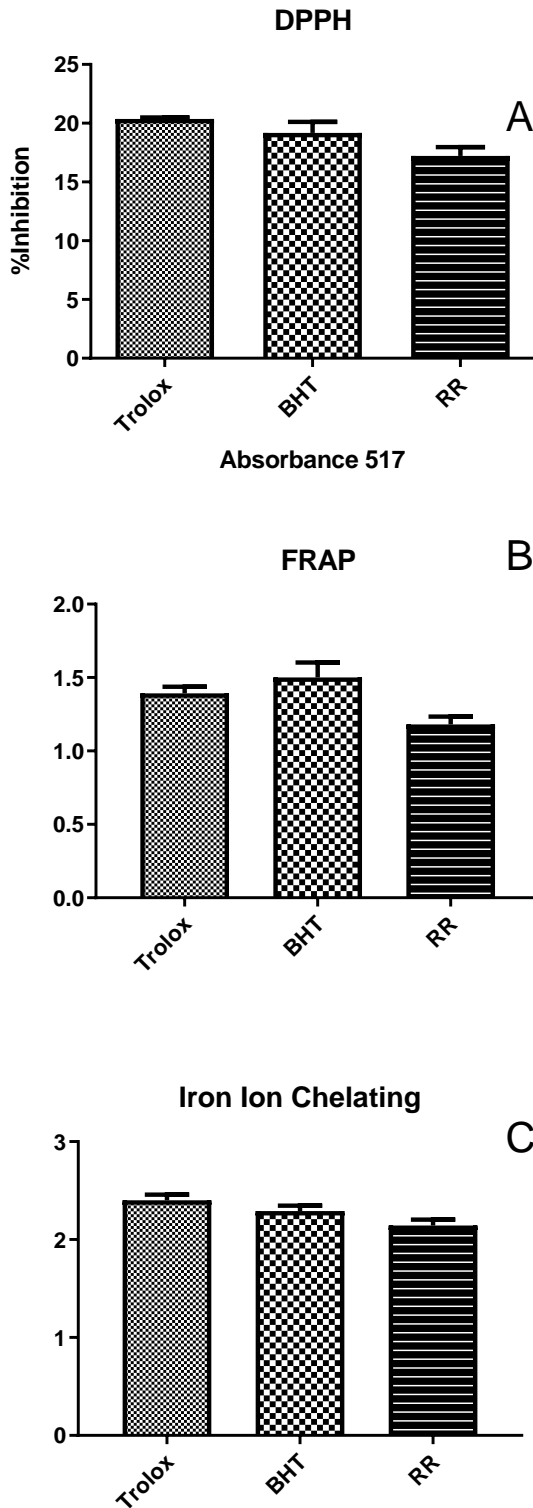


Figure 4. Antioxidant capacity (mg mL^{-1}) of *R.ribes* for the DPPH (PANEL A), FRAP (PANEL B), and Iron Ion Chelating (PANEL C) determinations (Absorbance). BHT and Trolox was used as a standard for DPPH, FRAP and Iron Ion Chelating (DPPH (PANEL A), FRAP (PANEL B) ve Demir İyonu Şelatlama (PANEL C) tayinleri için)

In addition, the total flavonoid and phenolic contents made are given in Table 5. According to the analyzes performed, the total flavonoid value was determined as 155.53 mg routine equivalent / mL extract, and the total phenolic value was determined as 69.57 mg gallic acid equivalent / mL.

Table 5. Total flavonoid and phenolic contents of the *R. ribes* methanol-chloroform extract from Elazığ/Arıcak. Rutin and gallic acid were used as standards for flavonoids and phenols, respectively^a (Elazığ/Arıcak'tan elde edilen *R. ribes* metanol-kloroform ekstraktının toplam flavonoid ve fenolik içeriği. Rutin ve gallik asit, sırasıyla flavonoidler ve fenoller için standart olarak kullanılmıştır)

Analysis	<i>R.ribes</i> roots extract
Total Flavonoid ($\mu\text{g RE/mL extract}$) ^b	155.53 \pm 0.36
Total Phenolic ($\mu\text{g GAE/mL extract}$) ^c	69.57 \pm 1.29

^aValues expressed are means \pm SD of three parallel measurements. ^bRE, Rutin equivalent. ^cGA, Gallic acid equivalent.

In the current study, we examined the antimicrobial effects of chloroform-methanol extract of the *R. ribes* plant obtained from Arıcak district, Elazığ Province, Turkey, on pathogen pneumonia isolates obtained from VAP patients in Adana Çukurova Hospital. As a result of the analyzes, it was determined that it showed strong antimicrobial effect on four isolates of *K. pneumonia*, *S. aureus* and *P. aeruginosa*. In addition, it was determined that *R. ribes* has very high antioxidant capacity with total flavonoid- phenolic and antioxidant experiments (DPPH, FRAP and Metal ion Chelating). Thus, it was determined that it gave effective results on *R. ribes* pneumonia isolates.

Mostly typical infections in intensive care units is VAP. Depending on the context and diagnostic criteria, reported incidences range greatly, from 5% to 40%. Long-term mechanical ventilation and length of stay in the ICU are linked to VAP [35]. An estimated 10% of deaths are attributed to VAP, and patients in surgical intensive care units have greater fatality rates. Strongly advised is microbiological confirmation of infection [7]. Although *P. aeruginosa* and methicillin-resistant *S.aureus* are among the common etiological agents of VAP, *A. baumannii* and *K. pneumoniae* are known to be the most important causes of VAP in many intensive care units worldwide [36]. In a clinical study, oral

herbal medicine mixture and mouthwash chlorhexidine (as a positive control) were compared in VAP patients. Oral herbal medicine formulation was given as miswak (stem of *Salvadora persica*), chamomile flower extract, listerine, veramin, zufa, *Echinacea angustifolia*, aloe vera green tea, and *Boswellia serrata* extracts. As a result of the study, it was revealed that oral herbal medicines are beneficial in preventing VAP, supporting our current study. It has been determined to play a significant function in maintaining oral health and preventing VAP by lowering the mouth's microbial flora [37].

The World Health Organization has reported that traditional medicines play an important role in maintaining, preventing chronic diseases, health and treating certain medical conditions. Studies have shown that compounds including, rhein, physcion-8-O-glucoside, chrysopanone, emodin, physcion aloe emodin-8-O-glucoside, rhaponticin, aloemodin, and sennoside A are present in the roots of *R. ribes* [38]. These components can ameliorate many diseases by regulating cellular signaling pathways and oxidative stress and inflammation processes [39]. Several *in vivo* and *in vitro* studies have demonstrated that *R. ribes* exerts its therapeutic effects via a variety of pathways [40]. Numerous studies have demonstrated the many biological properties of *R. ribes* root and leaf extract, such as delaying the progression of Alzheimer's disease, antibacterial and antiviral activity against *Herpes simplex virus*, *Enterobacter aerogenes* and *Bacillus subtilis* [41]. Meydan et al. (2022) stated that in an *in vitro* study in which they applied the aqueous extract and ZnO nanoparticle of *R. ribes*, it showed antimicrobial effect for gram-negative and positive bacteria. They showed that the highest effect was *B. subtilis* (21.5 mm zone), secondly *S. aureus* (14.1 mm zone diameter), which supports our studies [42]. In addition, *R. ribes* extracts from the HajeOmaran mountains in Iraq were subjected to examination, and the results revealed an antibacterial effect that was consistent with our investigation. Although *E. coli* was the most effective bacteria in their study, it was found that *K. pneumoniae* were the bacteria that had the greatest antimicrobial effect in our study when compared to the current study [43]. Wijesinghe et al. (2021), in their *in vitro* study, found that cinnamon leaf essential oil showed antibacterial effects against *P. aeruginosa*, *S. aureus* and *K. pneumoniae*, in parallel with our current data [44]. In addition, in a study on some resistant gram-positive/negative bacteria; reported that treatment of drug-sensitive strains with a combination of ciprofloxacin and garlic extract was antimicrobial

synergistic on *S. aureus* and *P. aeruginosa* bacteria [45].

Reactive oxidative species, which damages cells, are prevented by natural antioxidant molecules [46]. By preventing the onset or spread of the oxidative chain reaction, which functions as free radical scavengers, singlet oxygen scavengers, and reducing agents, increasing the intake of exogenous antioxidants will lessen the harm caused by oxidative stress. Exogenous antioxidants come primarily from foods and medicinal plants, such as fruits, flowers, spices and traditional herbs [47-48]. In an *in vitro* study where anthraquinones extracted from *R. ribes* were applied to bacteria, DPPH, FRAP and ferrous-ions chelating activities were found to be quite high as a result of the analyzes, and it is thought to be related to the secondary metabolites, flavonoids and phenolic substances in its structure [49]. In a study on obese rats, it was reported that *R. ribes* root extract improved DNA damage and MDA levels in brain tissues and showed positive effects on antioxidant parameter activities in different tissues [50]. Another study revealed that the whole plant butanol fraction of *R. ribes* collected from the Pakistan region exhibited significant anticancer (MCF-7) activity [51].

4. CONCLUSIONS (SONUÇLAR)

In conclusion, our research suggests that *R. ribes* extraction may reduce the severity of VAP in *in vitro* studies and that this effect may be mediated by altering bacterial infection mediators and oxidative stress parameters. In addition, it was confirmed that the *R. ribes* formulations applied in the study showed similar effects with antibiotic drugs with known benefits. We believe that herbal therapies, such as *R. ribes*, can provide a safe alternative to conventional treatments for the treatment of clinical VAP, which should be validated by carefully planned research. As a limitation of our study, experimental animal and human studies may compare with antibiotics often used to treat VAP symptoms. Long-term *in vivo* and clinical trials in humans with a focus on the VAP solution are required to elucidate the mechanism by which herbal supplements improve functional status for *in vitro* studies.

ACKNOWLEDGMENTS (TEŞEKKÜR)

We would like to thank the residents of Saman Village, Arıcak, Elazığ, for their help in *R. ribes* samples collection and imaging studies.

DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS (ETİK STANDARTLARIN BEYANI)

This study was approved by the local ethics committee Çukurova University (protocol no: 54/2016).

Bu makalenin yazarları, bu çalışmanın Çukurova Üniversitesi yerel etik kurul tarafından onaylandığını beyan eder (protokol no: 54/2016).

AUTHORS' CONTRIBUTIONS (YAZARLARIN KATKILARI)

Oğuzhan ÖZDEMİR: He conducted the experiments, analyzed the results and performed the writing process.

Deneyleri yapmış, sonuçlarını analiz etmiş ve makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

Nurten YILMAZ: She conducted the analyzed the results and performed the writing process.

Sonuçların analizini ve yazım sürecini yürüttü.

Mustafa Oğuzhan KAYA: He performed the writing process and supervising.

Yazım sürecini ve süpervizörlüğü gerçekleştirdi.

CONFLICT OF INTEREST (ÇIKAR ÇATIŞMASI)

There is no conflict of interest in this study.

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

REFERENCES (KAYNAKLAR)

- [1] Togacar M., Ergen B., Sertkaya M.E., Detection of pneumonia with deep learning model, Firat University Journal of Engineering Science, 31 (2019) 223–230.
- [2] Adnan M., Ali S., Sheikh K., Amber R., Review on antibacterial activity of Himalayan medicinal plants traditionally used to treat pneumonia and tuberculosis, Journal of Pharmacy and Pharmacology, 71 (2019) 1599–1625.
- [3] Cillóniz C., Torres A., Niederman M.S., Management of pneumonia in critically ill patients, BMJ, 375 (2021).
- [4] Pettigrew M.M., Tanner W., Harris A.D., The lung microbiome and pneumonia, The Journal of Infectious Diseases, 223 (2021) 241–245.
- [5] Spalding M.C., Cripps M.W., Minshall C.T., ventilator-associated pneumonia: new definitions, Critical Care Clinics, 33 (2017) 277–292.
- [6] Oliveira J., Zagalo C., Cavaco-Silva P., Prevention of ventilator-associated pneumonia, Revista Portuguesa de Pneumologia, 20 (2014) 152–61.
- [7] Papazian L., Klompas M., Luyt C.E., Ventilator-associated pneumonia in adults: a narrative review, Intensive Care Medicine, 46 (2020) 888–906.
- [8] Shahzad F., Anderson D., Najafzadeh M., The antiviral, anti-inflammatory effects of natural medicinal herbs and mushrooms and SARS-CoV-2 infection, Nutrients, 12, (2020) 2573; doi:10.3390/nu12092573.
- [9] Singh A.K., Sharma N., Ghosh M., Park Y.H., Jeong D.K. Emerging importance of dietary phytochemicals in fight against cancer: Role in targeting cancer stem cells, Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 57 (2017) 3449–3463.
- [10] Ozdemir O., Tuzcu Z. Resveratrol attenuates diabetic nephropathy by modulating organic transporters and heat shock proteins in streptozotocin-induced diabetic rats, Turkish Journal of Nature and Science, 4 (2015) 36–43.
- [11] Kirit A., Takim K., Durmus E., Guler E.M., Yenigun V.B., Bulut H., Kocyigit A., The anti-cancer effect of *Rheum ribes* L.'s ethanol extracts on malign melanoma cells, Journal of Health Sciences and Medicine, 3 (2020) 148 – 152.
- [12] Raad K., Javed A. Analysis of Chemical Composition by GC/MS and Assessment of Anticancer Activity of Rhubarb (*Rheum ribes* Linn.) Stalks, Applied Biological Research, 24 (2022) 413–419.
- [13] Demiray H., Estep A.S., Tabanca N., Becnel J.J., Demirci B. Chemical Constituents from *Rheum ribes* Shoots and its Insecticidal Activity Against *Aedes aegypti*, Revista Brasileira de Farmacognosia, 32 (2022) 81–85.
- [14] Cinar-Ayan I., Cetinkaya S., Dursun H.G., Sutar I., Bioactive compounds of *Rheum ribes* L. and its anticancerogenic effect via induction of apoptosis and miR-200 family expression in human colorectal cancer cells, Nutrition and Cancer, 73 (2021) 1228–1243.
- [15] Amiri N., Shafaghat A., Salimi F., Screening of the essential oil, hexane extract, chemical composition, antioxidant activity, and antimicrobial activity of the flower *Rheum ribes* L. from Iran, Journal of Essential Oil Bearing Plants, 18 (2015) 1108–1115.
- [16] Kalkan S., Otag M.R., Engin M.S., Physicochemical and bioactive properties of edible methylcellulose films containing *Rheum ribes* L. Extract, Food Chemistry, 307 (2020) 125524.
- [17] Ozdemir O., Kaya M.O., Gok M., Yilmaz N., Tuzcu Z., Chloroform-Methanol extraction

- antimicrobial and antioxidative potential of *Rheum ribes* originating from Elazığ/Arıcak Province, Journal of the Institute of Science and Technology, 13 (2023) 830–838.
- [18] Ozdemir O., Yılmaz N., Gok M., Kaya M.O., Determination of antimicrobial and antioxidant activities of *Lavandula angustifolia* volatile oil, Turkish Journal of Agriculture Research, 9 (2022) 265–273.
- [19] Tufekci A.R., Aksit H., Gul F., Demirtas I., Determination of phenolic profile of *Cirsium arvense* (L.) scop. subsp. *vestitum* (Wimmer et Grab.) petrak plant, Eurasian Journal of Biological and Chemical Sciences, 1 (2018) 33–36.
- [20] File T.M., Recommendations for treatment of hospital-acquired and ventilator-associated pneumonia: review of recent international guidelines, Clinical Infectious Diseases, 51 (2010) 42–47.
- [21] Kalanuria A.A., Ziai W., Zai W., Mirski M. Ventilator-associated pneumonia in the ICU, Crit Care, 18 (2014) 208.
- [22] Bauer A.W., Kirby W.M.M., Sherris J.C., Turck M., Antibiotic susceptibility testing by a standardized single disk method. American Journal of Clinical Pathology, 45 (1966) 493–496.
- [23] Ericsson H.M., Sherris J.C., Antibiotic sensitivity testing. report of an international collaborative study, Acta Pathologica et Microbiologica Scandinavica, Section B, 217 (1966) 90.
- [24] Ryan K.J., Schoenknecht F.D., Kirby W.M.M., Disc sensitivity testing, Hospital Practice, 5 (1970) 91- 100.
- [25] Anonymous, Performance Standards for Antimicrobial Disk Susceptibility Tests, 9th Ed. Clinical and Laboratory Standards Institute, Approved Standard M2-A9, CLSI, Wayne, Pa, 2006.
- [26] Stella L.R., Marín D., Metodologías para evaluar *in vitro* la actividad antibacteriana de Compuestos de origen vegetal, Scientia et technical Universidad Tecnológica de Pereira, 42 (2009) 263–268.
- [27] Anonymous, Disk Diffusion Supplemental Tables, 4th Ed. Clinical and Laboratory Standards Institute, M100-S17 (M2), CLSI, Wayne Pa, 2007.
- [28] Lalitha M.K., Manual on antimicrobial susceptibility testing. (under the auspices of indian association of medical microbiologists). Washington, dc: American Society for microbiology, 2004.
- [29] Blois M.S., Antioxidant determinations by the use of a stable free radical, Nature, 26 (1958) 1199–2000.
- [30] Dinis T.C.P., Maderia V.M.C., Almeida L.M., Action of phenolic derivatives (Acetaminophen, Salicylate and 5-aminosalicylate) as inhibitors of membrane lipid peroxidation and as peroxyl radical scavengers, Archives of Biochemistry and Biophysics, 315 (1994) 161–169.
- [31] Benzie I.F.F, Strain J.J., The ferric reducing ability of plasma as a measure of antioxidant power: the FRAP assay, Analytical Biochemistry, 239 (1996) 70–76.
- [32] Prior R.L., Wu X., Schaich K., Standardized methods for the determination of antioxidant capacity and phenolics in foods and dietary supplements, Journal Agriculture Food Chemistry, 53 (2005) 4290–4302.
- [33] Slinkard K., Singleton V.L. Total Phenol Analysis: Automation and Comparison with Manual Methods, American Society for Enology and Viticulture, 28 (1977) 49–55.
- [34] Park Y-S., Jung S-T., Kang S-G. Heo B.G., Arancibia-Avila P., Toledo P., Drzewiecki J., Namiesnik J., Gorinstein S. Antioxidants and proteins in ethylene-treated kiwifruits, Food Chemistry, 107 (2008) 640–648.
- [35] Modi A.R., Kovacs C.S., Hospital-acquired and ventilator-associated pneumonia: Diagnosis, management, and prevention, Cleveland Clinic Journal of Medicine, 87 (2020) 633–639.
- [36] Salehi M., Jafari S., Ghafouri L., Malekafzali Ardakani H., Abdollahi A., Beigmohammadi M.T., Dehghan Manshadi S.A., Feizabadi MM, Ramezani M, Abtahi H, Seifi A. Ventilator-associated pneumonia: multidrug resistant acinetobacter vs. extended spectrum beta lactamase-producing Klebsiella. Journal of Infection in Developing Countries, 14 (2020) 660–663.
- [37] Mojtahedzadeh M., Mashhadi Akbar, Boojar M., Habtemariam S., Nabavi S.M., Najafi A., Ghahremanian A., Baktash M., Aghaabdollahian S., Sureda A., Bagheri M., Systematic review: effectiveness of herbal oral care products on ventilator-associated pneumonia, Phytotherapy Research, 35 (2021) 3665–3672.
- [38] Yildirim M., Degirmenci U., Akkapulu M., Comelekoglu U., Balli E., Metin Ozcan T., Berkoz M., Yalin A.E., Yalin S., The effect of *Rheum ribes* L. on oxidative stress in diabetic rats, Journal of Basic and Clinical Physiology and Pharmacology, (2020).
- [39] Wang Y., Yu F., Li A., He Z., Qu C., He C., Ma X., Zhan H., The progress and prospect of natural components in rhubarb (*Rheum ribes* L.)

- in the treatment of renal fibrosis, *Frontiers in Pharmacology*, 13 (2022) 919967.
- [40] Keshavarzi Z., Shakeri F., Maghool F., Jamialahmadi T., Johnston T.P., Sahebkar A, A review on the phytochemistry, pharmacology, and therapeutic effects of *Rheum ribes*, *Advances in Experimental Medicine and Biology*, 1328 (2021) 447–461.
- [41] Shamansoori M.T., Karimi E., Oskoueian E., *Rheum ribes* extract-loaded nanoliposome as a novel phytogetic antibiotic alternative in mice challenged by *Escherichia coli* (O157:H7), *Biotechnology and Applied Biochemistry*, 69 (2022) 2540–2549.
- [42] Meydan I., Burhan H., Gur T., Seckin H., Tanhaei B., Sen F., Characterization of *Rheum ribes* with ZnO nanoparticle and its antidiabetic, antibacterial, DNA damage prevention and lipid peroxidation prevention activity of *in vitro*, *Environmental Research*, 204 (2022) 112363.
- [43] Alaadin A.M., Al-Khateeb E.H., Jager A.K. Antibacterial Activity of the Iraqi *Rheum ribes* Root, *Pharmaceutical Biology*, 45 (2007) 688–690.
- [44] Wijesinghe G.K., Feiria S.B., Maia F.C., Oliveira T.R., Joia F., Barbosa J.P., Boni G.C., Höfling J.F., *In-vitro* antibacterial and antibiofilm activity of *Cinnamomum verum* leaf oil against *Pseudomonas aeruginosa*, *Staphylococcus aureus* and *Klebsiella pneumoniae*, *Anais da Academia Brasileira de Ciencias*, 93 (2021) e20201507.
- [45] Magrys A., Onder A., Tchórzewska D., Antibacterial properties of *Allium sativum* L. against the most emerging multidrug-resistant bacteria and its synergy with antibiotics, *Archives of Microbiology*, 203 (2021) 2257–2268.
- [46] de Giffoni de Carvalho J.T., da Silva Baldivia D., Leite D.F., de Araújo L.C.A., de Toledo Espindola P.P., Antunes K.A., Rocha P.S., de Picoli Souza K., Dos Santos E.L., Medicinal plants from Brazilian cerrado: antioxidant and anticancer potential and protection against chemotherapy toxicity, *Oxidative Medicine Cellular Longevity*, 25 (2019) 3685264.
- [47] Xu D.P., Li Y., Meng X., Zhou T., Zhou Y., Zheng J., Zhang J.J., Li H.B., Natural antioxidants in foods and medicinal plants: extraction, assessment and resources, *International Journal of Molecular Sciences*, 18 (2017) 96.
- [48] Yagmuroglu O., Determination of total antioxidant capacities as ascorbic acid equivalent of tea extract samples from different brands using digital image-based colorimetric detection method, *Gazi University Journal of Science Part C: Design and technology*, 10 (2022) 682–690.
- [49] Gecibesler I.H., Disli F., Bayindir S., Toprak M., Tufekci A.R., Sahin Yaglioglu A., Altun M., Kocak A., Demirtas I., Adem S., The isolation of secondary metabolites from *Rheum ribes* L. and the synthesis of new semi-synthetic anthraquinones: Isolation, synthesis and biological activity, *Food Chemistry*, 342 (2021) 128378.
- [50] Bati B., Celik I., Turan A., Eray N., Alkan E.E., Zirek A.K, Effect of isgin (*Rheum ribes* L.) on biochemical parameters, antioxidant activity and DNA damage in rats with obesity induced with high-calorie diet, *Archive Physiology Biochemistry*, 129 (2023) 298–306.
- [51] Achakzai J.K., Anwar Panezai M., Kakar M.A., Kakar A.M., Kakar S., Khan J., Khan N.Y., Khilji I., Tareen A.K., *In vitro* anticancer MCF-7, anti-Inflammatory, and brine shrimp lethality assay (BSLA) and GC-MS analysis of whole plant butanol fraction of *Rheum ribes* (WBFRR), *BioMed Research International*, 2019 (2019) 3264846.



Tip-2 Nöro-Bulanık Denetleyiciler ile Döner Kanatlı İnsansız Hava Aracının Yörünge Takibi

Yeşim ÖNİZ*

İstanbul Bilgi Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 08/06/2023
Düzeltilme: 14/10/2023
Kabul: 24/11/2023

Anahtar Kelimeler

Döner Kanatlı İnsansız
Hava Aracı
Tip-2 Nöro-Bulanık
Denetleyici
Kayma Kipli Kontrol

Article Info

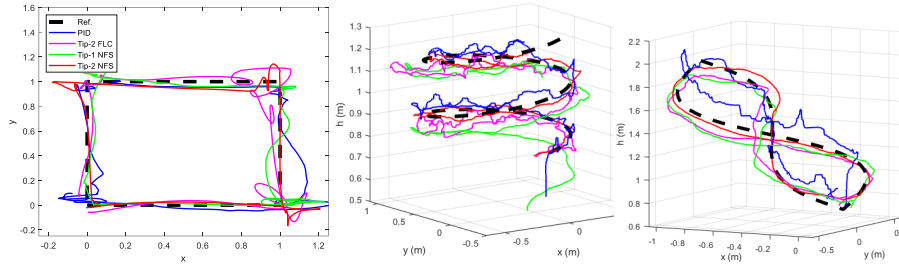
Research article
Received: 08/06/2023
Revision: 14/10/2023
Accepted: 24/11/2023

Keywords

Quadrotor
Type-2 Neuro-fuzzy
Controller
Sliding Mode Control

Grafik Özet (Graphical/Tabular Abstract)

Bu çalışmada, tip-2 nöro-bulanık denetleyiciler kullanılarak bir döner kanatlı insansız hava aracının yörünge takibi gerçekleştirilmiştir. Özellikle deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar, tip-2 nöro-bulanık denetleyiciler için geliştirilen kayma kipli kontrol tabanlı öğrenme algoritmalarının hedef yörüngeden daha az sapma ve daha gürbüz sistem cevabı sağladığını göstermektedir. / In this study, the trajectory tracking problem of a rotary wing unmanned aerial vehicle has been addressed by the use of type-2 neuro-fuzzy controllers. Especially the results recorded in the real-time experiments indicate that the proposed type-2 controllers with sliding mode control theory-based learning algorithm provide less deviation from the target trajectory and more robust system response.



Şekil A: Hedefyörünge takibi için deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar /
Figure A: Trajectory tracking results obtained from experimental studies

Önemli noktalar (Highlights)

- Üç farklı yörünge için benzetim ve deneysel çalışmalar yapılmıştır. / Simulation and experimental studies were carried out for three different trajectories.
- Parametre güncelleme kurallarının çıkarımında değişken yapıli sistemler kuramı kullanılmıştır. / Sliding mode control theory has been used in the derivation of the parameter update rules.
- Deneysel ve benzetim çalışmaları orantılı-integral-türev (PID) denetleyici, tip-2 bulanık mantık denetleyici ve tip-1 nöro-bulanık denetleyici ile tekrarlanmış olup denetleyicilerin cevapları karşılaştırılmıştır. / Experimental and simulation studies were repeated with proportional-integral-derivative (PID) controller, type-2 fuzzy logic controller and type-1 neuro-fuzzy controller and the responses of the controllers were compared.

Amaç (Aim): Bu çalışmada İHA'ların yörünge takibi pronlemi için daha gürbüz sistem cevabı sağlayan tip-2 nöro-bulanık denetleyicinin geliştirilmesi amaçlanmıştır. / In this study, it is aimed to develop a type-2 neuro-fuzzy controller that provides a robust system response for the trajectory tracking problem of UAVs.

Özgünlük (Originality): Parametre güncelleme kurallarının çıkarımında benzer çalışmalarda yoğunlukla kullanılan eğim düşümü yöntemi yerine değişken yapıli sistemler kuramı kullanılmıştır. / In the derivation of the parameter update rules, the theory of variable structure systems is used instead of the gradient-descent method, which is widely used in similar studies.)

Bulgular (Results): Benzetim ve deneysel çalışmalarda önerilen denetleyici ile çalışmada kullanılan diğer denetleyicilere göre daha küçük hata değerleri elde edilebildiği ve bozucu etkenlerin etkisinin denetleyici başarımı üzerinde daha sınırlı olduğu gözlemlenmiştir/ In simulation and experimental studies, it is observed that the proposed controller can achieve smaller error values than the other controllers used in the study and the effect of disturbance is limited on the controller performance.

Sonuç (Conclusion): Değişken yapıli sistemler tabanlı öğrenme algoritmaları tip-2 nöro-bulanık denetleyicilerde kullanıldığında, hedef yörüngeden daha az sapma ve daha gürbüz sistem cevabı elde edilebilir./ Use of variable structure systems-based learning algorithms in type-2 neuro-fuzzy controllers can provide less deviation from the target trajectory and more robust system response.



Tip-2 Nöro-Bulanık Denetleyiciler ile Döner Kanatlı İnsansız Hava Aracının Yörünge Takibi

Yeşim ÖNİZ*

İstanbul Bilgi Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

Makale Bilgisi

*Araştırma makalesi
Başvuru: 08/06/2023
Düzeltilme: 14/10/2023
Kabul: 24/11/2023*

Anahtar Kelimeler

*Döner Kanatlı İnsansız Hava Aracı
Tip-2 Nöro-Bulanık Denetleyici
Kayma Kipli Kontrol*

Öz

Bu çalışmada, tip-2 nöro-bulanık denetleyiciler kullanılarak bir döner kanatlı insansız hava aracının yörünge takibi gerçekleştirilmiştir. Geliştirilen kontrol sisteminin etkinliğini belirlemek amacıyla, oluşturulan üç farklı yörünge için benzetim ve deneysel çalışmalar yapılmıştır. Her bir eksen için ayrı bir denetleyici tasarlanmış olup hava aracının yörünge takibi sırasında ilgili eksen için gerçek ve hedef konumları arasındaki fark ve bu değerlerin zamana göre türevi denetleyicilerin giriş sinyalleri olarak kullanılmıştır. Elde edilen sonuçları daha iyi değerlendirebilmek amacıyla aynı yörüngeler için deneysel ve benzetim çalışmaları orantılı-integral-türev (PID) denetleyici, tip-2 bulanık mantık denetleyici ve tip-1 nöro-bulanık denetleyici ile tekrarlanmış olup denetleyicilerin cevapları karşılaştırılmıştır. Gerçek zamanlı deneysel çalışmalar, Parrot firması tarafından üretilen Ar.Drone 2.0 ile iç mekanda kontrollü bir ortamda gerçekleştirilmiştir. Özellikle deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar, tip-2 nöro-bulanık denetleyiciler için geliştirilen kayma kipli kontrol tabanlı öğrenme algoritmalarının hedef yörüngeden daha az sapma ve daha gürbüz sistem cevabı sağladığını göstermektedir.

Trajectory Tracking of a Quadrotor Using Type-2 Neuro-Fuzzy Controllers

Article Info

*Research article
Received: 08/06/2023
Revision: 14/10/2023
Accepted: 24/11/2023*

Keywords

*Quadrotor
Type-2 Neuro-fuzzy
Controller
Sliding Mode Control*

Abstract

In this study, the trajectory tracking problem of a rotary wing unmanned aerial vehicle has been addressed by the use of type-2 neuro-fuzzy controllers. In order to determine the effectiveness of the developed control system, simulation and experimental studies have been performed for three different trajectories. The movement of the quadrotor in each direction has been controlled by a separate controller, and the difference between the actual and target positions for the relevant axis during the trajectory tracking along with the time derivative of this value has been fed to the controllers as the input signals. In order to better evaluate the results obtained, experimental and simulation studies for the same trajectories have been repeated with proportional-integral-derivative (PID) controllers, type-2 fuzzy logic controllers and type-1 neuro-fuzzy controllers, and the responses of these controllers have been compared. Real-time experimental studies have been carried out indoors in a controlled environment with the Ar.Drone 2.0 produced by Parrot company. Especially the results recorded in the real-time experiments indicate that the proposed type-2 controllers with sliding mode control theory-based learning algorithm provide less deviation from the target trajectory and more robust system response.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Son yüzyıl, uçak teknolojisinde çok büyük gelişmelere sahne olmuştur. 1903 yılındaki ilk insanlı uçuştan bu yana uçak tasarımları gitgide gelişerek bugün büyük kargo taşıyabilen, yüksek manevra kabiliyetine sahip, yüksek hız ve irtifalara ulaşabilen uçakların tasarımlarını mümkün hale getirmiştir. 20. yüzyılın ikinci yarısından itibaren ise insansız hava araçlarının (İHA) çeşitli askeri amaçlarla geliştirilip kullanılmaya başlandığını ve bu hava araçlarına olan ilginin karmaşık ve

belirsizlikler içeren ortamlarda sağladıkları avantajlar nedeniyle gün geçtikçe artmakta olduğunu gözlemleyebiliriz. Özellikle fiziksel koşulların zorlu veya tehlikeli olduğu görevler ele alındığında, İHA'ların tam ölçekli insanlı bir hava aracına kıyasla neden yoğun olarak tercih edildiğini daha rahat anlayabiliriz. Son yirmi yıl içerisinde uygun fiyatlı, kararlı ve yüksek performansa sahip elektronik bileşen ve sistemlerin geliştirilmesi ve gerekli malzemelerin kolayca ulaşılabilir olması sayesinde de insansız hava araçlarının araştırma ve üretimi daha yaygın hale gelmiş ve askeri

alanlardaki kullanımlarının yanı sıra akademik araştırmalar, arama kurtarma, havadan görüntüleme, sınır güvenliği, haritalama, topografya, yangın takibi gibi farklı uygulamalarda da tercih edilmeleri söz konusu olmuştur [1-3].

Bu çalışma kapsamında dört rotorlu döner kanat tipi bir İHA kullanılmıştır. Genel olarak bu tür İHA'lar gövde, elektronik sistemler ve rotorlar olmak üzere 3 ana bölümden oluşmaktadır. Gövde temel olarak birbirine bağlanmış iki bardan oluşmakta olup bu yapı genellikle simetrik bir özellik taşımakta ve enerji tasarrufu sağlamak amacıyla mümkün olduğunca hafif ve dayanıklı bir malzemeden üretilmektedir. İki barın da her iki ucunda rotorlar yer almaktadır. Bu tür hava araçlarında tüm uçuş ve manevralar için sadece bu dört motor kullanılmakta ve motorlara iletilen sinyaller ile İHA'nın hareketleri belirlenmektedir. Bu nedenle çeşitli algılayıcılardan (basınç ölçer, jiroskop, pusula, GPS, ultrasonik, vb.) toplanan verileri alacak ve irtifa, konum gibi arzu edilen çıktılara ulaşmak için ulaşmak için gereken sinyalleri tahrik elemanlarına iletecek elektronik elemanlara ihtiyaç duyulmaktadır.

Döner kanatlı İHA'nın istenilen şekilde ve yörüngede hareket edebilmesi için uçuş parametrelerinin yüksek doğruluk derecesi ile hassas bir şekilde uçuş öncesinde ayarlanması gerekmektedir. Aksi durumlarda istenilen yörünge hareketleri elde edilemeyebilir ve çeşitli kaza riskleri ortaya çıkabilir. Ancak bu tür İHA'ların hareket denetimi, ayrışamayan doğrusal olmayan dinamiklere, çalışma ortamlarında pek çok belirsizliği ve bozan etkenlere sahip olmaları nedeniyle kontrol mühendisliği açısından pek çok zorluğu içinde barındırmaktadır [4]. Ayrıca birden fazla motorun aynı anda kontrol edilmesi, algılayıcılardan gelen verilerin içerdikleri hata payları ve gürültü, üç eksene ait açı değerlerinin elde edilmesindeki hatalar ve olumsuz hava koşulları İHA'ların denetimini zorlaştırmaktadır. Bu faktörlerin tümü, döner kanatlı bir İHA'nın hareket denetiminin oldukça zorlayıcı bir görev olmasına ve bu alanda çok sayıda araştırma faaliyetinin yürütülmesine yol açmaktadır. Bu çalışmalarda araştırmacılar tarafından genellikle iki farklı yaklaşım izlenmektedir. Model tabanlı denetleyicilerin kullanıldığı ilk yaklaşımda sistemin yüksek derecede doğruluk oranına sahip bir matematiksel modeli gerekli olurken ikinci yaklaşımda bu gereklilik modelden bağımsız denetleyicilerin kullanımı ile bertaraf edilmektedir.

Orantılı-integral-türev (PID) ve doğrusal kuadratik regülatör (LQR) gibi doğrusal, model tabanlı denetleyiciler, İHA'ların kontrolü için bir dereceye kadar başarı sağlamıştır. [5]'te, yükseklik ve konum denetimi için PID denetleyiciler kullanılarak döner kanatlı İHA'nın performansı, sert manevralar gerektiren farklı yörüngeler için test edilmiştir. [6]'da hem LQR hem de PID kontrol teknikleri kullanılmış ve yazarlar "ortalama" sonuçların elde edildiğini bildirmiştir. [7]'de LQR, optimal bir yörünge üretici ile birlikte kullanılmıştır. Görev sırasında referans yörüngede değişiklik gerektiren bir dizi benzetim çalışması yapılmıştır. Model öngörülü kontrol (MPC), İHA'ların yörünge izleme problemini ele alan başka bir model tabanlı denetim yaklaşımıdır. Yakın zamana kadar yüksek hesaplama gereksinimleri nedeniyle MPC'nin gerçek zamanlı uygulamaları sınırlı kalmaktayken yüksek performanslı işlemcilerin ortaya çıkması, bu tür denetleyicilerin sistemin örnekleme süresinin yeterince hızlı olması gereken havacılık mühendisliğinde kullanımına olanak sağlamıştır. [8]'de öncelikle döner kanatlı bir İHA için çeşitli çalışma noktaları belirlenmiş ve sistemin dinamikleri bu noktalarda için doğrusallaştırılarak bir dizi doğrusal denklem elde edilmiştir. Her bir doğrusal bölge için MPC en uygun denetim sinyalini sağlarken aynı zamanda bir doğrusal bölgeden diğerlerine geçişlerin yumuşak şekilde gerçekleşmesini mümkün kılmıştır. [9]'da, MPC denetleyicisinin hesaplama yükünü azaltmak amacıyla sistemin gelecekteki değerlerini tahmin edecek doğrusal bir öngörücü kullanılmıştır.

Uçak mühendisliğinde, sistemin yüksek derecede doğruluk oranına sahip matematiksel modelinin oluşturulması, bir dizi uçuş testi gerçekleştirerek rüzgar tüneli verilerinin toplanmasını ve sonrasında bu verilere uygun modelin uyarlanmasını gerektirmektedir. Bu süreç zaman alıcı olduğu kadar zahmetli de olup elde edilen model, kullanılan varsayım ve sadeleştirmelerden kaynaklanan tahmin hataları, malzeme özellikleri ve imalat toleransından kaynaklanan performans belirsizliği nedeniyle sınırlıdır [10-13]. Döner kanatlı İHA'lar için de geçerli olan bu belirsizlikler, tasarlanan kapalı döngü denetim sisteminin başarımında ciddi sapmalara neden olabilmektedir [14]. Bunun yanı sıra yukarıda da belirtildiği gibi algılayıcı sinyalleri genellikle yüksek oranda belirsizlik ve gürültü içermektedir. Belirlenimci modellerin, süreci uygun bir şekilde tanımlamakta yetersiz kaldığı böyle durumlarda bulanık mantık sistemleri, yapay sinir ağları gibi akıllı kontrol sistemlerinin kullanımı uygun bir çözüm olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu

tür modelden bağımsız denetleyici yapılarında, algılayıcılardan elde edilen verileri ve deneylerin sonuçlarını kullanarak fiziksel sistemin matematiksel denklemini belirlemek yerine, bu veriler doğrudan bir denetleyicinin tasarımı amacıyla kullanılmaktadır. Böylece sistemin yüksek derecede doğruluk içeren bir modeline olan ihtiyaç ortadan kaldırılarak belirsizlikler ve doğrusal olmayan etmenler içeren durumlarda denetleyici tasarımı kolaylaştırılmaktadır.

Yapay sinir ağlarında (ANN) insan beyninin öğrenme mekanizması yapay nöronlardan oluşan bir ağ tarafından taklit edilmektedir. Ağ, nöronlar arasındaki etkileşimleri kullanarak, istenen çıktıyı üretmek için ağırlıklarını uyarlamaktadır. [15]'te, döner kanatlı İHA'nın doğrusal ve açısal hızlarının ölçülemediği ve sistemin dinamik modelinin tam olarak bilinemediği varsayılmıştır. ANN ile İHA'nın hız vektörü tahmin edilmiş ve bu bilgi sistemin konumunu ve yönünü kontrol edip optimal bir yörünge yanıtı elde edilmesi amacıyla kullanılmıştır. [16]'da radyal tabanlı yapay sinir ağları kullanılarak sistemdeki bilinmeyen dinamikleri ve belirsizlikleri modellemek amacıyla öncelikle bir tanımlayıcı geliştirilmiş olup sonrasında bu model için sinir ağı tabanlı bir denetleyici oluşturulmuştur.

Modelden bağımsız denetim için yaygın olarak kullanılan bir başka yaklaşım, bulanık mantık denetleyicileridir. Bulanık mantık, üyelik fonksiyonları ve bulanık kurallar şeklinde ifade edilen uzman bilgisine dayanmaktadır. Üyelik fonksiyonlarının da bulanık olduğu ve bu sayede tip-1 bulanık mantık denetleyicilere göre belirsizlikleri modelleyip etkisini azaltabilme konusunda daha etkin olan tip-2 bulanık mantık denetleyicileri, belirsizlikler ve kesin olmayan bilgilerle karşı karşıya kalınan çoğu gerçek dünya uygulamasında tercih edilmektedir.

Literatürde bulanık mantık denetleyicileri sistemi kontrol etmek için tek başlarına kullanılabilecekleri gibi [17-19] yapay sinir ağları ile bulanık mantık sistemlerini birleştiren nöro-bulanık olarak adlandırabileceğimiz hibrit yapılarda sıklıkla kullanılmaktadır. Bu hibrit yapılar, sinir ağlarının öğrenme kabiliyetine ve bulanık sistemlerin uzman bilgisi ile belirsizliklerle başa çıkabilme yeteneğine sahip olmaları nedeniyle tercih edilmektedir. [20]'de nöro-bulanık denetleyici, İHA'nın yüksekliğini kontrol etmek amacıyla kullanılan PID denetleyicinin katsayılarını uyarlamak amacıyla kullanılmıştır. [21]'de ANFIS (Adaptive Neuro

Fuzzy Inference System) yapısı kullanılarak tip-2 bulanık mantık denetleyicisinin üyelik fonksiyonlarının ve kurallarının sayısı azaltılmaya çalışılmıştır.

Bu çalışmada, döner kanatlı insansız hava aracının yörünge izleme problemi için tip-2 nöro-bulanık denetleyici geliştirilmiştir. Parametre güncelleme kurallarının çıkarımında benzer çalışmalarda yoğunlukla kullanılan eğim düşümü yöntemi yerine değişken yapılı sistemler kuramı kullanılmıştır. Geliştirilen özgün denetleyicinin başarımı çalışmada kullanılan diğer denetleyicilerle karşılaştırılmıştır. Benzetim çalışmalarının yanı sıra Parrot firması tarafından üretilen AR.Drone 2.0 Elite model İHA üzerinde deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada kullanılan döner kanatlı İHA'nın kinematik ve dinamik modeli Bölüm 2'de sunulmuştur. Sırasıyla Bölüm 3 ve Bölüm 4'te tip-2 nöro-bulanık denetleyicinin yapısı ve parametrelerinin uyarlama kuralları paylaşılmıştır. Bölüm 5'te benzetim çalışmalarının sonuçları, Bölüm 6'da ise deneysel çalışmalarda elde edilen sonuçlar verilmiştir. Son bölüm, sonuç açıklamalarına ayrılmıştır.

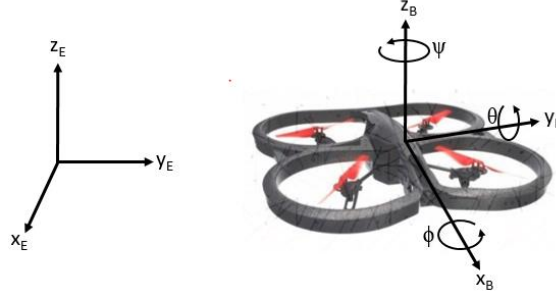
2. DÖNER KANATLI İHA'NIN MATEMATİKSEL MODELİ (MATHEMATICAL MODEL OF THE QUADROTOR)

Parrot firması tarafından üretilen AR.Drone 2.0 model İHA, düşük maliyeti ve kolay erişilebilirliği nedeniyle, benzetim çalışmaları ve gerçek zamanlı uygulamalar için test platformu olarak tercih edilmiştir. Matlab, Labview gibi çeşitli programlar üzerinden programlama imkanı sunan bu İHA pek çok araştırma projesinde aktif olarak kullanılmaktadır [22-23]. Bu İHA modelinde merkezi gövdenin etrafına, dört adet pervane simetrik olarak yerleştirilmiştir. Bu konfigürasyonda bitişik pervaneler ters yönde dönerek merkezi eksen etrafında sıfır net tork elde edilmesini ve böylece İHA'nın kontrolsüz şekilde dönmesinin önlenmesini sağlamaktadır. Her motora uygulanan enerji, belirlenen hareket yörüngesine ve istenilen hıza göre değiştirilmektedir.

Çalışmada kullanılan İHA, azami 18 km/h hıza ulaşabilmektedir. Toplam 436g ağırlığa sahip İHA 51.5 cm x 51.5 cm boyutlara sahiptir. İHA'nın güç gereksinimi 3 hücreli, 11.1 V ve 1000 mAh sağlayan bir lityum polimer pil ile karşılanmaktadır. İHA üzerinde gömülü bilgisayar sistemi CMAP 3630 1GHz ARM cortex A8 işlemciye sahip olup Linux OS işletim sistemini kullanmaktadır. DDR SDRAM 128MB hafızaya sahiptir.

Şekil 1'de gösterildiği üzere döner kanatlı İHA'lar, uçuş öteleme ve uçuş dönme olmak üzere toplam altı serbestlik derecesine sahiptir. Uçaklara benzer şekilde, x-ekseni ve y-ekseni boyunca dönme hareketlerini tanımlamak için sırasıyla yuvarlanma (ϕ) ve yunuslama (θ) terimleri kullanılırken sapma

açısı (ψ) z-ekseni boyunca dönme hareketine karşılık gelmektedir. Ayrıca döner kanatlı İHA'larda, x-ekseni boyunca öteleme hareketi, yunuslama değeri ayarlanarak üretilebilirken y-ekseni boyunca öteleme hareketi, yuvarlanma hareketinden kaynaklanmaktadır.



Şekil 1. Çalışmada kullanılan İHA için serbestlik dereceleri (Degrees of freedom for the UAV used in this study)

Altı serbestlik derecesine sahip döner kanatlı İHA'nın konumunu ve yönelimini belirleyebilmek amacıyla biri İHA'nın merkezine iliştilmiş ve $B = \{X_B, Y_B, Z_B\}$ şeklinde tanımlanmış, diğeri ise yerde belirlenen bir noktaya göre sabitlenen ve $E =$

$\{X_E, Y_E, Z_E\}$ şeklinde ifade edilen dünya koordinat sistemleri kullanılmaktadır. Denklem 1'de verilen dönüşüm matrisi R kullanılarak, B koordinat sistemine göre verilen konum ve doğrusal hız bilgileri E koordinat sistemine göre tanımlanabilir

$$R = \begin{bmatrix} \cos \theta \cos \psi & \sin \phi \sin \theta \cos \psi - \cos \phi \sin \psi & \cos \phi \sin \theta \cos \psi + \sin \phi \sin \psi \\ \cos \theta \sin \psi & \sin \phi \sin \theta \sin \psi + \cos \phi \cos \psi & \cos \phi \sin \theta \sin \psi - \sin \phi \cos \psi \\ -\sin \theta & \sin \phi \cos \theta & \cos \phi \cos \theta \end{bmatrix} \quad (1)$$

Newton ve Euler'in hareket yasaları kullanılarak döner kanatlı İHA için sistemin dinamik modeli Denklem 2'deki gibi elde edilebilir.

Tablo 1. Çalışmada kullanılan İHA için parametreler (Parameters for the UAV used in this study)

$$\begin{aligned} \ddot{x} &= \frac{1}{m} ((\cos \phi \sin \theta \cos \psi + \sin \phi \sin \psi)F_z + D_x) \\ \ddot{y} &= \frac{1}{m} ((\cos \phi \sin \theta \sin \psi - \sin \phi \cos \psi)F_z + D_y) \\ \ddot{z} &= \frac{1}{m} ((\cos \phi \cos \theta)F_z + D_z) - g \\ \ddot{\phi} &= \frac{(I_{yy} - I_{zz})\dot{\theta}\dot{\psi} - J\dot{\theta}(-\Omega_1 + \Omega_2 - \Omega_3 + \Omega_4) + lK_t(\Omega_4^2 - \Omega_2^2)}{I_{xx}} \\ \ddot{\theta} &= \frac{(I_{zz} - I_{xx})\dot{\phi}\dot{\psi} - J\dot{\phi}(-\Omega_1 + \Omega_2 - \Omega_3 + \Omega_4) + lK_t(\Omega_3^2 - \Omega_1^2)}{I_{yy}} \\ \ddot{\psi} &= \frac{(I_{xx} - I_{yy})\dot{\phi}\dot{\psi} + K_d(-\Omega_1^2 + \Omega_2^2 - \Omega_3^2 + \Omega_4^2)}{I_{zz}} \end{aligned} \quad (2)$$

Parametre	Değeri
m	0.445 kg
l	0.125 m
I_{xx}	$2.7 \cdot 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$
I_{yy}	$2.9 \cdot 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$
I_{zz}	$5.3 \cdot 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$
J	$2.03 \cdot 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$
K_d	$2.38 \cdot 10^{-9} \text{ N} \cdot \text{s}^2$
K_t	$9.14 \cdot 10^{-6} \text{ N} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^2$

Bu denklemde m İHA'nın ağırlığını, I_{xx} , I_{yy} ve I_{zz} sırasıyla İHA'nın x , y ve z doğrultularındaki atalet momentini ifade etmektedir. F_z terimi, z eksenini boyunca dikey itmeyi temsil eder. D_x , D_y ve D_z terimleri, x , y ve z doğrultularındaki hızlar için sürüklenme kuvvetleridir. J , rotorun atalet momentini ifade eder. Ω_i ($i=1,2,3,4$) motorların açısal hızlarını, l İHA'nın bar uzunluğunu, K_d hava sürtünme katsayısını, K_t ise itme kuvveti katsayısını göstermektedir. Bu çalışmada kullanılan Ar.Drone 2.0 Elite modeli için parametreler aşağıdaki tabloda verilmiştir [24-26]:

Kullanılan Ar.Drone 2.0, IEEE 802.11 kablosuz bağlantısı olan bir bilgisayar tarafından kontrol edilebilmektedir. İHA, bağlı olduğu istemciye iki veri akışı sağlamaktadır. Bunlardan ilki seyir verileri (navdata) diğeri ise video yayımıdır. Seyir verileri, atalet ölçüm sisteminden açı değerlerini, ultrasonik sensörden basınç ve irtifa değerlerini ve hız verilerini içerir. Ultrasonik sensörün menzili 6 m olup çalışma frekansı 25 Hz'dir. AR.Drone 2.0'ın ağırlık merkezine 3 eksenli bir dijital MEMS ivmeölçer yerleştirilmiştir. $\pm 2g$ aralığında kullanılabilen ivmeölçer 10 bit ADC ile

çalışmaktadır. Atalet ölçüm birimi 500 °/s'ye kadar ölçüm yapabilen iki analog sensörden oluşmaktadır. IMU sensöründe yer alan 3 eksenli jiroskopun hassasiyeti 2000°/s, 3 eksenli ivmeölçerin hassasiyeti ±50mg, 3 eksenli manyetometrenin hassasiyeti ise 6°'dir. Basınç sensörü ise ±10 Pa hassasiyete sahiptir.

Elde edilen bu verilerden aşağıdaki parametre grubu çeşitli denetleyicilerin tasarımında kullanılabilir.

z : dronun yerden yüksekliği, [m]
 v_x : x eksenindeki öteleme hareketinin hızı, [m/s]
 v_y : y eksenindeki öteleme hareketinin hızı, [m/s]
 ϕ : yuvarlanma açısı, [rad]
 θ : yunuslama açısı, [rad]
 ψ : sapma açısı, [rad]

İHA'nın hareket denetimini sağlamak amacıyla aşağıdaki $[-1, 1]$ aralığıyla sınırlandırılmış hareket kontrol komutları kullanılabilir:

u_z : z yönünde doğrusal hız komutu
 u_ψ : yalpalama eksenini etrafındaki açısal hız
 u_ϕ : yuvarlanma açısı komutu (Bu komut sola/sağa doğru eğilme açısı oluşturmak için kullanılmaktadır. Negatif değerler sola doğru eğilmeyi sağlayarak İHA'nın y(-) yönünde hareket etmesini sağlar.)
 u_θ : yunuslama açısı komutu (Bu komut öne/arkaya doğru eğilme açısı oluşturmak için kullanılmaktadır. Negatif değerler öne doğru eğilmeyi sağlayarak İHA'nın x(+) yönünde hareket etmesini sağlar.)

3. TİP-2 NÖRO-BULANIK DENETLEYİCİ (TYPE-2 NEURO-FUZZY CONTROLLER)

Lotfi Zadeh [27] tarafından tip-1 bulanık kümelerin bir uzantısı olarak ortaya konan tip-2 bulanık kümeler, bulanık bir küme için kesin üyelik fonksiyonlarının tanımlanamadığı, dilsel belirsizliklerin bulunduğu durumlarda yoğunlukla kullanılmaktadır. Bu tip bulanık kümelerde üyelik fonksiyonlarının kendisi de bulanıktır. Tip-2 bulanık sistemler, bulanık EĞER-O ZAMAN kuralları ile karakterize edilmekte olup kuralların öncül ve sonuç bölümlerindeki parametreler, tip-2 bulanık değerleri içermektedir. Bu çalışmada, her kuralın öncül ve sonuç bölümlerindeki bilinmeyen katsayıların uygun değerlerinin belirlenmesi amacıyla nöro-bulanık sistem (NFS) mimarisi kullanılmıştır. Kural sayısının eşit olduğu durumda, tip-2 NFS için tasarım parametrelerinin sayısı tip-1 NFS'ye göre daha fazladır. Bu durum da hesaplama

yükünün artmasına neden olduğundan tip-2 NFS'nin gerçek zamanlı uygulamalarını kısıtlamaktadır. Hesaplama yükünü azaltmak amacıyla çoğu araştırmacı, tip-2 bulanık sistemlerin tasarımında aralık değerli tip-2 bulanık kümeleri kullanmayı tercih etmektedir. Bu tür bulanık kümelerde ikincil üyelik değerleri bire eşit olduğundan ilgili hesaplamalar nispeten daha kolay gerçekleştirilebilmektedir [28]. Bu yaklaşımda, aralık değerli tip-2 bulanık kümeye ait en yüksek üst ve alt üyelik fonksiyonları tip-2 bulanık kümeyi karakterize etmek için kullanılmakta olup bu alt ve üst üyelik fonksiyonları tip-1 üyelik fonksiyonlarıdır.

Bu çalışmada kullanılan iki girişli tek çıkışlı tip-2 nöro-bulanık mantık denetleyicinin yapısı Şekil 2'de verilmiştir. Bu yapıda kuralların öncül kısmında aralık değerli tip-2 bulanık mantık üyelik fonksiyonları kullanılırken sonuç kısımlarında Takagi-Sugeno-Kang (TSK) yaklaşımı uygulanmıştır. Bu yaklaşımda bulanık kuralların sonuç kısmı Denklem 3'te belirtildiği gibi giriş sinyallerinin bir polinomu şeklinde olup tip indirgeme işlemine olan ihtiyacı ortadan kaldırmaktadır.

R_j : EĞER x_1, \tilde{A}_{j1} ve x_2, \tilde{A}_{j2} İSE,

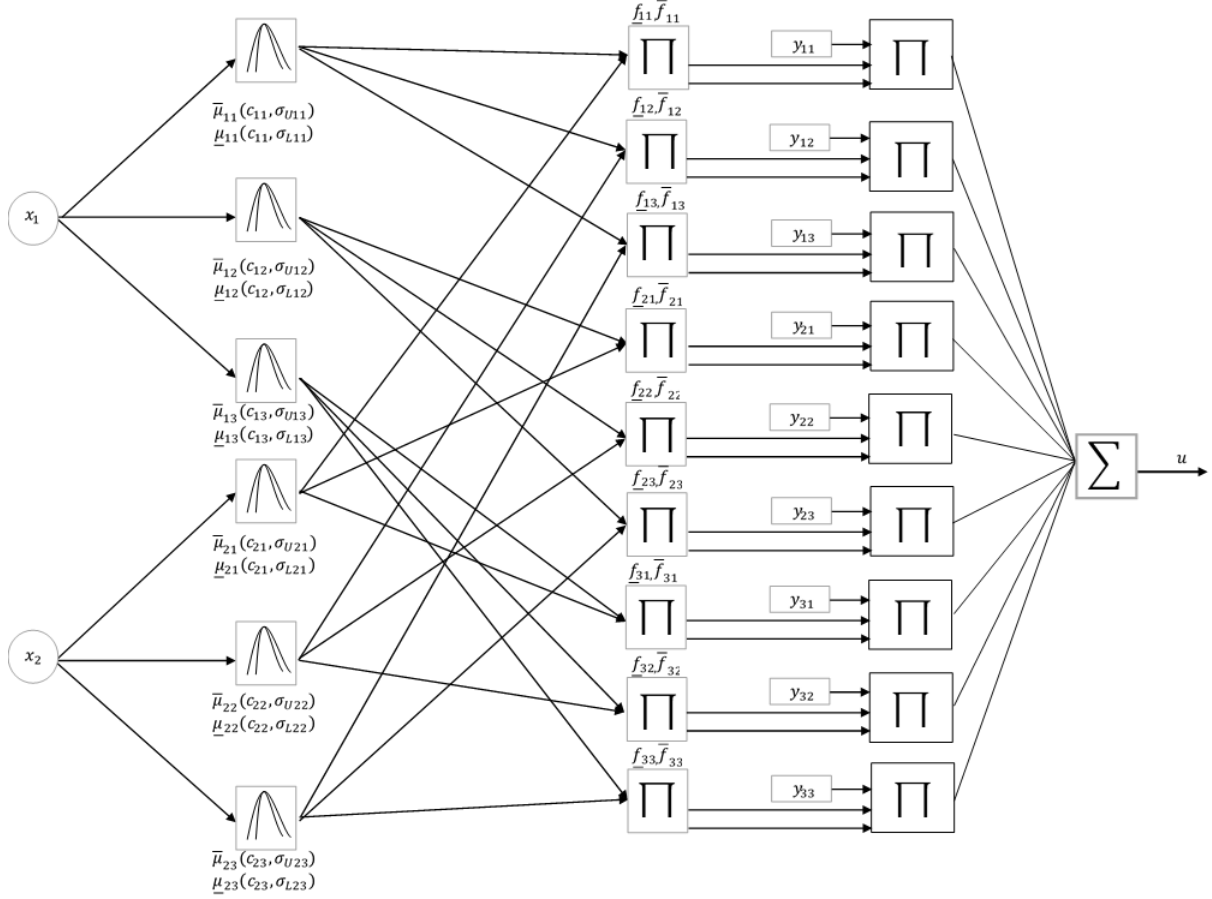
$$\text{O HALDE } y_j = \sum_{i=1}^m w_{ij} x_i + b_j \quad (3)$$

Burada x_1, x_2 giriş sinyallerini, y_j ($j=1, \dots, n$) bulanık kuralların çıkış sinyallerini, \tilde{A}_{jm} ise j numaralı kuralda i girişi için tanımlanan Gauss tip-2 üyelik fonksiyonlarını ifade etmektedir. w_{ij} ve b_j ($i=1, \dots, m, j=1, \dots, n$) kuralların sonuç kısımlarının parametreleridir. Bu çalışmada kuralların sonuç kısmında sıfır dereceli bir polinom kullanılmıştır, yani Denklem 3'te uygulanan TSK doğrusal fonksiyonu sadece b_j parametresini içermektedir.

Şekil 2'de gösterilen tip-2 nöro-bulanık denetleyicinin ilk katmanı sistemin giriş sinyallerinden oluşmaktadır. İkinci katmanda yer alan her bir düğüm bulanık mantığın dilsel bir terimine karşılık gelmektedir. Kuralların öncül kısımlarındaki her bir üyelik fonksiyonu, bir üst ve bir alt üyelik fonksiyonu ile temsil edilir. Her bir giriş sinyali için n sayıda tip-2 üyelik fonksiyonları kullanıldığı varsayıldığında, giriş sinyali i ($i = 1, \dots, m$) için üyelik fonksiyonları ($j = 1, \dots, n$) aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$\mu_{ij}(x_i) = [\underline{\mu}_{ij}(x_i), \bar{\mu}_{ij}(x_i)] \quad (4)$$

Bu ifadeye alt üyelik fonksiyonları $\underline{\mu}_{ij}(x_i)$ şeklinde gösterilirken üst üyelik fonksiyonları $\bar{\mu}_{ij}(x_i)$ şeklinde belirtilmiştir.



Şekil 2. Tip-2 nöro-bulanık denetleyicinin yapısı (Structure of a type-2 neuro-fuzzy controller)

Önerilen yapıda giriş sinyallerini bulanıklaştırma amacıyla Gauss tip-2 bulanık kümeler kullanılmıştır. Bu tip kümelerde belirsizlikler ortalama veya standart sapma (STD) ile ilişkilendirilebilir. Şekil 3(a) ve Şekil 3(b)'de belirsiz standart sapma ve belirsiz ortalamaya sahip Gauss tip-2 bulanık kümeler gösterilmektedir. Bu çalışmada belirsiz standart sapmaya sahip tip-2 bulanık kümeler kullanılmış olup üyelik fonksiyonlarının matematiksel ifadesi Denklem 5'te verilmiştir.

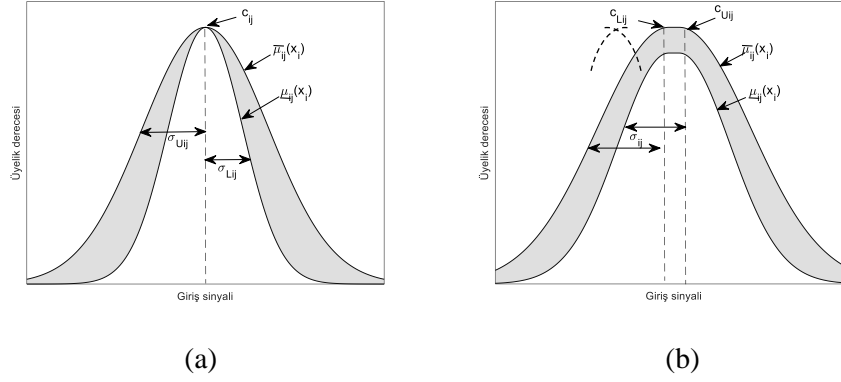
$$\underline{\mu}_{ij}(x_i) = \exp\left(-\frac{1}{2} \frac{(x_i - c_{ij})^2}{\sigma_{Lij}^2}\right)$$

$$\bar{\mu}_{ij}(x_i) = \exp\left(-\frac{1}{2} \frac{(x_i - c_{ij})^2}{\sigma_{Lij}^2}\right) \quad (5)$$

Üçüncü katmanda, çarpım t-norm operatörü kullanılarak ateşleme kuvveti aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır:

$$\underline{f}_{ij} = \underline{\mu}_{1i} \times \underline{\mu}_{2j}$$

$$\bar{f}_{ij} = \bar{\mu}_{1i} \times \bar{\mu}_{2j} \quad (6)$$



Şekil 3. (a) Belirsiz standart sapmaya sahip tip-2 bulanık küme, (b) Belirsiz ortalamaya sahip tip-2 bulanık küme ((a) Type-2 fuzzy set with uncertain standard deviation, (b) Type-2 fuzzy set with uncertain mean).

Kuralların ateşleme kuvvetlerini belirledikten sonra, bir sonraki katmanda tip-2 TSK bulanık mantık sisteminin durulaştırılmış çıkışı belirlenir. Durulaştırma işlemi için genellikle yinelemeli Karnik-Mendel algoritması kullanılmakla beraber bu algoritma hesaplama yükü nedeniyle gerçek zamanlı uygulamalara pek elverişli değildir. Bu amaçla denetleyicinin çıkışı u sinyalini belirlemek için [29]'daki yaklaşım bu çalışmada da Denklem 7'de gösterildiği gibi kullanılmıştır.

$$u = p \left(\sum_i \sum_j \underline{f}_{ij} y_{ij} \right) + q \left(\sum_i \sum_j \bar{f}_{ij} y_{ij} \right) \quad (7)$$

Bu denklemdeki p ve q ateşlenen her bir kuralın alt ve üst ateşleme seviyelerinin paylaşımını ağırlıklandıran tasarım parametreleridir.

4. PARAMETRE GÜNCELLEME KURALLARI (PARAMETER UPDATE RULES)

Tip-2 nöro-bulanık denetleyicinin istenilen başarıma ulaşabilmesi için bulanık kuralların öncül kısımlarında yer alan üyelik fonksiyonu parametrelerinin ve kuralların sonuç bölümlerinin uygun değerlerinin belirlenmesi gerekmektedir. Nöro-bulanık ağların eğitimi için genellikle eğitim düşünme tabanlı öğrenme algoritmaları kullanılmaktadır. Bu algoritmalarda ağız parametrelerinin hata fonksiyonuna göre gradyanları belirlendikten sonra parametreler belirlenen gradyanın ters yönünde güncellenerek hata fonksiyonun en aza indirilmesi hedeflenmektedir. Literatürde pek çok başarılı sonuç bildirilmiş olmasına rağmen [30,31] oluşturulan hata yüzeyinin düzgün olmaması bu öğrenme yönteminin başarımını olumsuz yönde etkilemektedir. Bu çalışmada, eğitim düşünme tabanlı öğrenme algoritmalarında karşılaşılan yakınsama ve kararlılık sorunlarının üstesinden gelebilmek amacıyla değişken yapıli sistemler tabanlı öğrenme

algoritmaları geliştirilerek denetim sistemine uyarlanmıştır. Güncelleme kurallarının türetilmesinde öncül kısımdaki tip-2 üyelik fonksiyonlarının sabit ortalamalı ve belirsiz standart sapmalı oldukları varsayılmıştır.

Kayma kipli denetim (KKD), değişken yapıli sistemler kuramının bir alt sınıfı olarak ortaya çıkmıştır [32]. KKD, bozanetkenler, parametre değişiklikleri ve belirsizlikler gibi sistem performansını olumsuz etkileyebilecek etmenlere karşı gösterdiği gürbüzlük nedeniyle pek çok araştırmacının ilgisini çekmiştir. Bu yaklaşımın altında yatan temel fikir, sistemin hareketini hatanın önceden tanımlanmış belirli bir fonksiyonunun sıfır olduğu bir düzlemde kısıtlamaktır. Örneğin tek girişli aşağıdaki dinamik sistemi ele alalım.

$$y^{(n)} = f(x(t)) + g(x(t))u(t) \quad (8)$$

Burada $x(t)$ sistemin durum vektörüne, $u(t)$ kontrol girişine, y ise sistemin çıkışına karşılık gelmektedir. Türevin derecesi (n) ile ifade edilirken $f(x(t))$ and $g(x(t))$ ise zamana ve sistemin durum değişkenlerine bağlı doğrusal olmayan fonksiyonlardır. KKD kuramında sistemden elde edilen çıkış ile istenilen çıkış değeri arasındaki fark yaygın olarak kayma yüzeyinin belirlenmesi için aşağıdaki ifadedeki gibi kullanılmaktadır.

$$s(x(t)) = \left(\frac{d}{dt} + \lambda \right)^{(n-1)} (y^d - y) = 0 \quad (9)$$

Bu ifadede λ pozitif bir sabittir ve kayma yüzeyinin eğimine karşılık gelmektedir. Denklem 9'da tanımlanan kayma yüzeyi aşağıdaki koşulları sağlamalıdır:

- Kayma yüzeyinin üstünde başlayan herhangi bir yörünge bu yüzey üstünde hareket etmelidir. Bu koşulu sağlamak için eğer $s(x(t)) = 0$ ise

bu fonksiyonun türevinin de sıfır olması – yani $\dot{s}(x(t)) = 0$ – gerekmektedir.

- Kayma yüzeyinin dışında başlayan yörüngeler kayma yüzeyine yakınsamalıdır. Bu koşul aşağıdaki durumlarda karşılanabilir:

$$\lim_{s \rightarrow 0^+} \dot{s} < 0 \text{ ve } \lim_{s \rightarrow 0^-} \dot{s} > 0 \quad (10)$$

Bu özellikleri sağlayan bir kayma yüzeyinin belirlenebilmesi amacıyla Lyapunov'un kararlılık teoreminden faydalanmak amacıyla Lyapunov fonksiyon adayı aşağıdaki şekilde belirlenebilir:

$$V(x, t) = \frac{1}{2} s^2 \geq 0 \quad (11)$$

Denklem 11'deki eşitlik yalnızca $s = 0$ durumunda geçerli olacaktır. Lyapunov kararlılık teoremine göre sistemin kararlılığını garantileyebilmek için verilen aday fonksiyonun türevinin sıfır ya da sıfırdan küçük olması gerekmektedir. Ayrıca eşitlik yalnızca $s = 0$ durumunda sağlanmalıdır.

$$\dot{V}(x, t, s) = s \frac{\partial s}{\partial t} \leq 0 \quad (12)$$

Dolayısıyla Denklem 11 ve Denklem 12'deki koşulları sağlayacak bir fonksiyon belirlenebilirse, sistemin yörüngeleri nereden başlarsa başlasın kayma yüzeyine yakınsayacağı ve bu yüzeye

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} = & \sum_i \sum_j \frac{\partial u}{\partial y_{ij}} \frac{\partial y_{ij}}{\partial t} + \sum_i \left(\frac{\partial u}{\partial c_{1i}} \frac{\partial c_{1i}}{\partial t} + \frac{\partial u}{\partial \sigma_{L1i}} \frac{\partial \sigma_{L1i}}{\partial t} + \frac{\partial u}{\partial \sigma_{U1i}} \frac{\partial \sigma_{U1i}}{\partial t} \right) \\ & + \sum_j \left(\frac{\partial u}{\partial c_{2j}} \frac{\partial c_{2j}}{\partial t} + \frac{\partial u}{\partial \sigma_{L2j}} \frac{\partial \sigma_{L2j}}{\partial t} + \frac{\partial u}{\partial \sigma_{U2j}} \frac{\partial \sigma_{U2j}}{\partial t} \right) \end{aligned} \quad (16)$$

Sistemin çıkışının y_{ij} parametresine göre türevi aşağıdaki şekilde bulunabilir:

$$\frac{\partial u}{\partial y_{ij}} = (p \underline{f}_{ij} + q \bar{f}_{ij}) \quad (17)$$

Ağın çıkışının tip-2 üyelik fonksiyonlarının parametrelerine göre türevleri ise aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial c_{1i}} = & \sum_j \left(\frac{\partial u}{\partial \underline{f}_{ij}} \frac{\partial \underline{f}_{ij}}{\partial \mu_{1i}} \frac{\partial \mu_{1i}}{\partial c_{1i}} + \frac{\partial u}{\partial \bar{f}_{ij}} \frac{\partial \bar{f}_{ij}}{\partial \bar{\mu}_{1i}} \frac{\partial \bar{\mu}_{1i}}{\partial c_{1i}} \right) \\ = & \sum_j \left(p y_{ij} \underline{f}_{ij} \left(\frac{x_1 - c_{1i}}{\sigma_{L1i}^2} \right) + q y_{ij} \bar{f}_{ij} \left(\frac{x_1 - c_{1i}}{\sigma_{U1i}^2} \right) \right) \end{aligned} \quad (18)$$

ulaştıktan sonra da ayrılamayacakları garantilenmiş olur.

Bu çalışmada, bulanık kurallarda yer yer alan y_{ij} , c_{ij} , σ_{Lij} ve σ_{Uij} parametrelerini güncellemek için kayma kipli kontrol kuramı kullanılmıştır. Bu amaçla öncelikle Denklem 13'te verilen kayma yüzeyi oluşturulmuş olup kayma yüzeyine ulaşıldıktan sonraki tüm zamanlar için nöro-bulanık denetleyicinin çıkışının hedef çıktı sinyali ile çakışması amaçlanmaktadır. Bu denklemde u^d denetleyici için istenilen çıkış değerini ifade etmekte olup sabit olduğu varsayılmıştır.

$$s = e = (u^d - u) = 0 \quad (13)$$

Oluşturulan kayma yüzeyini kullanarak Lyapunov fonksiyon adayı ve bu fonksiyonun türevi aşağıdaki gibi tanımlanabilir:

$$V = \frac{1}{2} s^2 = \frac{1}{2} e^2 = \frac{1}{2} (u^d - u)^2 \geq 0 \quad (14)$$

$$\dot{V} = e \dot{e} = e(u^d - \dot{u}) \leq 0 \quad (15)$$

Denklem 15'te verilen eşitsizlik $e\dot{u} \geq 0$ gerektirmektedir. Nöro-bulanık ağın çıkış sinyalinin türevini belirlemek amacıyla zincir kuralı aşağıdaki gibi kullanılabilir.

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial c_{2j}} = & \sum_i \left(\frac{\partial u}{\partial \underline{f}_{ij}} \frac{\partial \underline{f}_{ij}}{\partial \mu_{2j}} \frac{\partial \mu_{2j}}{\partial c_{2j}} + \frac{\partial u}{\partial \bar{f}_{ij}} \frac{\partial \bar{f}_{ij}}{\partial \bar{\mu}_{2j}} \frac{\partial \bar{\mu}_{2j}}{\partial c_{2j}} \right) \\ = & \sum_i \left(p y_{ij} \underline{f}_{ij} \left(\frac{x_2 - c_{2j}}{\sigma_{L2j}^2} \right) + q y_{ij} \bar{f}_{ij} \left(\frac{x_2 - c_{2j}}{\sigma_{U2j}^2} \right) \right) \end{aligned} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial \sigma_{L1i}} = & \sum_j \left(\frac{\partial u}{\partial \underline{f}_{ij}} \frac{\partial \underline{f}_{ij}}{\partial \mu_{1i}} \frac{\partial \mu_{1i}}{\partial \sigma_{L1i}} \right) \\ = & \sum_j p y_{ij} \underline{f}_{ij} \left(\frac{(x_1 - c_{1i})^2}{\sigma_{L1i}^3} \right) \end{aligned} \quad (20)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial \sigma_{L2j}} = & \sum_i \left(\frac{\partial u}{\partial \underline{f}_{ij}} \frac{\partial \underline{f}_{ij}}{\partial \mu_{2j}} \frac{\partial \mu_{2j}}{\partial \sigma_{L2j}} \right) \\ = & \sum_i q y_{ij} \bar{f}_{ij} \left(\frac{(x_2 - c_{2j})^2}{\sigma_{L2j}^3} \right) \end{aligned} \quad (21)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial \sigma_{U1i}} &= \sum_j \frac{\partial u}{\partial \bar{f}_{ij}} \frac{\partial \bar{f}_{ij}}{\partial \bar{\mu}_{1i}} \frac{\partial \bar{\mu}_{1i}}{\partial \sigma_{U1i}} \\ &= \sum_j p y_{ij} \bar{f}_{ij} \left(\frac{(x_1 - c_{1i})^2}{\sigma_{L1i}^3} \right) \end{aligned} \quad (22)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial E}{\partial \sigma_{U2j}} &= \sum_i \frac{\partial u}{\partial \bar{f}_{ij}} \frac{\partial \bar{f}_{ij}}{\partial \bar{\mu}_{2j}} \frac{\partial \bar{\mu}_{2j}}{\partial \sigma_{U2j}} \\ &= \sum_i q y_{ij} \bar{f}_{ij} \left(\frac{(x_2 - c_{2j})^2}{\sigma_{L2j}^3} \right) \end{aligned} \quad (23)$$

Güncelleme kurallarının aşağıdaki gibi seçilmesi durumunda:

$$\frac{\partial y_{ij}}{\partial t} = \alpha \operatorname{sgn}(e) \quad (24)$$

$$\frac{\partial c_{1i}}{\partial t} = \alpha \operatorname{sgn}(e) (x_1 - c_{1i}) \sum_j y_{ij} (\underline{f}_{ij} + \bar{f}_{ij}) \quad (25)$$

$$\frac{\partial c_{1i}}{\partial t} = \alpha \operatorname{sgn}(e) (x_1 - c_{1i}) \sum_j y_{ij} (\underline{f}_{ij} + \bar{f}_{ij}) \quad (26)$$

$$\frac{\partial \sigma_{L1i}}{\partial t} = \alpha \operatorname{sgn}(e) \sigma_{L1i} \sum_j y_{ij} \underline{f}_{ij} \quad (27)$$

$$\frac{\partial \sigma_{L2j}}{\partial t} = \alpha \operatorname{sgn}(e) \sigma_{L2j} \sum_i y_{ij} \underline{f}_{ij} \quad (28)$$

$$\frac{\partial \sigma_{U1i}}{\partial t} = \alpha \operatorname{sgn}(e) \sigma_{U1i} \sum_j y_{ij} \bar{f}_{ij} \quad (29)$$

$$\frac{\partial \sigma_{U2j}}{\partial t} = \alpha \operatorname{sgn}(e) \sigma_{U2j} \sum_i y_{ij} \bar{f}_{ij} \quad (30)$$

kayma yüzeyinin ve bu yüzeyin türevinin çarpımlarının tüm durumlar için $\dot{V} = s\dot{s} = -e\dot{u} \leq 0$ eşitsizliğini sağlaması temin olmuş olur. Bu denklemlerde α öğrenme katsayısını belirtmekte olup pozitif bir sabittir. Önerilen bu yöntemin literatürdeki diğer yöntemlere göre en önemli faydası yakınsamayı garantileyerek istikrarlı bir öğrenme sağlıyor olmasıdır.

5. BENZETİM ÇALIŞMALARI (SIMULATED STUDIES)

Önerilen öğrenme algoritmasının etkinliğini belirleyebilmek amacıyla, gerçek zamanlı deneysel çalışmalara başlamadan önce, MATLAB/Simulink ortamında benzetim çalışmaları yapılmıştır. Benzetim çalışmalarında AR.Drone 2.0 modeli esas alınarak x, y ve z yönlerindeki her bir eksen için ayrı bir denetleyici tasarlanmıştır. Her bir denetleyicinin iki giriş sinyali ve tek çıkışı bulunmaktadır. Yuvarlanma açısı komutunu belirlemek için kullanılan denetleyicinin giriş sinyallerini İHA'nın y-eksenindeki istenen yörünge ile mevcut konumu arasındaki fark, e_y , ve bu farkın zaman göre değişimi, \dot{e}_y oluşturmaktadır. Benzer şekilde yunuslama açısı komutunu belirlemek için kullanılan denetleyicinin giriş sinyallerini ise x-ekseninde gerçek konum ve istenen konum arasındaki fark, e_x , ile bu hatanın zamana göre

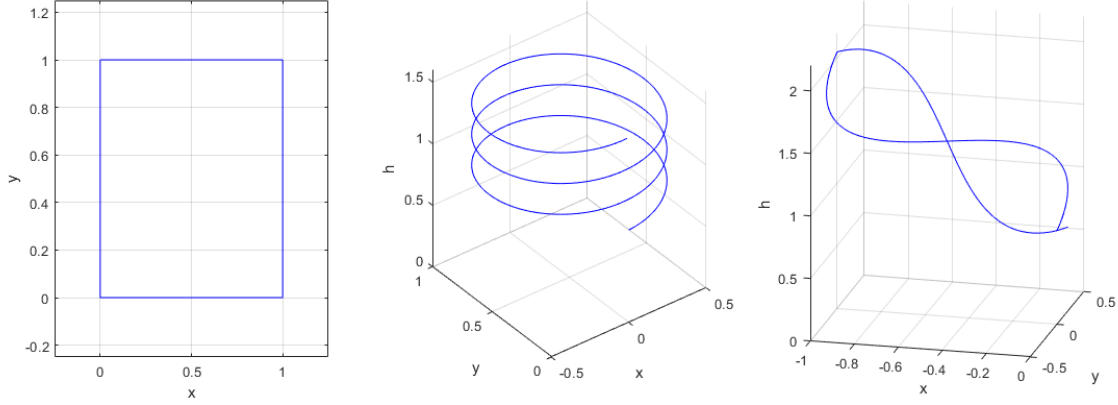
türevi, \dot{e}_x , oluşturmaktadır. İHA'nın yüksekliğini belirlemek için kullanılan denetleyicide ise gerçek ve istenen yükseklikler arasındaki fark, e_z , ile bu farkın türevi, \dot{e}_z , kullanılmıştır.

Benzetim çalışmalarında üç farklı hedef yörünge kullanılmıştır. Bu yörüngelerden ilki, Yörünge 1, iki boyutlu olarak xy-düzleminde tanımlanmış olup ani yön değişimleri gerektirmektedir. Diğer hedef yörüngeler ise her üç eksen de eş zamanlı olarak kontrol sinyallerinin üretilmesini gerektirmektedir. İlgili yörüngeler Şekil 4'te paylaşılmıştır.

Önerilen tip-2 nöro-bulanık denetleyicinin ilk katmanında giriş sinyallerini bulanık kümelere dönüştürmek amacıyla beş adet Gauss tip-2 üyelik fonksiyonu kullanılmıştır. Üyelik fonksiyonu sayısını belirlemek amacıyla benzetim çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalarda üyelik fonksiyonlarından bir tanesi hatanın (ya da türevinin) neredeyse sıfır olacağı durumu gösterebilmesi amacıyla merkeze, diğer üyelik fonksiyonları ise pozitif ve negatif hata (ya da türevi) durumlarına karşılık gelecek şekilde bu üyelik fonksiyonuna göre simetrik olarak yerleştirilmiştir. Üyelik fonksiyonu sayısının artması pozitif ve negatif hata (ya da türevi) için farklı derecelendirmelerin yapılabilmesini sağlamakla beraber hesaplama yükünü artırmaktadır.

Benzetim çalışmaları, tip-2 nöro bulanık denetleyicide her bir giriş sinyali için üç, beş ve yedi Gauss tip-2 üyelik fonksiyonu kullanılması durumları için gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar Tablo 2'de paylaşılmıştır.

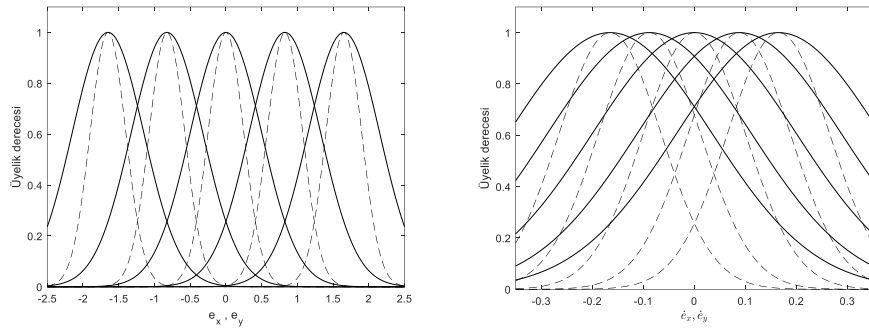
Tablo 2 incelendiğinde yedi üyelik fonksiyonu kullanıldığında beş üyelik fonksiyonu kullanılan duruma göre farklı eksenlerde ani değişimler gerektiren Yörünge 1 için daha iyi sonuçlar elde edilebileceği görülse de Yörünge 2 ve Yörünge 3 için üyelik fonksiyonu sayısının artmasının sistem cevabında etkisinin daha az olduğu gözlemlenebilir. Üyelik fonksiyonu sayısını beşten yediye çıkarmanın hesaplama yükünü önemli ölçüde artıracak olması ve deneysel çalışmalardaki zaman kısıtları nedeniyle denetleyicilerde beş üyelik fonksiyonu kullanılmıştır. Şekil 5 ve Şekil 6 bulanıklaştırma işlemi için kullanılan üyelik fonksiyonlarını göstermektedir. Bulanık kuralların sonuç kısmında yer alan parametreler ise rastgele bir şekilde seçilmiştir. Benzetim çalışmalarında örnekleme zamanı 0.02 s olarak belirlenmiştir.



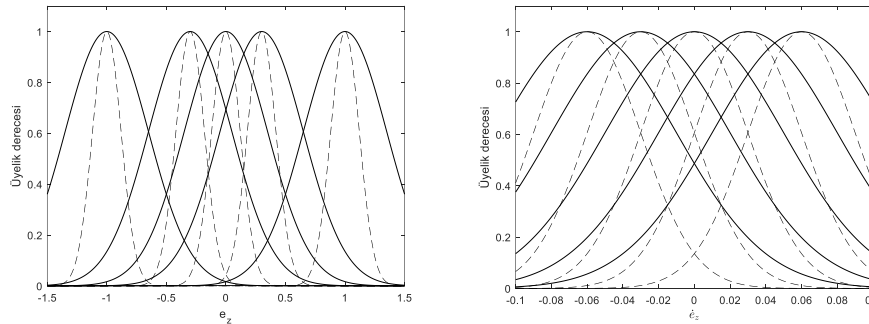
Şekil 4. (a) Hedef Yörünge 1, (b) Hedef Yörünge 2, (c) Hedef Yörünge 3. ((a) Target Trajectory 1, (b) Target Trajectory 2, (c) Target Trajectory 3.)

Tablo 2. Farklı üyelik fonksiyonu sayıları için ele edilen RMSE değerleri (RMSE values for different membership function numbers)

		Yörünge 1		Yörünge 2			Yörünge 3		
		\bar{X}_{RMSE}	\bar{Y}_{RMSE}	\bar{X}_{RMSE}	\bar{Y}_{RMSE}	\bar{H}_{RMSE}	\bar{X}_{RMSE}	\bar{Y}_{RMSE}	\bar{H}_{RMSE}
Üyelik Fonksiyonu Sayısı	3	0.117	0.112	0.005	0.009	0.056	0.003	0.029	0.008
	5	0.098	0.096	0.004	0.006	0.045	0.003	0.019	0.006
	7	0.076	0.090	0.004	0.004	0.044	0.002	0.014	0.005



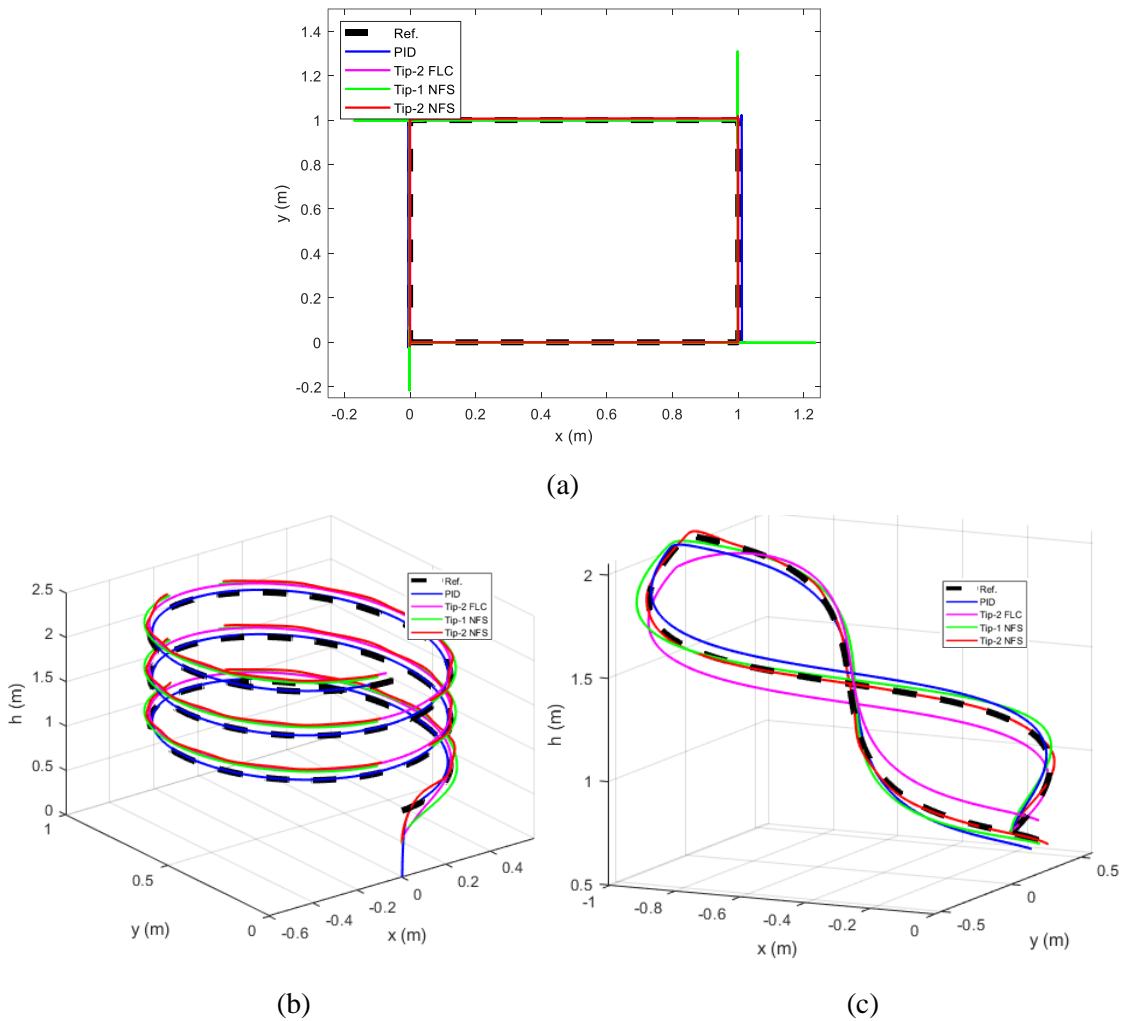
Şekil 5. x ve y eksenlerinde girişleri bulanıklaştırmak için kullanılan üyelik fonksiyonları (Membership functions used for inputs on the x and y axes)



Şekil 6. z ekseninde girişleri bulanıklaştırmak için kullanılan üyelik fonksiyonları (Membership functions used for inputs on the z axes)

Önerilen denetleyici yapısının etkinliğini belirlemek amacıyla benzetim çalışmaları PID denetleyici, tip-2 bulanık mantık denetleyici ve tip-1 nöro-bulanık denetleyici için de gerçekleştirilmiştir. Bu yapılarda da her bir eksen için ayrı bir denetleyici tasarlanmış olup ilgili eksendeki hedef yörüngeden sapma ve bu değerın türevi her bir denetleyici için giriş sinyallerini oluşturmaktadır. Tip-2 bulanık mantık ve tip-1 nöro-bulanık denetleyicilerde her bir giriş sinyalini bulanıklaştırmak amacıyla beş adet Gauss üyelik fonksiyonu kullanılmıştır. PID denetleyicinin katsayılarının belirlenmesinde öncelikle MATLAB/Simulink'in "PID Tuner" özelliği

kullanılmıştır. Bu bloktan elde edilen değerler, gerçek sistem ve sistemin matematiksel modeli ile arasındaki olası farklar (sadeleştirme ve varsayımlar nedeniyle oluşan farklar, parametre belirsizlikleri, vb.) göz önünde sonrasında ampirik olarak benzetim ve deneysel çalışmalarda en iyi cevabı sağlayacak şekilde ayarlanarak kullanılmıştır. Literatürde de döner kanatlı İHA'ların denetiminde kullanılan PID denetleyicilerde genellikle ampirik yaklaşımlarının benimsendiği görülmektedir [33]. PID denetleyicilerin katsayıları x ve y eksenleri için $K_P=0.6$, $K_I=0.01$, $K_D=0.02$ ve z eksenini için $K_P=2$, $K_I=0.01$, $K_D=0.35$ olarak belirlenmiştir.



Şekil 7. Benzetim çalışmalarının sonuçları: (a) Hedef yörünge 1 için, (b) hedef yörünge 2 için, (c) hedef yörünge 3 için (Simulation results for (a) Target trajectory 1, (b) Target trajectory 2, (c) Target trajectory 3)

Hedef yörünge 1, hedef yörünge 2 ve hedef yörünge 3 için alınan sistem cevapları Şekil 7'de, gösterilmiştir. Benzetim çalışmalarından alınan sonuçlar incelendiğinde, çalışma ortamında bozan etkenler bulunmadığı durumda tüm denetleyicilerin

hedef yörüngeleri yüksek doğruluk derecesiyle takip edebildiği sonucuna ulaşılabilir. Geliştirilen denetleyicilerin başarımını değerlendirmek için hata kareler ortalaması (RMSE) yöntemi kullanılmıştır. Denetleyiciler için elde edilen RMSE

değerleri Tablo 3'te paylaşılmıştır. Bu tabloya göre tip-2 nöro-bulanık denetleyici için en büyük hata değerleri ani manevralar gerektiren hedef yörünge 1 için elde edilmiştir. Bu duruma ani referans

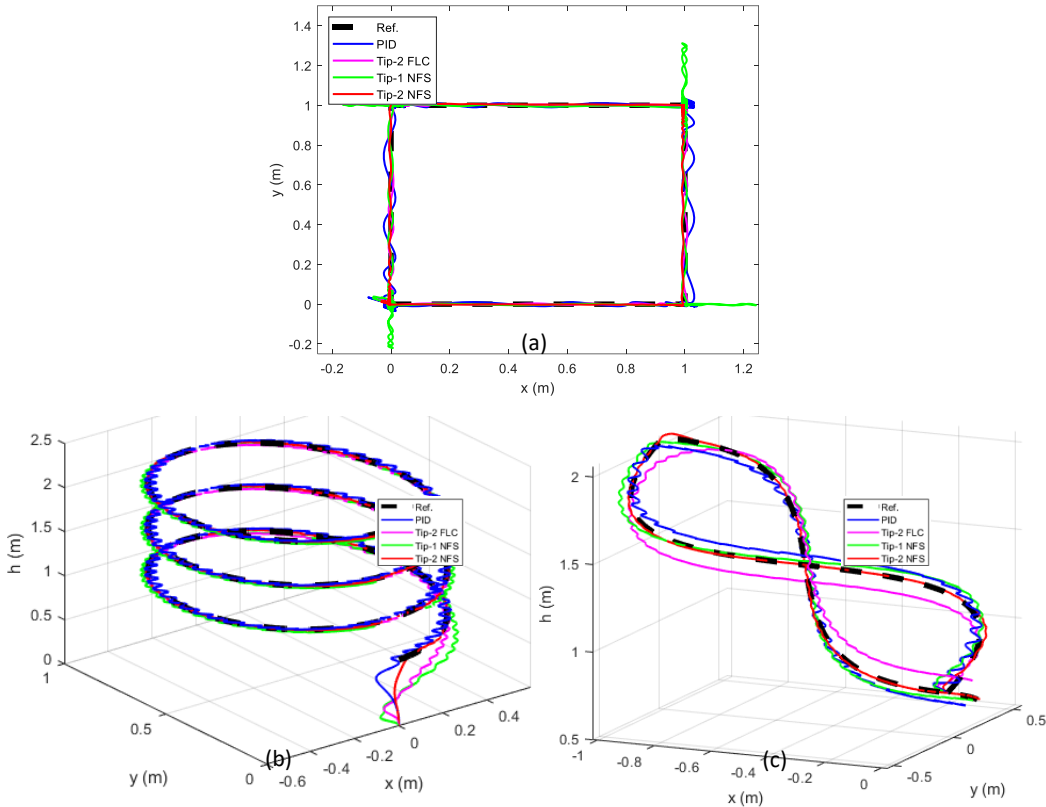
değişikliği durumlarında parametrelerin uyarlanması için gereken süre neden olabilmektedir.

Tablo 3. Benzetim çalışmalarında elde edilen RMSE değerleri (RMSE values obtained in the simulations)

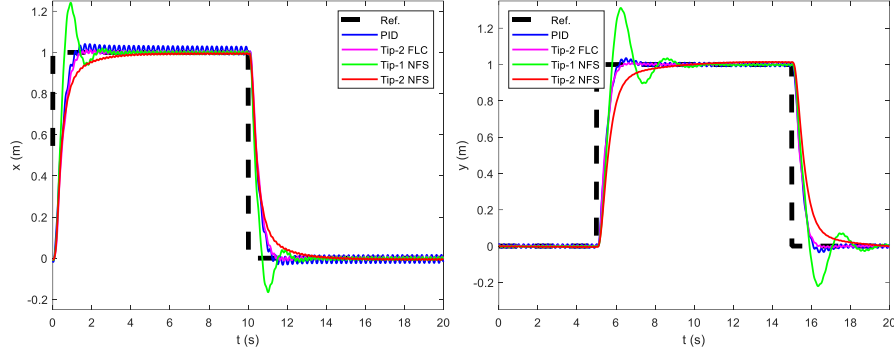
		Yörünge 1		Yörünge 2			Yörünge 3		
		X_{RMSE}	Y_{RMSE}	X_{RMSE}	Y_{RMSE}	H_{RMSE}	X_{RMSE}	Y_{RMSE}	H_{RMSE}
Denetleyici	PID	0.118	0.116	0.082	0.070	0.048	0.059	0.136	0.028
	Tip-2 FLC	0.097	0.112	0.037	0.040	0.088	0.034	0.078	0.122
	Tip-1 NFS	0.089	0.106	0.037	0.049	0.100	0.034	0.116	0.032
	Tip-2 NFS	0.098	0.096	0.004	0.006	0.045	0.003	0.019	0.006

Önerilen denetleyicinin, sistemi etkileyecek rüzgar gibi bozucu etkenler altındaki başarımlarını değerlendirmek amacıyla, sisteme x- ve y-eksenleri doğrultularında $d(t) = 0.2\sin(2.5\pi t)$ büyüklüğünde bozucu giriş sinyalleri eklenerek benzetim çalışmaları aynı hedef yörüngeler tekrarlanmıştır. Elde edilen sistem cevapları Şekil 8'de paylaşılmış olup x- ve y eksenleri için denetleyicilerin yörünge takip performansları Şekil 9'da gösterilmiştir. Verilen grafikler incelendiğinde tip-2 nöro-bulanık denetleyicinin bozucu etkenlerin

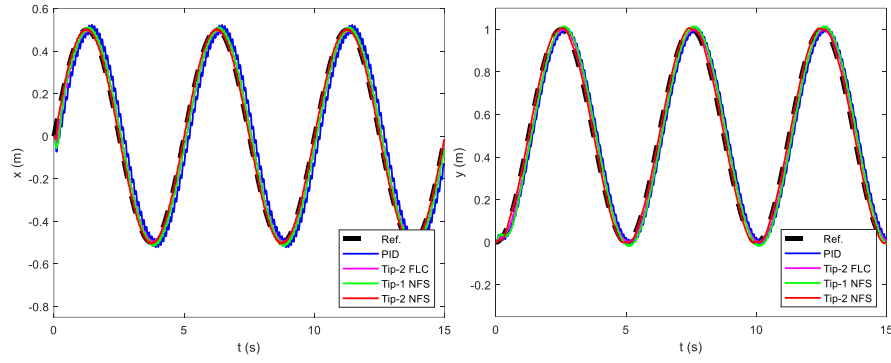
sistemi etkilediği durumda hedef yörüngeyi daha az sapma ile takip edebildiği görülebilmektedir. Benzetim çalışması için elde edilen ve hedef yörünge ile gerçek yörünge arasındaki farkın bir ifadesi olarak değerlendirilebilecek RMSE değerleri Tablo 4'te verilmiştir. Bu sonuçlar incelendiğinde önerilen denetleyici ile çalışmada kullanılan diğer denetleyicilere göre daha küçük hata değerleri elde edilebildiği ve bozucu etkenlerin etkisinin denetleyici başarımları üzerinde daha sınırlı olduğu görülebilir.



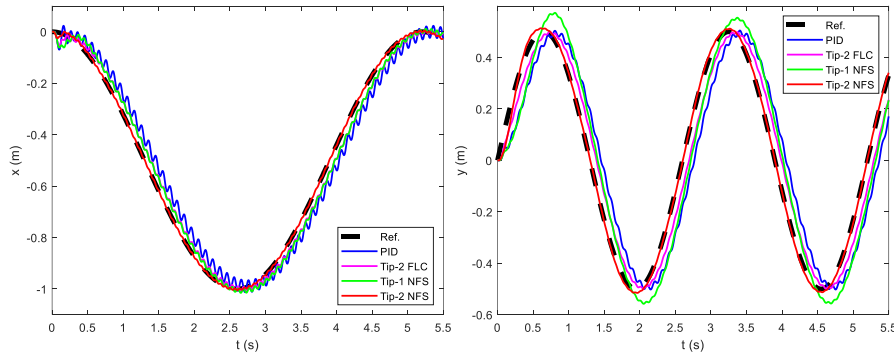
Şekil 8. Dış bozucu etkenlerin varlığında benzetim çalışmalarından elde edilen sonuçlar (a) Hedef yörünge 1, (b) hedef yörünge 2, (c) hedef yörünge 3. (Results obtained from the simulation studies in the presence of external disturbances (a) Target trajectory 1, (b) Target trajectory 2, (c) Target trajectory 3)



(a)



(b)



(c)

Şekil 9. Dış bozucu etkenlerin varlığında yörünge takip performansları: (a) Hedef yörünge 1, (b) hedef yörünge 2, (c) hedef yörünge 3. (Trajectory tracking performance in the presence of external disturbances: (a) target trajectory 1, (b) target trajectory 2, (c) target trajectory 3.)

Tablo 4. Dış bozucu etkenlerin varlığında benzetim çalışmalarında elde edilen RMSE değerleri (RMSE values obtained in simulation studies in the presence of external disturbances)

		Yörünge 1		Yörünge 2		Yörünge 3	
		\bar{X}_{RMSE}	\bar{Y}_{RMSE}	\bar{X}_{RMSE}	\bar{Y}_{RMSE}	\bar{X}_{RMSE}	\bar{Y}_{RMSE}
Denetleyici	PID	0.161	0.164	0.093	0.087	0.063	0.143
	Tip-2 FLC	0.152	0.146	0.040	0.042	0.037	0.081
	Tip-1 NFS	0.154	0.164	0.039	0.052	0.036	0.118
	Tip-2 NFS	0.149	0.153	0.013	0.017	0.013	0.051

6. DENEYSSEL ÇALIŞMALAR (EXPERIMENTAL STUDIES)

Önerilen denetleyici yapısı için benzetim çalışmalarının ardından aynı yörüngeler için gerçek zamanlı deneyler yapılmıştır. Deneysel çalışmalarda döner kanatlı İHA ile veri transferi 802.11n erişim noktası tabanlı kablosuz ağ üzerinden Wi-Fi sağlanmıştır. İstikrarlı bir iletişim sağlamak amacıyla örnekleme zamanı 0.02 s olarak seçilmiştir. Önerilen denetleyicileri gerçekleştirmek için MATLAB ortamında Simulink Desktop Real-Time kullanılmıştır. İHA'nın konum bilgisi sensör kartı tarafından sağlanan uzunlamasına ve yanal eksenler boyunca hız değerleri kullanılarak elde edilmiştir. Hız sensörlerinden gelen sinyallerdeki sinyal-gürültü oranını (SNR), MATLAB'ın snr fonksiyonu ile x-ekseni doğrultusundaki öteleme hareketine ait hız verilerinde 10.4 dB, y-ekseni doğrultusundaki öteleme hareketine ait hız verilerinde 13.3 dB ve irtifa ölçümlerinde 6.2 dB olarak belirlenmiştir. İHA'nın yerden yüksekliğini belirlemek amacıyla merkez gövdenin alt yüzeyinde yer alan altimetre kullanılmıştır. Tüm deneyler kontrollü bir ortamda iç mekanda gerçekleştirilmiştir.

Deneylerin ilk setinde, referans yönlerinde ani değişikliklerin varlığında denetleyicinin davranışını

araştırmak için kare şeklindeki hedef yörünge 1 kullanılmıştır. Deney, İHA havalandıktan ve 75 cm yüksekliğe ulaştıktan sonra başlatılmıştır. Kare biçimindeki hedef yörünge için elde edilen deney sonuçları, Şekil 11(a)'da sunulmuştur. Bu sonuçlardan önerilen tip-2 nöro bulanık denetleyicinin, her iki yönde de referans değerden daha az sapmaya neden olduğu gözlemlenmektedir.

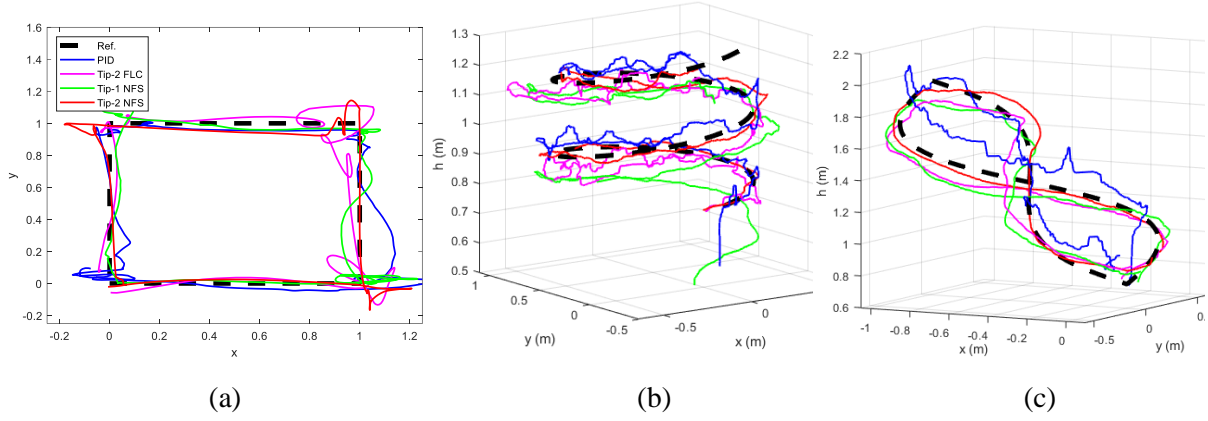
Deneysel çalışmaların ikinci bölümünde ise x- ve y-doğrultularında sinüzoidal fonksiyonların, z ekseninde ise doğrusal fonksiyonların kullanıldığı hedef yörüngeler kullanılmıştır. Deney başlangıcında önceki deneye benzer şekilde İHA 75 cm irtifaya ulaştıktan sonra referans yörünge kablosuz ağ üzerinden İHA'ya iletilmiştir. Şekil 11(b) ve 11(c)'de paylaşılan sistem cevapları incelendiğinde tip-2 nöro bulanık denetleyici ile hedef yörüngeden daha az sapma değerleri elde edilebildiği görülmektedir. Her üç yörünge cevabı için elde edilen RMSE değerleri Tablo 5'te verilmiştir. Sistemin gürbüzlüğünü ve kararlılığını göstermek amacıyla deneysel çalışmalarda oluşturulan 2 ve 3 boyutlu hedef yörüngeler için hata vektörünün faz uzayında izlediği yörüngeler Şekil 12'de gösterilmiştir. Bu şekilde z eksenini için alınan ölçümlerdeki gürültü ve parametre güncelleme kurallarında kullanılan *signum* fonksiyonunun etkileri görülebilmektedir.



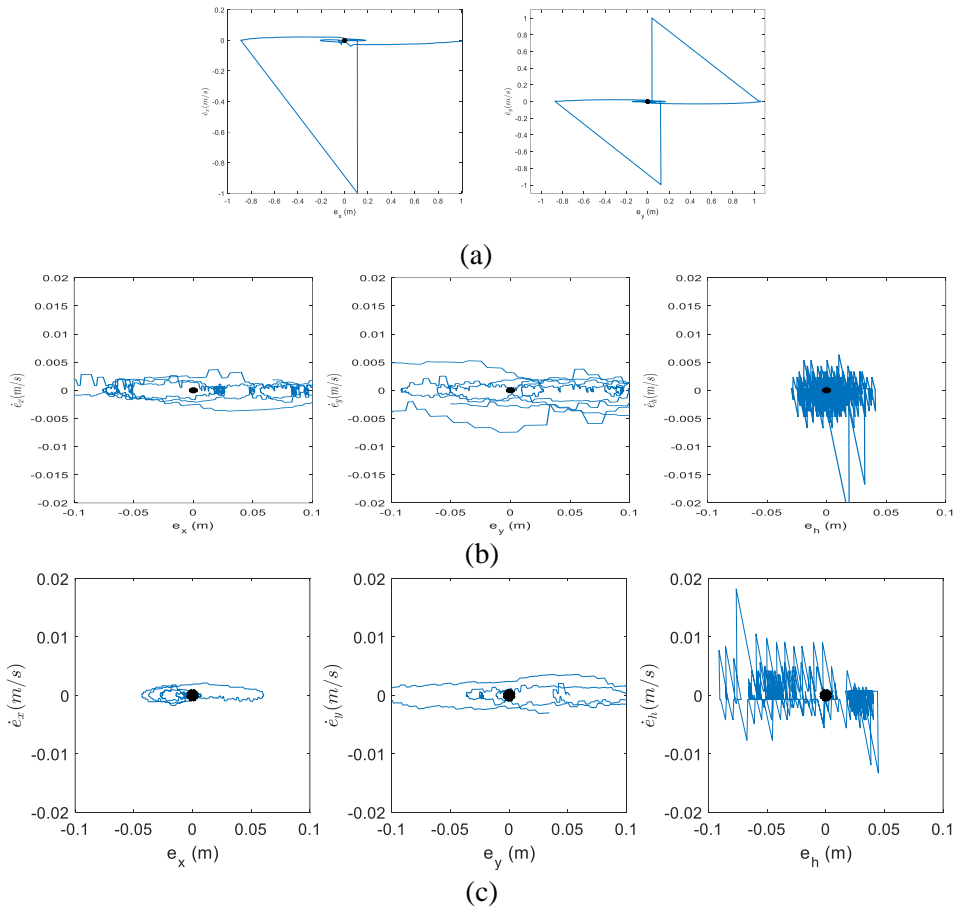
Şekil 10. Laboratuvarında yapılan deneylerden bir görüntü (An image of the experiments performed in the laboratory)

Tablo 5. Deneysel çalışmalarda elde edilen RMSE değerleri (RMSE values obtained in experimental studies)

		Yörünge 1		Yörünge 2			Yörünge 3		
		X_{RMSE}	Y_{RMSE}	X_{RMSE}	Y_{RMSE}	H_{RMSE}	X_{RMSE}	Y_{RMSE}	H_{RMSE}
Denetleyici	PID	0.313	0.287	0.151	0.194	0.028	0.152	0.256	0.143
	Tip-2 FLC	0.292	0.356	0.081	0.060	0.049	0.067	0.096	0.093
	Tip-1 NFS	0.307	0.317	0.080	0.093	0.055	0.085	0.091	0.098
	Tip-2 NFS	0.280	0.298	0.0765	0.055	0.015	0.032	0.072	0.079



Şekil 11. Deney sonuçları: (a) Hedef yörünge 1 için, (b) hedef yörünge 2 için, (c) hedef yörünge 3 için. (Experiment results: (a) for target trajectory 1, (b) for target trajectory 2, (c) for target trajectory 3.)



Şekil 12. Hata vektörünün faz uzayında izlediği yörüngeler: (a) Hedef yörünge 1 için, (b) hedef yörünge 2 için, (c) hedef yörünge 3 için. (Trajectories of the error vector in phase space: (a) for target trajectory 1, (b) for target trajectory 2, (c) for target trajectory 3)

7. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışmada döner kanatlı yapıdaki bir insansız hava aracının yörünge takibi problemi için tip-2 nöro-bulanık denetleyiciler geliştirilmiştir. Önerilen yapıda öğrenme algoritmasının tasarımında, benzer çalışmalarda yoğunlukla kullanılan eğim düşümü yöntemi yerine kayma kipli kontrol kuramı

kullanılmıştır. Bu sayede sistemin çalışma ortamında bulunan bozanetkenlere karşı daha gürbüz cevap verebilmesi ve öğrenme algoritmasının küresel minimuma yakınsamasının sağlanması hedeflenmiştir. Parametre güncelleme kurallarının çıkarımında Lyapunov kararlılık teoreminden faydalanılmıştır. Geliştirilen denetim sisteminin etkinliğini belirlemek amacıyla üç farklı

yörünge için hem benzetim hem de deneysel çalışmalar yapılmıştır. Elde edilen sonuçları daha iyi değerlendirebilmek amacıyla aynı çalışmalar PID denetleyici, tip-2 bulanık mantık denetleyici ve tip-1 nöro-bulanık denetleyici ile için tekrarlanmış olup sonuçlar tip-2 nöro-bulanık denetleyiciler için geliştirilen değişken yapılı sistemler tabanlı öğrenme algoritmalarının hedef yörüngeden daha az sapma ve daha gürbüz sistem cevabı sağladığını göstermiştir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

Bu çalışma, İstanbul Bilgi Üniversitesi BİLGİ Bilimsel Araştırma Fonu tarafından desteklenmiştir (Proje Kodu AK 85 089). Mali destekleri için İstanbul Bilgi Üniversitesi'ne teşekkür ederiz.

ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazarı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan eder.

The author of this article declares that the materials and methods used in this work do not require ethical committee approval and/or legal-specific permission.

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

Yeşim ÖNİZ: Deneyleri yapmış, sonuçlarını analiz etmiş ve makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

She conducted the experiments, analyzed the results and performed the writing process.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

There is no conflict of interest in this study.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Mishra, Balmukund, et al. "Drone-surveillance for search and rescue in natural disaster." *Computer Communications* 156 (2020): 1-10.
- [2] Elmas, Elif Ece, and Mustafa ALKAN. "İnsansız Hava Araçlarıyla Hareketli Nesnelerin Tespit ve Takibi." *Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology* 10.4 (2022): 1111-1126.
- [3] Sarkar, Sayani, Michael W. Totaro, and Khalid Elgazzar. "Intelligent drone-based surveillance: application to parking lot monitoring and

detection." In *Unmanned Systems Technology XXI*, vol. 11021, p. 1102104. International Society for Optics and Photonics, 2019.

- [4] Yazid, Edwar, Matthew Garratt, and Fendy Santoso. "Position control of a quadcopter drone using evolutionary algorithms-based self-tuning for first-order Takagi–Sugeno–Kang fuzzy logic autopilots." *Applied Soft Computing* 78 (2019): 373-392.
- [5] Mellinger D, Michael N, Kumar V. "Trajectory generation and control for precise aggressive maneuvers with quadrotors". *The International Journal of Robotics Research* 2012; 31(5):664-74.
- [6] Bouabdallah S, Noth A, Siegwart R. "PID vs LQ control techniques applied to an indoor micro quadrotor". In: 2004 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS); Sendai, Japan; 2004. pp. 2451-2456.
- [7] Cowling ID, Yakimenko OA, Whidborne JF, Cooke AK. "Direct method based control system for an autonomous quadrotor". *Journal of Intelligent & Robotic Systems* 2010; 60(2):285-316.
- [8] Alexis K, Papachristos C, Nikolakopoulos G, Tzes A. "Model predictive quadrotor indoor position control". In 2011 19th Mediterranean Conference on Control & Automation (MED) 2011 Jun 20 (pp. 1247-1252). IEEE.
- [9] Abdolhosseini M, Zhang YM, Rabbath CA. "An efficient model predictive control scheme for an unmanned quadrotor helicopter". *Journal of intelligent & robotic systems*. 2013 Apr 1;70(1-4):27-38.
- [10] Stevens, Brian L., Frank L. Lewis, and Eric N. Johnson. *Aircraft control and simulation: dynamics, controls design, and autonomous systems*. John Wiley & Sons, 2015.
- [11] J. A. Meda, "Estimation of complex systems with parametric uncertainties using a JSSF heuristically adjusted.," *IEEE Latin Amer. Trans.*, vol. 16, no. 2, pp. 350–357, Feb. 2018.
- [12] J. A. Meda-Campana, "On the estimation and control of nonlinear systems with parametric uncertainties and noisy outputs," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 31968–31973, 2018.
- [13] Mehndiratta, Mohit, Erkan Kayacan, Mahmut Reyhanoglu, and Erdal Kayacan. "Robust tracking control of aerial robots via a simple learning strategy-based feedback linearization." *Ieee Access* 8 (2019): 1653-1669.

- [14] Yao, Wen, Xiaoqian Chen, Wencai Luo, Michel Van Tooren, and Jian Guo. "Review of uncertainty-based multidisciplinary design optimization methods for aerospace vehicles." *Progress in Aerospace Sciences* 47, no. 6 (2011): 450-479.
- [15] T. Dierks and S. Jagannathan, "Output feedback control of a quadrotor UAV using neural networks," *IEEE Trans. Neural Netw.*, vol. 21, no. 1, pp. 50–66, Jan. 2009.
- [16] M. Jafari and H. Xu, "Intelligent control for unmanned aerial systems with system uncertainties and disturbances using artificial neural network," *Drones*, vol. 2, no. 3, 2018, Art. no. 30.
- [17] Al-Mahturi A, Santoso F, Garratt MA, Anavatti SG. "Nonlinear altitude control of a quadcopter drone using interval type-2 fuzzy logic". In *2018 IEEE Symposium Series on Computational Intelligence (SSCI) 2018 Nov 18* (pp. 236-241). IEEE.
- [18] Prayitno A, Indrawati V, Utomo G. "Trajectory tracking of AR. Drone quadrotor using fuzzy logic controller". *Telekomnika*. 2014;12(4):819-28.
- [19] Indrawati V, Prayitno A, Utomo G. "Comparison of two fuzzy logic controller schemes for position control of AR. Drone". In *2015 7th International Conference on Information Technology and Electrical Engineering (ICITEE) 2015 Oct 29* (pp. 360-363). IEEE.
- [20] Dorzhigulov A., Bissengaliuly B., Spencer B. F. Jr, Kim J., James A. P. (2018). "ANFIS based quadrotor drone altitude control implementation on Raspberry Pi platform." *Analog Integrated Circuits and Signal Processing*, 95(3), 435–445.
- [21] Ponce P., Molina A., Cayetano I., Gallardo J., Salcedo H., Rodriguez J., Carrera I. (2016). "Fuzzy logic sugeno controller type-2 for quadrotors based on anfis". In *Nature-Inspired Computing for Control Systems* (2016): 195-230.
- [22] Krajnik T, Vonasek V, Fiser D, Faigl J. "AR-drone as a platform for robotic research and education". In *International conference on research and education in robotics 2011 Jun 15* (pp. 172-186). Springer, Berlin, Heidelberg.
- [23] Bristeau PJ, Callou F, Vissiere D, Petit N. "The navigation and control technology inside the ar. drone micro uav". *IFAC Proceedings Volumes*. 2011 Jan 1;44(1):1477-84.
- [24] Jeurgens N. "Identification and control implementation of an AR. Drone 2.0". Masters Thesis, Eindhoven University of Technology. 2017.
- [25] Y. Sun, "Modeling, identification and control of a quad-rotor drone using low-resolution sensing," 2012.
- [26] Q. Li, "Grey-box system identification of a quadrotor unmanned aerial vehicle". PhD thesis, Citeseer, 2014.
- [27] L. A. Zadeh, "The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning—I," *Inf. Sci. (Ny)*., vol. 8, no. 3, pp. 199–249, Jan. 1975.
- [28] J.M Mendel, "Uncertain Rule-based Fuzzy Logic System: Introduction and New Directions", Prentice Hall, Upper Saddle River, 2001.
- [29] M. Biglarbegian, W. Melek, J. Mendel, "On the stability of interval type-2 TSK fuzzy logic control systems", *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics* 40 (3) (2010) 798–818.
- [30] Li, Long, Zuqiang Long, Hao Ying, and Zhijun Qiao. "An online gradient-based parameter identification algorithm for the neuro-fuzzy systems." *Fuzzy Sets and Systems* 426 (2022): 27-45.
- [31] Anshori, Mohamad Yusak, Dinita Rahmalia, Teguh Herlambang, and Denis Fidita Karya. "Optimizing Adaptive Neuro Fuzzy Inference System (ANFIS) parameters using Cuckoo Search (Case study of world crude oil price estimation)." In *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1836, no. 1, p. 012041. IOP Publishing, 2021.
- [32] Edwards, Christopher, and Sarah Spurgeon. "Sliding mode control: theory and applications". Crc Press, 1998.
- [33] Lopez-Sanchez, Ivan, and Javier Moreno-Valenzuela. "PID control of quadrotor UAVs: A survey." *Annual Reviews in Control* 56 (2023): 100900.



Siber Güvenlik, Siber Savaş Alanında Seçili Anahtar Kelimeler ile İlgili Araştırmaların Bibliyometrik Analizi

Sehavet NECİYEV^{1*} Betül PAZARBAŞI²

¹ İstanbul Üniversitesi, İletişim Fakültesi, Gazetecilik Bölümü, İstanbul, Türkiye

² Kocaeli Üniversitesi, İletişim Fakültesi, Gazetecilik Bölümü, Kocaeli, Türkiye.

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 20/10/2023
Düzeltilme: 21/11/2023
Kabul: 29/11/2023

Anahtar Kelimeler

Bibliyometrik analiz
Siber suç
Siber saldırı
Siber güvenlik
Siber savaş

Article Info

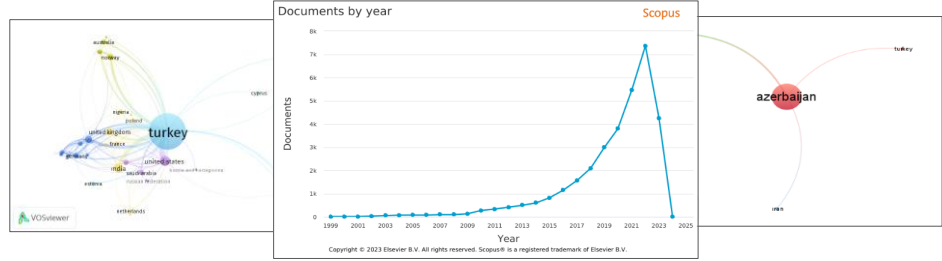
Research article
Received: 20/10/2023
Revision: 21/11/2023
Accepted: 29/11/2023

Keywords

Bibliometric analysis
cybercrime
Cyberattack
Cybersecurity
Cyber warfare

Grafik Özet (Graphical/Tabular Abstract)

Bu çalışmada 1999 ile 2023 yılları arasında siber güvenlik, siber savaşla ilgili seçilen kelimeleri barındıran bilimsel çalışmaların bibliyometrik analizi Scopus veri tabanı ve VOSviewer programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Grafikler için Scopus veri tabanı, kelime bulutlarını gösteren görseller için ise VOSviewer programı kullanılmıştır. / In this study, bibliometric analysis of scientific studies containing selected words related to cyber security and cyber war between 1999 and 2023 was carried out using the Scopus database and VOSviewer program. Scopus database was used for graphics, and VOSviewer program was used for visuals showing word clouds.



Şekil A: Bilimsel yayınların yıllara göre dağılımı ve ülkelere göre ortak yazarlık analizi. / Distribution of scientific publications by years and co-authorship analysis by country.

Önemli noktalar (Highlights)

- Dünya genelinde, Türkiye’de ve Azerbaycan’da siber güvenlikle ilgili yapılan çalışmaların eğiliminin incelenmesi. / Examining the trend of studies on cyber security around the world, in Turkey and Azerbaijan.
- Siber güvenlikle ilgili yapılan çalışmalarda en etkili yazarların, makalelerin ve finansman kaynaklarının tespiti. / Identification of the most influential authors, articles and funding sources in studies on cyber security.
- Siber güvenlikle ilgili yapılan çalışmalarda en iyi ülkelerin, kaynakların ve araştırmaları yayınlayan kuruluşların belirlenmesi. / Determining the best countries, sources and organizations that publish research on cyber security.

Amaç (Aim): Bu çalışmanın amacı siber güvenlik alanında gerçekleştirilen bilimsel araştırma eğilimlerini belirlemek ve analiz etmektir. / The aim of this study is to identify and analyze scientific research trends in the field of cyber security.

Özgünlük (Originality): Literatür incelendiğinde, bu çalışmada olduğu gibi siber güvenlik alanında ilk aşamada dünya genelinde, ikinci aşamada Türkiye’de ve Azerbaycan’da bilimsel araştırmaların bibliyometrik analizinin yapıldığı benzer bir çalışma görülmemiştir. / When the literature is examined, no similar study has been seen in the field of cyber security, as in this study, in which bibliometric analysis of scientific research was conducted worldwide in the first stage and in Turkey and Azerbaijan in the second stage.

Bulgular (Results): Bilimsel yayınların ülkelere göre dağılımına bakıldığında ilk sıralarda Amerika Birleşik Devletleri (ABD), Hindistan, Birleşik Krallık, Çin, Avustralya’nın yer aldığı tespit edilmiştir. / When we look at the distribution of scientific publications by country, it has been determined that the United States of America (USA), India, the United Kingdom, China and Australia are in the first places.

Sonuç (Conclusion): Bilimsel yayınların en çok Bilgisayar Bilimleri alanında (22855) yapıldığı, Ulusal Bilim Vakfının 1326 bilimsel yayını desteklediği ve Holt’un en çok bilimsel yayın yapan yazar olduğu bulgulanmıştır. / It was found that the most scientific publications were made in the field of Computer Science (22855), the National Science Foundation supported 1326 scientific publications and Holt was the author with the most scientific publications.



Siber Güvenlik, Siber Savaş Alanında Seçili Anahtar Kelimeler ile İlgili Araştırmaların Bibliyometrik Analizi

Sehavet NECİYEY * Betül PAZARBAŞI

¹ İstanbul Üniversitesi, İletişim Fakültesi, Gazetecilik Bölümü, İstanbul, Türkiye.

² Kocaeli Üniversitesi, İletişim Fakültesi, Gazetecilik Bölümü, Kocaeli, Türkiye.

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 20/10/2023
Düzeltilme: 21/11/2023
Kabul: 29/11/2023

Anahtar Kelimeler

Bibliyometrik analiz
Siber suç
Siber saldırı
Siber güvenlik
Siber savaş

Öz

Sürekli geliştirilmekte olan internet tabanlı teknolojiler, ürünler, hizmetler ve ağlarla ilgili en önemli endişelerden biri siber güvenlik konusudur. Bu çalışmanın amacı siber güvenlik alanında gerçekleştirilen araştırma eğilimlerini belirlemek ve çalışmalarını analiz etmektir. Araştırma kapsamında 1999 ile 2023 yılları arasında yayınlanan ve siber güvenlik, siber suç, siber saldırı, siber savaş konuları ile ilgili yapılan çalışmaların bibliyometrik analizi Scopus veri tabanı ve VOSviewer programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Elde edilen bulgular, en etkili yazarlar ve en iyi ülkeler, makaleler, finansman sağlayan kurumlar ve siber güvenlik üzerine araştırma yayınlayan kuruluşlar dahil olmak üzere çeşitli sonuçlar ortaya koymuştur. İlk aşamada dünya genelinde, ikinci aşamada spesifik olarak Türkiye ve Azerbaycan'da ilgili çalışmaların kapsamı belirlenerek, bibliyometrik analizi yapılmıştır. Yapılan bibliyometrik analiz, mevcut çalışmaların siber güvenliğe ilişkin bilgiyi etkilediğini göstermektedir. Bu çalışma, siber güvenlik ve siber savaşla ilgili araştırmaların kapsamlı bir değerlendirmesini sunması ve gelecekte yapılması planlanan araştırmalar için perspektif oluşturması açısından değerlidir.

Biometric Analysis of Research on Selected Keywords in The Field of Cyber Security, Cyber Warfare

Article Info

Research article
Received: 20/10/2023
Revision: 21/11/2023
Accepted: 29/11/2023

Keywords

Bibliometric analysis
Cybercrime
Cyberattack
Cybersecurity
Cyber warfare

Abstract

Cybersecurity is one of the most important concerns about the ever-developing Internet-based technologies, products, services and networks. The aim of this study is to identify research trends and analyses studies in the field of cyber security. Within the scope of the research, bibliometric analysis of the studies published between 1999 and 2023 on cyber security, cybercrime, cyberattack, cyber warfare and cyber security was carried out using Scopus database and VOSviewer program.

The findings revealed various results, including the most influential authors and top countries, articles, funding institutions and organizations publishing research on cyber security. In the first stage, the scope of the relevant studies in the world in general and specifically in Turkey and Azerbaijan in the second stage was determined and bibliometric analysis was carried out. The bibliometric analysis shows that existing studies affect the knowledge on cyber security. This study is valuable in terms of providing a comprehensive evaluation of research on cyber security and cyber warfare and creating a perspective for future research.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Bugünün teknoloji odaklı dünyasında siber alan kritik öneme sahiptir ve potansiyel bir savaş alanını ifade etmektedir. Dijital çağda iletişim formları hızla değişmektedir. İnternet kullanım oranlarının

artması ve yenilikler iletişim için yeni fırsatlar yaratırken, aynı zamanda bireylerin, kuruluşların ve ulusların güvenliğini tehdit eden, yıkıcı ve ciddi sonuçlar doğuran kötü niyetli faaliyetlerin de önünü açmaktadır. Bilginin dijital platformlarda paylaşıldığı mevcut internet kültüründe bilginin

güvenliğinin sağlanması önem arz etmektedir. Siber güvenlik, kontrol edilemediği noktada endişe vericidir. Siber saldırılar ve siber suç potansiyel bir tehdit haline gelecektir. Hükümetler arasında iç içe geçmiş ve birbirine bağımlı sistemlerden oluşan karmaşık ağlarda siber güvenlik saldırıları ve siber savaş tehdidi büyük maliyetler ve sorunlar içermektedir [1]. Skybox Security'nin kurucusu ve CEO'su Gidi Cohen'e göre siber saldırıların hızı ve karmaşıklığı düzenli olarak arttığı için, bağlantılı altyapılara geçişin siber tehditleri daha da artıracığı düşünülmektedir [2]. Siber saldırılar ve siber suçların artması siber güvenlik araştırmalarına daha fazla odaklanmayı zorunlu hale getirmekte, konuyla ilgili bilimsel çalışmalar son yıllarda kapsam olarak genişlemektedir.

Herhangi bir bilim dalıyla ilgili üretilmiş her türden yazılı literatürün belli dönemlerde incelenmesi, o bilim dalındaki gelişmelerin ortaya konulması bakımından önemlidir [3]. Bu çalışmanın amacı, siber güvenlik, siber suç, siber saldırılar, siber savaş araştırma eğilimlerinin bibliyometrik bir incelemesini sunmaktır. Mevcut çalışma, ilgili konu başlıklarındaki yayınların siber alandaki tehditlerin artmasına paralel arttığı temel varsayımından hareketle iki araştırma sorusunu yanıtlamak için Türkiye ve Azerbaycan'da siber güvenlik, siber savaşla ilgili araştırmaların durumunu incelemeyi hedeflemektedir. Araştırma kapsamında Türkiye ve Azerbaycan'ın analiz edilmesinin temel nedeni ortak jeostratejik çıkarlara, tarihsel, kültürel, dinsel ve dilsel bağlara sahip iki ülkenin giderek güçlenen politik, ekonomik, askeri işbirliğinin bir sonucu olarak siber güvenlik alanında ikili işbirliğine yönelik ortak saldırılara daha açık hale gelmeleridir. Azerbaycan'da siber güvenlik alanında yapılan bilimsel çalışmaların Türkiye'deki araştırmalara oranla daha düşük olması, ülkede hibe ve finansman olanaklarının yetersizliği bu alanda yapılacak çalışmaların önemini artırmaktadır. Konuya ilişkin bilimsel analizlerin siber güvenlik politikalarının, finansman ve ortak yazar ağının geliştirilmesi, bölgesel/ikili iş birliğinin akademik alanlarda da desteklenmesi noktasında yarar sağlayacağı düşünülmektedir.

İlk olarak, çalışma 1999 ile 2023 yılları arasında siber güvenliğe ilişkin yayınların zaman içindeki genel eğiliminin ne olduğunu araştırmakta, ikinci olarak da analiz bu alanda en çok alıntı yapılan araştırma makalelerinin hangileri olduğunu belirlemeye çalışmaktadır. Yapılan analizin kapsamı Scopus indeksli hakemli akademik yayımlarla sınırlıdır. Soruların yanıtlarını ortaya koyabilmek için makale aşağıdaki şekilde

yapılandırılmıştır. Öncelikle literatür taraması ve bibliyometrik analiz metodolojisi açıklanmakta, ardından araştırma soruları belirlenen metodoloji kullanılarak yanıtlanmaktadır. Sonuç bölümünde ise ana inceleme bulguları değerlendirilmektedir. Çalışma ile, mevcut literatürün ana bileşenlerinin niceliksel analizi sonucunda elde edilen bulguların, araştırmacıların ve uygulayıcıların zaman içindeki araştırma eğilimlerini belirlemeleri noktasında yarar sağlayacağı ve siber güvenlik politikalarının oluşturulması noktasında bilimsel alana katkı koyacağı ön görülmektedir.

2. LİTERATÜR İNCELEMESİ (LITERATURE REVIEW)

Siber güvenlik, bilgi ve iletişim sistemlerinin ve bunların içerdiği bilgilerin hasara, yetkisiz kullanıma, değişikliğe veya istismara karşı korunmasını sağlayan faaliyet ya da süreç, yetenek veya kabiliyet olarak ifade edilebilir [4]. Siber güvenlik, yazılımlara, donanımlara, bilgisayarlara ve ağlara yönelik düşmanca saldırı riskini azaltma eylemidir. Siber güvenlik ihlali, herhangi bir bilgi sisteminin veya güvenlik politikalarının gizliliğini kolayca tehlikeye atabilir. Dijital çağda finans kuruluşları, hükümetler ve askeri kuruluşlar veri tabanlarında depolanan yüksek miktarda veriye sahiptir. Veri herhangi bir organizasyonun en değerli varlıklarından biridir. Veri güvenliği, ticari/askeri sırların yanı sıra kişisel verilerin çalınmasını, sızdırılmasını veya değiştirilmesini önlemek için güvenlik politikaları, erişim denetimleri, şifreleme ve yedekleme yöntemlerini içerir. Artan miktarda veri çevrimiçi olarak depolanmakta, işlenmekte ve yönetilmektedir [5]. Veri eksikliği araştırma, risk yönetimi ve siber güvenlik gibi birçok alanda zorluklara yol açabilmektedir [6]. Siber saldırılar en gelişmiş şirketleri bile felç edebilir. Bu nedenle dünyanın her yerinde hükümetler gelecekte ortaya çıkabilecek tehlikeler karşısında siber güvenlik alanında araştırmalarını sürdürmektedir. Siber güvenlik açıkları, mahremiyet ihlali ve mali kayıplar dahil olmak üzere önemli kurumsal riskler içermektedir [7]. Siber güvenlik, sürekli bir yarış halindedir çünkü siber saldırganlar her gün yeni taktikler ve araçlar geliştirir. Bu nedenle güvenlik politikalarını düzenli olarak gözden geçirmek ve organizasyonun güvenlik kültürünü sürekli olarak güçlendirmek önemlidir. Ayrıca siber güvenlik, kişisel gizliliği koruma ve siber saldırıların toplumun çeşitli yönlerine etkisi gibi daha geniş sosyal ve etik konuları da içerir.

1990'lı yıllarda basit virüs yazılımlarıyla başlayan siber saldırıların, günümüzde gelişmiş, hedefli,

kalıcı tehditler olarak karmaşıklığının ve ekonomik etkisinin arttığı bilinmektedir [8]. Siber güvenlik, siber saldırıları önlemek için vaz geçilemeyen, her zaman büyük ilgi gören ve etkileri küresel olan bir alanı ifade etmektedir. Siber suç, geleneksel suç gibi sıklıkla suç üçgeni içinde tanımlanmaktadır. Suç üçgeni tanımından hareketle izinsiz giriş üçgenine göre bir siber suçun meydana gelmesi için üç faktörün olması gerekir: bir mağdur, bir saik ve bir fırsat. Mağdur, saldırının hedefidir, saik, suçluyu saldırıyı gerçekleştirmeye iten unsurdur ve fırsat, suçun işlenmesi için bir şanstır [9]. Genel olarak saldırganlar mali kazanç, casusluk, zorlama veya intikam almak için kurbanları hedef almış olsalar da fırsatçı, eğlence amaçlı ve hedefsiz saldırılar da oldukça yaygındır. Siber suç işleyenler için paranın bir numaralı motivasyon olduğu bilinmektedir [10]. Acemi hackerler ise daha çok merak, ünlü olma ve eğlenme gibi motive edici özelliklerine göre tanımlanmaktadır [11]. 2017 yılında Visual Capitalist tarafından büyük kuruluşlar üzerinde yapılan küresel bir araştırmaya göre, siber saldırıların %41'i fidye almak amacıyla gerçekleştirilmiştir. Siber saldırı girişiminde bulunanlar için finansal, sosyal/siyasi hacktivism, casusluk, intikam, rahatsızlık/yıkım, savaş/savunma ve suç kolaylaştırma olmak üzere yedi tane benzersiz motivasyon bulunmaktadır [12-14]. Verizon 2018 Veri İhlali Araştırmaları Raporunda ihlallerin %76'nın mali kazanç amacıyla gerçekleştirilmiştir [15]. Federal Soruşturma Bürosu'nun (FBI) 2022 İnternet Suç Raporu'nda 2018 yılından itibaren son beş yılda siber suçlara ilişkin dünya genelinden 3,26 milyon şikâyetin kayda alındığı ve toplam kayıpların 27,6 milyar dolar olduğu belirtilmiştir [16]. Yine FBI'nın verilerine göre 2021'de 6,9 milyar dolar olan toplam mali kayıp 2022'de 10,2 milyar doların üzerine çıkmıştır. Scopus veri tabanındaki siber güvenlikle ilgili ilk makale 1 Ocak 1999 yılında yayımlanmıştır [17]. Siber güvenlik alanındaki tehditlerin artması siber tehlikesizlikle ilgili tedbirlere ve araştırmalara daha fazla odaklanmayı zorunlu hale getirmektedir.

3. YÖNTEM (METHODOLOGY)

Bu çalışmada kullanılan yöntem bibliyometrik analizdir. Bibliyometrik analiz araştırma performansını değerlendirmenin yanı sıra farklı disiplinleri, iş birliği profillerini, ülke karşılaştırmalarını, zaman dilimlerindeki değişiklikleri ve diğer şeyleri karşılaştırmaların etkili yöntemlerinden biridir [18]. Bir çalışmanın veya araştırma alanının evrimi, kavramsal, entelektüel ve sosyal bir yapı sağlamak için başlığı, anahtar kelimeleri ve yazarları bibliyometrik analiz

kullanılarak kolayca bulunabilir [19]. Bibliyometrik analiz herhangi bir alana ilişkin yayınlanmış çeşitli kaynakların gelişim düzeyinin tespit edilmesi açısından önemli bir analiz yöntemidir. Bu analiz yöntemiyle yazılı iletişimin çeşitli yönleri sayılıp analiz edilerek bir disiplinin doğasına ve gelişim sürecine ışık tutmak mümkün hale gelmektedir. Bibliyometrik çalışmalar, yayın çıktı türevleri, alıntı etkisi, ülkeler, kurumlar ve bilimsel etkinliklerin değerlendirilmesi arasındaki ilişkiye bakmaktadır [20]. Bibliyometrik çalışmalar, yayımlanan araştırmaları görsel olarak sunmakta ve nicel yöntemler kullanmaktadır [21]. "Bibliometric" kavramı Yunanca ve Latince'de kitap ve kâğıt anlamına gelen "biblio" ile ölçü manasına gelen "metric" kelimelerinin birleşiminden oluşarak, kitap veya belgelere ait bir ölçü birimini ifade etmektedir [22]. Bibliyografik çalışmanın öncü örneği, 1917 yılında Cole ve Eales tarafından gerçekleştirilen 1550'den 1860'a kadar karşılaştırmalı anatomi literatürünün istatistiksel analizini içeren çalışmadır [23]. İstatistiksel bibliyografya terimi ilk kez 1922 yılında E. Wyndham Hulme tarafından bilim ve teknolojinin gelişim süreçlerini, dokümanlarını sayarak aydınlatılması anlamında [24] bibliyometrik terimi ise ilk kez 1969 yılında Pritchard tarafından kullanılmıştır [25].

Bibliyometrik haritalama disiplinler, çalışma alanları, uzmanlıklar, kurumlar, yazarlar ve ülkeler arasında ne tür bir ilişki olduğuna dair mekânsal olarak bilim haritalama ve performans analizidir [26]. Başka bir deyişle bilim haritalaması, bilimsel araştırmanın yapısal ve dinamik yönlerini keşfetmeyi hedeflemektedir [27-28]. Bir kavram haritası oluştururken, haritanın dayandığı özetler bütünü bir örnek olarak kabul edilebilir ve her bir özet bir gözlemi temsil eder [29]. Yayın ve atıf sayıları gibi çeşitli ölçütlere dayalı olarak zaman içinde meydana gelebilecek potansiyel dalgalanmalara rağmen, bu parametreler yazarların, kurumların ve dergilerin belirli bir alandaki etkisini ve önemini vurgulamak için önemli göstergeler olmaya devam etmektedir. Bibliyometrik analiz bir bilimsel alanın izlenmesine ve bir araştırma alanının bilişsel yapısını ve gelişimini belirlemek amacıyla sınırlandırılmasına odaklanmaktadır [30-32]. Scopus veri tabanında bilimsel çalışmaların başlık, özet, anahtar kelimeler kısmında (İngilizce olarak) "siber güvenlik, siber suç, siber savaş, siber saldırı" ifadelerinden en az birinin bulunduğu yayımlar filtrelenerek analiz edilmiş ve sonuçlar değerlendirilmiştir. Araştırmayla ilgili 1998-2024 yılları arasında dünya genelinde 32.184, Türkiye'de 329, Azerbaycan'da 14 bilimsel yayının yayımlandığı tespit edilmiştir. Arama aşığıdaki

parametrelerle 09.08.2023 tarihinde gerçekleştirilmiştir: (TITLE-ABS-KEY (cybersecurity) OR TITLE-ABS-KEY (cybercrime) OR TITLE-ABS-KEY (cyber-warfare) OR TITLE-ABS-KEY (cyberattack)) AND (LIMIT-TO (AFFILCOUNTRY,"Turkey"))).

Bilimsel yayınların yılına, türüne veya çalışma tasarımına ilişkin herhangi bir kısıtlama (hariç tutma) yapılmamıştır. Siber güvenlik konusunda dünya genelinde, Türkiye ve Azerbaycan'da yapılmış bilimsel yayınların yıllara, ülkeye, bölgeye ve yazarına göre, üniversitelerin üyeliklerine göre, yayımlanması için en çok tercih edilen kaynaklarına göre, konu alanına ve belge türüne göre, finansman sponsorlarına göre bibliyometrik analizi ortaya konulmaya çalışılmıştır. Bunun yanı sıra Türkiye'de ve Azerbaycan'da ülkelere göre ortak yazarlık analizi, yazar anahtar kelimelerine dayalı eş oluşum analizi, en çok alıntı yapılmış ilk 3 bilimsel yayının analizi, ülke bazında atıf analizi, atıf yapılan yazarlara dayalı ortak atıf analizi yapılarak bilimsel çalışmaların eğilimi niceliksel ve görsel olarak sunulmuştur.

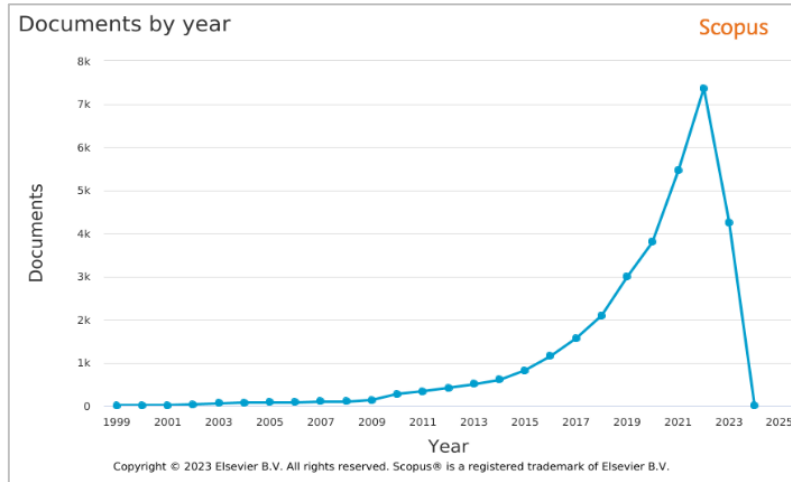
Görsellerin bir kısmı Scopus veri tabanı üzerinden, elde edilen diğer veriler ise VOSviewer 1.6.19 programına aktararak görselleştirilmiş ve yorumlanmıştır. VOSviewer programı, bibliyometrik ağları oluşturmak ve görselleştirmek için yaygın olarak kullanılan bir yazılım aracıdır [33]. Bibliyometrik ağların görselleştirilmesinde mesafeye dayalı bir yaklaşım izlenmektedir. Web of

Science, Scopus, Dimensions ve PubMed dosyaları ve RIS, EndNote ve RefWorks gibi referans yöneticisi dosyaları VOSviewer'a girdi olarak sağlanabilmektedir [34]. VOSviewer yazılım aracıyla yazılı iletişim süreçleri matematik ve istatistiksel yöntemlerle analiz edilerek özetlenmektedir. Bibliyometrik ağların oluşturulması ve görselleştirilmesi için VOSviewer yazılımında hem tam hem de kesirli sayma yöntemleri mevcuttur [35]. Bibliyometrik bilimsel yayınların kalitesini değil miktarını değerlendirdiğinden, herhangi bir bilimsel yayının içerik gücü, değeri veya literatüre bireysel katkısı açısından dikkate alınmamıştır [36].

4. BULGULAR (FINDINGS)

4.1. Dünya Genelinde Siber Güvenlikle İlgili Yayınlanmış Bilimsel Çalışmaların Bibliyometrik Analizi (Bibliometric Analysis of Scientific Studies Published Worldwide on Cyber Security)

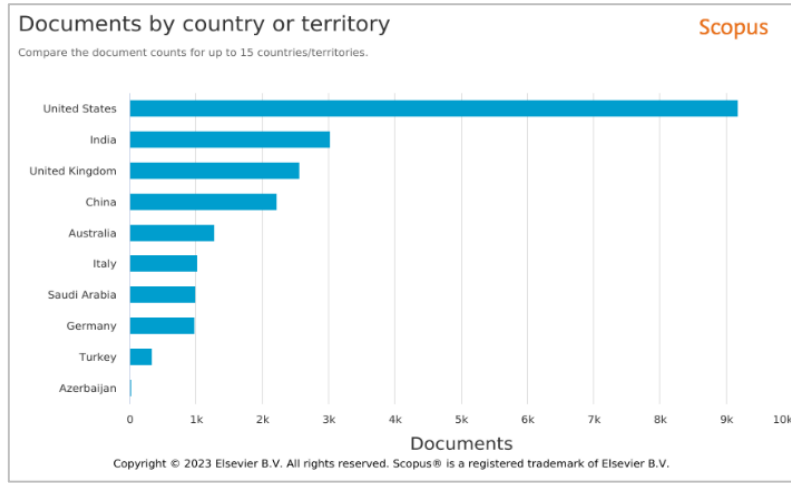
Şekil 1, 1999-2023 yılları arasında dünya genelinde Scopus veri tabanındaki "siber güvenlik, siber suç, siber saldırı, siber savaş" kelimelerini içeren bilimsel yayınların yıllara göre sayısını göstermektedir. Bilimsel yayınların yıllara, ülkeye veya bölgeye ve yazarına göre net sayıları tablo 1'de gösterilmiştir. 2015 yılından 2023 yılına kadar bilimsel yayınların sayısı giderek artmıştır. Önceki yıllarla karşılaştırıldığında 2022 yılında yayınların sayısı (7363) en üst noktaya ulaşmıştır.



Şekil 1. Bilimsel yayınların yıllara göre dağılımı (Distribution of scientific publications by years)

Şekil 2, 1999-2023 yılları arasında dünya genelinde araştırma kapsamındaki bilimsel yayınların ülkelere göre dağılımını göstermektedir. İlk sıralarda Amerika Birleşik Devletleri (ABD), Hindistan, Birleşik Krallık, Çin, Avustralya, İtalya, Suudi Arabistan, Almanya yer almaktadır, Türkiye ve

Azerbaycan ise araştırma konusuna dahil olduğu için tabloya manuel olarak eklenmiştir. Bilimsel yayınların ülkelere göre net sayıları tablo 1'de gösterilmiştir. ABD de yapılan bilimsel yayınlarla (9174) diğer ülkeler arasında büyük oranda fark görülmektedir.



Şekil 2. En fazla yayına sahip ülke/bölge (Country/region with the most publications)

Tablo 1’de en çok bilimsel yayın yapan yazarların adlarına ve yayınlarının sayılarına yer verilmiştir. Birinci sırada 63 bilimsel yayımla Holt, T.J., ikinci sırada 54 bilimsel yayımla Choo, K.K.R., üçüncü

sırada ise 50 bilimsel yayımla Alazab, M. görünmektedir. Dünya genelinde en çok atıf alan makale Kolias ve arkadaşları tarafından 2017 yılında yazılan makale olmuştur [37].

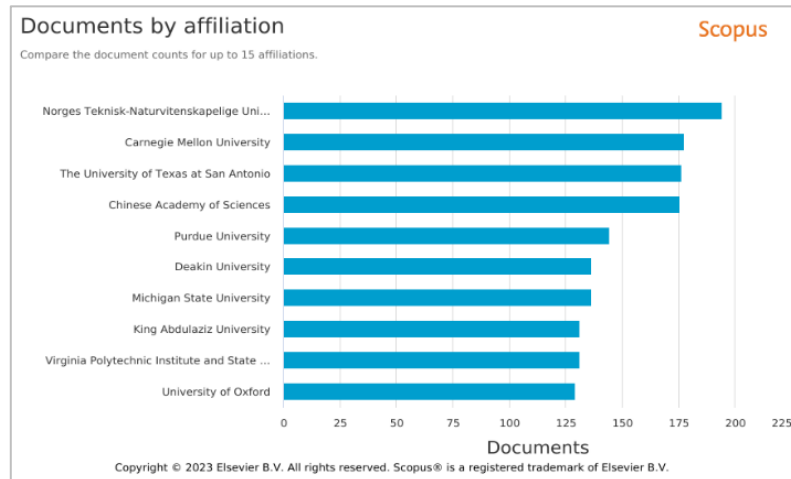
Tablo 1. Bilimsel yayınların yıllara, ülkeye/bölgeye ve yazarına göre ilk 10’da yer alan sayıları (Number of scientific publications in the top 10 by year, country/region and author)

S/n	Yıllara göre belgeler	Sayı	Ülkeye/bölgeye göre belgeler	Sayı	Yazara göre belgeler	Sayı
1	2015	817	ABD	9174	Holt, T.J.	63
2	2016	1145	Hindistan	3015	Choo, K.K.R.	54
3	2017	1557	Birleşik Krallık	2551	Alazab, M.	50
4	2018	2084	Çin	2216	Straub, J.	46
5	2019	2985	Avustralya	1266	Jahankhani, H.	44
6	2020	3795	İtalya	1014	Kozik, R.	44
7	2021	5462	Suudi Arabistan	977	Chen, H.	43
8	2022	7363	Almanya	970	Choraś, M.	41
9	2023	4252	Türkiye	329	Kshetri, N.	41
10	2024	2	Azerbaycan	14	Wang, L.	40

Scopus veri tabanının analizine dayalı olarak yazarlar tarafından oluşturulmuştur.

Şekil 3, 1999-2023 yılları arasında dünya genelinde araştırma kapsamındaki bilimsel yayınların üniversitelerin üyeliklerine göre analizini

göstermektedir. Aynı zamanda tablo 2’de de üniversitelerin üyeliklerine göre ilk 10’da yer alan bilimsel yayınların net sayıları da belirlenmiştir.



Şekil 3. Yayınların üniversitelerin üyeliklerine göre sayıları (Number of publications by affiliation)

Tablo 2, siber güvenlik ve siber savaşla ilgili araştırma konusuna önemli katkılarda bulunan kurumlara ilişkin net sayılar sunmaktadır. Üniversitelerin üyeliklerine göre ilk 10 da yer alan bilimsel yayınların sayılarına bakıldığında Norveç Bilim ve Teknoloji Üniversitesi 194 yayımla ilk sırada görünmektedir. İkinci sırada 177 yayımla Carnegie Mellon Üniversitesi, üçüncü sırada ise San Antonio'daki Teksas Üniversitesi gelmektedir.

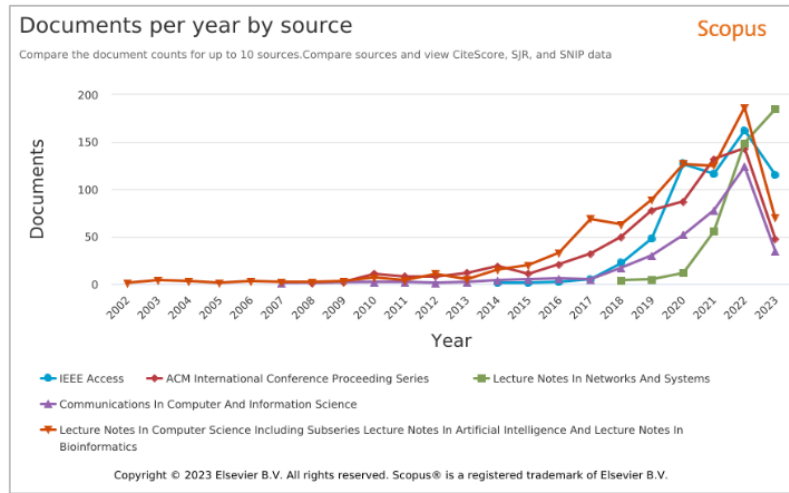
Tablo 2. Üniversitelerin üyeliklerine göre ilk 10'da yer alan belgeler (Documents in the top 10 according to the membership of universities)

S/n	Üniversitelerin üyeliklerine göre belgeler	Sayı
1	Norveç Bilim ve Teknoloji Üniversitesi	194
2	Carnegie Mellon Üniversitesi	177

3	San Antonio'daki Teksas Üniversitesi	176
4	Çin Bilimler Akademisi	175
5	Purdue Üniversitesi	144
6	Deakin Üniversitesi	136
7	Michigan Eyalet Üniversitesi	136
8	Kral Abdulaziz Üniversitesi	131
9	Virginia Politeknik Enstitüsü ve Eyalet Üniversitesi	131
10	Oxford Üniversitesi	129

Scopus veri tabanının analizine dayalı olarak yazarlar tarafından oluşturulmuştur.

Şekil 4, 1999-2023 yılları arasında dünya genelinde araştırma kapsamındaki bilimsel yayınların yayınlanması için en çok tercih edilen kaynakların analizini göstermektedir. Aynı zamanda tablo 3'te en çok tercih edilenler sıralamasında ilk 10'da yer alan kaynaklardaki yayınların net sayıları gösterilmiştir.



Şekil 4. Yayınların yayınlanması için en çok tercih edilen kaynaklar (The most preferred sources for publication)

Tablo 3'te görüldüğü gibi bu listenin başında siber güvenlik ve savaşla ilgili 843 makale yayınlayan Bilgisayar Bilimi Ders Notları (Yapay zekâ ve biyoinformatik ders notları dahil) yer almaktadır. İkinci sırada onu 663 yayımla ACM Uluslararası Konferans Bildiri Serisi, üçüncü sırada ise 599 yayımla IEEE Erişimi dergisi bulunmaktadır. İlk 10'daki en son sırada ise 273 yayımla IEEE Güvenlik ve Gizlilik dergisi yer almaktadır.

Tablo 3. Bilimsel yayınların sayılarına göre ilk 10'da yer alan kaynaklar (Sources in the top 10 based on the number of scientific publications)

S/n	Kaynaklara göre yıllık belgeler	Sayı
1	Bilgisayar Bilimi Ders Notları (Yapay Zekâ ve Biyoinformatik Ders Notları dahil)	843
2	ACM Uluslararası Konferans Bildiri Serisi	663
3	IEEE Erişimi	599

4	Ağlar ve Sistemler Konusunda Ders Notları	411
5	Bilgisayar ve Bilgi Biliminde İletişim	364
6	Ceur Çalıştay Bildirileri	359
7	Akıllı Sistemler ve Bilgi İşlemdeki Gelişmeler	352
8	Bilgisayarlar ve Güvenlik	311
9	Sensörler	276
10	IEEE Güvenlik ve Gizlilik	273

Scopus veri tabanının analizine dayalı olarak yazarlar tarafından oluşturulmuştur.

Tablo 4'te konu alanına ve belge türüne göre ilk 10'da yer alan bilimsel yayınların sayıları gösterilmiştir. Bulgulara göre en çok Bilgisayar Bilimleri alanında (22855) bilimsel yayın yayımlanmıştır. Türünü göre ise en çok (14297) konferans makalesi yayımlanmıştır. İlk 10'da en son sırada Malzeme Bilimi alanında 1357 makale yayımlanırken, belge türü olarak en az (29) mektuplara yer verildiği ortaya çıkmıştır.

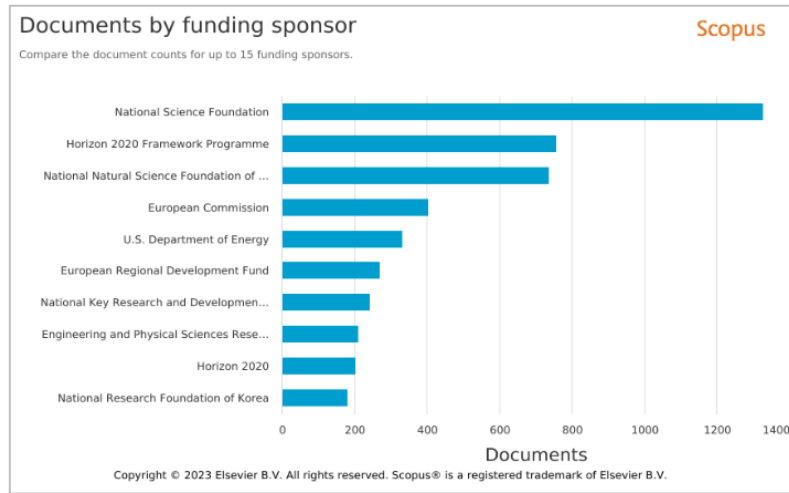
Tablo 4. Konu alanına ve belge türüne göre ilk 10’da yer alan bilimsel yayınların sayıları
(Number of scientific publications in the top 10 by subject area and document type)

S/n	Konu alanına göre belgeler	Sayı	Türe göre belgeler	Sayı
1	Bilgisayar Bilimleri	22855	Konferans makalesi	14297
2	Mühendislik	14391	Makale	12085
3	Sosyal Bilimler	6624	Kitap bölümü	2690
4	Matematik	4665	İnceleme	1096
5	Karar Bilimi	4444	Konferans makalesi	781
6	Enerji	2201	Kitap	581
7	İşletme	2101	Başyazı	235
8	Fizik ve Astronomi	2047	Analiz ve yorumlar	229
9	Tıp	1478	Kısa anket	131
10	Malzeme Bilimi	1357	Mektup	29

Scopus veri tabanının analizine dayalı olarak yazarlar tarafından oluşturulmuştur.

Şekil 5, 1999-2023 yılları arasında dünya genelinde araştırma kapsamındaki bilimsel yayınların finansman sponsorlarının analizini göstermektedir.

Aynı zamanda, tablo 5’te listede ilk 10’da yer alan finansman kuruluşlarına göre yayınların sayıları da gösterilmiştir.

**Şekil 5.** Yayınların finansman sponsorları (Financing sponsors of publications)

Tablo 5’te ilk 10’da yer alan finansman sponsorlarının sayılarına yer verilmiştir. Siber güvenlik ve siber savaş üzerine yapılmış 1326 bilimsel yayını destekleyen Ulusal Bilim Vakfı kayda değer katkıda bulunan kuruluş olarak ortaya çıkmaktadır. İkinci sırada ise 754 yayını destekleyen Horizon 2020 Çerçeve Programı yer alırken, onu 734 yayını destekleyen Çin Ulusal Doğa Bilimleri Vakfı takip etmektedir. İlk 10’da sonuncu sırada ise 179 yayına finansman desteği sağlayan Kore Ulusal Araştırma Vakfı bulunmaktadır.

Tablo 5. Bilimsel yayınlar için ilk 10’da yer alan finansman sponsorları (Top 10 funding sponsors for scientific publications)

S/n	Finansman sponsoruna göre belgeler	Sayı
1	Ulusal Bilim Vakfı	1326
2	Horizon 2020 Çerçeve Programı	754
3	Çin Ulusal Doğa Bilimleri Vakfı	734
4	Avrupa Komisyonu	402

5	ABD Enerji Bakanlığı	330
6	Avrupa Bölgesel Kalkınma Fonu	267
7	Çin Ulusal Anahtar Araştırma ve Geliştirme Programı	240
8	Mühendislik ve Fizik Bilimleri Araştırma Konseyi	208
9	Horizon 2020	201
10	Kore Ulusal Araştırma Vakfı	179

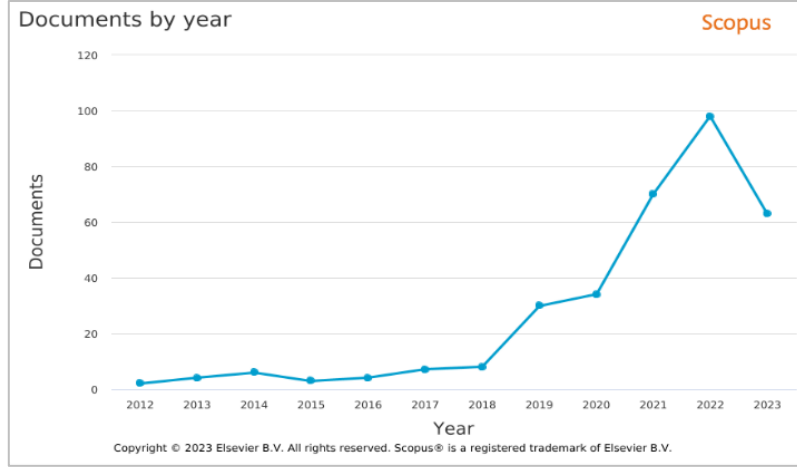
Scopus veri tabanının analizine dayalı olarak yazarlar tarafından oluşturulmuştur.

4.2. Türkiye’de Siber Güvenlikle İlgili Yayınlanmış Bilimsel Çalışmaların Bibliyometrik Analizi (Bibliometric Analysis of Scientific Studies Published on Cyber Security in Turkey)

Şekil 6, 1999-2023 yılları arasında Türkiye’de Scopus veri tabanındaki “siber güvenlik, siber suç, siber saldırı, siber savaş” kelimelerini içeren bilimsel yayınların yıllara göre sayısını göstermektedir. Aynı zamanda bilimsel yayınların yıllara, ülkeye veya bölgeye ve yazarına göre net

sayıları tablo 6'da gösterilmiştir. Scopus veri tabanı üzerinde Türkiye'de ilk yayının 2012 yılında yayımlandığı görülmektedir. 2019 yılından itibaren bilimsel yayınların sayısı giderek artmıştır. Önceki

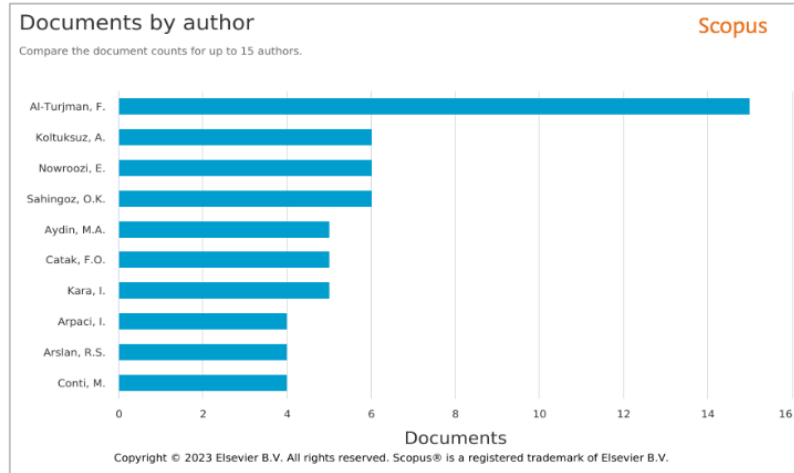
yıllarla karşılaştırıldığında dünya genelinde olduğu gibi Türkiye'de de 2022 yılında yayınların sayısı (98) en üst noktaya ulaşmıştır.



Şekil 6. Bilimsel yayınların yıllara göre dağılımı (Distribution of scientific publications by years)

Şekil 7, 1999-2023 yılları arasında Türkiye'de araştırma kapsamındaki en çok bilimsel yayın yapan yazarların sayılarını göstermektedir. Tablo 6'ya göre en çok yayın yapan 10 yazar arasından Al-Turjman, F., 15 yayımla ilk sırada yer almaktadır.

İkinci sırada ise 6 yayın yapan 3 yazar; Koltuksuz, A., Nowroozi, E., Sahingoz, O.K. bulunmaktadır. İlk 10'da en son sırada 4 yayımla Conti, M. görülmektedir.



Şekil 7. Türkiye'de en çok bilimsel yayın yapan yazarlar (Authors with the most scientific publications in Turkey)

Tablo 6'da Türkiye'deki yayınların türüne bakıldığında makale, konferans makalesi, kitap bölümü, inceleme, kitap, analiz türlerine yer verildiği görülmektedir. İlk sırada en çok

makale (150) türündeki yayınlara, ikinci sırada konferans makalelerine (126), en az ise analiz (1) türüne yer verildiği tespit edilmiştir.

Tablo 6. Bilimsel yayınların yıllara, yazarına ve türüne göre ilk 10'da yer alan sayıları (Number of scientific publications in the top 10 by year, author and type)

S/n	Yıllara göre belgeler	Sayı	Yazarına göre belgeler	Sayı	Türüne göre belgeler	Sayı
1	2014	6	Al-Turjman, F.	15	Makale	150

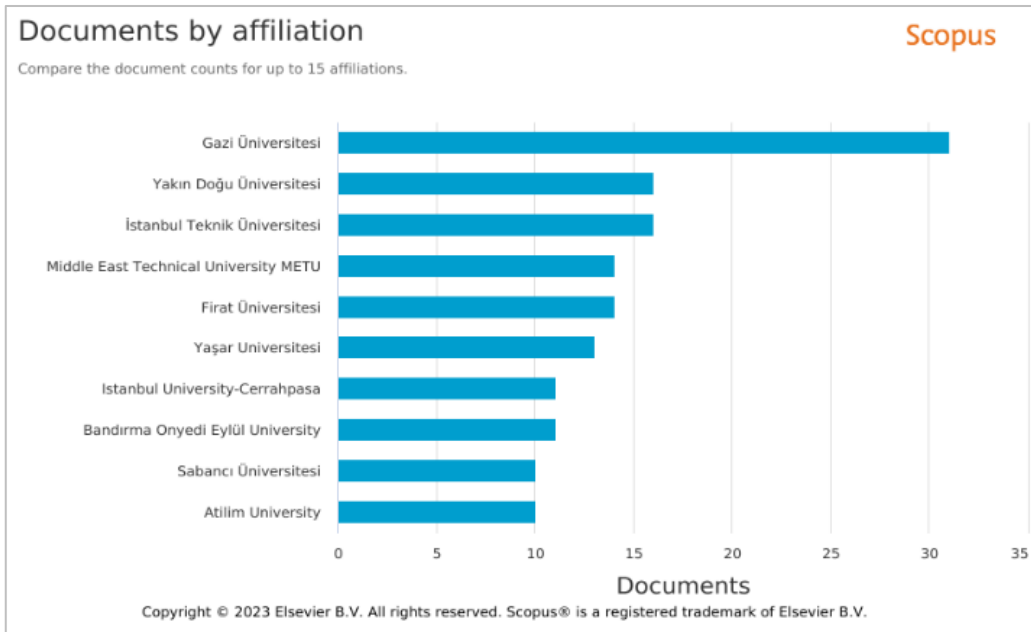
Tablo 6'nın devamı

2	2015	3	Koltuksuz, A.	6	Konferans makalesi	126
3	2016	4	Nowroozi, E.	6	Kitap bölümü	34
4	2017	7	Sahingoz, O.K.	6	İnceleme	12
5	2018	8	Aydin, M.A.	5	Kitap	6
6	2019	30	Catak, F.O.	5	Analiz	1
7	2020	34	Kara, I.	5		
8	2021	70	Arpaci, I.	4		
9	2022	98	Arslan, R.S.	4		
10	2023	63	Conti, M.	4		

Scopus veri tabanının analizine dayalı olarak yazarlar tarafından oluşturulmuştur.

Şekil 8, 1999-2023 yılları arasında Türkiye'de araştırma kapsamındaki bilimsel yayınların üniversitelerin üyeliklerine göre analizini göstermektedir. Aynı zamanda tablo 7'de

üniversitelerin üyeliklerine göre ilk 10'da yer alan bilimsel yayınların net sayıları da gösterilmiş ve yorumlanmıştır.



Şekil 8. Yayınların üniversitelerin üyeliklerine göre sayıları (Number of publications by affiliation)

Tablo 7'de Türkiye'de üniversitelerin üyeliklerine göre ilk 10'da yer alan bilimsel yayınların sayıları gösterilmiştir. İlk 10 da yer alan bilimsel yayınların sayılarına bakıldığında ilk sırada 31 yayınlı Gazi Üniversitesi, ikinci sırada ise aynı sayıda (16) yayınlı Yakın Doğu Üniversitesi ve İstanbul Teknik Üniversitesi, üçüncü sırada aynı sayıda (14) yayınlı Orta Doğu Teknik Üniversitesi ve Fırat Üniversitesi gelmektedir.

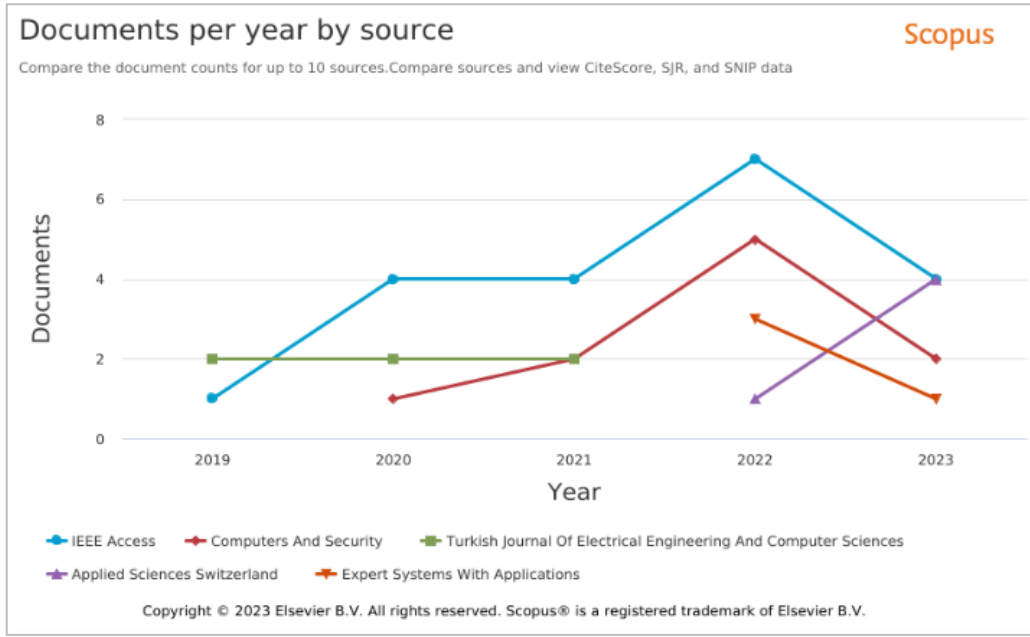
Tablo 7. Üniversitelerin üyeliklerine göre ilk 10'da yer alan bilimsel yayınların sayıları (Number of scientific publications in the top 10 according to university memberships)

S/n	Üyeliğe göre belgeler	Sayı
1	Gazi Üniversitesi	31
2	Yakın Doğu Üniversitesi	16

3	İstanbul Teknik Üniversitesi	16
4	Orta Doğu Teknik Üniversitesi ODTÜ	14
5	Fırat Üniversitesi	14
6	Yaşar Üniversitesi	13
7	İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa	11
8	Bandırma Onyediy Eylül Üniversitesi	11
9	Sabancı Üniversitesi	10
10	Atılım Üniversitesi	10

Scopus veri tabanının analizine dayalı olarak yazarlar tarafından oluşturulmuştur.

Şekil 9, 1999-2023 yılları arasında Türkiye'de araştırma kapsamındaki bilimsel yayınların yayınlanması için en çok tercih edilen kaynakların analizini göstermektedir. Veri tabanında anahtar kelimeler aratılırken siber güvenlik ve siber savaşla ilgili ilk makalenin yayımlandığı yıl başlangıç tarihi olarak kabul edilmiştir.



Şekil 9. Yayınların yayınlanması için en çok tercih edilen kaynaklar
(The most preferred sources for publication)

Tablo 8’de en çok tercih edilenler sıralamasında ilk 10’da yer alan kaynaklardaki yayınların net sayıları gösterilmiştir. Bu listenin başında siber güvenlik ve siber savaşla ilgili 20 makale yayınlayan IEEE Erişimi dergisi yer almaktadır. İkinci sırada onu 10 yayınlara Bilgisayarlar ve Güvenlik dergisi, üçüncü sırada ise 6 yayınlara Türk Elektrik Mühendisliği ve Bilgisayar Bilimleri Dergisi takip etmektedir. İlk 10’daki en son sırada ise 3 yayınlara SPIE (The

international society for optics and photonics) Tutanakları Uluslararası Optik Mühendisliği Topluluğu görünmektedir.

Aynı tabloda (Tablo 8) bilimsel yayınların konu alanına göre dağılımına bakıldığında ilk sırada 251 yayınlara Bilgisayar Bilimi görünmektedir. Onu 179 yayınlara Mühendislik alanı takip ederken, üçüncü sırada 66 yayınlara Karar Bilimleri alanı gelmektedir.

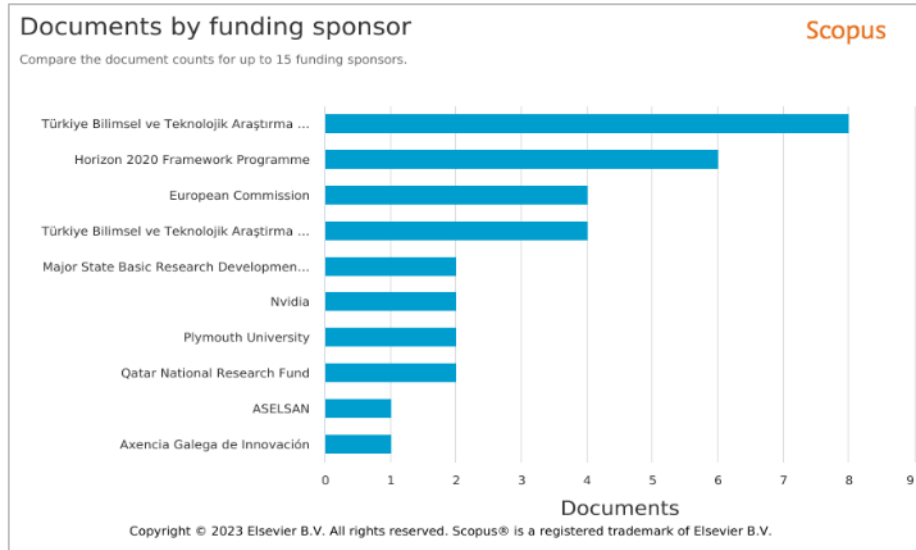
Tablo 8. Bilimsel yayınların konu alanına göre ve kaynağına göre ilk 10 da yer alan sayıları
(Number of scientific publications in the top 10 according to their subject area and source)

S/n	Konu alanına göre belgeler	Sayı	Kaynağına göre yıllık belgeler	Sayı
1	Bilgisayar Bilimi	251	IEEE Erişimi	20
2	Mühendislik	179	Bilgisayarlar ve Güvenlik	10
3	Karar Bilimleri	66	Türk Elektrik Mühendisliği ve Bilgisayar Bilimleri Dergisi	6
4	Matematik	48	Uygulamalı Bilimler İsviçre	5
5	Sosyal Bilimler	48	Uygulamalarla uzmanlık sistemleri	4
6	Malzeme Bilimi	31	Ağlar ve Sistemler Konusunda Ders Notları	4
7	Fizik ve Astronomi	25	Bilgisayar ve Bilişim Biliminde İletişim	3
8	İşletme, Yönetim ve Muhasebe	20	Elektrik	3
9	Ekonomi, Ekonometri ve Finans	20	Ağ ve Hizmet Yönetimi Konusunda IEEE İşlemleri	3
10	Enerji	20	SPIE Tutanakları Uluslararası Optik Mühendisliği Topluluğu	3

Scopus veri tabanının analizine dayalı olarak yazarlar tarafından oluşturulmuştur.

Şekil 10, 1999-2023 yılları arasında Türkiye’de araştırma kapsamındaki bilimsel yayınların finansman sponsorlarının analizini göstermektedir.

Aynı zamanda, tablo 9’da da listede ilk 10’da yer alan finansman kuruluşlarına göre yayınların sayıları da gösterilmiştir.



Şekil 10. Yayınların finansman sponsorları (Financing sponsors of publications)

Şekil 10'de 1999-2023 yılları arasında Türkiye'de araştırma kelimesi birinde "i" harfiyle, diğerinde ise "ı" harfiyle yazıldığı için Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumunun adı iki defa yer almıştır. Tablodaki verilere göre birinci sırada Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (8+4=)12 yayını finansal olarak desteklemiştir. İkinci sırada ise onu Horizon 2020 Çerçeve Programı ve Avrupa Komisyonu her biri eşit sayıda (6) yayınlara takip etmektedir. İlk 10'da sonuncu sırada ise 1 yayına finansman desteği sağlayan Galiçya İnovasyon Ajansı görülmektedir.

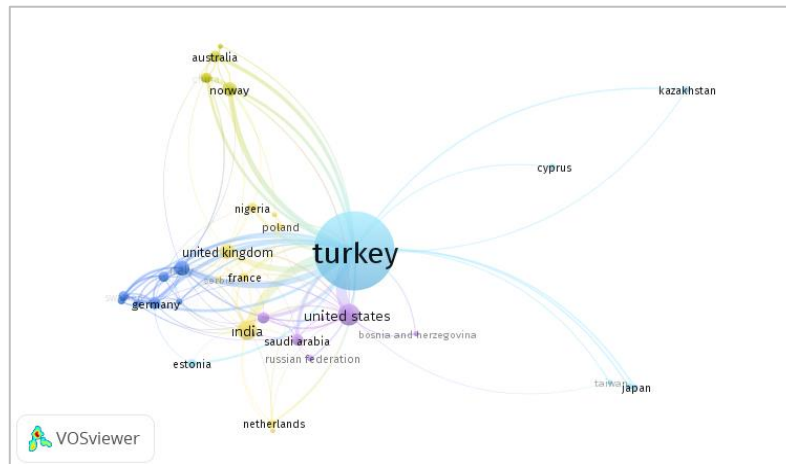
Tablo 9. Bilimsel yayınlar için ilk 10'da yer alan finansman sponsorları (Top 10 funding sponsors for scientific publications)

S/n	Finansman sponsoruna göre belgeler	Sayı
1	Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu	8
2	Horizon 2020 Çerçeve Programı	6
3	Avrupa Komisyonu	6

4	Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu	4
5	Çin'in Büyük Devlet Temel Araştırma Geliştirme Programı	2
6	Nvidia	2
7	Plymouth Üniversitesi	2
8	Katar Ulusal Araştırma Fonu	2
9	ASELSAN	1
10	Galiçya İnovasyon Ajansı	1

Scopus veri tabanının analizine dayalı olarak yazarlar tarafından oluşturulmuştur.

Şekil 11, 1999-2023 yılları arasında Türkiye'de araştırma kapsamındaki bilimsel yayınların ülkelere göre ortak yazarlık analizini göstermektedir. Bu kapsamda VOSviewer programında ülke başına minimum 2 yayın, 10 alıntı eşiğiyle tam sayma yöntemi kullanılarak ortak yazarlık analizi yapılmıştır. 58 ülkeden bu kriterleri karşılayan 34 ülke bulunmuştur. Bunlardan en yüksek değerlere sahip ilk 10 ülke tablo 10'da listelenmiştir.



Şekil 11. Ünelere göre ortak yazarlık analizi (Co-authorship analysis by country)

Çin (alıntı sayısı 570) ve Pakistan (alıntı sayısı 576) ile ortak yazarlığa ilişkin alıntı sayıları yüksek olsa da belge sayıları ve toplam bağlantı güçleri az olduğuna göre ilk 10'da yer almamıştır. Ülkelere göre ortak yazarlık analizindeki sayılara bakıldığında ilk 10'daki yayın sayısı, alıntı sayısı ve toplam bağlantı gücüne göre ilk sırada Türkiye, son sırada ise Suudi Arabistan yer almaktadır. Suudi Arabistan'la ortak olarak 8 bilimsel yayın, 62 alıntı yapıldığı ve bağlantı gücünün 16 olduğu tespit edilmiştir.

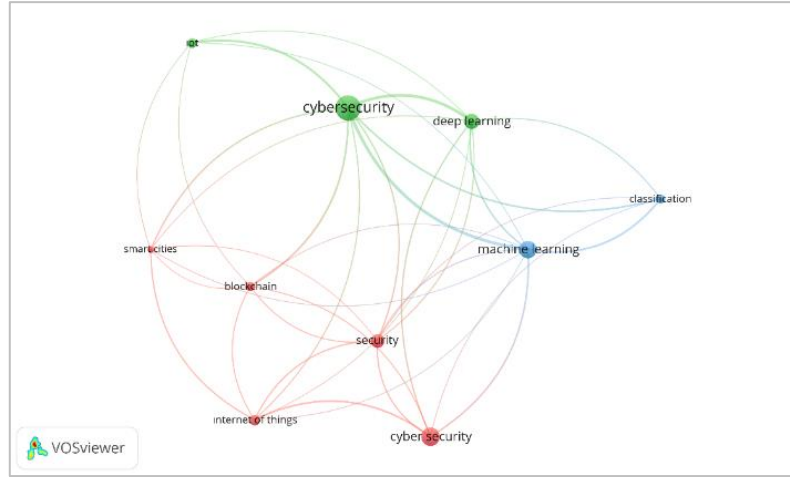
Tablo 10. Ükelere göre ortak yazarlık analizinde ilk 10'da yer alan yayın, alıntı ve bağlantı gücü sayıları (Number of publications, citations and link strength in the top 10 in co-authorship analysis by country)

S/n	Ülke	Yayın sayısı	Alıntı sayısı	Bağlantı gücü
1	Türkiye	328	2470	211
2	ABD	28	270	55

3	Hindistan	23	140	46
4	İtalya	14	298	38
5	Birleşik Krallık	14	92	30
6	Norveç	12	89	23
7	Almanya	9	29	31
8	İran	8	76	18
9	Avustralya	8	439	17
10	Suudi Arabistan	8	62	16

Scopus veri tabanının analizine dayalı olarak yazarlar tarafından oluşturulmuştur.

Şekil 12, 1999-2023 yılları arasında Türkiye'de Scopus veri tabanındaki araştırma kapsamındaki bilimsel yayınlarda yazar anahtar kelimelerine dayalı eş oluşumu göstermektedir. Yapılan analizde 329 makalede 1003 anahtar kelime kullanılmıştır. Bir anahtar kelimenin minimum tekrarlanma sayısı 5 olarak seçilmiştir ve 32 tane anahtar kelimenin her birinin minimum 5 defa tekrarlandığı bulgulanmıştır.



Şekil 12. Yazar anahtar kelimelerine dayalı eş oluşum analizi (Co-occurrence analysis based on author keywords)

Türkiye'de yayımlanan bilimsel yayınlarda eş oluşum bağlamında yazarlar tarafından en çok tercih edilen anahtar kelimelerin sayıları tablo 11'de gösterilmiştir. En çok tercih edilen ilk 10 anahtar kelimelerden ilk sırada "Sibergüvenlik" (bitişik yazılmış) anahtar kelimesi yer almaktadır ve 79 kez kullanılmıştır. Üçüncü sırada ise 42 defa tercih edilen aynı kelimenin ayrı yazılmış versiyonu "Siber güvenlik" bulunmaktadır. İkinci sırada "makine öğrenimi" ifadesi 38 defa kullanılmıştır. Aynı zamanda altıncı sırada yer alan ve 14 defa tercih edilen "Nesnelerin interneti" ifadesinin kısaltması olan "İot" anahtar kelimesi de 11 defa tercih edilmiştir. "Sibergüvenlik ve Siber güvenlik" anahtar kelimelerinin tekrarlanma ve bağlantı gücü sayılarını toplayarak en çok tercih edilen kelime sayısı ve bağlantı gücünü göstermek mantıklı

olacaktır. Bu şekilde "Siber güvenlik" kelimesinin tekrarlanma sayısı $79+42=121$, bağlantı gücü sayısı ise $87+42=129$ olacaktır. Aynı işlem "Nesnelerin interneti" ifadesi ve kısaltması için de yapılırsa tercih edilme sayısı $14+11=25$, bağlantı gücü sayısı ise $20+16=36$ olacaktır.

Tablo 11. En çok kullanılan anahtar kelimelerinin tekrarlanma ve bağlantı gücü sayıları (Number of repetitions and link strength of the most used keywords)

S/n	Anahtar kelimeler	Tekrar sayısı	Bağlantı gücü
1	Sibergüvenlik (cybersecurity)	79	87
2	Makine öğrenimi (machine learning)	38	50

Tablo 11'in devamı

3	Siber güvenlik (cybersecurity)	66	73
4	Derin öğrenme (deep learning)	28	42
5	Nesnelerin interneti (Internet of things)	14	20
6	Sınıflandırma (classification)	10	19
7	Blok zinciri (blockchain)	10	16
8	İot (Internet of Things)	11	16

9	Akıllı şehirler (smart cities)	6	15
---	--------------------------------	---	----

Scopus veri tabanının analizine dayalı olarak yazarlar tarafından oluşturulmuştur.

Tablo 12'de 1999-2023 yılları arasında Scopus verilerine göre Türkiye'de 329 makale arasından "siber güvenlik, siber suç, siber saldırı, siber savaş" kelimelerini içeren ve en çok alıntı yapılmış ilk 3 bilimsel yayının başlığı, yazarı, kaynağı, yılı, türü ve alıntı sayısı gösterilmiştir. İlk sırada yer alan makaleden 230 alıntı yapılmıştır.

Tablo 12. Türkiye'de yayımlanan ve en çok alıntı yapılmış ilk 3 bilimsel yayın
(The top 3 most cited scientific publications published in Turkey)

S/n	Belge başlığı	Yazarlar	Kaynak	Yıl / türü	Alıntılar
1	IMCFN: İnce ayarlı evrişimli sinir ağı mimarisi kullanan görüntü tabanlı kötü amaçlı yazılım sınıflandırması	Vasan, D., Alazab, M., Wassan, S., ... Safaei, B., Zheng, Q.	Bilgisayar Ağları , 171, 107138	2020 Makale	230
2	CNN mimarileri topluluğu (IMCEC) kullanılarak görüntü tabanlı kötü amaçlı yazılım sınıflandırması	Vasan, D., Alazab, M., Wassan, S., Safaei, B., Zheng, Q.	Bilgisayarlar ve Güvenlik , 92, 101748	2020 Makale	188
3	Derin öğrenme yaklaşımı kullanılarak nesnelerin internetinde siber güvenlik tehditlerinin tespiti	Ullah, F., Naeem, H., Jabbar, S., ... Al-Turjman, F., Mostarda, L.	IEEE Erişimi , 7, s. 124379–124389, 8812669	2019 Makale	117

Scopus veri tabanının analizine dayalı olarak yazarlar tarafından oluşturulmuştur.

Tablo 13, 1999-2023 yılları arasında Türkiye'de araştırma kapsamındaki bilimsel yayınların ülke bazında atıf analizini göstermektedir. Tablo 13'de bilimsel yayınların ülke bazında ilk 10'da yer alan belge ve atıf sayıları da gösterilmiştir. VOSviewer programında her ülkenin minimum belge sayısı 5, her ülkenin minimum alıntı sayısı 15 olarak belirlenmiştir, 58 ülkeden yalnız 17'si eşik değerlerini karşılamıştır. Belge sayısı ve atıf sayısına göre ilk sırada Türkiye, ikinci sırada Çin, üçüncü sırada Pakistan bulunmaktadır. İlk 10'da en son sırada İran 8 belge, 76 alıntıyla görünmektedir. Diğer ülkelerle kıyaslandığında Çin ve Pakistan'la ortak belge sayısı (6) az olsa da alıntı sayıları yüksektir.

Tablo 13. Türkiye'deki bilimsel yayınların ülke bazında ilk 10'da yer alan belge ve atıf sayıları (The number of documents and citations of scientific publications in Turkey in the top 10 on a country basis)

S/n	Ülkeler	Belge sayısı	Atıf sayısı
-----	---------	--------------	-------------

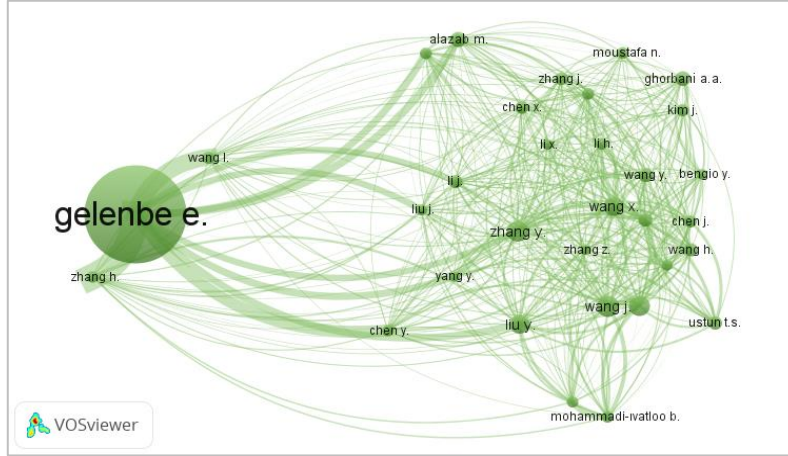
1	Türkiye	328	2470
2	Çin	6	570
3	Pakistan	6	567
4	Avustralya	8	439
5	İtalya	14	298
6	ABD	28	270
7	Hindistan	23	140
8	Birleşik Krallık	14	92
9	Norveç	12	89
10	İran	8	76

Scopus veri tabanının analizine dayalı olarak yazarlar tarafından oluşturulmuştur.

Şekil 13, araştırma kapsamındaki bilimsel yayınlarda atıf yapılan yazarlara dayalı ortak atıf analizini göstermektedir. Yapılan analizde bir yazarın minimum alıntı sayısı 30 olarak belirlenmiştir, 21311 yazardan 32'si eşik değerini karşılamıştır. 296 atıf sayısı ve 2461 bağlantı gücü olan Gelenbe e. adlı yazar listenin başında yer almaktadır. İkinci sırada WANG j. (64; 749), üçüncü sırada ise 63 atıf sayısı ve 828 bağlantı

gücüyü Zhang y. görmektedir. İlk 10'da son sırada 41 atıf sayısı ve 594 bağlantı gücüyle Wang

w. isimli yazarın yer aldığı şekil 13 ve tablo 14 de net bir şekilde görmektedir.



Şekil 13. Atıf yapılan yazarlara dayalı ortak atıf analizi (Co-citation analysis based on cited authors)

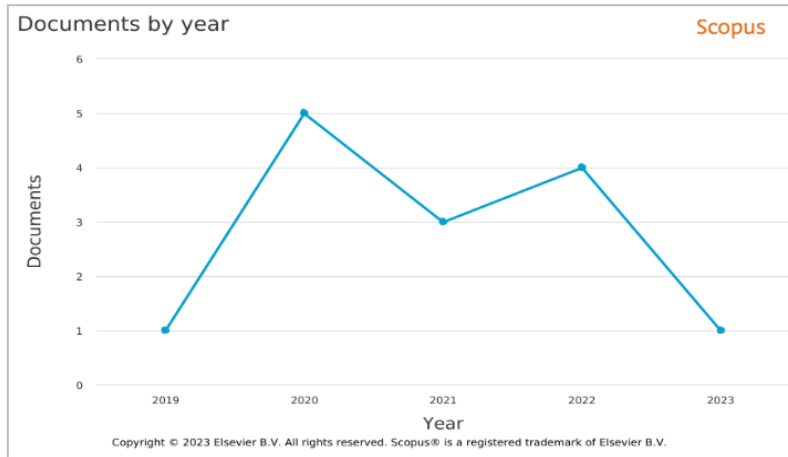
Tablo 14. Türkiye’de atıf yapılan yazarlara dayalı ilk 10’da yer alan ortak atıf ve bağlantı gücü sayıları (Number of co-citation and link strength in the top 10 based on cited authors in Turkey)

S/n	Yazar	Atıf sayısı	Bağlantı gücü
1	Gelenbe E.	296	2461
	Wang J.	64	749
3	Zhang Y.	63	828
4	Li Y.	62	691
5	Liu Y.	57	835
6	Wang X.	57	768
7	Alazab M.	46	560
8	Ghorbani A.A.	45	387
9	Wang Y.	42	519
10	Wang W.	41	594

Scopus veri tabanının analizine dayalı olarak yazarlar tarafından oluşturulmuştur.

4.3. Azerbaycan’da Siber Güvenlikle İlgili Yayınlanmış Bilimsel Çalışmaların Bibliyometrik Analizi (Bibliometric Analysis of Scientific Studies Published on Cyber Security in Azerbaijan)

Şekil 14, 1999-2023 yılları arasında Azerbaycan’da Scopus veri tabanındaki “siber güvenlik, siber suç, siber saldırı, siber savaş” kelimelerini içeren bilimsel yayınların yıllara göre sayısını göstermektedir. Bilimsel yayınların yıllara, ülkeye veya bölgeye ve yazarına göre net sayıları tablo 15’te de gösterilmiştir. Scopus veri tabanı üzerinde Azerbaycan’da ilk yayın 2019 yılında yayımlanmıştır.



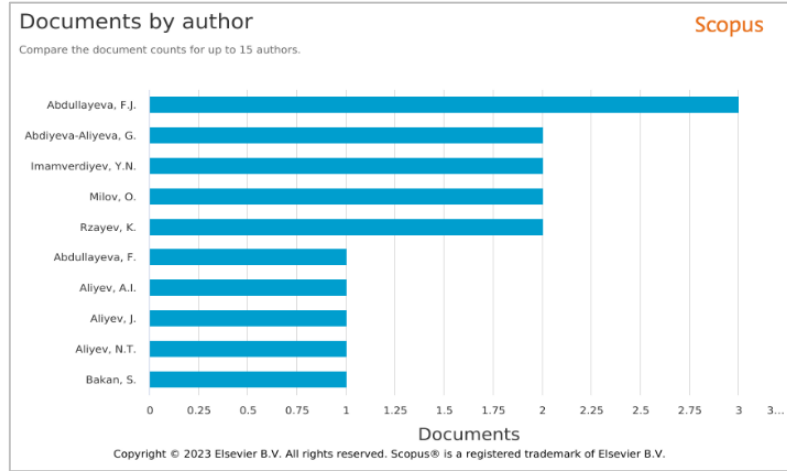
Şekil 14. Bilimsel yayınlanan yıllara göre dağılımı (Distribution of scientific publications by years)

Şekil 15, 1999-2023 yılları arasında Azerbaycan’da en çok bilimsel yayın yapan yazarların analizini

göstermektedir. Tablo 15’te görüldüğü gibi, Abdullayeva, F.J. adlı yazar 3 yayımla ilk sırada yer

almaktadır. İkinci sırada ise 2 yayın yapan 4 yazar; Abdiyeva-Aliyeva, G., İmamverdiyev, Y.N., Milov, O., Rzayev, K., yer almıştır. Diğer 4 yazarın (Abdullayeva, F., Aliyev, A.I., Aliyev, J., Aliyev,

N.T.) her biri 1 adet yayın yayınlamıştır. Azerbaycan'da yazar sayısının 9 olduğu, 10'a tamamlanmadığı saptanmıştır.



Şekil 15. En çok bilimsel yayın yapan yazarlar (Authors with the most scientific publications)

Azerbaycan'daki yayınların türüne bakıldığında makale, konferans makalesi, kitap bölümü olarak yayın türlerine yer verildiği görülmektedir. İlk sırada en fazla makale (7) türündeki yayınlara, ikinci sırada konferans makalelerine (6), en az ise kitap bölümü (1) türüne yer verildiği tespit edilmiştir.

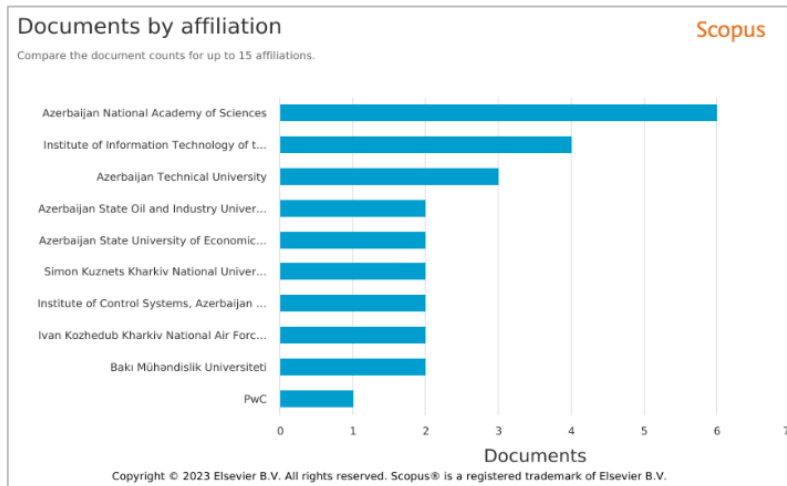
Tablo 15. Bilimsel yayınların yıllara, yazarına ve türüne göre ilk 10'da yer alan sayıları (Number of scientific publications in the top 10 by year, author and type)

S/n	Yıllara göre belgeler	Sayı	Yazara göre belgeler
1	2019	1	Abdullayeva, F.J.
2	2020	5	Abdiyeva-Aliyeva, G.
3	2021	3	İmamverdiyev, Y.N.

4	2022	4	Milov, O.
5	2023	1	Rzayev, K.
6			Abdullayeva, F.
7			Aliyev, A.I.
8			Aliyev, J.
9			Aliyev, N.T.
10			Bakan, S.

Scopus veri tabanının analizine dayalı olarak yazarlar tarafından oluşturulmuştur.

Şekil 16, 1999-2023 yılları arasında Azerbaycan'da araştırma kapsamındaki bilimsel yayınların üniversitelerin üyeliklerine göre analizini göstermektedir. Aynı zamanda tablo 16'da bilgi üretilen kurumların üyeliklerine göre ilk 10'da yer alan bilimsel yayınların net sayıları da gösterilmiştir.



Şekil 16. Yayınların sayısına göre üniversitelerin üyelikleri (Number of publications by affiliation)

Azerbaycan'da Üniversitelerin üyeliklerine göre ilk 10'da yer alan bilimsel yayınların sayılarına bakıldığında ilk sırada 6 yayımla Azerbaycan Ulusal Bilimler Akademisi, ikinci sırada ise 4 yayımla Azerbaycan Ulusal Bilimler Akademisi Bilgi Teknolojisi Enstitüsü, üçüncü sırada ise 3 yayımla Azerbaycan Teknik Üniversitesi'nin geldiği görülmektedir.

Tablo 16. Üniversitelerin üyeliklerine göre ilk 10'da yer alan bilimsel yayınların sayıları (Number of scientific publications in the top 10 according to the membership of universities)

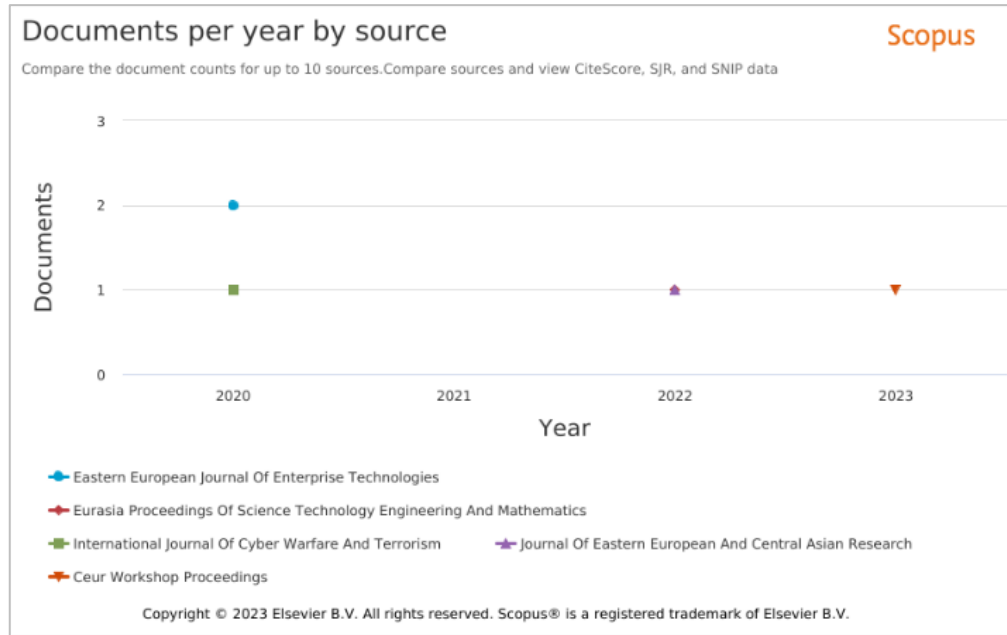
S/n	Üyelğe göre belgeler	Sayı
1	Azerbaycan Ulusal Bilimler Akademisi	6
2	Azerbaycan Ulusal Bilimler Akademisi Bilgi Teknolojisi Enstitüsü	4
3	Azerbaycan Teknik Üniversitesi	3
4	Azerbaycan Devlet Petrol ve Sanayi Üniversitesi	2
5	Azerbaycan Devlet Ekonomi Üniversitesi UNEC	2
6	Simon Kuznets Kharkiv Ulusal Ekonomi Üniversitesi	2
7	Kontrol Sistemleri Enstitüsü, Azerbaycan Ulusal Bilimler Akademisi	2

8	Ivan Kozhedub Kharkiv Ulusal Hava Kuvvetleri Üniversitesi	2
9	Bakü Mühendislik Üniversitesi	2
10	PwC (PricewaterhouseCoopers)	1

Scopus veri tabanının analizine dayalı olarak yazarlar tarafından oluşturulmuştur.

Şekil 17, 1999-2023 yılları arasında Azerbaycan'da araştırma kapsamındaki bilimsel yayınların yayınlanması için en çok tercih edilen kaynakların analizini göstermektedir. Veri tabanında anahtar kelimeler aratılırken siber güvenlik ve siber savaşla ilgili ilk makalenin yayımlandığı yıl başlangıç tarihi olarak kabul edilmiştir.

Aynı zamanda tablo 17'de en çok tercih edilenler sıralamasında ilk 10'da yer alan kaynaklardaki yayınların net sayıları gösterilmiştir. Bu listenin başında siber güvenlik ve siber savaşla ilgili 2 makale yayınlayan Doğu Avrupa İşletme Teknolojileri Dergisi yer almaktadır. İkinci sırada onu 1 yayımla Ceur Çalıştay Bildirileri ve yine 1 yayımla Avrasya Bilim Teknoloji Mühendislik ve Matematik Bildiriler Kitabı takip etmektedir. İlk 10'da en son (dokuzuncu sırada, 10'a tamamlanmamıştır) 1 yayımla Rus Kriminoloji Dergisi görünmektedir.



Şekil 17. Yayınların yayınlanması için en çok tercih edilen kaynaklar (The most preferred sources for publication)

Tablo 17'de bilimsel yayınların konu alanına göre ve kaynağına göre ilk 10'da yer alan sayıları gösterilmiştir. Bilimsel yayınların konu alanına göre dağılımına bakıldığında ilk sırada 11 yayımla Bilgisayar Bilimi alanı yer almaktadır. Onu 5

yayımla Mühendislik alanı takip ederken, üçüncü sırada 4 yayımla Matematik alanı gelmektedir. İlk 10'da en son sırada ise 1 yayımla Ekonomi, Ekonometri ve Finans alanı görünmektedir.

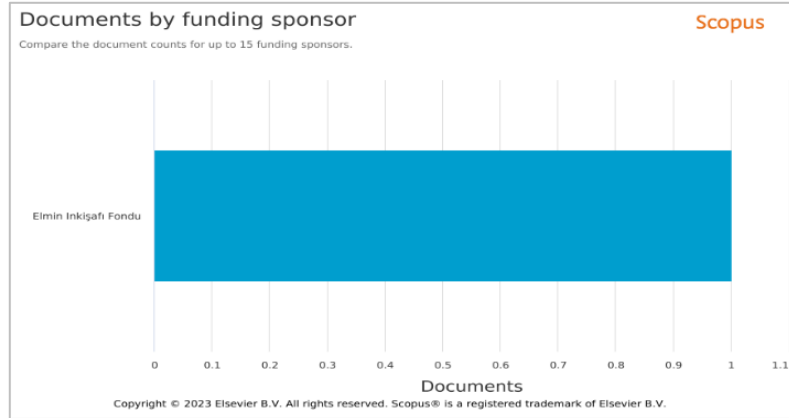
Tablo 17. Bilimsel yayınların konu alanına göre ve kaynağına göre ilk 10'da yer alan sayıları
(Number of scientific publications in the top 10 according to their subject area and source)

S/n	Konu alanına göre belgeler	Sayı	Kaynağına göre yıllık belgeler	Sayı
1	Bilgisayar Bilimleri	11	Doğu Avrupa İşletme Teknolojileri Dergisi	2
2	Mühendislik	5	Ceur Çalıştay Bildirileri	1
3	Matematik	4	Avrasya Bilim Teknoloji Mühendislik ve Matematik Bildiriler Kitabı	1
4	İşletme, Yönetim ve Muhasebe	3	Uluslararası Siber Savaş ve Terörizm Dergisi	1
5	Karar Bilimi	3	Doğu Avrupa ve Orta Asya Araştırmaları Dergisi	1
6	Enerji	3	Bilişim Bilimi Dergisi	1
7	Sosyal Bilimler	3	Süper Hesaplama Dergisi	1
8	Tarım ve Biyoloji Bilimleri	2	İleri Bilgisayar Bilimi	1
9	Çevre Bilimi	2	Rus Kriminoloji Dergisi	1
10	Ekonomi, Ekonometri ve Finans	1	0	0

Scopus veri tabanının analizine dayalı olarak yazarlar tarafından oluşturulmuştur.

Şekil 18, 1999-2023 yılları arasında Azerbaycan'da Scopus veri tabanındaki araştırma kapsamındaki bilimsel yayınların finansman sponsorlarını göstermektedir. Azerbaycan'da 14 bilimsel yayından yalnız bir tanesi Bilim Geliştirme Fonu

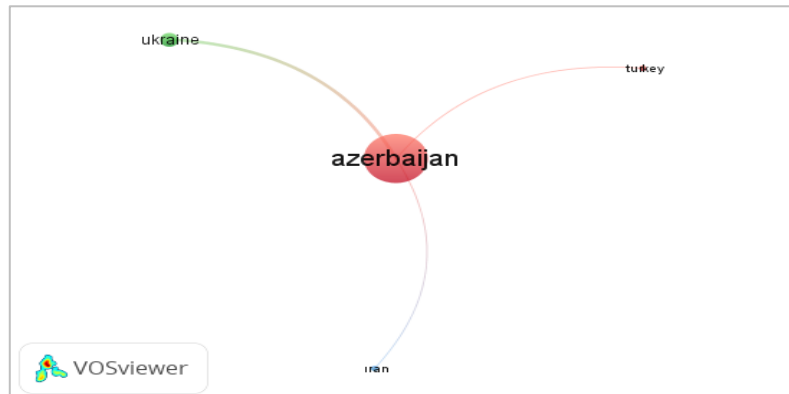
(Elmin inkişafı fondu) tarafından desteklenmiştir. Nispi karşılaştırma yapıldığında Azerbaycan'da bilimsel yayınların finansal olarak desteklenmesinin pek yaygın olmadığı anlaşılmaktadır.



Şekil 18. Yayınların finansman sponsoru (Financing sponsors of publications)

Şekil 19, 1999-2023 yılları arasında Azerbaycan'da araştırma kapsamındaki bilimsel yayınların ülkelere göre ortak yazarlık analizini göstermektedir. VOSviewer programında her ülkenin minimum

belge sayısı 1, her ülkenin minimum alıntı sayısı 1 olarak belirlenmiştir, 5 ülkeden yalnız 4'ü eşik değerlerini karşılamıştır.



Şekil 19. Yayınların ülkelere göre ortak yazarlık analizi (Co-authorship analysis of publications by country)

Tablo 18’de görüldüğü gibi belge sayısı ve atıf sayısına göre ilk sırada Azerbaycan, ikinci sırada Ukrayna, üçüncü sırada İran, Türkiye ise son sırada yer almaktadır. İran’la Türkiye’nin ortak belge sayısı aynı olsa da Türkiye ile kıyaslandığında alıntı sayısı (5) yüksek çıkmıştır.

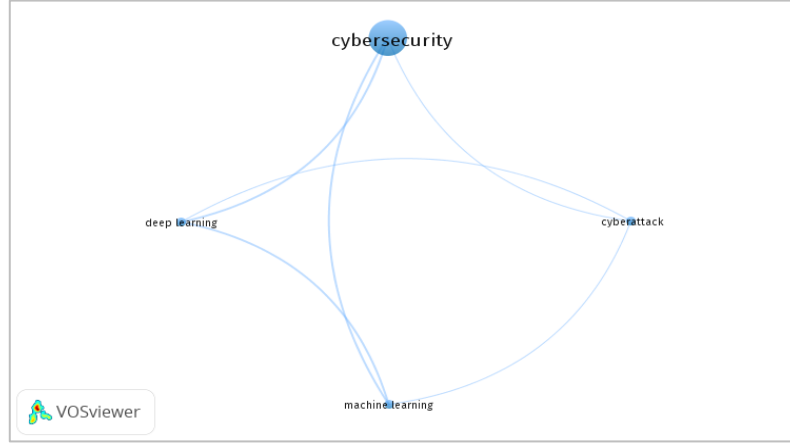
Tablo 18. Azerbaycan’daki bilimsel yayınların ülke bazında atıf analizi (Citation analysis of scientific publications in Azerbaijan on a country basis)

S/n	Ülkeler	Belge sayısı	Atıf sayısı	Bağlantı gücü
-----	---------	--------------	-------------	---------------

1	Azerbaycan	14	30	6
2	Ukrayna	4	6	4
3	İran	1	5	1
4	Türkiye	1	1	1

Scopus veri tabanının analizine dayalı olarak yazarlar tarafından oluşturulmuştur.

Şekil 20, 1999-2023 yılları arasında Azerbaycan’da araştırma kapsamındaki bilimsel yayınlarda yazar anahtar kelimelerine dayalı eş oluşumu göstermektedir.



Şekil 20. Yazar anahtar kelimelerine dayalı eş oluşum analizi (Co-occurrence analysis based on author keywords)

14 makalede 63 anahtar kelime kullanılmıştır. Bir anahtar kelimenin minimum tekrarlanma sayısı 2 olarak belirlenmiştir ve 4 tane anahtar kelimenin her birinin minimum 2 defa tekrarlandığı tespit edilmiştir. En çok kullanılan anahtar kelimelerin “Sibergüvenlik (cybersecurity), derin öğrenme (deep learning), makine öğrenme (machine learning), siber saldırı (cyberattack) olduğu bulgulanmıştır. En çok kullanılan anahtar kelimelerin tekrarlanma ve bağlantı gücü sayıları tablo 19’da gösterilmiştir.

Tablo 19. Yazarlar tarafından en çok kullanılan anahtar kelimelerinin tekrarlanma ve bağlantı gücü sayıları (Repetition and link strength numbers of keywords most used by authors)

S/n	Anahtar kelimeler	Tekrarlanma sayısı	Bağlantı gücü
1	Sibergüvenlik (cybersecurity)	8	5
2	Derin öğrenme (deep learning)	2	5
3	Makine öğrenimi (machine learning)	2	5
4	Siber saldırı (cyberattack)	2	3

Scopus veri tabanının analizine dayalı olarak yazarlar tarafından oluşturulmuştur.

Tablo 20’de 1999-2023 yılları arasında Scopus verilerine göre Azerbaycan’da yayınlanan 14 makale arasından en çok alıntı yapılmış ilk 3 bilimsel yayının başlığı, yazarı, kaynağı, yılı, türü ve alıntı sayısı gösterilmiştir. İlk sırada yer alan makaleden 7 alıntı yapılmıştır.

Tablo 20. Azerbaycan'da yayımlanan ve en çok alıntı yapılmış ilk 3 bilimsel yayın
(The top 3 most cited scientific publications published in Azerbaijan)

S/n	Belge başlığı	Yazarlar	Kaynak	Yılı / türü	Alıntılar
1	Azerbaycan'da tarımın geliştirilmesinde yenilikçi bir faktör olarak dijitalleşme etkinliği	Valiyev, A., Rustamov, F.V.O., Huseynova, R.A., Orujova, M.S., Musayeva, S.N.	Doğu Avrupa ve Orta Asya Araştırmaları Dergisi , 9(2), s. 194–205	2022 Makale	7
2	SINGLETON: Nesnelerin İnternetindeki sensör ağları için kriptografik mandallara dayalı hafif ve güvenli bir uçtan uca şifreleme protokolü	Hassani Karbasi, A., Shahpasand, S.	Süper Hesaplama Dergisi, 77(4), s. 3516–3554	2021 Makale	5
3	Siber güvenlikte derin öğrenme: Zorluklar ve yaklaşımlar	İmamverdiyev, Y.N., Abdullayeva, F.J.	Uluslararası Siber Savaş ve Terörizm Dergisi , 10(2), s. 82–105	2020 Makale	5

Scopus veri tabanının analizine dayalı olarak yazarlar tarafından oluşturulmuştur.

Tablo 21, araştırma kapsamındaki bilimsel yayınların ülke bazında atıf analizini göstermektedir. VOSviewer programında her ülkenin minimum belge sayısı 1, her ülkenin minimum alıntı sayısı 1 olarak belirlenmiştir, 5 ülkeden 4'ü eşik değerlerini karşılamıştır. Belge ve atıf sayısına göre ilk sırada Azerbaycan, en son sırada Türkiye'nin yer aldığı görülmektedir.

Tablo 21. Azerbaycan'daki bilimsel yayınların ülke bazında belge ve atıf sayıları (Number of documents and citations of scientific publications in Azerbaijan on a country basis)

S/n	Ülkeler	Belge sayısı	Atıf sayısı
1	Azerbaycan	14	30
2	Ukrayna	4	6
3	İran	1	5

4	Türkiye	1	1
---	---------	---	---

Scopus veri tabanının analizine dayalı olarak yazarlar tarafından oluşturulmuştur.

Şekil 21, 1999-2023 yılları arasında Azerbaycan'da araştırma kapsamındaki bilimsel yayınlarda atıf yapılan yazarlara dayalı ortak atıf analizini göstermektedir. Bu analizde bir yazarın minimum alıntı sayısı 4 olarak belirlenmiştir, 781 yazardan 26'si eşiği karşılamıştır.

Tablo 22'de görüldüğü gibi Yevseiev s. en çok atıf sayısı (12) ve bağlantı (105) gücüne sahip olan yazardır. İkinci sırada ise Yu y. 6 atıf sayısı, 246 bağlantı gücüne sahiptir olan yazardır. Yu y. en çok bağlantı gücüne sahip olan yazardır. Atıf sayısına (7) göre Milov o., Yu y. den önde görünse de bağlantı gücü (88) ondan zayıftır.



Şekil 21. Atıf yapılan yazarlara dayalı ortak atıf analizi (Co-citation analysis based on cited authors)

Tablo 22. Azerbaycan'da atıf yapılan yazarlara dayalı ilk 10'da yer alan ortak atıf ve bağlantı gücü sayıları (Co-citation and link strength numbers in the top 10 based on cited authors in Azerbaijan)

S/n	Yazar	Atıf sayısı	Bağlantı gücü
1	Yevseyev S.	12	105
2	Milov O.	7	88
3	Yu Y.	6	246
4	Kotenko I.	6	75
5	Abdullayeva F.J.	5	168
6	Aminanto M.E.	4	168
7	Cai Z.	4	168
8	Chilamkurti N.	4	168
9	Diro A.A.	4	168
10	Kim J.	4	168

Scopus veri tabanının analizine dayalı olarak yazarlar tarafından oluşturulmuştur.

5. SONUÇ VE ÖNERİ (CONCLUSION AND SUGGESTION)

Bu çalışmada 1999-2023 yılları arasında Scopus veri tabanında, bilimsel çalışmaların başlık, özet, anahtar kelimeler kısmında “siber güvenlik, siber suç, siber savaş, siber saldırı” ifadeleri barındıran bilimsel yayınların bibliyometrik analizi yapılmıştır. Genel olarak 2015'ten 2023 yılına kadar siber güvenlikle ilgili bilimsel yayınların sayılarında yükselen bir artış gözlemlenmiştir. Önceki yıllarla karşılaştırıldığında dünya genelinde olduğu gibi 2022 yılında Türkiye ve Azerbaycan'da da bilimsel yayınların sayısı (98) en üst noktaya çıkmıştır. Bilimsel yayınların ülkelere göre dağılımına bakıldığında ilk sıralarda Amerika Birleşik Devletleri (ABD), Hindistan, Birleşik Krallık, Çin, Avustralya'nın yer aldığı tespit edilmiştir. Dünya genelinde en çok bilimsel yayın yapan yazarın 63 bilimsel yayını Holt, T.J., olduğu, Türkiye'de en çok yayın (15) yapan yazarın Al-Turjman, F., Azerbaycan'da en çok yayın (9) yapan yazarın ise Abdullayeva, F.J. olduğu bulgulanmıştır.

Üniversitelerin üyeliklerine göre bilimsel yayınların sayılarına bakıldığında dünya genelinde Norveç Bilim ve Teknoloji Üniversitesi (194 yayın), Türkiye'de Gazi Üniversitesi (31 yayın), Azerbaycan'da Azerbaycan Ulusal Bilimler Akademisi (6 yayın) ilk sırada görünmektedir. Bilimsel yayınların yayınlanması için dünya genelinde en çok tercih edilen kaynaklarda ilk sırada 843 bilimsel yayının yayımlandığı Bilgisayar Bilimi Ders Notları (Yapay zekâ ve biyoinformatik ders notları dahil) bulunmaktadır. Türkiye'de Bilimsel yayınların yayınlanması için en çok tercih edilen kaynakları listesinde 20 tane bilimsel yayının yayımlandığı IEEE Erişimi dergisi yer almaktadır.

Azerbaycan'da ise bilimsel yayınların yayınlanması için en çok Doğu Avrupa İşletme Teknolojileri Dergisi tercih edilerek 2 tane bilimsel yayın yayımlanmıştır.

Dünya genelinde bilimsel yayınların en çok Bilgisayar Bilimleri alanında (22855) ve belge türü olarak en çok konferans makalesinin (14297) yayımlandığı görülmüştür. Türkiye'de ve Azerbaycan'da da en çok yayının Bilgisayar Bilimleri alanında yapıldığı, türüne göre ise en çok makale türündeki yayınlara yer verildiği ortaya çıkmıştır.

Dünya genelinde bilimsel yayınların finansman sponsorlarına bakıldığında Ulusal Bilim Vakfı 1326 bilimsel yayını destekleyerek alana kayda değer katkıda bulunmuştur. Türkiye'de 12 yayın finansal olarak Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu tarafından desteklenmiştir. Azerbaycan'da ise toplam 14 Scopus makalesinden yalnız bir tanesi finansal olarak Bilim Geliştirme Fonu (Elmin inkişafı fondu) tarafından desteklenmiştir.

Türkiye'de Ülkelere göre ortak yazarlık ilişkilerine bakıldığında Türkiye, ABD, Hindistan, İtalya ve Birleşik Krallık ilk sıralarda görünmektedir. Türkiye'de yazar anahtar kelimelerine dayalı eş oluşum analizinde 329 makalede 1003 anahtar kelimenin kullanıldığı bulgulanmıştır. En çok kullanılan anahtar kelimelerin “Sibergüvenlik (cybersecurity), Siber güvenlik (cyber security) ve makine öğrenimi (machine learning)” olduğu bulgulanmıştır.

Türkiye'de 329 makaleden en çok alıntı yapılmış (230 alıntı) bilimsel yayın “IMCFN: İnce ayarlı evrimsel sinir ağı mimarisi kullanan görüntü tabanlı kötü amaçlı yazılım sınıflandırması” adlı makaledir. Azerbaycan'da ise en çok alıntı (7 alıntı) yapılmış bilimsel yayının “Azerbaycan'da tarımın geliştirilmesinde yenilikçi bir faktör olarak dijitalleşme etkinliği” adlı makale olduğu tespit edilmiştir. Türkiye'de bilimsel yayınların ülke bazında atıf analizinde belge sayısı ve atıf sayısına göre ilk sırada Türkiye, ikinci sırada Çin, üçüncü sırada Pakistan yer almaktadır. Türkiye'de bilimsel yayınlarda atıf yapılan yazarlara dayalı yapılan analizde ise 296 atıf sayısı ve 2461 bağlantı gücü olan Gelenbe e. adlı yazar listenin başında yer almaktadır. Gelenbe e. adlı yazarın yüksek oranda ortak atıf alması siber güvenlik ve siber savaşla ilgili önemli çalışmalara imza attığını göstermektedir.

Azerbaycan'da bilimsel yayınların ülkelere göre ortak yazarlık analizinde ve ülke bazında atıf analizinde belge sayısı ve atıf sayısına göre ilk sırada Azerbaycan, ikinci sırada Ukrayna, üçüncü sırada İran, Türkiye ise son sırada yer almaktadır. Azerbaycan'da bilimsel yayınlarda yazar anahtar kelimelerine dayalı eş oluşumu analizinde 14 makalede 63 anahtar kelimenin kullanıldığı tespit

edilmiştir. En çok kullanılan anahtar kelimelerin “Siber güvenlik (cybersecurity), derin öğrenme (deep learning), makine öğrenme (machine learning), siber saldırı (cyberattack) olduğu bulunmuştur. Azerbaycan’da atıf yapılan yazarlara dayalı ortak atıf analizinde yevseyev s. adlı yazarın en çok atıf aldığı (12) ve bağlantı (105) gücüne sahip olduğu ortaya çıkmıştır.

Dünya genelinde yapılan çalışmaların bibliyometrik analizine bakıldığında, Türkiye’de ve Azerbaycan’da siber güvenlikle ilgili makalelerin geç dönemde yayımlanmaya başladığı ancak sonuç olarak bu konulara ilginin son yıllarda arttığı görülmektedir. Analiz, siber güvenlik, siber suçla ilgili literatürdeki eksiklikleri de ortaya çıkarmaktadır. Bu alanda yapılacak çok daha fazla sayıdaki araştırma akademisyenlere ve mesleki profesyonellere değerli bilgiler sağlayabilir.

Özellikle Türkiye ve Azerbaycan’da siber güvenlikle ilgili araştırmalara ilişkin gelişmelerin gözlemlenebilmesi, iş birliğinin sağlanabilmesi için, dünya genelinde en çok taranan veri tabanlarındaki (Scopus, Web of Science, ...) dergilerde yayın sayılarının artırılmasının bilimsel alana katkı sağlayacağı ve araştırmacıların bu noktada desteklenmesinin önemli olduğu düşünülmektedir.

ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazarı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

The author of this article declares that the materials and methods they use in their work do not require ethical committee approval and/or legal-specific permission.

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS’ CONTRIBUTIONS)

Şehavet NECİYEV ve Betül PAZARBAŞI: Bu çalışmada yazarlar eşit katkı sağlamıştır.

The authors contributed equally to this study.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur. There is no conflict of interest in this study.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

[1] McLennan, M. (2022). The Global Risks Report 17th Edition, World Economic Forum.

[2] Tuttle, H. (2022). “2022 Cyber Landscape”, Risk Management; New York Vol. 69, Iss. 1, 18-23.

[3] Kozak, N. (2000). Türkiye’ de Akademik Turizm Literatürünün Gelişim Süreci Üzerine Bir İnceleme, DAÜ: Turizm Araştırmaları Dergisi, Cilt: 1, Sayı:1 Aralık, ss. 15-55.

[4] Homeland Security. “Cybersecurity Glossary”. <https://niccs.cisa.gov/about-niccs/cybersecurity-glossary> 10 October 2021. 14.09, 2023.

[5] Gao, L., Calderon, T. G. and Tang, F. (2020). Public companies’ cybersecurity risk disclosures, International Journal of Accounting Information Systems, Vol. 38, p. 100468, doi: 10.1016/j.accinf.2020.100468.

[6] Falco, G., Eling, M., Jablanski, D., Weber, M., Miller, V., Gordon, L.A... & Lin, H. (2019). Cyber risk research impeded by disciplinary barriers. Science 366(6469), 1066–1069.

[7] Sheehan, B., Murphy, F., Mullins, M. and Ryan, C. (2019). Connected and autonomous vehicles: A cyber-risk classification framework. Transportation research part A: policy and practice, 124, 523-536.

[8] Şentürk, H., Çil, C. Z. & Sağıroğlu, Ş. (2016). Siber güvenlik yatırım kararları üzerine literatür incelemesi. Politeknik Dergisi, 19(1), 39-51.

[9] Shinder, D. L. & Cross, M. (2008). Scene of the Cybercrime. Elsevier.

[10] Nixu Cybersecurity. (2019). Cyberattack motives, part 1: Why hackers hack? Who are they? <https://www.nixu.com/blog/cyber-attack-motives-part-1-why-hackers-hack-who-are-they>.

[11] Chng, S., Lu, H. Y., Kumar, A., & Yau, D. (2022). Hacker types, motivations and strategies: A comprehensive framework. Computers in Human Behavior Reports, 5, 100167.

[12] Mark, C. (2020). Understanding cyber attacker motivations to best apply controls. AT&T Cybersecurity. <http://cybersecurity.att.com/blogs/security-essentials/understanding-cyber-attacker-motivations-to-best-apply-controls>.

[13] Hjørtedal, M. (2011). China’s use of cyber warfare: Espionage meets strategic deterrence. Journal of Strategic Security, 4(2), 1-24.

[14] Traer, S., & Bednar, P. (2021). Motives behind ddos attacks. In Digital Transformation and Human

- Behavior: Innovation for People and Organisations (pp. 135-147). Springer International Publishing.
- [15] Widup, S., Spitler, M., Hylender, D., & Bassett, G. (2018). Verizon data breach investigations report. Technical report.
- [16] Federal Soruşturma Bürosu tarafından yayımlanan 2022 İnternet Suç Raporu. s.7. https://www.iafci.org/app_themes/docs/Federal%20Agency/2022_IC3Report.pdf.
- [17] Johnstone, P. (1999). Financial crime: Prevention and regulation in the intangible environment. *Journal of Money Laundering Control*, 2(3), 253-263.
- [18] Bambo, T. L., Pouris, A. (2020). Bibliometric analysis of bioeconomy research in South Africa. *Scientometrics*. 125(1):29–51. doi:10.1007/s11192-020-03626-y.
- [19] Donthu, N., Kumar, S. & Pattnaik, D. (2020). Forty-five years of journal of business research: a bibliometric analysis. *Journal of business research*, 109, 1-14.
- [20] Norfarah, N., Ali, S. M., Siti-Nabiha, A. K., Ebrahim, N. A. (2019). Firms' sustainable practice research in developing countries: mapping the cited literature by bibliometric analysis approach. *International Journal of Sustainable Strategic Management*, 7(1-2), 5-26.
- [21] Akman, A. Z. & Erdirencelebi, M. (2023). Kurumsal sosyal sorumluluk kavramının bibliyometrik analizi: 2017-2021 dönemine bir bakış. *Ömer Halisdemir Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 16(3), 597-614.
- [22] Hussain, A. & Fatima, N. (2011). A bibliometric analysis of the 'Chinese Librarianship: an International Electronic Journal, (2006-2010)'. *Chinese Librarianship: an International electronic journal*, 31, 1-14.
- [23] Bulut, Z. & İli, N. D. (2022). Türkiye ve dünyadaki "hüzün turizmi" çalışmalarının bibliyometrik analizi. *Turizm ve İşletme Bilimleri Dergisi*. Volume: 2 Issue: 1, 66- 88, 31.
- [24] Groos, O. V. & Pritchard, A. (1969). Documentation notes. *Journal of Documentation*, 25(4), 344-349.
- [25] Gök, H. S. (2021). Gönüllü turizm konusunda yapılan araştırmaların bibliyometrik analizi: Scopus örneği. *Türk turizm araştırmaları dergisi*, 5(2), 1546-1567.
- [26] Small, H. (1999). Visualizing science by citation mapping. *Journal of the American society for Information Science*, 50(9), 799-813.
- [27] Börner, K., Chen, C. & Boyack, K. W. (2003). Visualizing knowledge domains. *Annual review of information science and technology*, 37(1), 179-255.
- [28] Morris, S. A. & Van der Veer Martens, B. (2008). Mapping Research Specialties. *Annual review of information science and technology*, 42(1), 213-295.
- [29] Van Eck, N. J., & Waltman, L. (2007). Bibliometric mapping of the computational intelligence field. *International Journal of Uncertainty, Fuzziness and Knowledge-Based Systems*, 15(05), s.12.
- [30] Cobo, M. J., Chiclana, F., Collop, A., de Ona, J. & Herrera-Viedma, E. (2013). A bibliometric analysis of the intelligent transportation systems research based on science mapping. *IEEE transactions on intelligent transportation systems*, 15(2), 901-908.
- [31] Martínez, M. A., Cobo, M. J., Herrera, M. & Herrera-Viedma, E. (2015). Analyzing the scientific evolution of social work using science mapping. *Research on social work practice*, 25(2), 257-277.
- [32] Noyons, E., Moed, H. & Van Raan, A. (1999). Integrating research performance analysis and science mapping. *Scientometrics*, 46(3), 591-604.
- [33] Van Eck, N. J., & Waltman, L. (2014). Visualizing bibliometric networks. In *Measuring scholarly impact: Methods and practice* (pp. 285-320). Cham: Springer International Publishing.
- [34] Van Eck, N. J., & Waltman, L. (2023). Manual for VOSviewer version 1.6.19. Universiteit Leiden.
- [35] Perianes-Rodriguez, A., Waltman, L., & Van Eck, N.J. (2016). Constructing bibliometric networks: A comparison between full and fractional counting. *Journal of Informetrics*, 10(4), 1178-1195.
- [36] Khalil, G. M., & Crawford, C. A. G. (2015). A bibliometric analysis of US-based research on the behavioral risk factor surveillance system.

American journal of preventive medicine, 48(1), 50-57.

[37] Koliass, C., Kambourakis, G., Stavrou, A. & Voas, J. (2017). DDoS in the IoT: Mirai and other botnets. *Computer*, 50(7), 80-84.

Blokzincir Teknolojisi ile Nesnelerin İnterneti Tabanlı (IoT) Sistemlerin Veri Güvenliğinin Sağlanması

Gül Fatma TÜRKER^{1*}  Kubilay TANYERİ¹ 

¹Suleyman Demirel University, Faculty of Engineering, Department of Computer Engineering, Isparta, Turkey

Makale Bilgisi

Research article
Received: 28/10/2022
Revision: 23/05/2023
Accepted: 23/05/2023

Anahtar Kelimeler

Akıllı Ev Sistemi
Blokzincir
Nesnelerin İnterneti (IoT)
Nesnelerin İnterneti
Güvenliği
Veri Bütünlüğü

Article Info

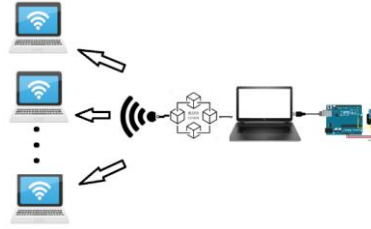
Araştırma makalesi
Başvuru: 28/10/2022
Düzeltilme: 23/05/2023
Kabul: 23/05/2023

Keywords

Smart Home System
Blockchain
Internet of Things
Internet of Things Security
Data Integrity

Grafik Özet (Graphical/Tabular Abstract)

Bu çalışmada, bir akıllı ev sistemi örneği sunulmuş, bu sistemde blokzincir teknolojisi ile IoT entegrasyonu gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan IoT tabanlı sistemde, veri gizliliği ve bütünlüğü için blokzincir dağıtık veri tabanı kullanılmış ve elde edilen sonuçlar, veri bütünlüğünün korunduğunu ve veri kayıplarının olmadığını göstermiştir. / In this study, an example of a smart home system has been presented, where blockchain technology has been integrated with IoT. In the designed IoT-based system, a distributed blockchain database has been employed for data privacy and integrity, and the obtained results demonstrate the preservation of data integrity and the absence of data losses.



Şekil A: IoT sistemlerin güvenliğini sağlayan uygulama tasarımı / **Figure A:** Design of applications ensuring the security of IoT systems.

Önemli noktalar (Highlights)

- IoT cihazlarından alınan verilerin güvenliği için kullanılan kimlik doğrulama, kimlik yönetimi, veri bütünlüğü yöntemi, yetkilendirme ve erişim denetimi, birlikte çalışabilirlik ve gizlilik yöntemleri üzerine blokzincir teknolojisi ile çözümler sunulmuştur. / Solutions utilizing blockchain technology have been presented for authentication, identity management, data integrity methods, authorization and access control, interoperability, and privacy methods employed for securing data from IoT devices.
- Akıllı bir ev sistemi için tasarlanan IoT ağ sisteminde ortam verilerinin güvenliği blokzincir teknolojisi ile sağlanmıştır. / In the IoT network system designed for a smart home system, the security of environmental data is provided by blockchain technology.
- IoT sistemlerde oluşan veri güvenliği problemleri için blokzincir teknolojisi potansiyel çözümler sağlamaktadır. / Blockchain technology provides potential solutions for data security problems arising in IoT systems

Amaç (Aim): IoT cihazlarından alınan verilerin güvenliğini sağlamak için örnek bir uygulama ile akıllı bir ev sistemi olarak tasarlanan IoT ağında ortam verilerinin güvenliği blokzincir teknolojisi ile sağlanmıştır. / The security of environmental data in the IoT network, which is designed as a smart home system with a sample application to ensure the security of data received from IoT devices, is provided by blockchain technology.

Özgünlük (Originality): Çalışma IoT sistemlerde oluşan veri güvenliği problemleri için blokzincir teknolojisinin çözümler sunduğunu gösterdi. / The study demonstrated that blockchain technology provides solutions for data security problems in IoT systems.

Bulgular (Results): Blokzincir teknolojisi ile IoT cihazları arasında güvenli veri aktarımı sağlanması için tasarlanan sistemde verilerin güvenli olarak iletiliği kanıtlanmıştır. / It has been proven that data is transmitted securely in the system designed to ensure secure data transfer between IoT devices with blockchain technology.

Sonuç (Conclusion): IoT tabanlı sistemlere veri gizliliği ve bütünlüğü için blokzincir dağıtık veri tabanı uygulanarak alınan sonuçlardan bir veri bütünlüğü saptandığı ve veri kayıplarının olmadığını göstermektedir. / The results obtained by applying blockchain distributed database to IoT-based systems for data confidentiality and integrity show that data integrity is detected and there is no data loss.



Blokzincir Teknolojisi ile Nesnelerin İnterneti Tabanlı (IoT) Sistemlerin Veri Güvenliğinin Sağlanması

Gül Fatma TÜRKER^{1*} Kubilay TANYERİ²

¹Suleyman Demirel University, Faculty of Engineering, Department of Computer Engineering, Isparta, Turkey

Makale Bilgisi

Research article
Received: 28/10/2022
Revision: 23/05/2023
Accepted: 23/05/2023

Anahtar Kelimeler

Akıllı Ev Sistemi
Blokzincir
Nesnelerin İnterneti (IoT)
Nesnelerin İnterneti
Güvenliği
Veri Bütünlüğü

Öz

Günümüzde akıllı şehirlerin, akıllı evlerin ve nesnelerin ortaya çıkması ile Nesnelerin İnterneti (Internet of Things - IoT) değeri artan bir teknoloji olarak gelişmektedir. 2025 yılına kadar internete bağlı olan IoT cihaz sayısının 70 milyarı geçmesi beklenmektedir. IoT sistemleri sınırlı kaynaklara ve hesaplama yeteneğine sahip olmaları, merkezi topolojiye sahip olmamaları nedeniyle pek çok gizlilik ve güvenlik sorunlarını oluşturmaktadır. Veri gizliliği ve veri bütünlüğü IoT veri aktarımında oldukça kritik parametrelerdir, bu nedenle IoT çözümlerinde, hizmet potansiyeli ve hassas verileri içermesi açısından topladıkları ve işledikleri verilerin güvenliği ve gizliliği önemlidir. IoT sistemlerde oluşan veri güvenliği problemleri için blokzincir teknolojisi potansiyel çözümler sağlamaktadır. Bu çalışmada, IoT cihazlarından alınan verilerin güvenliğini sağlamak için blokzincir teknolojisi kullanılmıştır. Akıllı bir ev sistemi için tasarlanan IoT ağı uygulaması üzerinde IoT cihazlarındaki güvenlik açıklıklarından kaynaklanan veri mahremiyeti problemi için blokzincir oluşturulmuş ve cihazlar arasındaki veri iletişiminde iletilen verilerin güvenliği oluşturulan hash algoritmaları ile sağlanırken aynı zamanda veri bütünlüğü testleri yapılarak iletilen verilerin doğruluğu kanıtlanmıştır.

Ensuring Data Security of Internet of Things (IoT) Systems with Blockchain Technology

Article Info

Araştırma makalesi
Başvuru: 28/10/2022
Düzeltilme: 23/05/2023
Kabul: 23/05/2023

Keywords

Smart Home System
Blockchain
Internet of Things
Internet of Things Security
Data Integrity

Abstract

Nowadays, with the emergence of smart cities, smart homes and objects, the Internet of Things (IoT) is developing as a technology with increasing value. By 2025, the number of IoT devices connected to the Internet is expected to exceed 70 billion. IoT systems pose many privacy and security problems due to their limited resources, computational capability, and lack of centralized topology. Data privacy and data integrity are critical parameters in IoT data transmission, so in IoT solutions, the security and confidentiality of the data they collect and process is important in terms of service potential and including sensitive data. Blockchain technology provides potential solutions for data security problems in IoT systems. In this study, blockchain technology is used to ensure the security of data received from IoT devices. Blockchain has been created for the data privacy problem caused by security vulnerabilities in IoT devices on the IoT network application designed for a smart home system, and the security of the data transmitted in the data communication between the devices is ensured by the created hash algorithms, while at the same time the data integrity tests have been carried out to prove the accuracy of the transmitted data.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Nesnelerin interneti günümüzde oldukça yaygınlaşan bir teknoloji olarak akıllı sistemlerin gelişimine katkı sağlamaktadır. IoT uygulamaları aracılığı ile insanların günlük hayatlarında kullandıkları pek çok elektronik cihaz birbirleriyle haberleşmekte ve ihtiyaç halinde bu cihazlar internete bağlanarak çözümler sunmaktadır [1].

Nesnelerin İnterneti, bir ağa bağlı tüm cihaz/nesnelerin insan müdahalesine ve veri girişine gerek duymadan belirli bir protokol ile kendi aralarında veri iletişimi yapabilen, milyarlarca veri toplayarak bu veriler ile karar verebilen akıllı bir iletişim sistemidir [2-3]. IoT teknolojisi günümüzde akıllı ev, akıllı şehir, enerji ölçüm, inşaat, sağlık, tarım, hayvan takibi, kamu sektörü, lojistik, ulaştırma, denizcilik gibi farklı alanlarda

kullanılmaktadır [4]. IoT teknolojisinde meydana gelen hızlı değişimler, düşük maliyetli kablosuz sinyal iletiminde ki önemi oluşturmasının yanısıra [1] bu tür cihazların ve kendi aralarında paylaşılan verilerin güvenlik sorunlarını da beraberinde getirmektedir. En önemli sorunlar verileri algılama, depolama ve işleme süreçlerinde karşımıza çıkmaktadır. Genellikle IoT cihazları uzak konumda yer alır ve bu cihazlardan gelen veriler kayıplara uğrayabilir ve değiştirilebilir, bu durum yanlış ve değiştirilmiş bilgilere, gizlilik, güvenlik tehditlerine ve tutarsızlıklara yol açabilir. Farklı IoT cihazlarından alınarak bir araya getirilen veriler kötü amaçlı olabilir ve diğer IoT katmanları tarafından güvenilir olarak bildirilse de güvenilmez hale gelebilir [5]. Güvenli ve güvenilir bilgilerin iletilmesi erişim denetimi, kimlik doğrulama, gizlilik ve bütünlük gibi güven ve gizlilik parametrelerinin korunması için gereklidir.

Blokzincir (Blockchain) teknolojisinin, âdemimerkeziyetçilik, dağıtılmış defterler, veri bütünlüğü konularında etkili olduğu kanıtlanmıştır. Bu teknoloji IoT cihazları açısından düşük karmaşıklık düzeyini sağlayabilir [6]. Hataya dayanıklı veri paylaşımı, hesaplama gücü, enerji, veri depolama vb. gibi özelliklerinden dolayı blokzincir mekanizması IoT ortamında duyulan güvenilirliği ve güvenliği önemli derecede artıracak yapıdadır [7]. IoT cihazlarından alınan verilerin, yetkilendirilmesi, kimlik doğrulaması ve denetimi blokzincir teknolojisi ile gerçekleştirilebilir. Blokzincirdeki her blok eşit yetki ve bilgiye sahiptir. Ağ işlemleriyle ilgili tüm bilgileri depolayan evrensel bir defter, tüm bloklar arasında paylaşarak blokzincir teknolojisini güvenilir ve değişmez hale getirmektedir [8].

Biswas vd. yaptığı çalışmalarında, akıllı şehirler için IoT cihazları arasında güvenli iletişim sağlayan blokzinciri sistemlerine dayalı bir taslak önermişlerdir [9]. Leiding vd. yaptıkları çalışmalarında ise merkezi olmayan, Ethereum Blokzinciri tabanlı, kendi kendini yöneten bir VANET önermişlerdir [10]. Huang vd. çalışmalarında, IoT üzerinde veri erişimi, gizliliği ve transferi gibi konular üzerinde yoğunlaşmışlardır. Bu konularda güvenlik sorunlarına çözüm üretmek için Ethereum kullanılarak blokzinciri tabanlı sistem önermişlerdir [11]. Cha vd. yaptıkları çalışmalarında giyilebilir IoT sistemleri ve kullanıcıların veri gizliliğini sağlayan blokzincir destekli bir ağ sistemi

önermişlerdir. Kullanılacak cihazlar şifrelenerek, sadece kullanıcı tarafından ulaşılabilir ve yine kullanıcı tarafından açılabilir şekilde blokzincirde tutulmuştur [12].

IoT cihazların erişim kontrolü için blokzincir sistemine dayalı çözüm yöntemlerinden biri olan 'Control Chain' yöntemi kullanılabilir. Bitcoin blokzinciri ile aynı temel prensipler kullanılarak çoklu blokzincir sistemleri oluşturulabilir [13]. 2012 yılına kadar yapılan çalışmaların özellikle Bitcoin alanına yönelik olduğu görülmektedir. 2013 yılı sonrasında blokzincir teknolojisinin farklı alanlarına yönelik çalışmaların yaygınlaştığı görülmektedir [14].

Akıllı evler için blokzincir tabanlı mimariler ilkesini kullan bir teknik Taylor vd. tarafından öne sürülmüştür. Sunulan çözümlerde haberleşme ve kimlik doğrulama amacıyla genel ve yerel olmak üzere iki tür blokzinciri kullanılmıştır. Sonuçlar, kümeleme ve düğümlerin ağ yükünü ve gecikmeyi azlattığını göstermektedir. Bu yaklaşım IoT tabanlı çözümlerin önemli bir parçası olan enerji ve kullanılabilirlik endişelerini de ortadan kaldırır [15]. Azaria vd. çalışmalarında, MedRec isimli blokzincir tabanlı veri kayıt yönetim sistemi önermişlerdir. Hastaların, geniş çaplı ve değiştirilmesi mümkün olmayan sağlık bilgilerine sahip olması ve bu bilgilere diğer sağlık kuruluşlarından erişim sağlanabilmesi amaçlanmıştır. Madenci bilgisayarları Proof-of-Work (PoW) ile sistemin inanılrlığını sağlamıştır [16]. Watanabe vd. çalışmalarında, dijital haklar gibi sözleşmelerin idaresinin daha güvenli olması için yeni bir yöntem sunmuşlardır. Oluşturdukları yönteme Proof-of Stake (PoS) yöntemi ekleyerek melez bir blokzinciri sistemi ortaya çıkarmıştır [17].

Önümüzdeki yıllarda blokzincir tabanlı DNS ve blokzincir tabanlı internet kullanımı yaygınlaşacaktır. DNS Chain; özgür, güvenli ve dağıtık bir DNS çözümü olarak öne sürülmüştür [18]. Secure Chain, log kayıtlarının ve ağda kullanılan cihaz bilgilerinin saklanmasına yönelik bir yaklaşımdır. Barnas çalışmasında, yeni bir siber güvenlik yaklaşımına ihtiyaç duyulduğunu belirtmiş ve ülke ulusal güvenliği için blokzincir kullanımına dair önerilerde bulunmuştur [19]. Sengupta vd. çalışmalarında öncelikle saldırıları, güvenlik açığı nesnelere göre sınıflandırmış ve endüstriyel IoT uygulamaları üzerine bir vaka çalışması sunmuşlardır [20]. Giannoutakis vd. çalışmalarında akıllı ev kurulumlarının siber güvenlik mekanizmalarını desteklemek için

cihazların değişmezliğine odaklanan bir blokzincir sistemi oluşturmuşlardır. Önerilen metodoloji, akıllı ev ağ geçidi ve IoT cihazlarının bütünlüğünü sağlamak için uygun akıllı sözleşme desteğinin yanı sıra engellenen kötü amaçlı IP'lerin dinamik ve değişmez yönetimini de sağlamaktadır [21].

Blokzinciri IoT'ye entegre etmek için uygulanan teknik yaklaşımlar ve çözümler hakkında yapılan araştırmalarda güvenlik alanında eksikliklerin olduğu tespit edilmiştir [22-23]. Literatür araştırmasında görüldüğü üzere IoT sistemler, yapısı gereği yüksek seviye güvenlik gerektiren ağlardan oluşmaktadır. Özellikle veri güvenliğine yönelik gelişen sorunların kimlik doğrulama ve veri iletim aşamalarında olduğu tespit edilmiştir. Blokzincir teknolojisi ile bu sorunlar üzerine önerilen çözümler verilen literatür araştırmasında sunulmuştur. Özetlenen benzer çalışmalarda Ethereum kullanılarak kimlik doğrulama amaçlı çalışmalar yapılarak güvenli yönetim sistemi kontrolü sağlanmıştır. Bitcoin, Ethereum gibi mevcut teknikler kullanılarak uygulamalar yapıldığı izlenmiştir.

Bu çalışmada, akıllı bir ev sistemi için oluşturulan IoT tabanlı bir uygulamada kişisel verilerin ve mahremiyetin korunmasını sağlamak amacıyla verilerin iletileceği adresler seçilmiş ve sadece belirtilen adreslere verilerin gönderilmesi için blokzincir oluşturulmuştur. Ayrıca blokzincire aktarılan veriler çıkış ve varış noktasında karşılaştırılarak doğruluk testi yapılmıştır. IoT sistemde veri gizliliği, veri bütünlüğü, veri güvenliği geliştirilen yazılımda test edilerek kanıtlanmıştır. Ayrıca blokzincir teknolojisinin işleyişi, IoT mimarisi, blokzincir ve akıllı sözleşmeler ile IoT cihazlarından alınan verilerin güvenliği için kullanılan kimlik doğrulama, kimlik yönetimi, veri bütünlüğü yöntemi, yetkilendirme ve erişim denetimi, birlikte çalışabilirlik ve gizlilik yöntemleri üzerine çözümler incelenmiştir.

2. BLOKZİNCİR (BLOCKCHAIN)

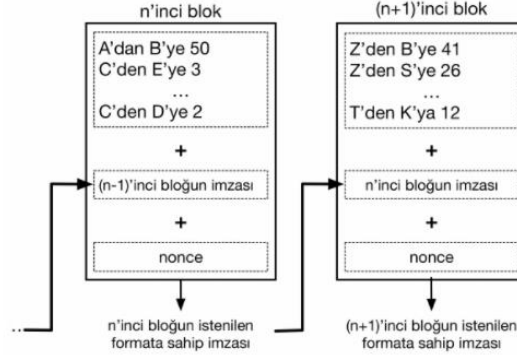
Veri, teknoloji endüstrisindeki tüm yeniliklerin merkezi olmuştur. Bu durum, çeşitli kuruluşları ve satıcıları, birbirine bağlılığın farklı hizmetlerle

iletişim kurmasına izin veren teknolojileri uygulamaya teşvik etmiştir. Bu gelişmeyi destekleyen ana teknolojilerden biri blokzincirdir. Blokzincir, merkezi bir otorite olmadan güvensiz bir ortamda anonimlik ve değişmezliği korurken, farklı müşteriler arasındaki iletişimi ademimerkezileştirmek için kullanılmıştır. Blokzincir geliştiricileri, farklı hizmet türleri ve çözümleri için blokzinciri önermektedir. Blokzincir yeteneklerini benimsemek için önerilen çözümlerden biri IoT paradigmasıdır [24].

2.1. Blokzincir Teknolojisi Yapısı ve Teknikleri (Blockchain Technology Structure and Techniques)

Blokzincir teknolojisi, sistem kullanıcılarının verilerini ve işlemlerini tutan bloklardan oluşur ve işlemler kriptografi ile güvence altına alınmaktadır. Blokzincir teknolojisinde bulunan düğümler (node) birbirlerine bağlantılıdır ve bu kayıtlar bloklar sayesinde kayıt altına alınmaktadır. Blokzincir kavramı ilk kez 1991 yılında ortaya çıkmış ve Bitcoin adlı elektronik para birimi kullanılarak işlem kayıtlarının bir kamu tarafından tutulduğu ilk blokzincir oluşturulmuştur [6].

Blokzincir temel itibarıyla bir veri tabanıdır. Veri tabanında bulunması gereken veriler bloklara sıralı bir şekilde kayıt edilmektedir. Blok büyüklüğü, bloğun veri bilgisi alanları (zaman damgası, başlık, şifre, versiyon numarası, ait olduğu protokol her bir kaydın parmak izi gibi), bilgilerin nasıl kayıt altına alınacağı, hangi veri alanlarını içereceği, bu alanların nasıl ve hangi düzende sıralanacağı, bloklar dolduğunda nasıl davranması gerektiği, bloklarların birbiri ile bağlantı özellikleri, yeni bloğun üretilme koşulları, blokzincirlerin merkezde nasıl dağılacağı, takip ve edileceği gibi konular her bir blokzincirin kendine ait özelliklerini ve kurallarını oluşturmaktadır. Şekil 1'de bir blokzincir örneği verilmiştir. Her blok bir bloktan oluşur ve bu blokta bir önceki bloğun özet bilgileri yer alır. Blok içinde oluşan ilk zincir bloğu Genesis Blok'tur. Bu başlangıç bloğa kendisinden bir önceki blok olmaması sebebiyle bir önceki blok hash değeri olan değere blok zincir üreticisi tarafından bir değer atanır. Bu değer ise genellikle 256 adet "0" dan oluşur.



Şekil 1. Blokzincir yapısı (Blockchain structure)

Zincire yeni bir blok geldiğinde yeni gelen bloğun girdilerinden bir tanesi önceki bloğun hash değeri olacaktır. Blokları birbirine eklemek için bir önceki bloğun hash değeri kullanıldığından, herhangi bir blokta meydana gelecek değişiklik, o bloğun hash değerini değiştirecektir. Bundan dolayı devamındaki her bloğun hash değeri değişeceği için eklenen bloğun kendisinden gelen tüm blokların hash değerlerinin değişmesine sebep olacaktır. Bu

durum ise mevcut zincirin orijinal zincir olmadığını ortaya çıkaracaktır.

Zincirdeki bir bloktan önce gelen bloğa ebeveyn blok (Parent Blok) adı verilmektedir. Her bloğun sadece bir tane ebeveyn bloğu olur. Fakat her ebeveyn bloğun birden fazla yavru (child) bloğu olabilmektedir. Bu durumda blokzincirde çatallanma (forking) olayı meydana gelmiştir.

Tablo 1. Blok yapısı (Block structure)

Alan Adı	Boyut	Açıklama
Sihirli Sayı	4 Byte	“Aşağıdaki bir bloktur” anlamında
Blok Boyutu	4 Byte	Blok büyüklüğünü gösterir
Blok başlığı	80 Byte	Farklı alanlardan oluşmaktadır
Kayıt sayacı	1-9 Byte	Kayıt (işlem) adedini gösterir
İşlem Kayıtlar	Değişken	Kayıt altına alınan işlemler ya da veriler

Blokzincirde bir bloğun genelde 5 alanı vardır. Tablo 1’de blokzinciri oluşturan bir bloğun alanları verilmiştir. Sihirli sayı her zaman 0xD9B4BEF9’dur. Bu alan blokzincir veri tabanında bir veri okunurken devamında gelecek olan bilgilerin de bir blok olduğunu belirler. Blok boyutu ise blok sonuna kadar ne kadar alan olduğunu ifade eder. Yani bu alan bloğun sonunu ifade eder.

Blok Versiyonu; doğrulama kurallarından hangilerinin uygulanacağını belirler. Bir blok oluşturulurken uyulması gereken kurallar; bloğun yapısı, uzunluğu, kayıtların şekli, alanlarının sırası (syntax, standart) önemlidir. Belirlenen bu kurallar zaman içerisinde değiştirilebilir.

Merkle Ağaç Kökü Özeti; blok içerisine kayıt edilen işlemler ikiye bölünür ve hash değerleri alınır. Bu şekilde hesaplamalar ikiye bölünür ve hesaplanıp en sonunda iki hash değeri kalır, onlar da hash yapılarak merkle ağacı kökü hesaplanmış olur. En son ulaşılan hash değeri merkle ağacı kökünü verir. Merkle ağacı kökü bloktaki tüm işlem kayıtlarının özeti olarak değerlendirilebilir. Bloklar

hakkında bir diğer önemli kısım ise, blok yüksekliğidir. Blokzincirin oluşturulduğu tarihten günümüze kadar blokzincire eklenmiş olan blokların sayısını belirler.

3. NESNELERİN İNTERNETİ (IoT) (INTERNET OF THINGS (IoT))

IoT sistemler kuruldukları ortamlardaki verileri alır, birbirleriyle ağ üzerinden iletişime geçer ve kullanım amaçlarına göre bilgi servisi oluştururlar. Toplanan tüm bilgilerin güvenliği ve mahremiyeti dijital alanda önemli bir problem olarak karşımıza çıkmaktadır. Sensörler ve aktüatörler gibi teknoloji entegrasyonunun daha az güvenli bileşenleri istismar edilmeye açıktır ve temel güvenlik parametrelerini sızdırabilmektedir. Bu nedenle saldırgan üst düzey düğümlere ulaşabilir ve bütün ağı ele geçirebilir. Kaynak kısıtlı uç cihazlar ve yüksek performanslı üst düzey düğümler için kriptografik yöntemler oluşturmak IoT için büyük önem arz etmektedir. IoT kullanıcıları, IoT uygulamasının maliyet optimizasyonunun ve fiziksel dağıtımının değişen özelliklere sahip bileşenlere bağlı olduğunu bilmelidir [26].

IoT ve geleneksel ağlar arasındaki en önemli farklardan bir tanesi, cihazlarda bulunan kaynak seviyeleridir. Sensor ve RFID düğümlerine sahip olan IoT cihazları kısıtlı kaynağa sahip gömülü cihazları barındırmaktadır. Sınırlı pil ömrü, düşük işlemci gücü ve düşük bellek yapısı IoT cihazlarının en belirgin özelliklerindedir. Geleneksel ağlar bunun tersine akıllı telefonlar, güçlü bellek ve işlemci gücüne sahip sunucular ve bilgisayarları kapsamaktadır. Bundan dolayı geleneksel ağlar, çok yüksek karmaşık ve güvenlik protokolleri ile güvence altına alınabilirken, IoT cihazlarının oluşturmuş olduğu ağların güvenliğinin artırılması için bellek, işlemci gücü, pil ömrü vb. gibi etkenler göz önünde bulundurulmalıdır [27-28].

4. IoT GÜVENLİĞİ İÇİN BLOKZİNCİR ÇÖZÜMLERİ (BLOCKCHAIN SOLUTIONS FOR IoT SECURITY)

Blokzincirin güçlü alt yapısı kullanılarak IoT'nin gizlilik ve bütünlük sorunları çözülebilir. Örneğin, heterojen IoT cihazları arasında veri güvenilirliğinin garantisi ve güvenli veri paylaşımının zorluğu, verilerin değişmezliğini garanti eden ortak blokzincir platformu ile sağlanabilir. Blokzincirin IoT güvenliğinde kullanılabilecek alanları:

Kimlik Doğrulama Yönetimi: IoT sistemleri farklı türlerde kısıtlı kaynakların birlikte çalıştığı karmaşık bir ağ sistemi olduğu için, IoT senaryolarında çok faktörlü kimlik doğrulama ve hafif kimlik doğrulama protokolleri çok elzem olmaktadır. Pek çok kimlik doğrulama yöntemlerinin mevcut olmasına rağmen çeşitli protokoller ve IoT cihazlarının sınırlı kaynakları kimlik doğrulamasını oldukça zorlaştırmaktadır. X.509 sertifikaları, Donanım Güvenlik Modülü (HSM), Güvenilir Platform Modülü (TPM) ve Simetrik Anahtarlar gibi bazı yaygın kimlik doğrulama yöntemleri kullanılabilir. Bunların yanı sıra her yöntemin kendi içerisinde avantajları mevcuttur ve doğru türde kimlik doğrulama mekanizmasını seçmek IoT cihazları arasında güvenilir iletişimin sürdürülmesi açısından oldukça önemlidir. Akıllı sözleşmeler (smart contracts), IoT cihazlarına merkezi olmayan kimlik doğrulama yetenekleri elde etmesini sağlar. Ayrıca akıllı sözleşmeler, geleneksel yetkilendirme protokolleriyle karşılaştırıldığında, sisteme bağlı olan IoT cihazlarına daha etkili bir yetkilendirme erişim kuralı sağlayabilir. Akıllı sözleşmeler kullanılarak, grup, makine ve kişilerin verilere erişim süresi, durumu ve koşulu belirlenerek verilerin gizliliği sağlanabilir [29-30].

Kimlik Yönetimi: Dijital ortamlardaki kimlik, normal geleneksel yöntemler üzerine işleyen kimlik yönetimleri ile benzer şekilde çalışmaktadır. Geleneksel yöntemler olarak, birleştirilmiş, merkezleştirilmiş ve yalıtılmış sistemler kimlik yönetimi olarak bilinmekte ve dijital kimlik yönetimi olarak kullanılmaktadır. Dijital kimlik, süreçleri olduğundan hızlı hale getirip aktörlerin sayısını azaltsa bile çoğu kimlik yönetim sistemleri kimlik verilerini merkezi bir sunucuda depolayarak bu sistemi birçok güvenlik saldırısına karşı savunmasız hale getirmektedir. Blokzincir güvenlik özellikleri, güvenli ve güvenilir bir kimlik yönetim sistemi oluşturulması için kullanışlıdır. Blokzincir geleneksel kimlik yönetim sistemlerinden gelen birçok sınırlamaları ortadan kaldırabilmektedir [31]. Blokzinciri tabanlı kimlik yönetim sistemleri, dijital kimliklerin doğrulanması için Merkezi olmayan tanımlayıcılar veya DID (Decentralized ID) adı verilen benzersiz bir tanımlayıcı kullanır. Bir DID çözülebilir, kriptografik olarak doğrulanabilir, merkezi olmayan, yeniden atanamaz bağımsız sağlayıcılar olmalıdır. Blokzincir yapıları sistemlerde, kimliği veren kişi, kimlik bilgilerine DID ekler ve bu DID blokzincirde saklanır. Blokzincir gerçek veri erişim kısıtlamaları olan herkese aynı bilgiyi sağlayarak kimlik doğrulayıcı görevi üstlenir. Bundan dolayı blokzincir tabanlı sistemlerde kimlik bilgilerinin doğrulanması, kimlik doğrulayıcının kimliği verenin güvenilirliğine ilişkin değerlendirmesine bağlıdır. Bazı popüler kimlik yönetim sistemleri Sovrin, ShoCard ve Uport kimlik yönetim sistemleridir. Bu protokoller otomatik bir şekilde çalışır ve açık kaynak kodludur [32].

Veri Bütünlüğü Yönetimi: Blokzincir tabanlı bir IoT sistemde işlem bloğunun farklı alanlarının birleştirilmesi ile oluşan şifreleme işlemi veri bütünlüğünü korumanın uygun bir yoludur [33]. Blokzincir ağına bağlı IoT cihazlarından alınan veriler tekil bir anahtara sahiptir ve bu veriler ağ aracılığı ile doğrulanmaktadır. Bu sayede iletilen verilerin bütünlüğü ve doğrulanması gerçekleştirilir. Bununla birlikte IoT cihazlarından aktarılan veriler dağıtılmış sisteme sahip olan blokzincirler tarafından kayıt altına alınır ve verilerin bütünlük ve güvenliği takip edilir.

Yetkilendirme ve Erişim Denetimi: Blokzincir, tüm sistem merkezi olmadığı ve ağdaki her düğüm veya üye başkaları tarafından doğrulandığı için varsayılan olarak kimlik doğrulama sağlar [34]. Yetkilendirme süreci, IoT ağında bulunan servis hizmetlerine erişimleri denetler. Cihazlar arasında güveni devam ettirmek oldukça gereklidir, bununla birlikte belirli hizmetleri belirli cihazlara atamak

oldukça zordur. IoT ağında geleneksel veri erişiminden farklı olarak veri iletişimi gerçek zamanlı olarak yürütülür. Sorguların yürütülme işi ve veri akışı IoT ağında gerçek zamanlı olarak gerçekleşir, bundan dolayı oldukça güçlü bir erişim mekanizması kullanılması gerekmektedir. Blokzincirin âdemimerkeziyetçi yapısı ve değişmez altyapısı kullanıcı ile Authorization Server arasında güvenilir bir veri iletişimi sağlar ve IoT cihazlarına merkezi olmayan kimlik doğrulama yeteneği kazandırır. Bununla birlikte erişim kontrol mekanizmaları politikalarını şeffaf ve değişmez bir hale gelir.

Birlikte Çalışabilirlik Yöntemi: Mevcut birlikte çalışabilirlik, ağ geçitleri ve ağ cihazlarına dayanmaktadır. Fakat bu ağ cihazlarının ve ağ geçitlerinin stabil şekilde çalışabilmeleri için sınırlı yetenekleri mevcuttur. Birlikte çalışabilirlik için henüz belirlenmiş bir standart yoktur ancak bu standartların oluşabilmesi için hizmet sağlayıcıların ve geliştiricilerin ortak çalışmaları bir zorunluluktur. Bir diğer sorun IoT cihazlarının üzerinde kullanılan güvenlik çözümlerinden kaynaklanmaktadır. Birlikte çalışabilirlik için blokzincir mekanizması etkin bir çözüm oluşturabilmektedir. Blokzincir mekanizması dağıtılmış ve otomatik bir şekilde çalışır. S2GHOST, Work (Co-PoW) ve Tornado otoritelerce tanımlanmış iç model olarak bilinmektedir.

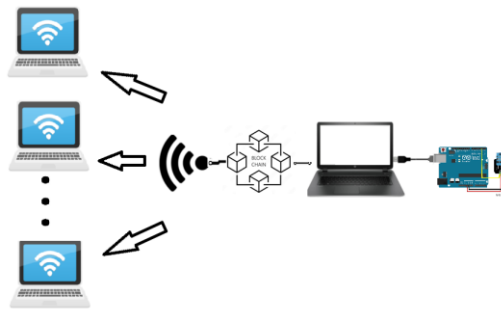
Gizlilik Yöntemi: Veri gizliliği, dijital platformlardaki en önemli sorunlardan birisidir. Gizlilik sorunu için, iletişim sisteminde çeşitli simetrik (AES, IDEA) ve asimetrik (ECC, RSA) anahtar şifreleme sistemleri ve tokenizasyon yaygın olarak kullanılmaktadır [35]. IoT cihazlarının kullanım alanlarından olan, akıllı araç sistemleri, akıllı sağlık sistemleri, akıllı evler vb. gibi sistemler üzerinden akan bilgilerin gizliliğinin korunması gerekmektedir. IoT cihazlarının mimari yapısı gizlilik risklerini artırmaktadır. Son zamanlarda yapılan araştırmalarda IoT cihazları için kriptografi kullanan bazı protokoller önerilmiştir ancak gizliliği

korumada bazı sınırlamaları ve zorlukları mevcuttur. Blokzincir verilerin şifrenmesini kullanarak IoT sistemlere potansiyel çözüm sunmaktadır. Tüm kullanıcılara açık olan blokzincir herkesin sistemde bulunan verilere erişmesine izin verirken, özel blokzincir, blokzincir ağ kullanıcılarını sınırlamak için ideal bir çözüm olarak düşünülebilir.

5. BLOKZİNCİR TEKNOLOJİSİ İLE IoT GÜVENLİĞİNİ SAĞLAYAN UYGULAMA (APPLICATION PROVIDING IoT SECURITY WITH BLOCKCHAIN)

Kişisel ve hassas veriler çeşitli casus yazılımlar veya servisler gibi yasal olmayan yöntemler ile ele geçirilmektedir. Nesnelerin İnterneti teknolojisinde ağın büyüklüğü, verilerin fazlalığı, IoT cihazlarının güvenilirlik düzeyinin düşük olması sebebi ile mevcut IoT sistemi iyileştirmek için farklı teknikler ve algoritmalar kullanılmaktadır [36]. IoT ağlar üzerinde verilerin güvenliğinin sağlanması için blokzincir teknolojisinin etkili çözümler sunduğu bilinmektedir.

Bu çalışmada akıllı ev sistemleri için bir IoT ağı tasarlanmıştır. IoT cihazlar üzerinden alınan ortamdaki veriler blokzincir kullanılarak ağda ki diğer cihazlara güvenli şekilde iletilmesini sağlayan bir uygulama gerçekleştirilmiştir. Sunucu bilgisayarın bulunduğu ortamdan DHT11 sensörü ile alınan nem ve sıcaklık verileri, oluşturulan blokzincir sistemine aktarılmıştır. Dağıtık bir yapıda olan blokzincir verileri (nem, sıcaklık) sunucu (server) bilgisayara bağlanan istemci (client) bilgisayarlara güvenli bir şekilde iletilmiştir. Blokzincir ile IoT cihazlarının güvenliğini sağlamak için geliştirilen bu çalışmada sunucu ile istemci arasında 8890 portu üzerinden iletişim kanalı oluşturulmuştur. İstemci bilgisayarlar bağlanma isteğini bu port üzerinden blokzincirin üretildiği sunucu bilgisayara gönderir ve sunucuya bağlanma istekleri, sunucu bilgisayarın istemci isteklerine izin vermesi koşulu ile gerçekleşir.



Şekil 2. IoT sistemlerin güvenliğini sağlayan uygulama tasarımı (Application design that ensures the security of IoT systems)

Şekil 2’de IoT sistemde veri güvenliğini sağlayan örnek tasarım verilmiştir. Blokzincir ile IoT cihazlarının güvenliğini sağlayan uygulama C# programlama dili ile gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan IoT sistemde arduino cihazı ve DHT11 nem ve sıcaklık sensörü kullanılmıştır. Nem ve sıcaklığı algılayacak şekilde programlanan arduino (IoT düğümü) ile veriler elde edilmiştir. Sunucu bilgisayara bağlanan arduino ortamın nem ve sıcaklık değerlerini alabilmektedir. Kullanılacak sistemlerin ihtiyaçlarına göre ağa dahil edilen cihazlar bluetooth ya da Wi-Fi teknolojileri ile desteklenebilir.

Blokzincir oluşturulma aşamasında her bir blok oluşumu için kullanılacak blok sınıfı tanımlanır. Bloklarda her bir bloğun index numarası,

oluşturulma zamanı, nem ve sıcaklık değerlerinin aktarılacağı veri alanı, bir önceki bloğun hash değeri ve kendi hash değeri tutulmaktadır. Her bir bloğun oluşturulacak hash değeri, SHA256 şifreleme algoritması sayesinde CalculateHash() fonksiyonu aracılığı ile TimpeStamp, PreviousHash ve Data alanları kullanılarak oluşturulmaktadır. Böylece çözülmesi ve oluşturulması neredeyse imkânsız olan bloğa ait bir biricik hash değeri üretilmektedir.

Blokların birbirleriyle ilişkili ve sıralı bir şekilde tutulacağı blokzincir ise, Blokzincir MainBlockchain = new Blockchain(); ile MainBlockchain olarak tanımlanmıştır. Blokzincir sınıfının içerisinde üretilen blokların ekleneceği kod parçası Şekil 3’te tanımlanmıştır.

```

1 public void AddBlok(Blok blok)
2 {
3     Blok latestBlok = GetLatestBlok();
4     blok.Index = latestBlok.Index + 1;
5     blok.PreviousHash = latestBlok.Hash;
6     blok.Hash = blok.CalculateHash();
7     Chain.Add(blok);
8 }

```

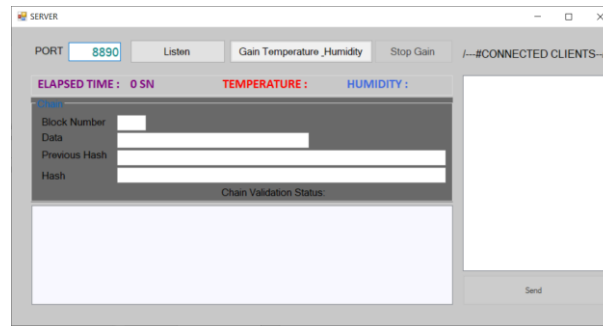
Şekil 3. Blokları zincire ekleyen kod parçası (Piece of code that adds blocks to the chain)

AddBlok(Blok blok) fonksiyonu her 3 saniyede bir IoT cihazı tarafından okunan ortamın nem ve sıcaklık değerlerinin bir blok olarak oluşturulmasından sonra MainBlockchain olarak tanımlanan blokzincire eklemekle görevlidir. Blok ekleme ve blokzincir doğrulamasının yapılacağı IsValid() fonksiyonu “Public Class Blokzincir” sınıfı içerisinde tanımlanmıştır.

Arduino cihazından alınan verilerin sisteme aktarılması readtime_Tick(object sender, EventArgs e) fonksiyonu aracılığı ile gerçekleştirilir. Bu sayede arduino cihazı her 3

saniyede bir ortamın nem ve sıcaklık değerini okur. Bu değer create_Blok() fonksiyonuna gönderilerek blok oluşturulur. Oluşan her bir bloğun hash değeri bir sonraki bloğun previousHash değeri olacak şekilde blokzincir sistemine kayıt edilir.

Şekil 4’te sunucu bilgisayar için tasarlanan arayüz verilmiştir. Arayüz üzerindeki Listen butonu aktif edildiğinde istemci bilgisayarlar sunucu bilgisayara bağlanabilir hale gelir. Bu durumda IoT düğüm üzerindeki nem ve sıcaklık verileri blokzincire aktarılmaya hazırdır.



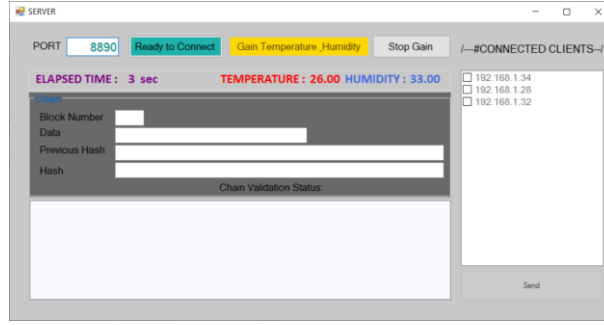
Şekil 4. Sunucu bilgisayarda kullanıcı arayüzü (User interface on server computer)

‘Gain Temperature_Humidity’ butonu aktif duruma getirildiğinde verileri alıp blokzincire aktarmaya

başlayacaktır. ‘Connected Clients’ alanı sisteme bağlanıp arduino cihazından alınan verilerin

aktarılabacağı istemci bilgisayarların IP (internet protocol) adreslerini göstermektedir. Sunucu'nun IP numarası 192.168.1.27 olarak tespit edilmiştir. Şekil 5'te IP adresleri 192.168.1.28, 192.168.1.32, 128.168.1.34 olan 3 istemcinin sunucuya bağlanmış

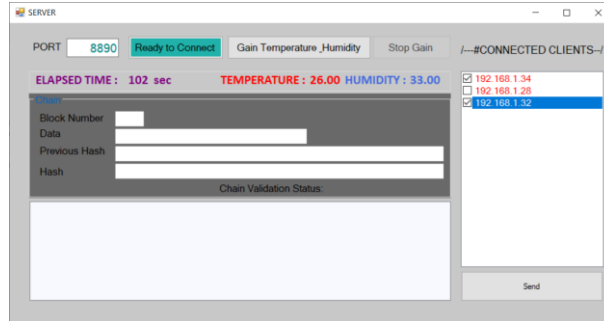
olduğu görülmektedir. 'Gain Temperature_Humidity' butonu aktif edilmiş ve sistemin bulunduğu ortamın nem ve sıcaklık değerleri her 3 saniyede bir okunarak blokzincire aktarılması başlamıştır.



Şekil 5. Sunucu bilgisayarda program başlatılması (Starting a program on the server computer)

'Gain Temperature_Humidity' butonu aktif hale getirilmesi ile nem ve sıcaklık değeri alma işlemi başlatılmakta ve ortamın nem ve sıcaklık değeri her 3 saniyede bir ekranda gösterilmektedir. Bu değerler aynı zamanda blokzincirde veri alanlarına aktarılan değerlerdir. Kullanıcının isteğine bağlı olarak 'Stop Gain' butonu ile ortamın nem ve sıcaklık değerlerini blokzincire aktarma işlemi durdurulabilir. Bu süreç içerisinde her 3 saniyede bir nem ve sıcaklık değerlerinden oluşan veriler blokzincir oluşumunda kullanılmaktadır.

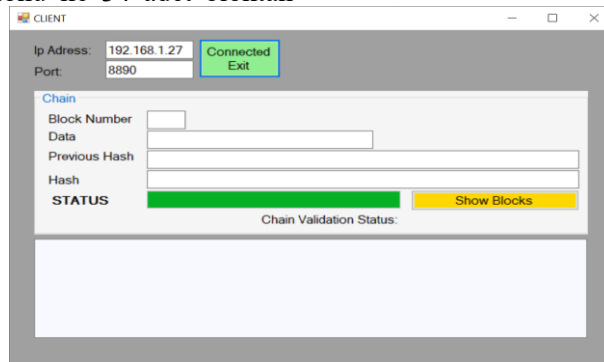
Şekil 6'da sistemde 102 saniye geçmiş ve 'Stop Gain' butonu ile 34 adet bloktan oluşan blokzincir oluşumu tamamlanmıştır. Bu aşamada sunucu'ya bağlanan istemcilere ait IP numaralarının renk durumu kırmızıya dönmesi ile sunucudan hangi istemciye blokzincir verilerinin aktarılacağı belirlenecektir. Şekil 6'da sunucu'ya bağlanan 192.168.1.32 ve 192.168.1.34 IP adresli istemcilere verilerin gönderileceği sunucu kullanıcısı tarafından seçilmiştir.



Şekil 6. Sunucu bilgisayarda veri okunmasının durdurulması (Stopping data reading on the server computer)

Sunucu bilgisayardan 192.168.1.28 IP adresli istemciye blokzincir verilerinin gönderilmeyeceği görülmektedir. 'Send' butonu ile 34 adet bloktan

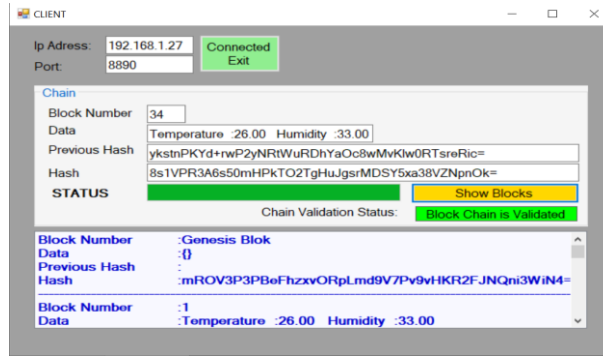
oluşan blokzincir verileri IP numaraları seçili istemcilere gönderilmiştir.



Şekil 7. İşlemci bilgisayarda veri alınmasının tamamlanması (Completing data retrieval on the processor computer)

Şekil 7’de sunucu’dan istemcilere verilerin gönderilme durumu ‘STATUS’ bardan anlık olarak takip edilebilmektedir. ‘STATUS’ barın tamamı yeşile döndüğü durumda artık blokzincirde bulunan nem ve sıcaklık verileri içeren blokların istemcilere gönderilme işlemi tamamlanmıştır. Şekil 8’de istemci bilgisayarda yer alan arayüz verilmiştir, programda bulunan ‘Show Bloks’ butonu ile blokzincirdeki bloklara ait veriler ekranda görülmektedir. Ayrıca tüm bloklar alt kısımda yer alan bilgi ekranından da takip edilebilir durumdadır. Blokzincirdeki blokların ekranda gösterilmesi ile blokzincirin doğrulanması yapılabilmektedir. Tüm

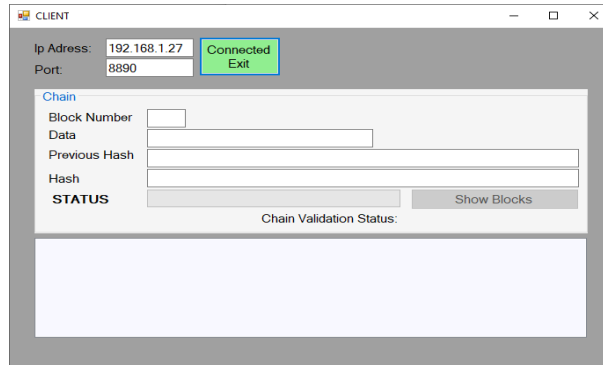
blokların, bir önceki ve bir sonraki bloklarının hash değerleri kontrol edilerek bloklar arasında herhangi bir kopma, veri kaybı veya kötü niyetli saldırıların tarafından herhangi bir blok eklenip eklenmediği kontrol edilir. Eğer blokzincirde bir veri kaybı söz konusu değilse veya blok ya da bloklar eklenmesi durumu yok ise verilerin güvenli ve doğru bir şekilde aktarıldığı anlaşılır. Bu durumda sistem ‘Blockchain is Validated’ bilgisini vermektedir. Bu aşamada IsValid() fonksiyonu kullanılmıştır. Bloklardaki verilerde ve zincirde bir bozulma olması durumunda sistem, istemci tarafında ‘Blockchain is not Validated’ uyarısı vermektedir.



Şekil 8. İşlemci bilgisayarda blokların doğrulama durumu (Validation status of blocks on the processor computer)

İstemci bilgisayar ekranında blok numaraları, data, previous hash ve bloğun kendi hash değerleri görülmektedir. Sunucu bilgisayar ile ağ bağlantı sonlandırılması ‘Connected Exit’ butonu ile yapılır.

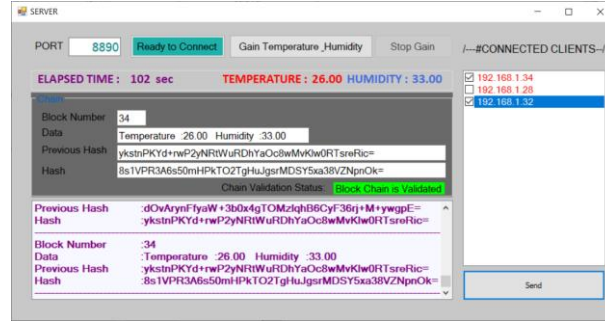
Şekil 9’da 192.168.1.28 IP numaralı istemci 192.168.1.27 IP numaralı sunucu tarafından seçilmediği için blokzincir verilerinin bu istemciye iletilmediği görülmektedir.



Şekil 9. İşlemci bilgisayarda veri alma durumu (Data retrieval status on the processor computer)

Şekil 10’da sunucu’da verilerin IP numaraları seçili istemci bilgisayarlara iletilmesi bilgisi verilmiştir. Gönderilen blokzincir blokları ve doğrulama

durumu ‘Chain Validation Status’ alanında görülmektedir.



Şekil 10. İşlemci bilgisayarda blokzincir verilerinin gösterimi (Display of blockchain data on the processor computer)

Şekil 10'da sunucu bilgisayar tarafından blokzincir ile iletilen veriler Şekil 8'de verilen istemci bilgisayar arayüzünde veri kayıpsız olarak iletilmiş görülmektedir.

Tasarlanan IoT sistemi üzerinde veri kayıplarını engellemek için blokzincir teknolojisi kullanılmıştır. Cihazlar arasında gönderilen veriler blokzincire aktararak değiştirilemez bir yapı oluşturulmuş ve veri güvenliği sağlanmıştır. Tasarlanan uygulamada iletilen verilerin alınan veriler ile testleri yapılarak veri bütünlüğü sağlandığı kanıtlanmıştır.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER (CONCLUSION AND SUGGESTIONS)

IoT sistemleri siber saldırı gibi güvenlik ve gizlilik sorunları ile karşılaşmaktadır. Bunun gibi güvenliği tehdit eden durumları engellemek amacıyla blokzincir teknolojisinin kritik bir önem taşıdığı görülmektedir. Bu çalışmada blokzincir teknolojisi ile IoT entegrasyonu yapılan bir akıllı ev sistemi örneği oluşturulmuştur. Tasarlanan IoT tabanlı sisteme veri gizliliği ve bütünlüğü için blokzincir dağıtık veri tabanı uygulanmış ve alınan sonuçlardan bir veri bütünlüğü saptandığı ve veri kayıplarının olmadığı gösterilmiştir. IoT veri haberleşmesinde kimlik doğrulama ve denetimi ve veri paylaşımı aşamalarında saldırılara karşı ortaya çıkabilecek olası veri kayıplarının önlenmesi için blokzincir teknolojisi ile bilgilerin depolandığı

evrensel bir defter oluşturularak güvenilir ve değişmez bir yapı oluşturulmuştur. Örnek uygulamada ortam nem ve sıcaklık değerleri her 3 saniyede bir alınarak blokzincirdeki bloklar oluşturulmuş ve veri alanlarına aktarılmıştır.

Geliştirilen sistemde verilerin kayıpsız olarak iletilmesi veri bütünlüğü testleri ile yapılmaktadır. Bu aşamada verilerin ilk olarak algılandığı IoT sensör verileri ile gönderilmek istenen noktada ki veri karşılaştırması yapılarak sistemin doğruluğu kanıtlanmıştır. İletilecek veri şifrelenerek, sadece yetkilendirilmiş kullanıcı tarafından ulaşılabilir ve yine kullanıcı tarafından açılabilir şekilde blokzincirde tutulmuştur. Özellikle yetkili kullanıcı seçilmesi sayesinde düğümlerin ağ yükü hafifletilmiştir. Veri iletişimindeki güvenliğin yanı sıra bir diğer önemli husus olan veri gizliliği verilerin blokzincirde kullanılan hash yöntemiyle saldırganların kaynakları ele geçirmesinin önüne geçilmiştir. Veri iletim aşamasında hem saldırılara karşı veriler korunmuş hem de verilerin iletildiği noktada testleri yapılarak veri bütünlüğü sağlanmıştır. Blokzincir teknolojisinin IoT sistemler için güvenli bir hizmet oluşturduğu kanıtlanmıştır. Sonuçlar dikkate alınarak yeni algoritmalar geliştirilebilir ve gelecekte blokzincir teknolojisi kullanılarak hızla büyüyen bir ağ olan IoT tabanlı cihazlar arasında güvenli veri aktarımı sağlanabilir.

ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazarları çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

The author of this article declares that the materials and methods they use in their work do not require ethical committee approval and/or legal-specific permission.

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

Gül Fatma TÜRKER: Deneyleri yapmış, sonuçlarını analiz etmiş ve makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

Kubilay TANYERİ: He conducted the experiments, analyzed the results and performed the writing process.

She/He conducted the experiments, analyzed the results and performed the writing process.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

There is no conflict of interest in this study.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Erkan, E., Fidan, Ş., & Oğraş, H. (t.y.). LoRa Modülasyon Tabanlı Saha Aydınlatma Sistemi Uygulaması. Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology, 203-216.
- [2] Weber, R. H. (2010). Internet of Things – New security and privacy challenges. *Computer Law & Security Review*, 26(1), 23-30. <https://doi.org/10.1016/j.clsr.2009.11.008>
- [3] Ashton, K. (2009). That ‘internet of things’ thing. *RFID journal*, 22(7), 4986,2009.
- [4] Gündüz, Muhammed Zekeriya, D. A. Ş. Resul. (2018). Nesnelerin interneti: Gelişimi, bileşenleri ve uygulama alanları, Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 24, 327-335.
- [5] Sicari, S., Rizzardi, A., Grieco, L. A., & Coen-Porisini, A. (2015). Security, privacy and trust in Internet of Things: The road ahead. *Computer Networks*, 76, 146-164. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2014.11.008>
- [6] Kumar, R., & Sharma, R. (2021). Leveraging blockchain for ensuring trust in IoT: A survey. *Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences*. <https://doi.org/10.1016/j.jksuci.2021.09.004>
- [7] Christidis, K. & Devetsikiotis. (2016). Blockchains and Smart Contracts for the Internet of Things. *IEEE Access*, 4, 2292-2303.
- [8] Pilkington, M. (2016). *Blockchain Technology: Principles and Applications*.
- [9] Biswas, K., & Muthukumarasamy, V. (2016). Securing Smart Cities Using Blockchain Technology. 2016 IEEE 18th International Conference on High Performance Computing and Communications; IEEE 14th International Conference on Smart City; IEEE 2nd International Conference on Data Science and Systems (HPCC/SmartCity/DSS), 1392-1393.
- [10] Leiding, B., Memarmoshrefi, P., & Hogrefe, D. (2016). Self-managed and blockchain-based vehicular ad-hoc networks (s. 140). <https://doi.org/10.1145/2968219.2971409>
- [11] Huang, Z., Su, X., Zhang, Y., Shi, C., Zhang, H., & Luyang, X. (2017). A decentralized solution for IoT data trusted exchange based-on blockchain (s. 1184). <https://doi.org/10.1109/CompComm.2017.8322729>
- [12] Cha, S.-C., Chen, J.-F., Su, C., & Yeh, K.-H. (2018). A Blockchain Connected Gateway for BLE-Based Devices in the Internet of Things. *IEEE Access*, 6, 24639-24649.
- [13] Pinno, O. J. A., Gregio, A. R. A., & De Bona, L. C. E. (2017). ControlChain: Blockchain as a Central Enabler for Access Control Authorizations in the IoT. *GLOBECOM 2017 - 2017 IEEE Global Communications Conference*, 1-6. <https://doi.org/10.1109/GLOCOM.2017.8254521>
- [14] Mendi, A. F. (2021). Blokzincir Uygulamaları ve Gelecek Öngörülleri. *GSI Journals Serie C: Advancements in Information Sciences and Technologies*, 4(1), 76-88.
- [15] Taylor, P. J., Dargahi, T., Dehghantanha, A., Parizi, R. M., & Choo, K.-K. R. (2020). A systematic literature review of blockchain cyber security. *Digital Communications and Networks*, 6(2), 147-156.
- [16] Azaria, A., Ekblaw, A., Vieira, T., & Lippman, A. (2016). MedRec: Using Blockchain for Medical Data Access and Permission Management. 2016 2nd International Conference on Open and Big Data (OBD), 25-30.
- [17] Watanabe, H., Fujimura, S., Nakadaira, A., Miyazaki, Y., Akutsu, A., & Kishigami, J. J. (2016). Blockchain contract: Securing a blockchain applied to smart contracts. 2016 IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE), 467-468.
- [18] Singh, S., & Singh, N. (2016). Blockchain: Future of financial and cyber security. 2016 2nd International Conference on Contemporary Computing and Informatics (IC3I), 463-46717.
- [19] Barnas, N. B. (2016). Blockchains in national defense: Trustworthy systems in a trustless world. Blue Horizons Fellowship, Air University, Maxwell Air Force Base, Alabama.
- [20] Sengupta, J., Ruj, S., & Bit, S. D. (2020). A Comprehensive Survey on Attacks, Security Issues and Blockchain Solutions for IoT and IIoT. *Journal of Network and Computer Applications*, 149, 102481. <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2019.10248191>
- [21] Giannoutakis, K. M., Spathoulas, G., Filelis-Papadopoulos, C. K., Collen, A., Anagnostopoulos, M., Votis, K., & Nijdam, N. A. (2020). A Blockchain Solution for Enhancing Cybersecurity Defence of IoT. 2020 IEEE International Conference on Blockchain (Blockchain), 490-495.

- <https://doi.org/10.1109/Blockchain50366.2020.00071>
- [22] Lo, S. K., Liu, Y., Chia, S. Y., Xu, X., Lu, Q., Zhu, L., & Ning, H. (2019). Analysis of blockchain solutions for IEEE Access, 7, 58822-58835.
- [23] [23] Alkhateeb, A., Catal, C., Kar, G., & Mishra, A. (2022). Hybrid blockchain platforms for the internet of things (IoT): A systematic literature review. Sensors, 22(4), 1304.
- [24] Ali, A., Almaiah, M. A., Hajjej, F., Pasha, M. F., Fang, O. H., Khan, R., Teo, J., & Zakarya, M. (2022). An Industrial IoT-Based Blockchain-Enabled Secure Searchable Encryption Approach for Healthcare Systems Using Neural Network. Sensors, 22(2), 572.
- [25] D. Lee Kuo Chuen, Handbook of digital currency: Bitcoin, innovation, financial instruments, and big data, Elsevier, 2015. (t.y.).
- [26] Attkan, A., & Ranga, V. (2022). Cyber-physical security for IoT networks: A comprehensive review on traditional, blockchain and artificial intelligence based key-security. Complex & Intelligent Systems, 1-33.
- [27] Jing, Q., Vasilakos, A. V., Wan, J., Lu, J., & Qiu, D. (2014). Security of the Internet of Things: Perspectives and challenges. Wireless Networks, 20(8), 2481-2501. <https://doi.org/10.1007/s11276-014-0761-7>
- [28] Beechamresearch. (son). (2016). "IoT Sector Map". <http://www.beechamresearch.com/article.aspx?id=4>
- [29] Abdelmaboud, A., Ahmed, A. I. A., Abaker, M., Eisa, T. A. E., Albasheer, H., Ghorashi, S. A., & Karim, F. K. (2022). Blockchain for IoT Applications: Taxonomy, Platforms, Recent Advances, Challenges and Future Research Directions. Electronics, 11(4), 630.
- [30] İrfan Kösesoy. (2019). Nesnelerin İnterneti Güvenliğinde Blok Zinciri Uygulamaları. Yıl 2019, Cilt 2, Sayı 1.
- [31] Rathee, T., & Singh, P. (2021). Secure data sharing using Merkle hash digest based blockchain identity management. Peer-to-Peer Networking and Applications, 14(6), 3851-3864. <https://doi.org/10.1007/s12083-021-01212-4>
- [32] Haddouti, & El, S. (2020). 3rd International Conference on Advanced Communication Technologies and Networking, CommNet 2020. 3rd Int. Conf. Adv. Commun. Technol. Networking, CommNet 2020 1-7.
- [33] A. Dorri, S. S. Kanhere, R. Jurdak, and P. Gauravaram, "Lsb: A lightweight scalable blockchain for iot security and privacy," arXiv preprint arXiv:1712.02969, 2017.
- [34] Roy, S., Ashaduzzaman, M., Hassan, M., & Chowdhury, A. R. (2018). Blockchain for IoT security and management: Current prospects, challenges and future directions. 2018 5th International Conference on Networking, Systems and Security (NSysS), 1-9.
- [35] S. Roy, A. R. Shovon, and M. Whaiduzzaman, "Combined approach of tokenization and mining to secure and optimize big data in cloud storage," in Humanitarian Technology Conference (R10-HTC), 2017 IEEE Region 10. IEEE, 2017, pp. 83-88.
- [36] Pattewar, G., Mahamuni, N., Nikam, H., Loka, O., & Patil, R. (2022). Management of IoT Devices Security Using Blockchain—A Review. Sentimental Analysis and Deep Learning, 735-743.

Yarı Denetimli Makine Öğrenmesi Yöntemini Kullanarak Müzik Türlerinin Tespiti

Alp Kaan TURAN^{1*} , Hüseyin POLAT¹ 

¹Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, 06500, Yenimahalle/ANKARA

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 30/08/2023
Düzeltilme: 11/10/2023
Kabul: 13/12/2023

Anahtar Kelimeler

Makine öğrenmesi
Yarı denetimli öğrenme
Kendi kendine öğrenme

Article Info

Research article
Received: 30/08/2023
Revision: 11/10/2023
Accepted: 13/12/2023

Keywords

Machine learning
Semi-supervised learning
Self-learning
Self-training

Grafik Özet (Graphical/Tabular Abstract)

Sınıflandırma işlemine ait akış şeması. / Flow chart of the classification process

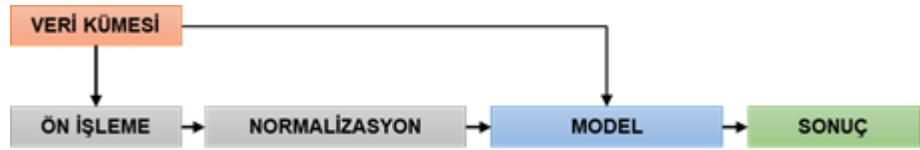


Figure A: Flow chart diagram / Şekil A: İş akış şeması

Önemli noktalar (Highlights)

- Yarı denetimli öğrenme ile sınıflandırma / Classification with semi-supervised learning
- Kendi kendine öğrenme yönteminin uygulanması / Implementation of the self-training method

Amaç (Aim): Kendi kendine öğrenme yönteminin sınıflandırma performansına etkisinin belirlenmesi. / Determining the effect of self-training method on classification performance.

Özgünlük (Originality): GTZAN müzik türleri veri kümesi üzerinde sekiz farklı sınıflandırıcı model için kendi kendine öğrenme yönteminin katkısı değerlendirilmiştir. / The contribution of the self-training method is evaluated for eight different classifier models on the GTZAN music genres dataset.

Bulgular (Results): Daraltılmış eğitim kümesi ile yapılan ölçümlerle karşılaştırıldığında kendi kendine öğrenme yöntemi, k-en yakın komşu sınıflandırıcı için 0,02-0,04 ve çok katmanlı yapay sinir ağı sınıflandırıcı için 0,05-0,09 doğruluk artışı sağlanmıştır. Bu iki sınıflandırıcı üzerinden, destekleyici yöntemlerin katkısı değerlendirilmiştir. Eklenen bir dengeleme filtresiyle kendi kendine öğrenme yönteminin doğruluk oranında yaklaşık 0,01 oranında ek bir artış sağlanmıştır. Diğer sınıflandırıcılarla yapılan deneylerde, kendi kendine öğrenmenin sınıflandırma performansını değiştirmedeği ya da düşürdüğü görülmüştür. / Compared to the measurements with the reduced training set, the self-learning method improved accuracy by 0.02-0.04 for the k-nearest neighbor classifier and 0.05-0.09 for the multilayer neural network classifier. On these two classifiers, the contribution of the supplementary methods was evaluated. With the addition of a stabilization filter, an additional increase of about 0.01 in the accuracy of the self-learning method was achieved. Experiments with other classifiers showed that self-learning did not change the classification performance or decreased.

Sonuç (Conclusion): Kullanılan veri kümesi ve uygulanan sınıflandırıcı türüne bağlı olarak, modelin kendi kendine eğitim yöntemi ile desteklenmesi sınıflandırma başarısına katkı sağlayabilmektedir. / Depending on the dataset used and the type of classifier applied, the self-training of the model can contribute to the classification success.



Yarı Denetimli Makine Öğrenmesi Yöntemini Kullanarak Müzik Türlerinin Tespiti

Alp Kaan TURAN^{1*} , Hüseyin POLAT¹

¹Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, 06500, Yenimahalle/ANKARA

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 30/08/2023
Düzeltilme: 11/10/2023
Kabul: 13/12/2023

Anahtar Kelimeler

Makine öğrenmesi
Yarı denetimli öğrenme
Kendi kendine öğrenme

Öz

Denetimli makine öğrenmesi yöntemleri ile başarılı sonuçlar elde etmek için yüksek miktarda etiketli veriye ihtiyaç duyulur. Etiketleme, zaman ve işgücü açısından maliyetli bir işlemdir. Etiketleme için gereken zaman ve işgücünü azaltmak için çeşitli yöntemlerden faydalanılır. Etiketli verinin etiketsiz veriyle birlikte kullanıldığı yarı denetimli öğrenme de bu yöntemlerden biridir. Bu çalışmada, GTZAN veri kümesindeki müzik türlerinin tespitinde bir yarı-denetimli öğrenme yöntemi olan kendi kendine öğrenmenin katkısı değerlendirilmiştir. Müzik türlerini tespit etmek için kendi kendine öğrenme yöntemi sırasıyla Naive Bayes, K-En Yakın Komşu, Karar Ağacı, Destek Vektör Makinesi, Lojistik Regresyon, Çok Katmanlı Yapay Sinir Ağı, XGBoost ve Rastgele Orman sınıflandırıcılara uygulanmıştır. Çalışmada kullanılan veri kümesi, dört farklı oranda (%4, %8, %16, %32) etiketli veri, %10 test verisi ve kalan kısmı etiketsiz veri olacak şekilde ayrılmıştır. Her bir oran için daraltılmış etiketli, etiketsiz kümeye sözde etiket atayarak ve test dışındaki bölüm tamamen etiketli olacak şekilde üç farklı eğitim kümesi oluşturulmuştur. Bu kümeler ile makine öğrenmesi modelleri eğitilmiş ve daha önceden ayrılmış test verisi ile model performansları sınanmıştır. Çalışmada, kendi kendine öğrenme yönteminin etkisi doğruluk ve F1-Skor ölçütleri yönünden değerlendirilmiştir. Daraltılmış eğitim kümesi ile yapılan ölçümlerle karşılaştırıldığında, kendi kendine öğrenme yöntemi, k-en yakın komşu sınıflandırıcı için 0,02-0,04 ve çok katmanlı yapay sinir ağı sınıflandırıcı için 0,05-0,09 doğruluk artışı sağlanmıştır. Bu iki sınıflandırıcı üzerinden, destekleyici yöntemlerin katkısı değerlendirilmiştir. Eklenen bir dengeleme filtresiyle kendi kendine öğrenme yönteminin doğruluk oranında yaklaşık 0,01 oranında ek bir artış sağlanmıştır. Diğer sınıflandırıcılarla yapılan deneylerde, kendi kendine öğrenmenin sınıflandırma performansını değiştirmediği ya da düşürdüğü görülmüştür.

Music Genre Detection Using Semi-Supervised Machine Learning

Article Info

Research article
Received: 30/08/2023
Revision: 11/10/2023
Accepted: 13/12/2023

Keywords

Machine learning
Semi-supervised learning
Self-learning
Self-training

Abstract

Supervised machine learning methods require large amounts of labeled data to achieve successful results. Labeling is a costly process in terms of time and labor. Various methods are used to reduce the time and labor required for labeling. Semi-supervised learning, where labeled data is used together with unlabeled data, is one of these methods. In this study, we evaluate the contribution of self-learning, a semi-supervised learning method, in the detection of music genres in the GTZAN dataset. The self-learning method was applied to Naive Bayes, K-Nearest Neighbor, Decision Tree, Support Vector Machine, Logistic Regression, Multilayer Neural Network, XGBoost and Random Forest classifiers respectively. The dataset used in the study was divided into four different proportions (4%, 8%, 16%, 32%) of labeled data, 10% test data and the remainder unlabeled data. For each proportion, three different training sets were created: narrowed labeled, by assigning pseudo-labels to the unlabeled set, and with the non-test portion fully labeled. Machine learning models were trained with these sets and the model performances were tested with the pre-separated test data. In the study, the effect of the self-learning method was evaluated in terms of accuracy and F1-Score. Compared to the measurements with the reduced training set, the self-learning method improved accuracy by 0.02-0.04 for the k-nearest neighbor classifier and 0.05-0.09 for the multilayer neural network classifier. On these two classifiers, the contribution of the supplementary methods was evaluated. With the addition of a stabilization filter, an additional increase of about 0.01 in the accuracy of the self-learning method was achieved. Experiments with other classifiers showed that self-learning did not change the classification performance or decreased.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Yapay zekanın bir dalı olan makine öğrenmesi, el alınan veriyi en iyi şekilde genelleyen modelleri ortaya çıkarmak için kullanılan yöntemleri içerir. Makine öğrenmesi yöntemleriyle, bilinen veri örnekleri eğitilen modelle, örnekler arasındaki ilişkinin ortaya çıkarılması ya da yeni girdilere ait sonuçların tahmin edilmesi amaçlanır. Makine öğrenmesi, denetimli öğrenme (*supervised learning*) ve denetimsiz öğrenme (*unsupervised learning*) olarak adlandırılan iki temel kategoriye sahiptir. Denetimli öğrenme için kullanılan veri kümesinde, her bir örnek için n adet girdi özneliği ($x_1, x_2, x_3 \dots x_n$) ve genellikle bir hedef özneliği (y) bulunur. Bu tür veri kümeleri, içerdiği örnekler etiket olarak da adlandırılan hedef özneliğine sahip olması nedeniyle “etiketli veri kümesi” olarak adlandırılır. Eğitim veri kümesi ile eğitilen model kullanılarak yeni girdi örnekleri için hedef özneliğinin değeri tahmin edilmeye çalışılır. Bu kategorideki yöntemler genellikle regresyon ve sınıflandırma işlemlerinde kullanılır.

Denetimsiz öğrenme yönteminde kullanılan veri kümesindeyse sadece n adet girdi özneliği ($x_1, x_2, x_3 \dots x_n$) bulunur ve hedef özneliği bulunmaz. Bu sebeple, denetimsiz öğrenmede kullanılan veri kümesi “etiketsiz veri kümesi” olarak adlandırılır. Denetimsiz öğrenmede, veri örnekleri benzerliklerine göre kümeleme işlemine tabi tutulur.

Denetimli ve denetimsiz öğrenme kategorileri dışında, yarı denetimli öğrenme (YDÖ, *semi-supervised learning*) olarak adlandırılan başka bir kategori de bulunur. YDÖ, kavramsal olarak denetimli ve denetimsiz öğrenme arasında konumlanır. YDÖ üzerine yapılan çalışmalarda genellikle sınıflandırmaya odaklanılmıştır. Performansı arttırmak için, sınırlı miktarda etiketli veri ile birlikte etiketlenmemiş veriden de yararlanılmaya çalışılır [1].

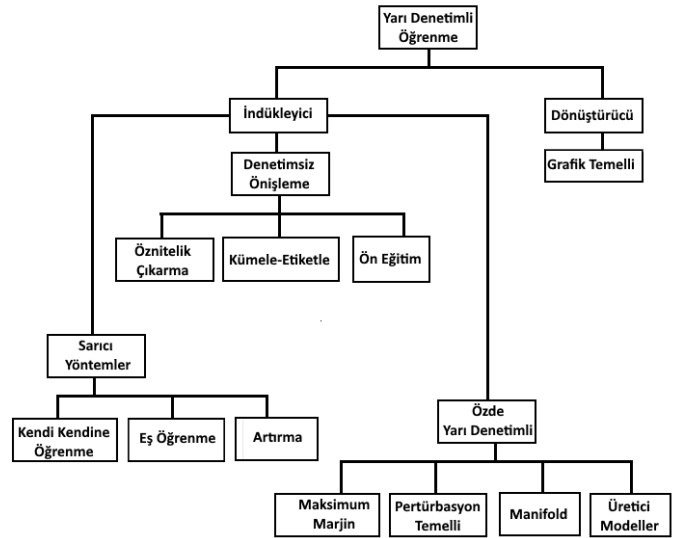
YDÖ, etiketlenmiş verinin sınırlı olduğu durumlarda performanslı bir sınıflandırma yapabilmek için kullanılan etkili bir stratejidir [2]. YDÖ’de, model etiketli ve etiketsiz veri birlikte kullanılarak eğitilir ve yeni veri örnekleri için hedef özneliğinin değeri tahmin edilir [3].

Sınıflandırma bağlamında YDÖ’deki temel varsayım, aynı yüksek yoğunluk bölgesinde bulunan iki veri örneğinin büyük olasılıkla aynı sınıf etiketine sahip olması gerektiğidir. Bu kabul, düzgünlük varsayımı (*smoothness assumption*) olarak adlandırılır [4]. Düzgünlük varsayımına göre veri kümesindeki iki veri örneğinin girdi

öznelikleri (x, x') birbirine yakınsa, bu örneklere ait hedef özneliklerinin sınıf etiketleri de (y, y') aynı olmalıdır. Düzgünlük varsayımı, aynı zamanda geçişli olarak da uygulanabilir. X_1 , sınıf etiketine sahip bir veri örneği olsun. Ayrıca sınıf etiketine sahip olmayan X_2 ve X_3 veri örnekleri mevcut olsun. Veri örnekleri uzayında X_2 veri örneği, X_1 veri örneğine ve X_3 veri örneği, X_2 veri örneğine yakınsa, geçişli yayılımdan dolayı, X_1 ’e yakın olmasa bile X_3, X_1 veri örneği ile aynı sınıf etiketine sahip olacaktır [2].

YDÖ’de indükleyici (*inductive*) ve dönüştürücü (*transductive*) olmak üzere iki ana yöntem grubu mevcuttur [5]. İndükleyici yöntemlerle, etiketli veri yardımıyla etiketsiz veriye sözde etiket (*pseudo label*) atanır. Dönüştürücü yöntemlerle, etiketli ve etiketsiz veri birlikte kullanılarak graf tabanlı bir model oluşturulur [3]. YDÖ yöntemleri Şekil 1’deki gibi sınıflandırılır.

İndükleyici yöntemler kendi içinde, denetimsiz ön işleme (*unsupervised preprocessing*), özde yarı denetimli (*intrinsically semi-supervised*) ve sarıcı (*wrapper*) yöntemler olarak üçe ayrılabilir. Denetimsiz ön işleme (*unsupervised preprocessing*) yöntem grubu öznelik çıkarma (*feature extraction*), kümele-etiketle (*cluster-then-label*), ön eğitim (*pre-training*) gibi yöntemleri kapsar. Bu yöntemlerde, sözde etiket atanan örnekler eğitim aşamasında kullanılmaz; etiketli veri kullanılarak etiketsiz veri kümeleme işlemine tabi tutulur. Bu işlemden sonra oluşan kümelere ve dolayısıyla içerdikleri veri örneklerine sınıf etiketi atanarak model oluşturulur [6].



Şekil 1. YDÖ yöntemlerinin sınıflandırılması
(Classification of semi-supervised learning methods) [1]

Maksimum-marj (*maximum-margin*), manifold (*manifolds*), pertürbasyon temelli (*perturbation-based*), üretici modeller (*generative models*) gibi teknikleri içeren özde yarı denetimli (*intrinsically semi-supervised*) yöntemler, sınıflandırıcının amaç ya da iyileştirme fonksiyonunun etiketsiz veriyi de içerecek şekilde genişletilmesine dayanır [7]. Özde yarı denetimli yöntemlere örnek olarak, etiketsiz veriyi de kapsayacak şekilde aralığın maksimize edildiği yarı denetimli destek vektör makinesi (*semi-supervised support vector machines-S3VM*) verilebilir [8].

Sarıcı yöntemler, en eski ve iyi bilinen YDÖ yöntemlerindedir [9]. Sarıcı yöntemler kendi arasında kendi kendine öğrenme (KKÖ, *self-learning*), eş öğrenme (*co-training*) [10] ve artırma (*boosting*) olarak üçe ayrılır. Bu yöntemlerde ana ilke, etiketli veri kullanarak eğitilen sınıflandırıcı yardımıyla etiketsiz veri örneklerine sözde etiket (sınıf etiketi) atanmasıdır. Etiket atanacak örnek kalmayınca kadar, eğitim ve sözde etiket atama süreci döngüler halinde tekrarlanır. Eş öğrenmenin KKÖ'den farkı, birden fazla modelin kullanılması ve bu modellere ait sözde etiket atanmış örneklerin diğer modelin eğitim kümesine eklenmesidir [11], [12]. KKÖ yöntemi, en temel sözde etiket verme yaklaşımıdır [6].

Bu çalışmada, KKÖ'nün çeşitli sınıflandırıcılara olan etkisi GTZAN ses veri kümesi [13] üzerinde değerlendirilmiştir. Literatürdeki diğer çalışmalardan farklı olarak, KKÖ'nün etkisi, herhangi bir ek yöntemle desteklenmeden sekiz farklı sınıflandırıcı model üzerinde test edilmiştir. Daha sonra, KKÖ ek bir seçim yöntemi ile güçlendirilerek en başarılı iki sınıflandırıcı üzerinde testler yürütülmüş, sonuçlar paylaşılmıştır. Bu sayede elde edilen deneysel sonuçlarla KKÖ'nün yalın ve destekleyici bir yöntemle kullanımının etkisi, olumlu ve olumsuz yönleriyle birlikte ortaya koyulmuştur.

KKÖ yöntemi, literatürde *kendi kendine eğitim* (*self-training*), *kendi kendine etiketleme* (*self-labeling*), *karar yönelimli öğrenme* (*decision-directed learning*) gibi kavramlarla yer bulmuştur [2]. KKÖ yöntemi, bir sınıflandırıcı tarafından belirli bir eşik değerinin üstündeki olasılıklar için etiketsiz veri örneklerine sözde etiket atanması prensibine dayanır. Böylece, etiketlenmiş veri örnekleri ile birlikte sözde etiket verilmiş veri örneklerinin bir arada kullanılması, aynı sınıfa ait bölgelerin daha etkili bir şekilde belirlenmesini sağlar [4]. KKÖ yönteminde, genellikle aşağıdaki adımlar izlenir:

- 1) Etiketli veriler kullanılarak bir sınıflandırıcı eğitilir.
- 2) Eğitilmiş modelle etiketlenmemiş veri örneklerine sözde etiket atanır.
- 3) Etiketli ve sözde etiket atanmış veri örnekleri birlikte kullanılarak sınıflandırıcı yeniden eğitilir.
- 4) Etiket atanabilecek etiketsiz veri kalmayınca ya da etiketsiz verinin tümü etiketleninceye kadar 2. ve 3. adımları tekrarlanır.

KKÖ yönteminin işleyişi, Algoritma 1'de gösterilmiştir. Etiketli verilerin bulunduğu veri kümesi X_L , etiketsiz verilerin olduğu veri kümesi X_U ve başlangıç durumunda boş olan sözde etiket atanmış veri kümesi X_{se} ile temsil edilir. İlk durumda, X_L kümesindeki etiketli veri ile model eğitilir. Eğitilen model kullanılarak, X_U kümesinde yer alan, belirli bir eşik değerinin üstünde sınıflandırma doğruluğuna sahip veri örneklerine sözde etiket atanır. Bu veri örnekleri X_{se} kümesine taşınır ve X_U kümesinden çıkarılır. Sonraki aşamada döngüsel olarak X_L ve X_{se} kümelerinin birleşimi ($X_L \cup X_{se}$) kullanılarak mevcut model tekrar eğitilir. X_U kümesindeki kalan veri örneklerine aynı kabuller doğrultusunda sözde etiket atanır. Sözde etiket atanmış veri örnekleri X_{se} kümesine taşınır, aynı zamanda ilgili veri örnekleri X_U kümesinden de çıkarılmış olur. Bu işlem X_U kümesi boşalana ve X_{se} kümesine eklenen yeni veri örneği kalmayınca kadar devam eder.

Algoritma 1. KKÖ algoritması (Self-learning algorithm) [14]

Girdi: $X_L =$ etiketli veri kümesi
 $X_U =$ etiketsiz veri kümesi
 $X_{se} = \{\}$ sözde etiket atanmış veri kümesi, başta boş

döngü = 0

tekrarla:
 $X_L \cup X_{se}$ ile sınıflandırıcıyı eğit
 X_U 'da marj içinde kalan veriye sözde etiket ver
Sözde etiket verilen örnekleri:
 X_U kümesinden çıkar,
 X_{se} kümesine ekle

döngü ++, döngü sayısını artır.
 $X_U = \{\}$ etiketsiz veri kümesi boşsa ya da döngüde sözde etiket verilen örnek yoksa çık
değilse tekrarla

Buradaki kritik noktalardan biri, her döngü sırasında sözde etiket verilecek alt kümenin nasıl tespit edileceği konusudur. KKÖ modeli, her döngüde belirli bir etiketsiz veri alt kümesini seçmelidir. Aksi takdirde, tüm etiketsiz veri örneklerine ilk döngüde etiket atanır. Bu da, modelin, sözde etiket atama işlemi için, etiketli veri ile yapılan sınıflandırmayla aynı performansa sahip

olmasına yol açar [15]. Bu noktada, her bir sınıf için güvenilir eşik değerlerinin belirlenmesi gerekmektedir. İkili sınıflandırmada, sözde etiket atama işleminde hedef değer seçimi Eşitlik 1'e göre gerçekleştirilir.

$$\tilde{y} = \begin{cases} +1, & \text{if } f(x, +1) \geq \theta, \\ -1, & \text{if } f(x, -1) \geq \theta, \end{cases} \quad (1)$$

\tilde{y} : atanacak sınıf etiketi (sözde etiket), θ : eşik değeri,

x : girdi öznelikleri, $f(x, n)$: sınıflandırıcının ürettiği olasılık değeri

Eşik değer (θ), yanlış etiketleme ihtimalini azaltacak şekilde yüksek belirlenmelidir. Öte yandan, çok yüksek bir eşik değeri belirlenmesi halinde her döngüde sözde etiketleme işlemi için ayrılan etiketsiz alt veri kümesi küçülecektir. Bu durumda, sözde etiket atanan veri örneği sayısı azalacaktır. İkili sınıflandırmada, en uygun eşik değerini belirlemek için kullanılan yöntemlerden biri, tahmin edilen pozitif ve negatif sınıfların olasılık değerlerinin ortalamasının alınmasıdır [16].

İkili sınıflandırma dışında, çoklu sınıflandırma için de, uygun eşik değerinin belirlenmesi konusunda çeşitli çalışmalar mevcuttur. Bunlardan biri Lee ve diğerlerinin çalışmasıdır [17]. Çalışmada, çoklu sınıflandırma için uygun eşik değeri yapay sinir ağı modeli kullanılarak belirlenir. Tür ve diğerlerinin çalışmasının [16] çok sınıflı veri kümelerine uygulandığı başka bir çalışmada [18] eşik değer seçilmeden sözde etiket atama işlemi yürütülür. En güvenilir etiketsiz veri oranına (p) başta 0,20 değeri atanır ve maksimum 0,50 oluncaya kadar her döngüde bu oran 0,05 artırılır. Cascante-Bonilla ve diğerleri tarafından yapılan çalışmada [19], sözde etiket atama için *müfredat öğrenmesi (curriculum learning)* modeli önerilmiştir. Müfredat öğrenmesi, çıkarım yapılması kolay veriden zora doğru modelin eğitilmesi esasına dayanır. İlgili çalışmada etiketsiz verilerin tümü etiketlenene kadar döngüler halinde işlem tekrarlanır. Karşılaştırma için 1 ile 0 arasında 0,2'lik adımlarla azalan yüzdelik skor eşik değeri kullanılır. Her döngüde azalan eşik değerinin üzerinde skora sahip etiketsiz veri örneklerine sözde etiket atanır, veri örneği eğitim kümesine eklenir ve model yeniden eğitilir [19]. Bunların dışında, Rastgele Orman ve Adaboost gibi çoğunluk oyu sınıflandırıcılarda, sözde etiketleme işleminde eşik değeri seçimi otomatik olarak yapılır [2].

Eş öğrenme başka bir KKÖ yaklaşımıdır. KKÖ'den farkı, birlikte çalışan en az iki model içermesidir. Eş öğrenme yaklaşımlarından biri *Noisy student* [11] yöntemidir. Bu yöntemde, bir öğretmen bir de öğrenci modeli bulunur. Öğretmen model doğru

etiketlenmiş veri ile eğitilir ve bu model öğrenci modeli eğitmekte kullanılır. Öğrenci sınıflandırıcı etiketsiz veri üzerinde tahminleme yapar ve sonucu öğretmen sınıflandırıcıya geri besler. Başka bir eş öğrenme yöntemi olan *FixMatch* [20] algoritmasında, iki modelden biri doğru etiketli, diğeri gürültü eklenmiş veri ile eğitilir. Doğru etiketli veri ile eğitilen model, gürültü eklenmiş veri ile eğitilen modeli düzeltmek için kullanılır. Entropi kaybı üzerinden veri kümesinin olasılık dağılımı hesaplanarak karşılaştırma yapılır.

Konuyla ilgili çalışmalar kapsamında, *Yılmaz* ve diğerlerinin çalışmasında [21] GTZAN veri kümesi üzerinde *Naive Bayes*, *K-En Yakın Komşu*, *Rastgele Orman*, *Destek Vektör Makinesi*, *Lojistik Regresyon* ve *XGBoost* sınıflandırıcıları kullanılmış; *K-En Yakın Komşu* ve *XGBoost* ile sırasıyla %91,59 ve %91,79 doğruluk oranı elde edilmiştir. *Sigtia* ve *Dixon* tarafından yapılan başka bir çalışmada [22], GTZAN veri kümesi üzerinde derin öğrenme kullanarak yapılan sınıflandırmada %83 doğruluk elde edilmiştir.

Kiranoğlu ve diğerlerinin çalışmasında [23] suç oluşum tahmininde KKÖ'nün katkısını değerlendirilmiştir. Bu kapsamda 2019 yılında İngiltere'de işlenen suçlar veri kümesi üzerinde *Naive Bayes*, *K-En Yakın Komşu*, *Karar Ağacı*, *Destek Vektör Makinesi* sınıflandırıcılar kullanılarak deneysel çalışma yürütülmüştür. *Triguero* ve diğerleri tarafından yapılan başka bir çalışmada [24] KKÖ yönteminin etkisi ölçülmüştür. 60 veri kümesi üzerinden gürültü filtreleme teknikleri ile desteklenmiş KKÖ yönteminin etkililiği değerlendirilmiştir.

Wang ve diğerlerinin çalışmasında [25] çeşitli görüntü ve ses veri kümeleri üzerinde π -*Model*, *Pseudo-Labeling*, *Mean Teacher*, *VAT*, *UDA*, *FixMatch* [20], *Dash*, *CoMatch*, *CRMatch*, *FlexMatch* [26], *AdaMatch*, *SimMatch* YDÖ yöntemlerinin sınıflandırma başarıları ve hata oranları karşılaştırılmıştır.

Zoph ve diğerleri tarafından yapılan çalışmada [27], görüntü veri kümeleri üzerinde veri artırımı, kısıtlı veri ile ön eğitim ve KKÖ yöntemlerinin sınıflandırma başarısına etkileri değerlendirilmiştir.

Li ve *Zhou'nun* çalışmasında [28], KKÖ yöntemi, SETRED adı verilen grafik tabanlı dağılım filtresi algoritmasıyla desteklenmiştir. Çalışmada, yaygın kullanılan on adet veri kümesi üzerinde deneysel çalışmalar yürütülmüştür. Çalışma sonucunda, KKÖ yöntemi tek başına veri kümelerinin sadece altısında model performansı artırdığı, dördünde düşürdüğü görülmüştür. Diğer taraftan, SETRED

ile desteklenen KKÖ yöntemi kullanıldığında, veri kümelerinin sekizinde sınıflandırma performansında artış olurken ikisinde düşmüştür.

Zou ve diğerleri [29] KKÖ'de gürültü kaynaklı yanlış etiket atama problemiyle başa çıkmak, atama işleminin güvenilirliğini artırmak için *CRST* (*confidence regularized self-training*) yöntemini önermişlerdir. Etiket ve model düzenleme içeren yöntem, görüntü sınıflandırmada doğruluk oranı artışı sağlamıştır. Sohn ve diğerleri tarafından yapılan çalışmada [20], KKÖ, modelin genelleme yeteneğini artırmak için entropi tabanlı dengeleme teknikleriyle desteklenmiştir. Çalışmada, *FixMatch* adı verilen algoritma CIFAR-10 [30] görüntü veri kümesine uygulanmıştır. Sadece 250 etiketli veri örneği kullanılarak %94,93 doğruluk oranı elde edilmiştir. Bir başka çalışmada [26], *Fixmatch* algoritmasının türevi olan *FlexMatch* algoritması önerilmiştir. *FlexMatch* algoritmasında, esnek etiketlemeyi sağlayan ve Müfredat Sözcük Etiketleme (*Curriculum Pseudo Labeling*) adı verilen yöntem kullanılmıştır. Bu algoritmanın eğitim süresi *Fixmatch* algoritmasının beşte biri kadardır. Ayrıca, çok az miktarda eğitim verisiyle *Fixmatch*'e göre daha başarılı sonuçlar elde edilmesini sağlamıştır. Yakın zamanda yapılan bir diğer çalışmada [31], *Fixmatch* algoritmasının bir başka türevi *DeFixmatch* algoritması önerilmiştir. Yapılan deneylerde daha yüksek doğruluk oranı elde edilmiştir. Ancak, bu algoritmanın hesaplama yükü ve zaman maliyeti *Fixmatch*'e göre daha yüksektir.

Literatür taraması sonucunda, etiketli verinin yetersiz olduğu durumlarda, KKÖ'nün performans artırıcı yardımcı bir yöntem olarak başarılı uygulamalarının olduğu görülmüştür.

2. MATERYAL VE METOD (MATERIAL AND METHODS)

Tzanetakis ve diğerleri tarafından hazırlanan GTZAN müzik türü veri kümesi [13], 10 farklı türde (*blues, classic, country, disco, hip hop, jazz, metal, pop, reggae, rock*), her tür için 1000 adet olmak üzere toplam 10000 dosyadan oluşur. Her bir dosya, 22050 Hz örnekleme frekansında 16 bit .au formatında kaydedilmiş üçer saniyelik ses verisi içerir. Bu çalışmada, GTZAN veri kümesi tekrar ön işleme tabi tutulmamıştır. *Olteanu* tarafından yapılan çalışmada [32] elde edilen ve 60 öznelikten oluşan veri kümesi kullanılmıştır. Veri kümesindeki öznelikler Tablo 1'de gösterilmektedir.

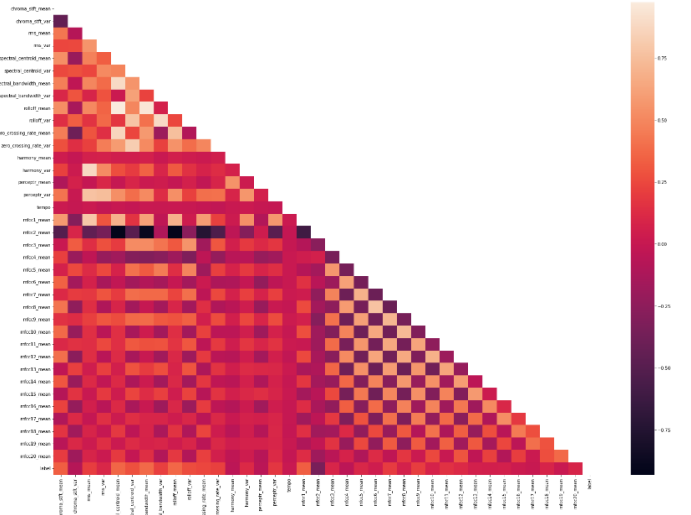
Tablo 1. GTZAN veri kümesine ait öznelikler (Features in GTZAN dataset)

ÖZNETELİK ADI	MİKTAR
Dosya adı, Saniye cinsinden süre, Tempo, Müzik türü	4
Kroma kısa fourier frekans dönüşümü ortalama ve varyansı, karekök ortalama ve varyansı, spektral ağırlık merkezi ortalaması ve varyansı, bant genişliği ortalaması ve varyansı, kesim frekansı ortalama ve varyansı, sıfır geçiş oranı ortalaması ve varyansı, harmoni ortalaması ve varyansı, algısal oran ortalaması ve varyansı	16
Mel frekans kepstral katsayısı ortalaması ve varyansı (20 Kanal)	40

2.1. Ön İşleme (Preprocessing)

İlk olarak, veri kümesinden kullanılmayacak olan "dosya adı" ve "saniye cinsinden süre" öznelikleri çıkarıldı. Sayısal öznelikler normalizasyon işlemine tabi tutulmuştur. Normalizasyon işlemine min-maks normalizasyon yöntemi kullanılmıştır. Bir özneliğin alabileceği değerlerin en küçüğü $\min(x)$ en büyüğü $\max(x)$ olduğu kabul edilirse, min-maks normalizasyon sonrası oluşan ölçeklendirilmiş x' değeri Eşitlik 2'deki gibi hesaplanır:

$$x' = \frac{x - \min(x)}{\max(x) - \min(x)} \quad (2)$$



Şekil 2. GTZAN veri kümesine ait ısı haritası (Heatmap of GTZAN dataset)

Sonrasında, öznelikler için ısı haritası oluşturulmuştur (Şekil-2). 0,80 üzerindeki değerler pozitif, -0,80 altındaki değerler negatif yüksek korelasyonu gösterir. Buna göre, Spektral Ağırlık Merkezi Ortalaması özneliği ile Kesim Frekansı Ortalaması (0,97) ve Sıfır Geçiş Oranı Ortalaması Katsayısı (0,87) öznelikleri arasında görece yüksek bir korelasyon bulunmaktadır. Ayrıca, 2. Kanal Mel Frekans Kepstral Katsayısı özneliği ile Spektral Ağırlık Merkezi Ortalaması (-0,93), bant genişliği Ortalaması (-0,89) ve Kesim Frekansı Ortalaması (-0,92) öznelikleri arasında görece daha yüksek bir negatif korelasyon vardır.

Girdi özneliklerine bağlı olarak hedef sınıf etiketinin dağılımını ortaya çıkarmak için, öznelikler PCA (Temel Bileşen Analizi) yöntemi ile üçe indirildi. Sonrasında, üç farklı açıdan görünecek şekilde dağılım grafiği oluşturuldu. Grafiklerden de anlaşılacağı üzere, bazı sınıflara (*rock*, *country* vb.) ait verilerin homojen bir dağılıma sahip olmadıkları görülmüştür (Şekil 3).

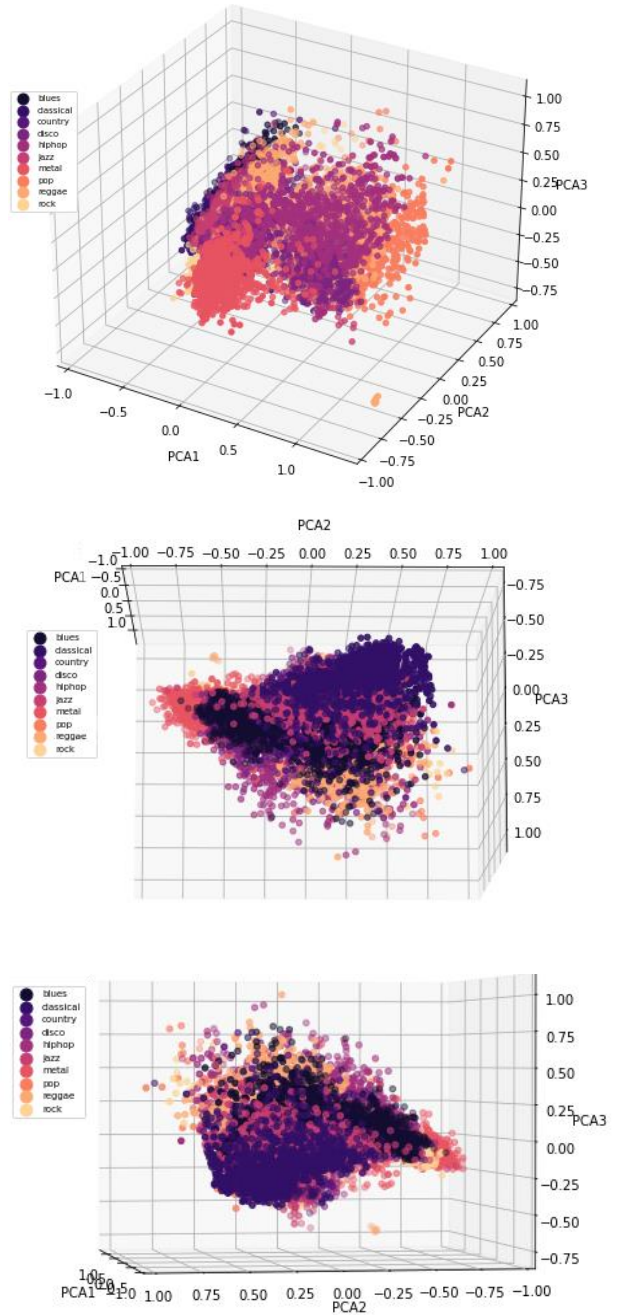
KKÖ yöntemini test etmek için, tüm etiketli veri kümesi üzerinde belirli oranlarda örneklerin sınıf etiketinin kaldırıldığı, etiket silme işlemi uygulandı. Dört farklı oranda (%86, %82, %74, %58) etiket silme işlemi yapılarak etiketli, etiketsiz ve test veri kümeleri elde edildi. Veri dengesizliğini önlemek için, tüm veri kümeleri sınıf dağılımı dengeli olacak şekilde bölündü. Test kümesi sabit (%10) olarak tutuldu.

1. Veri kümesinin test verisi dışında kalan kısmı (etiket silme olmadan)
2. Etiketsiz veri ayrıldıktan sonra kalan kısmı (daraltılmış etiketli veri),
3. Etiketsiz veriye KKÖ yöntemiyle sözde etiket atayarak oluşan veri kümeleri kullanılarak model eğitimi yapıldı. Kümeler örneklerin sıra numarası üzerinden ayrıldı. Böylece, her sınıflandırma algoritması için aynı eğitim ve test veri kümesi oluşumları kullanıldı.

2.2. Sınıflandırma Yöntemleri (Classification Methods)

Eğitim ve test çalışmaları *Naive Bayes*, *K-En Yakın Komşu*, *Karar Ağacı*, *Rastgele Orman* ve *XGBoost*, *Destek Vektör Makinesi*, *Lojistik Regresyon*, *Çok Katmanlı Yapay Sinir Ağı* yöntemleri kullanılarak yapılmıştır.

Naive Bayes, olasılık tabanlı bir yaklaşımla örüntü tanımlamada kullanılan bir denetimli makine öğrenmesi yöntemidir [33].



Şekil 3. Öznelik dağılım grafikleri (Feature scatter plots)

Naive Bayes yöntemi, tüm girdi özneliklerinin birbirinden bağımsız olduğu varsayımı üzerine kuruludur. $P(A)$, A olayının gerçekleşme olasılığı; $P(B)$, B olayının gerçekleşme olasılığı; $P(A|B)$, B olayı gerçekleşirken aynı zamanda A olayının gerçekleşme olasılığı; $P(B|A)$, A olayı gerçekleşirken aynı zamanda B olayının gerçekleşme olasılığıdır. Bu durumda, $P(A|B)$ olasılığı Eşitlik 3'teki gibi ifade edilir.

$$P(A | B) = \frac{P(B|A)*P(A)}{P(B)} \quad (3)$$

$x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ Şeklinde ifade edilebilecek bağımsız girdi öznelikleri için bağımlı hedef

özniteliğinin C_i sınıfı olma olasılığı Eşitlik 4'teki gibi ifade edilir.

$$P(C_i | X) = \frac{P(X | C_i) * P(C_i)}{P(X)}$$

$$(C_i | x_1, \dots, x_n) = \frac{P(x_1, \dots, x_n | C_i) * P(C_i)}{P(x_1, \dots, x_n)} \quad (4)$$

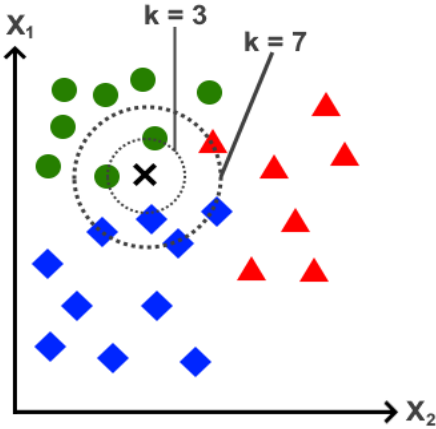
Sayısal türdeki bağımsız değişkenler için, girdi dizisinin ortalaması μ ve standart sapması σ olmak üzere bağımlı hedef özniteliğinin C_i sınıfı olma olasılığı *Gaussian Bayes* yöntemi ile hesaplanır ve Eşitlik 5'teki gibi ifade edilir.

$$\mu = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_j, \quad \sigma^2 = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (x_j - \mu)^2$$

$$P(x_j | C_i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{ji}} \exp\left(-\frac{(x_j - \mu_{ji})^2}{2\sigma_{ji}^2}\right) \quad (5)$$

Her bir sınıf için, sınıfa ait olasılıkların çarpımı o sınıfın hedef değer olma olasılığını verir.

K-En Yakın Komşu (KNN - K-Nearest Neighbor), hiperuzayda bir noktaya ait hedef değerinin, kendisine en yakın noktalardan tahmin edildiği, sınıflandırma ve regresyon işlemleri için kullanılan bir denetimli öğrenme yöntemidir [34]. Bir denetimli öğrenme yöntemi olsa da, eğitim aşaması içermez. Şekil 4'te gösterildiği gibi hedef özniteliğinin değeri, çeşitli mesafe ölçüm yöntemlerine göre belirlenen k adet en yakın komşusuna bakılarak çoğunluk oyu (nokta sayısı) ya da ağırlıklı oy seçimi ile tespit edilir.



Şekil 4. K-en yakın komşu algoritması için en yakın komşuların belirlenmesi (Determination of nearest neighbors for the KNN algorithm)

Bağımsız girdi değişkenlerinin birbirleriyle orantısız olması sorun çıkaracağından, hesaplama öncesi normalizasyon yapılması gerekir. n Adet girdi özniteliğine sahip veri kümesindeki, i . öznitelik değerleri sırasıyla p_i , q_i ile temsil edilen

veri örnekleri P ve Q arasındaki mesafe Eşitlik 6'daki gibi hesaplanır.

$$d_r(P, Q) = \{\sum_{i=1}^n |p_i - q_i|^r\}^{\frac{1}{r}} \quad (6)$$

Uzaklık ölçüm yöntemleri, denklemden r yerine 1 koyulduğunda *Manhattan*, 2 koyulduğunda *Öklid*, 2'den büyük bir değer koyulduğunda *Minkowski* olarak adlandırılır. Kategorik örnekler için *Hamming mesafesi* uzaklık ölçüm yönteminden faydalanılır. Verideki eksikler/boşluklar ve aykırı değerler modelin çalışma başarısını düşürür; veri sayısı arttıkça performansı düşer.

Karar Ağacı (Decision Tree), sınıflandırma ve regresyon için kullanılan bir denetimli makine öğrenmesi yöntemidir [35]. Bağımsız girdi değişkenlerinin değer aralığı ya da kategorilerine göre koşullu (eğer ise, eğer değilse) olarak dallanmaların olduğu ikili ya da çoklu ağaç yapılarıyla temsil edilir. Homojen bir yapı oluşturmak için, ayrışmanın olacağı düğümlerin tespitinde *entropi*, *gini* ve *twoing* kriterleri kullanılır.

S veri örneklerinin bulunduğu küme, n hedef özniteliği değeri (sınıf) sayısı ve p_i küme içinde i . sınıfın bulunma olasılığı olduğu durumda, bu kümeye ait entropi $H(S)$ Eşitlik 7'deki gibi hesaplanır:

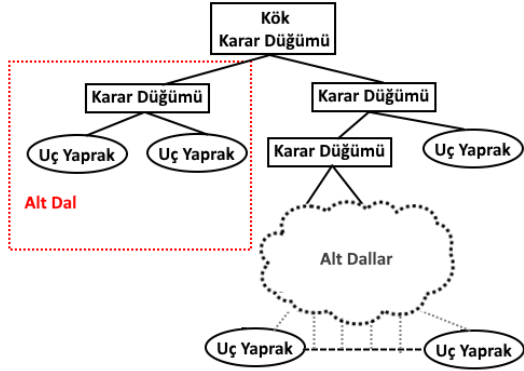
$$H(S) = -\sum_{i=1}^n p_i \log_2(p_i) \quad (7)$$

Karar ağaçları oluşturulurken ID3, C4.5, CART gibi algoritmalarından faydalanılır. ID3 sadece sayısal ya da sadece kategorik girdi öznitelikleri ile çalışır. C4.5 algoritması hem sayısal hem de kategorik girdi öznitelikleri ile çalışır. CART algoritması ikili ağaç yapısı oluşturur. CART algoritmasında *gini* ve *twoing* kriterleri kullanılır. ID3, C4.5 algoritmalarında *entropi* kriteri kullanılır ve ayırt edici öznitelik tespitinde "bilgi kazancı" ölçümünden yararlanır. X girdi özniteliği, S veri kümesi ve $S_1, S_2 \dots S_n$ alt kümeler olsun. $|S_i|$ i . kümenin, $|S|$ veri kümesinin tamamının eleman sayısını gösterebilir. X öznitelik bilgisinin bilgi kazancı Eşitlik 8'deki gibi hesaplanır:

$$\text{Bilgi kazancı}(S, X) = H(S) - \sum_{i=1}^n \frac{|S_i|}{|S|} H(S_i) \quad (8)$$

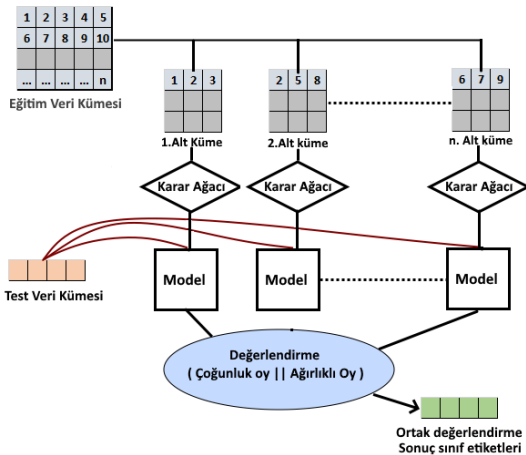
Şekil 5'te gösterildiği gibi karar ağacındaki örnekler ayrıştırma kriteri doğrultusunda alt dallara ayrılır. Kök düğüm, ayrıştırmanın başlayacağı kök öznitelik bilgisini temsil eder ve belirlenen koşul doğrultusunda alt dallara ayrılarak gruplanır. Kök düğümün altında yer alan düğümler, küme homojen (sadece bir hedef öznitelik değerini içerecek) hale geldiyse "uç yaprak", yine dallanma varsa "karar

düğümü” olarak adlandırılır. Dallanma işlemi ağacın bütün dallarında yaprak düğümlere ulaşana ya da maksimum derinlik gibi sonlanma koşulu oluşuncaya kadar devam eder.



Şekil 5. Örnek karar ağacı (Example decision tree)

Rastgele Orman (Random Forest), sınıflandırma ve regresyon problemlerinde kullanılan, *Karar Ağacı* tabanlı bir denetimli öğrenme yöntemidir. Topluluk öğrenmesi (*Ensemble learning*) kategorisinde yer alır. *Karar Ağacı* gibi diğer algoritmalarla karşılaştırıldığında, eğitim verisine aşırı duyarlı olma eğilimindedirler [36]. Eğitim örneklerindeki değişiklikler, varyansın artmasına ve dolayısıyla aşırı öğrenmeye yol açabilir. Bu durumu önlemek için "torbalama" (*bagging, bootstrap aggregation*) adı verilen teknikler kullanılır. Bu yöntemde, eğitim kümesine ait örnekler rastgele şekilde eğitim gruplarına ayrılır. Bir örnek, bir ya da birden fazla grupta yer alabilir ya da hiçbir grubun içinde yer almaz. Ayırma işleminden sonra, eğitim gruplarıyla birden fazla karar ağacı birlikte eğitilir ve hata oranlarına göre çoğunluk oylaması veya ağırlıklı oy yöntemleri kullanılarak seçim yapılır [37]. Rastgele orman algoritmasının çalışma örneği Şekil 6'da gösterildiği gibidir.



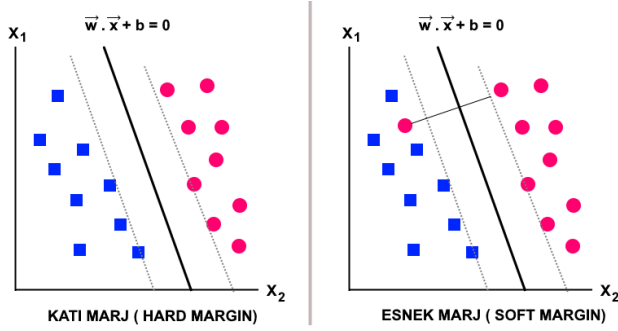
Şekil 6. Rastgele Orman algoritmasının örnek çalışma şekli (Example of how the random forest algorithm works)

XGBoost, sınıflandırma ve regresyon amacıyla kullanılan bir denetimli öğrenme algoritmasıdır. *Rastgele Orman* algoritması gibi topluluk öğrenmesi grubunda yer alır. İşleyiş olarak rastgele orman algoritmasına benzer. *Rastgele Orman* algoritmasında torbalama (*bagging*) yapılırken, XGBoost algoritmasında artırma (*boosting*) uygulanır.

Artırma yönteminde, birden fazla sınıflandırıcıdan gelen tahminler birleştirilerek sonuç elde edilir. Sınıflandırıcılar, sırayla bir öncekinin hatasına göre ağırlıklandırılarak (güçlü olanın ağırlığı artırılarak) sonuç modele ulaşılır.

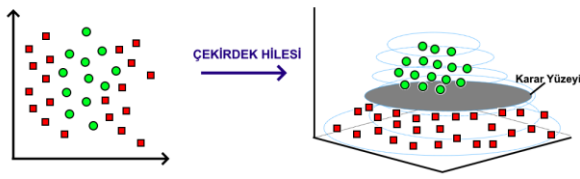
Alt eğitim kümelerindeki ağaçların dallarındaki hatalar hesaplanarak uç yapraklarda budama yapılır. Döngüsel olarak yapılan budama sonucunda her ağacın sadece belirli bir bölümü tahminlemede kullanılır. Böylece aşırı öğrenmenin önüne geçilir. Çalışma şekli bakımında XGBoost, *Gradyan Artırma Karar Ağacı Algoritmasının* optimize edilmiş halidir [38]. Hız, performans, uyarlanabilirlik, girdi çeşitliği toleransı ve eksik veriyi işleyebilmesi özellikleri ile öne çıkar.

Destek Vektör Makineleri (Support Vector Machines), sınıflandırma amacıyla kullanılan bir denetimli makine öğrenmesi yöntemidir. Hem doğrusal olarak ayrılabilen hem de doğrusal olarak ayrılamayan veri kümelerinin sınıflandırılmasında kullanılır [39]. Doğrusal olarak ayrılabilen veri kümeleri için, hiperuzayda sınıfları ayıran uygun hiper düzlemi bulma esasına dayanır. Hiper düzlem tespit edilirken, her sınıfa ait veri örnekleri oluşturduğu sınır ile maksimum uzaklık sağlanmaya çalışılır. Sınıflar, sınırları belli olacak şekilde ayrılması durumunda, bu katı marj (*hard margin*) sınıflandırma olarak adlandırılır. Sınıflara ait veri örneklerinin bir kısmı ait oldukları marjın dışına taşmışsa bu esnek marj (*soft margin*) sınıflandırma olarak adlandırılır. Katı ve esnek marj sınıflandırmaya ait örnek gösterim Şekil 7'deki gibidir. Doğrusal olarak ayrılamayan veri kümelerinde ise, sınıfları ayırmak için çeşitli yöntemler kullanılır. Bunlardan biri çok terimli dönüştürmedir. Bu yöntemde boyut artırımı ile veri kümesi doğrusal ayrılabilir hale getirilir. Ancak bu yöntem hesaplama maliyetinde artışa, model performansında düşüşe ve aşırı öğrenmeye neden olur. İlgili sakıncaları aşmak adına, çekirdek hilesi (*kernel trick*) yöntemine başvurulur. Çekirdek hilesi yöntemi ile veri kümesi herhangi bir boyut artırma işlemi yapılmadan daha yüksek düzeyli bir uzaya eşleştirilir. Böylece esnek ve verimli bir şekilde ayrıştırma yapılır. Çekirdek hilesi yönteminde *Linear, Çok Terimli, Radyal Bazlı Fonksiyon (RBF) ve Sigmoid* gibi çekirdek fonksiyonları kullanılır.



Şekil 7. Katı marj ve esnek marj (Hard and soft margin)

Şekil 8’de iki adet girdi özneliğine sahip veri kümesinin RBF çekirdek hilesi ile dönüştürülmesi örneklenmiştir.



Şekil 8. RBF çekirdek hilesi (RBF Kernel trick)

Lojistik Regresyon (Logistic Regression), sınıflandırma amacıyla kullanılan bir denetimli makine öğrenmesi yöntemidir [40]. Bağımsız girdi değişkenlerinin ağırlık değerleri ile çarpılarak elde edilen toplamdan, olasılık değeri hesaplanır. Bu olasılık değeri ile hedef özneliği tahmin edilir. x_{ji} i. örnek için j. girdi özneliğinin değerini, b_j özneliğe ait ağırlığı ve e_j hatayı göstermek üzere i. örneğin öngörülen değeri \hat{Y}_i Eşitlik 9’da verildiği şekilde hesaplanır.

$$\hat{Y}_i = b_0x_{0i} + b_1x_{1i} + b_2x_{2i} \dots + b_kx_{ki} + e_i$$

$$= \sum_{j=0}^k b_jx_{ji},$$

$$\hat{Y}_i = b_0 + \sum_{j=1}^k b_jx_{ji} + e_i \quad (9)$$

İkili sınıflandırma ele alındığında, bir örneğe ait girdi öznelikleri X_i iken ilk sınıfın (hedef özneliği) olasılığı $P(X_i) = P(Y_i = 0, X_i)$ ikinci sınıfın olasılığı $P(Y_i = 1, X_i) = 1 - P(X_i)$ şeklinde bulunur. İki olasılığın birbirine bölümü ile iki sınıf olasılığı arasındaki oran tespit edilir. *Logit* fonksiyonu ile bu değer 0-1 arasındaki olasılık değerine çevrilir. Bu da Eşitlik 10’da gösterildiği gibi *sigmoid* fonksiyonuna karşılık gelmektedir.

$$Oran = \frac{P(X_i)}{1-P(X_i)}, \quad (10)$$

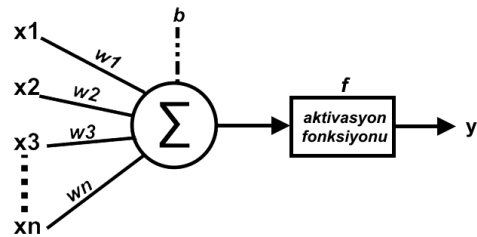
$$\text{logit}(Oran) = \log_e \left(\frac{p(X_i)}{1-p(X_i)} \right) \quad p(X_i) = \frac{e^{\hat{Y}_i}}{1+e^{\hat{Y}_i}}$$

İkili sınıflandırma için $p(X_i) \geq 0,5$ olması durumunda ilk sınıf (0) aksi halde ikinci sınıfa (1) ait hedef özneliği değeri elde edilir. Çok sınıflı lojistik regresyonda, sigmoid fonksiyonu yerine *softmax* fonksiyonu kullanılır. n Adet hedef özneliği değeri (sınıf etiketi) içeren bir veri kümesinde bir örneğe ait ϕ girdi öznelikleri için k . sınıf etiketi C_k ’nın olasılığı Eşitlik 11’deki gibi hesaplanır. Olasılığı en büyük sınıf, etiket hedef özneliği değeri olarak atanır.

$$p(C_k | \phi) = y_k(\phi) = \frac{\exp(\hat{Y}_k)}{\sum_{i=1}^N \exp(\hat{Y}_i)} \quad (11)$$

Girdi özneliklerine (bağımsız değişkenlere) bağlı ağırlıkların ve katsayıların hesaplanmasında *En Büyük Olabilirlik tahmini (MLE - Maximum Likelihood Estimator)*, *Yeniden Ağırlıklandırılmış En Küçük Kareler (RILS - Iteratively Reweighted Least Squares)* ve *Gradyan İniş (Gradient Descent)* yöntemlerinden faydalanılır.

Çok Katmanlı Yapay Sinir Ağı/ÇKYSA (Multilayer Neural Network), biyolojik nöronların mekanik yapısının taklit edilmesiyle ortaya çıkan makine öğrenmesi yöntemidir [41]. Hata toleransının yüksek olması, doğrusal olmayan problemler için uygun olması, uyarlanabilir olması gibi özelliklerden dolayı yaygın olarak kullanılır. Sinir ağı katmanları, yan yana gelen algılayıcılardan (*perceptron*) oluşur. Sinir ağlarına ait algılayıcılar Şekil 9’daki gibi çalışır.



Şekil 9. McCulloch–Pitt yapay nöron modeli (McCulloch–Pitt Model) [42]

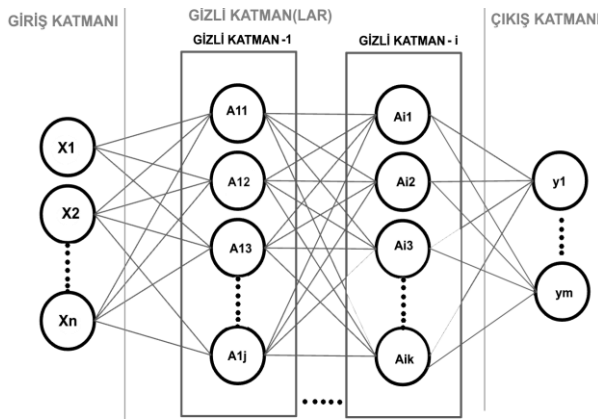
Eşitlik 12’de verildiği gibi, algılayıcı girdileriyle ($x_1, x_2, x_3 \dots x_n$) eğitim aşamasında hesaplanan ağırlık değerleri ($w_1, w_2, w_3 \dots w_n$) çarpılıp, bir taban değeri b ile toplandıktan sonra aktivasyon fonksiyonu f kullanılarak hedef değeri elde edilir.

$$f(b + \sum_{i=1}^n x_i w_i) \quad (12)$$

Problemin niteliğine göre *sigmoid*, *Tanh*, *Relu*, *LeakRelu*, *Softmax*, *Swing* vb. aktivasyon fonksiyonları kullanılır. Çok katmanlı sinir ağı Şekil 10’da gösterildiği şekilde, bir *girdi katmanı (input*

layer), bir ya da birden fazla gizli katman (hidden layer) ve çıktı katmanından (output layer) oluşur.

Birbirinden bağımsız birden fazla algılayıcının yan yana gelmesiyle katmanlar oluşur. Katmandaki algılayıcıların çıktılarının diğer katmanlardaki algılayıcıların girdisi olacak şekilde daha fazla katmanın bir araya gelmesiyle çok katmanlı yapay sinir ağları meydana gelir. Sinir ağlarında, gerçek ve tahmin edilen hedef özniteliği değeri karşılaştırılarak geri yayılım (back propagation) algoritması ile ağırlık değerleri güncellenir. İleri yayılım (forward propagation) ile hesaplanan yeni ağırlık değerleri ile tekrar tahminleme yapılır ve bu döngüler halinde tekrarlanır.



Şekil 10. Çok katmanlı sinir ağı mimarisi (Multi layer neural network architecture)

2.3. Performans Değerlendirme Ölçütleri (Performance Evaluation Metrics)

Karışıklık Matrisi (Confusion Matrix): Karışıklık matrisi, bir girdi örneğinin ait olduğu sınıf etiketi ile sınıflandırıcının tahmin ettiği sınıf etiketinin karşılaştırılmasını sağlayan tablodur. Şekil 11’de ikili sınıflandırmaya ait örnek karışıklık Matrisi verilmiştir.

		TAHMİN	
		Pozitif	Negatif
GERÇEK	Pozitif	Doğru Pozitif (DP)	Yanlış Negatif (YN)
	Negatif	Yanlış Pozitif (YP)	Doğru Negatif (DN)

Şekil 11. Karışıklık matrisi (Confusion Matrix)

Doğruluk (Accuracy): Doğru tahminlerin toplam miktarının, kümedeki örnek sayısına bölümüyle elde edilir. Özellikle dengesiz kümelerde başarıyı ölçmek için yeterli olmayacağından diğer ölçütlerle beraber kullanılır. Eşitlik 13’teki gibi ifade edilir.

$$\text{Doğruluk} = \frac{DP + DN}{DP + YP + DN + YN} \quad (13)$$

Kesinlik (Precision): Pozitif sınıf için, doğru tahmin edilen örnek sayısının, doğru ve yanlış pozitif tahmin örnekleri toplamına bölümünden oluşur. Pozitif öngörü oranıdır. Eşitlik 14’teki gibi ifade edilir.

$$\text{Kesinlik} = \frac{DP}{DP + YP} \quad (14)$$

Duyarlılık (Sensitivity / Recall): Pozitif sınıf için doğru tahminlerin, gerçek pozitif örneklerin sayısına bölümünden oluşur. Pozitif gerçek değerler için doğruluk oranıdır. Eşitlik 15’teki gibi ifade edilir.

$$\text{Duyarlılık} = \frac{DP}{DP + YN} \quad (15)$$

Özgünlük (Specify): Negatif sınıf için, doğru tahminlerin, gerçek negatif örneklerin sayısına bölümünden oluşur. Negatif gerçek değerler için doğruluk oranıdır. Eşitlik 16’daki gibi ifade edilir.

$$\text{Özgünlük} = \frac{DN}{DN + YP} \quad (16)$$

F1-Skor (F1-Score): Duyarlılık ve özgünlük değerleri dikkate alarak model başarısını ölçmekte kullanılır. Eşitlik 17’deki gibi ifade edilir.

$$F_1 - \text{skor} = 2 \times \frac{\text{Duyarlılık} \times \text{Özgünlük}}{\text{Duyarlılık} + \text{Özgünlük}} \quad (17)$$

3. BULGULAR (RESULTS)

Deneysel çalışma için dört eğitim ve test kümesi oluşturuldu.

Etiket kaldırma oranı (tüm küme üzerinden sırasıyla %86, %82, %74, %58) belirlendi. %10’lu kısım test veri kümesi olarak belirlendikten sonra sırasıyla kalan %4, %8, %16, %32’lik bölümü kısmi eğitim kümesi olarak kullanıldı.

1. %4, %8, %16, %32’lik kısmi eğitim kümesi,
2. Test kümesi dışında kalan %90’lık tümü etiketli eğitim kümesi,
3. Kısmi eğitim kümeleri ile sırasıyla %86, %82, %74, %58’lik etiketsiz veriye sözde etiket atanarak oluşan kümeler ile eğitim ve test işlemleri yürütüldü.

Deneysel çalışmalarda, sözde etiket atama işlemi için güvenilirlik (olasılık eşik değeri) 0,98 olarak seçildi. K-En Yakın Komşu sınıflandırıcısı için $k=3$ değerinde dirsek noktası olduğundan, bakılacak komşu sayısı 3 olarak belirlendi. Yapay Sinir Ağı modeli, düğüm sayısı sırasıyla 512, 256, 128, 64

olan 4 gizli katmana sahip olacak şekilde oluşturuldu. Gizli katmanlarda *RELU* aktivasyon fonksiyonu kullanıldı. Sınıf sayısı kadar (10) düğümüne sahip çıkış katmanında aktivasyon fonksiyonu olarak *softmax* kullanıldı. Aşırı öğrenmeyi engellemek adına gizli katmanların çıkışında 0,25 oranında seyreltme uygulandı. Öğrenme oranı 0,0001 olacak şekilde *RMSProp* optimizasyon fonksiyonu kullanıldı. Lojistik regresyon modeli için maksimum döngü sayısı 1000, $\gamma = 0,0001$, çekirdek *linear* olacak şekilde parametre düzenlemesi yapıldı. *XGBoost* modelinde eğitilecek karar ağacı sayısı 100 olarak belirlendi. Diğer sınıflandırıcılar için varsayılan parametreler üzerinden yürütüm gerçekleştirildi.

Deneyisel çalışmalarda, Grafik İşlem Birimi içermeyen, toplam 20 çekirdekli 2 adet Intel *Xeon* 4210 işlemci ve 64 GB belleğe sahip *ThinkSystem SR650* raf sunucu kullanıldı. Geliştirme ortamı olarak *Anaconda*, programlama dili olarak *Python* ve bu dile ait *numpy*, *pandas*, *matplotlib*, *sklearn*, *keras*, *semilearn* kütüphaneleri kullanıldı.

Deneyisel çalışmaya ait sonuçlar Tablo 2, 3, 4, 5 ve 6'da verilmiştir. Tablo 2'de tüm sınıflandırıcılar için tamamı etiketli veri kümesi üzerinden yapılan ölçüm değerleri yer almaktadır. En düşük etiketli veri oranından en yükseğe doğru Tablo 3, 4, 5 ve 6'da kısmi etiketli ve sözde etiket atama ile oluşan veri kümelerine ait ölçümler göstermektedir. Tabloların ilk sütununda kullanılan sınıflandırıcı bilgisi, ikinci sütununda kullanılan veri kümesi (VK) yer almaktadır. **VK** sütununda 1 değeri kısıtlı, 2 değeri sözde etiket atama işlemi sonrası, 3 değeri tümü etiketlenmiş eğitim kümesi ile yapılan testleri ifade eder. Sonuç etiketi bazında **F₁-Skor** değeri, kümenin tümüne ait doğruluk değeri (**Doğruluk**) ölçütlerini içeren sütunlar yer almaktadır. Ayrıca, tablolarda, sözde etiket atama işleminde atama yapılan örnek (**EA**), doğru atama yapılan örnek sayısı (**DEA**) ve bunların oranını (**DEA/EA**) gösteren sütunlar yer almaktadır. Sözde etiket atama işleminin kaç döngüde tamamlandığı **Tekrar** ve işlem süresi bilgisi **Süre** sütunlarında gösterilmiştir.

- Eğitim kümesi boyutu arttıkça KNN, ÇKYSA ve XGBoost modellerinde doğru sözde etiket atanan örnek sayısı oranı artmıştır. KNN için Tablo 3-6'da gösterildiği gibi DEA/EA oranı sırasıyla %72, %86, %90, %96'dır. Benzer şekilde ÇKYSA için DEA/EA oranı sırasıyla %75, %84, %89, %96; XGBoost için %70, %81, %92, %98'dir. Diğer modellerde belirgin bir artış olmamıştır ya da model doğruluk oranı düşük olduğu için DEA/EA oranındaki artış model performansına yansımamıştır.

- 1. ve 3. veri kümeleri karşılaştırıldığında, beklenildiği üzere, eğitim kümesi boyutundaki artışa koşut olarak işlem süreleri de artmıştır. Sözde etiket atama işleminin yapıldığı 2. veri kümesi için, işlem süresi tekrar sayısı ve eğitim veri kümesinin boyutuna bağlı olarak değişmiştir.
- Kullanılan eğitim kümesi boyutu büyüdükçe doğruluk ve sınıf bazında F₁-skor ölçütlerinde iyileşme olmuştur.
- Eğitim kümesi boyutu büyüdükçe, sözde etiket atama tekrar sayısında genel olarak azalma olmuştur. Örneğin ÇKYSA modeli için Tablo 3'te verilen yapılandırmada sözde etiket atama işlemi 4 tekrarda tamamlanırken, Tablo 4, 5, 6'da yer alan yapılandırmalarda sırasıyla 3, 3 ve 1 tekrarda işlem sonlanmıştır.

Tablo 2, 3, 4, 5 ve 6'da yer alan veriler toplu olarak değerlendirildiğinde aşağıdaki bulgulara ulaşılmıştır:

- KKÖ'nün, sınıflandırma başarısı düşük olan Naive Bayes, Lojistik Regresyon ve Karar Ağacı modelleriyle beraber kullanıldığında başarıyı düşürdüğü görülmüştür. Sınıflandırıcı başarısının sözde etiket atama işlemine de yansıdığı düşünüldüğünde, bu beklenen bir sonuçtur.
- Karar ağacı tabanlı, topluluk öğrenmesi yöntemi Rastgele Orman ve XGBoost modellerinde, sözde etiket atama başarısı yüksek olsa dahi KKÖ'nün başarı artışı sağlamadığı ya da düşürdüğü görülmüştür.
- Destek Vektör Makinesi modelinde, sözde etiket atama işlemi yüksek oranda başarılı olsa da, sözde etiket atanan örnek sayısı azdır. Bu nedenle KKÖ yönteminin kullanılması başarıyı etkilememiştir.
- KNN modeli için KKÖ doğruluk oranı yönünden 0,02-0,04 arası artış sağlamıştır.
- ÇKYSA modeli için KKÖ 0,05-0,09 arasında istikrarlı bir doğruluk oranı artışı sağlamıştır.

Ek Yöntem: KKÖ'nün en çok katkısını sağladığı KNN ve ÇYYSA sınıflandırıcılarda aşağıdaki adımları içeren destekleyici bir yöntem uygulanmıştır.

- 1- Eşik değerinin üstünde olasılığa sahip etiketlerin sınıf bazında toplamını sayısını bul.
- 2- En düşük miktara sahip sınıfın belirli bir yüzdesini (bu çalışmada %80 alınmıştır) **etiket atama oranı** olarak belirle.

3- Her sınıf için, eşik değerin üstündeki örnekler için, **etiket atama oranı** kadar olan kısmına etiket ata.

Bu yöntemle, etiket atama sırasında sınıflar arasındaki dengesiz dağılımının önüne geçilmesi amaçlanmıştır. Tablo 3, 4, 5 ve 6'da, anılan iki sınıflandırıcı için 2* şeklinde verilen satırlarda ek yöntemle ait sonuçlar görülmektedir. Buna göre, ek yöntem doğru etiket atama oranını yükseltmiş, 0,01-0,02 arasında ek bir doğruluk artışı sağlamıştır. Çok büyük bir artışı ifade etmese de bu, destekleyici yöntemlerin sağlayabileceği katkının potansiyelini göstermesi yönünden anlamlıdır.

KKÖ gibi sarıcı yöntemler ele alındığında, bu yöntemler için temel dayanak aynı sınıfa ait örneklerin belirli bir bölgede toplanmasıdır. Ancak mevcut çalışmadaki gibi veri kümesinin geniş yayılıma sahip olması, KKÖ yönteminin performansını olumsuz etkilemiştir. Şekil 3'teki dağılım grafiğinde de görüleceği üzere, kimi müzik türleri belirli bölgelerde yoğunlaşırken, rock gibi müzik türleri için örnekler geniş bir bölgeye dağılmıştır. Bu durum, ilgili türler için doğruluk oranı ve F1-skor değerinin düşmesine sebep olmuştur. Belirli bir bölgede yoğunlaşan *classic* ve *metal* müzik türleri için yüksek F1-skor değeri elde edilmiştir. Bunun sonucunda, sözde etiket atama işleminde, sadece belirli bir bölgede toplanan örneklerle sahip müzik türlerine yüksek oranda ve başarılı bir şekilde sözde etiket atanırken, diğer müzik türleri için etiket atama işleminin başarısı düşmüştür. Başka bir ifadeyle, yüksek öbeklenme olan müzik türleri için ölçüm değerlerinde iyileşme yaşanırken; diğer müzik türlerinde model başarısı düşmüş ve yanlış etiketleme oranı artmıştır.

Son olarak, mevcut çalışmada elde edilen sonuçlar, Wang ve diğerleri tarafından yapılan çalışmadaki [25] sonuçlarla karşılaştırılmıştır (Tablo 7). Tabloda da görüleceği üzere, referans çalışmada sözde etiket atama (*Pseudo-labelling*) yöntemi hata oranını arttırmıştır. Öte yandan *FixMatch*, *FlexMatch* algoritmaları hata oranını ortalama %10 (bağıl olarak yaklaşık %30) azaltmıştır. Mevcut çalışmada, aynı yapılandırma üzerinde yapılan deneylerde KKÖ destekli ÇKYSA modeli ile hata oranında %6 (bağıl olarak yaklaşık %14) iyileşme sağlanmıştır.

4. SONUÇ (CONCLUSION)

Çalışma kapsamında, KKÖ'nün GTZAN veri kümesi üzerinden sınıflandırma performansına etkisi değerlendirilmiştir. KKÖ, her ne kadar umut vaat eden bir yarı denetimli öğrenme yöntemi olsa da, her durumda istenen katkıyı sağlamamaktadır. Kullanılan veri kümesinin niteliğine göre kimi

durumlarda başarı artışı sağlarken, kimi durumlarda etkisiz kalmakta ya da başarıyı düşürmektedir.

Örneğin, Li ve Zhou'nun çalışmasında [17], veri kümesindeki dağılım ve gürültü miktarına bağlı olarak, KKÖ herhangi bir ek teknik ile desteklenmediğinde performans artışı yerine düşüşe sebep olabileceği görülmektedir. Bu nedenle, KKÖ SETRED adı verilen algoritma ile desteklenmiştir.

Bir başka çalışmada [24] önerilen gürültü giderme, çalışma kapsamında işlenen veri kümelerinde başarılı olmuştur. Ancak, yöntem, sınıfların geniş dağılıma sahip olduğu bu çalışmada kullanılan benzer veri kümelerinde, dağılık örneklerin gürültü olarak algılanmasına sebep olmaktadır. Bu da, sınıflandırma başarısını düşürmektedir. Sonuç olarak, KKÖ vb. sarıcı yöntemlerin başarılı sonuç üretebilmesi için:

- Veri kümesinin yapısına uygun, yeterli performansa sahip bir model seçilmelidir.
- Kısıtlı veri kümesinin tüm hedef sınıfları için yeterli örneğe sahip olması ve sınıfların düzenli bir dağılım göstermesi gerekmektedir.
- Veri kümesinin yapısına göre, gerekli durumlarda yöntem, gürültü filtreleme ya da etiket ve model bazında düzenleme gibi ek tekniklerle desteklenmelidir.

KKÖ'nün yalın halde kullanımı yerine, veri kümesinin karakteristiğine bağlı olarak, yukarıda bahsedilenler gibi ek tekniklerle desteklenmesinin model başarısını artıracığı düşünülmektedir.

ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazarı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

The author of this article declares that the materials and methods they use in their work do not require ethical committee approval and/or legal-specific permission.

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

Alp Kaan TURAN: Analiz, yazılım uygulaması, sonuçların değerlendirilmesi ve makalenin yazım işlerini yürütmüştür.

He performed the analysis, software implementation, analysis of the results and writing the paper.

Hüseyin POLAT: Gözden geçirme, yönlendirme ve makalenin yazımı konularında katkı sağlamıştır.

He contributed to the review, supervision and writing of the paper.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

There is no conflict of interest in this study.

Tablo 2. %90 etiketli küme (90% labeled dataset)

Sınıflandırıcı	VK	F1-Skor											Doğruluk	Süre
		blues	classic	country	disco	hip hop	jazz	metal	pop	reggae	rock			
K-En Yakın Komşu	3	0,94	0,93	0,88	0,91	0,92	0,91	0,96	0,93	0,94	0,87	0,92	< 1sn	
Ç,K, Yapay Sınır Ağı	3	0,93	0,90	0,80	0,89	0,86	0,85	0,93	0,91	0,87	0,79	0,87	04:39	
Destek Vektör Makinesi	3	0,58	0,88	0,38	0,54	0,54	0,72	0,79	0,74	0,58	0,43	0,63	00:21	
XGBoost	3	0,90	0,94	0,88	0,89	0,90	0,85	0,94	0,90	0,89	0,88	0,90	00:09	
Rastgele Orman	3	0,92	0,94	0,85	0,84	0,87	0,88	0,91	0,90	0,89	0,80	0,88	01:50	
Naive Bayes	3	0,39	0,79	0,47	0,38	0,40	0,53	0,60	0,65	0,47	0,26	0,51	< 1sn	
Karar Ağacı	3	0,67	0,83	0,52	0,55	0,64	0,71	0,74	0,67	0,62	0,51	0,65	00:01	
Lojistik Regresyon	3	0,66	0,89	0,54	0,67	0,63	0,75	0,83	0,79	0,62	0,50	0,69	00:02	

Tablo 3. %4 etiketli, %86 etiketsiz veri kümesi (4% labeled, 86% unlabeled dataset)

Sınıflandırıcı	VK	F1-Skor											Doğruluk	EA	DEA	DEA/EA	Tekrar	Süre
		blues	classic	country	disco	hip hop	jazz	metal	pop	reggae	rock							
K-En Yakın Komşu	1	0,51	0,80	0,51	0,48	0,51	0,61	0,71	0,64	0,59	0,42	0,57						<1sn
	2	0,57	0,79	0,52	0,46	0,59	0,65	0,75	0,70	0,60	0,43	0,60	5070	3626	0,72	4	<1sn	
	2*	0,57	0,86	0,47	0,58	0,50	0,71	0,73	0,69	0,64	0,37	0,62	4402	3569	0,81	10	00:05	
Ç,K, Yapay Sınır Ağı	1	0,56	0,82	0,51	0,34	0,44	0,66	0,65	0,72	0,50	0,32	0,56						00:18
	2	0,59	0,80	0,52	0,53	0,62	0,68	0,75	0,72	0,57	0,47	0,62	5238	3953	0,75	4	06:01	
	2*	0,59	0,89	0,58	0,49	0,61	0,66	0,75	0,74	0,64	0,38	0,64	4357	3751	0,86	7	08:38	
Destek Vektör Makinesi	1	0,34	0,74	0,00	0,06	0,07	0,39	0,52	0,56	0,39	0,00	0,40						<1sn
	2	0,34	0,74	0,00	0,06	0,07	0,39	0,52	0,56	0,39	0,00	0,40					1	<1sn
	1	0,59	0,83	0,53	0,50	0,59	0,64	0,70	0,72	0,58	0,35	0,61						00:01
XGBoost	2	0,48	0,74	0,41	0,49	0,51	0,59	0,66	0,62	0,53	0,28	0,52	4320	3022	0,70	29	01:54	
	1	0,59	0,89	0,58	0,49	0,61	0,66	0,75	0,74	0,64	0,38	0,64						00:04
	2	0,59	0,89	0,54	0,49	0,60	0,69	0,74	0,74	0,62	0,34	0,63	2	2	1,00	3	00:22	
Rastgele Orman	1	0,40	0,73	0,47	0,29	0,41	0,48	0,62	0,59	0,48	0,23	0,47						<1sn
	2	0,31	0,64	0,48	0,33	0,38	0,43	0,61	0,51	0,42	0,25	0,43	4910	2850	0,58	2	<1sn	
	1	0,24	0,76	0,18	0,23	0,36	0,40	0,49	0,53	0,38	0,24	0,38						<1sn
Karar Ağacı	2	0,23	0,68	0,20	0,19	0,32	0,38	0,49	0,55	0,36	0,24	0,37	6250	2883	0,46	1	<1sn	
	1	0,47	0,81	0,28	0,26	0,49	0,58	0,60	0,66	0,53	0,19	0,52						<1sn
	2	0,47	0,81	0,28	0,26	0,49	0,58	0,60	0,66	0,53	0,19	0,52						<1sn
Lojistik Regresyon	1	0,47	0,81	0,28	0,26	0,49	0,58	0,60	0,66	0,53	0,19	0,52						<1sn
	2	0,47	0,81	0,28	0,26	0,49	0,58	0,60	0,66	0,53	0,19	0,52						<1sn
	1	0,47	0,81	0,28	0,26	0,49	0,58	0,60	0,66	0,53	0,19	0,52						<1sn

Tablo 4. %8 etiketli, %82 etiketsiz veri kümesi (8% labeled, 82% unlabeled dataset)

Sınıflandırıcı	VK	F1-Skor											Doğruluk	EA	DEA	DEA/EA	Tekrar	Süre
		Blues	classic	country	disco	hip hop	jazz	metal	pop	reggae	rock							
K-En Yakın Komşu	1	0,67	0,87	0,59	0,62	0,66	0,71	0,77	0,78	0,66	0,55	0,69						< 1sn
	2	0,76	0,89	0,65	0,68	0,66	0,70	0,80	0,85	0,63	0,58	0,72	4840	4151	0,86	3	< 1sn	
	2*	0,78	0,88	0,60	0,67	0,66	0,74	0,84	0,82	0,62	0,59	0,73	4472	4104	0,92	12	00:05	
Ç,K, Yapay Sınır Ağı	1	0,60	0,86	0,57	0,56	0,60	0,68	0,82	0,72	0,61	0,36	0,65						00:38
	2	0,69	0,94	0,62	0,62	0,67	0,80	0,86	0,77	0,66	0,61	0,72	5560	4645	0,84	3	03:18	
	2*	0,74	0,87	0,65	0,68	0,69	0,76	0,85	0,82	0,71	0,53	0,73	4890	4456	0,91	4	04:19	
Destek Vektör Makinesi	1	0,30	0,77	0,23	0,19	0,43	0,28	0,58	0,55	0,53	0,07	0,44						< 1sn
	2	0,30	0,77	0,23	0,19	0,43	0,28	0,58	0,55	0,53	0,07	0,44	15	14	0,93	6	00:04	
	1	0,65	0,88	0,57	0,64	0,72	0,69	0,86	0,74	0,68	0,54	0,70						00:02
XGBoost	2	0,57	0,84	0,47	0,64	0,70	0,68	0,75	0,70	0,61	0,45	0,64	3975	3209	0,81	40	03:29	
	1	0,67	0,87	0,57	0,61	0,71	0,74	0,83	0,76	0,62	0,55	0,70						00:08
	2	0,67	0,87	0,59	0,66	0,69	0,74	0,83	0,75	0,61	0,55	0,70	97	97	1,00	21	03:36	
Rastgele Orman	1	0,28	0,82	0,45	0,29	0,53	0,53	0,58	0,63	0,53	0,26	0,50						< 1sn
	2	0,24	0,82	0,39	0,25	0,52	0,50	0,60	0,52	0,47	0,27	0,45	4210	2502	0,59	4	< 1sn	
	1	0,37	0,81	0,25	0,34	0,44	0,57	0,61	0,54	0,36	0,34	0,46						< 1sn
Karar Ağacı	2	0,37	0,82	0,21	0,34	0,45	0,55	0,62	0,57	0,36	0,32	0,46	7050	3562	0,51	1	< 1sn	
	1	0,46	0,87	0,39	0,37	0,56	0,58	0,72	0,66	0,56	0,35	0,56						< 1sn
	2	0,46	0,87	0,39	0,37	0,56	0,58	0,72	0,66	0,56	0,35	0,56	1	1	1,00	2	< 1sn	

Tablo 5. %16 etiketli, %74 etiketsiz veri kümesi (16% labeled, 74% unlabeled dataset)

Sınıflandırıcı	VK	F ₁ -Skor											Doğruluk	EA	DEA	DEA/EA	Tekrar	Süre
		blues	classic	country	disco	hip hop	jazz	metal	pop	reggae	rock							
K-En Yakın Komşu	1	0,81	0,85	0,68	0,70	0,71	0,76	0,87	0,81	0,73	0,62	0,75						< 1sn
	2	0,85	0,87	0,68	0,71	0,73	0,79	0,89	0,83	0,77	0,66	0,79	4210	3807	0,90	3	< 1sn	
Ç.K, Yapay Sınır Ağı	1	0,75	0,87	0,58	0,66	0,63	0,75	0,84	0,84	0,70	0,49	0,72						00:01
	2*	0,80	0,90	0,74	0,77	0,70	0,81	0,85	0,87	0,73	0,70	0,79	3880	3766	0,97	2	03:10	
Destek Vektör Makinesi	1	0,38	0,79	0,31	0,25	0,31	0,53	0,60	0,60	0,56	0,26	0,49						00:01
	2	0,38	0,79	0,31	0,25	0,31	0,53	0,60	0,60	0,56	0,26	0,49	145	139	0,96	10	00:19	
XGBoost	1	0,79	0,90	0,71	0,71	0,70	0,77	0,86	0,80	0,68	0,65	0,76						00:05
	2	0,79	0,90	0,68	0,71	0,72	0,78	0,86	0,77	0,73	0,61	0,75	3730	3414	0,92	26	02:51	
Rastgele Orman	1	0,74	0,87	0,65	0,68	0,69	0,76	0,85	0,82	0,71	0,53	0,73						00:16
	2	0,77	0,89	0,63	0,69	0,69	0,77	0,85	0,82	0,74	0,52	0,74	92	91	0,99	17	05:28	
Naive Bayes	1	0,33	0,81	0,41	0,47	0,36	0,56	0,61	0,70	0,48	0,26	0,52						< 1sn
	2	0,29	0,82	0,38	0,33	0,41	0,48	0,63	0,62	0,43	0,28	0,46	3700	2288	0,62	4	< 1sn	
Karar Ağacı	1	0,47	0,72	0,33	0,38	0,50	0,54	0,64	0,59	0,49	0,31	0,49						< 1sn
	2	0,46	0,75	0,35	0,38	0,47	0,49	0,62	0,60	0,45	0,32	0,49	6480	3415	0,53	1	< 1sn	
Lojistik Regresyon	1	0,57	0,86	0,47	0,58	0,50	0,71	0,73	0,69	0,64	0,37	0,62						< 1sn
	2	0,57	0,86	0,47	0,58	0,50	0,71	0,73	0,69	0,64	0,37	0,62	4	4	1,00	2	00:01	

Tablo 6. %32 etiketli, %58 etiketsiz veri kümesi (32% labeled, 58% unlabeled dataset)

Sınıflandırıcı	VK	F ₁ -Skor											Doğruluk	EA	DEA	DEA/EA	Tekrar	Süre
		blues	classic	country	disco	hip hop	jazz	metal	pop	reggae	rock							
K-En Yakın Komşu	1	0,88	0,94	0,77	0,80	0,83	0,81	0,95	0,83	0,88	0,70	0,84						< 1sn
	2	0,88	0,93	0,79	0,80	0,88	0,86	0,94	0,86	0,89	0,73	0,86	3350	3231	0,96	2	< 1sn	
Ç.K, Yapay Sınır Ağı	1	0,73	0,82	0,73	0,69	0,77	0,77	0,87	0,83	0,75	0,54	0,75						03:42
	2*	0,85	0,93	0,80	0,80	0,84	0,87	0,89	0,87	0,81	0,76	0,84	3300	3158	0,96	1	06:48	
Destek Vektör Makinesi	1	0,52	0,88	0,38	0,28	0,49	0,65	0,67	0,64	0,62	0,27	0,56						00:03
	2	0,52	0,88	0,38	0,28	0,49	0,65	0,67	0,64	0,62	0,27	0,56	239	232	0,97	9	00:47	
XGBoost	1	0,81	0,95	0,80	0,78	0,85	0,87	0,92	0,86	0,86	0,70	0,84						00:08
	2	0,82	0,95	0,78	0,77	0,86	0,88	0,92	0,86	0,85	0,74	0,84	2925	2865	0,98	34	04:45	
Rastgele Orman	1	0,81	0,94	0,75	0,75	0,86	0,83	0,88	0,85	0,81	0,65	0,82						00:34
	2	0,80	0,94	0,75	0,75	0,85	0,85	0,88	0,86	0,79	0,68	0,82	108	108	1,00	22	13:56	
Naive Bayes	1	0,37	0,88	0,48	0,41	0,43	0,61	0,62	0,65	0,48	0,34	0,54						< 1sn
	2	0,32	0,87	0,41	0,34	0,41	0,53	0,61	0,59	0,40	0,26	0,48	2899	1737	0,60	22	00:01	
Karar Ağacı	1	0,55	0,81	0,52	0,54	0,59	0,61	0,68	0,71	0,61	0,32	0,59						< 1sn
	2	0,48	0,84	0,45	0,53	0,57	0,68	0,75	0,68	0,60	0,39	0,59	5460	3129	0,57	1	00:01	
Lojistik Regresyon	1	0,56	0,89	0,53	0,55	0,60	0,68	0,77	0,71	0,67	0,42	0,64						< 1sn
	2	0,56	0,89	0,53	0,55	0,60	0,68	0,77	0,71	0,67	0,42	0,64	38	38	1,00	5	00:04	

Tablo 7. Yöntem karşılaştırma tablosu (Method comparison table)

Yöntem	Referans	Hata Oranı	Doğruluk
Tamamı Etiketli	[25]	5,98 ± 0,32	94,02 ± 0,32
Kısmi Etiketli (%4)		31,53 ± 0,52	68,47 ± 0,52
Pseudo-Labeling		33,93 ± 0,69	66,07 ± 0,69
FixMatch		22,09 ± 0,65	77,91 ± 0,65
FlexMatch		21,82 ± 1,17	78,18 ± 1,17
Tamamı Etiketli	Mevcut çalışma	13,00	87,00
Kısmi Etiketli (%4)		44,00	56,00
KKÖ *		38,00	62,00
KKÖ * + Ek Yöntem		36,00	64,00

* KKÖ'nün, ÇKYSA sınıflandırıcı ile birlikte kullanıldığı deneysel çalışmayı gösterir

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] J. E. van Engelen ve H. H. Hoos, “A survey on semi-supervised learning”, *Mach Learn*, c. 109, sy 2, ss. 373-440, Şub. 2020, doi: 10.1007/s10994-019-05855-6.
- [2] M.-R. Amini, V. Feofanov, L. Pauletto, E. Devijver, ve Y. Maximov, “Self-Training: A Survey”. arXiv, 15 Şubat 2023. <http://arxiv.org/abs/2202.12040>
- [3] X. Zhu, “Semi-Supervised Learning Literature Survey”, *Comput Sci, University of Wisconsin-Madison*, c. 2, Tem. 2008.
- [4] O. Chapelle, B. Schölkopf, ve A. Zien, Ed., *Semi-supervised learning*. içinde Adaptive computation and machine learning series. Cambridge, Mass. [u.a]: MIT Press, 2010.
- [5] Ke Chen ve Shihai Wang, “Semi-Supervised Learning via Regularized Boosting Working on Multiple Semi-Supervised Assumptions”, *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, c. 33, sy 1, ss. 129-143, Oca. 2011, doi: 10.1109/TPAMI.2010.92.
- [6] I. Triguero, S. García, ve F. Herrera, “Self-labeled techniques for semi-supervised learning: taxonomy, software and empirical study”, *Knowl Inf Syst*, c. 42, sy 2, ss. 245-284, Şub. 2015, doi: 10.1007/s10115-013-0706-y.
- [7] O. Chapelle ve A. Zien, “Semi-supervised classification by low density separation”, içinde *International workshop on artificial intelligence and statistics*, PMLR, 2005, ss. 57-64.
- [8] K. Bennett ve A. Demiriz, “Semi-supervised support vector machines”, *Advances in Neural Information processing systems*, c. 11, 1998.
- [9] S. Fralick, “Learning to recognize patterns without a teacher”, *IEEE Trans. Inform. Theory*, c. 13, sy 1, ss. 57-64, Oca. 1967, doi: 10.1109/TIT.1967.1053952.
- [10] A. Blum ve T. Mitchell, “Combining labeled and unlabeled data with co-training”, içinde *Proceedings of the eleventh annual conference on Computational learning theory*, Madison Wisconsin USA: ACM, Tem. 1998, ss. 92-100. doi: 10.1145/279943.279962.
- [11] Q. Xie, M.-T. Luong, E. Hovy, ve Q. V. Le, “Self-training with Noisy Student improves ImageNet classification”. arXiv, 19 Haziran 2020. <http://arxiv.org/abs/1911.04252>
- [12] G. Karamanolakis, S. Mukherjee, G. Zheng, ve A. H. Awadallah, “Self-Training with Weak Supervision”. arXiv, 12 Nisan 2021. <http://arxiv.org/abs/2104.05514>
- [13] G. Tzanetakis, “Automatic Musical Genre Classification of Audio Signals.”, Oca. 2001.
- [14] C. Rosenberg, M. Hebert, ve H. Schneiderman, “Semi-supervised self-training of object detection models”, 2005.
- [15] N. Kamal, M. Andrew, ve M. Tom, “Semi-Supervised Text Classification Using EM”, içinde *Semi-Supervised Learning*, O. Chapelle, B. Scholkopf, ve A. Zien, Ed., The MIT Press, 2006, ss. 32-55. doi: 10.7551/mitpress/9780262033589.003.0003.
- [16] G. Tur, D. Hakkani-Tür, ve R. E. Schapire, “Combining active and semi-supervised learning for spoken language understanding”, *Speech Communication*, c. 45, sy 2, ss. 171-186, Şub. 2005, doi: 10.1016/j.specom.2004.08.002.
- [17] D.-H. Lee, “Pseudo-Label: The Simple and Efficient Semi-Supervised Learning Method for Deep Neural Networks”, *ICML 2013 Workshop: Challenges in Representation Learning (WREPL)*, Tem. 2013.
- [18] Y. Zou, Z. Yu, B. V. K. V. Kumar, ve J. Wang, “Domain Adaptation for Semantic Segmentation via Class-Balanced Self-Training”, 2018, doi: 10.48550/ARXIV.1810.07911.
- [19] P. Cascante-Bonilla, F. Tan, Y. Qi, ve V. Ordonez, “Curriculum Labeling: Revisiting Pseudo-Labeling for Semi-Supervised Learning”. arXiv, 10 Aralık 2020. <http://arxiv.org/abs/2001.06001>
- [20] K. Sohn vd., “FixMatch: Simplifying Semi-Supervised Learning with Consistency and Confidence”. arXiv, 25 Kasım 2020. <http://arxiv.org/abs/2001.07685>
- [21] P. Yilmaz, Ş. Akçakaya, Ş. D. Özkaya, ve A. ÇetiN, “Machine Learning Based Music Genre Classification and Recommendation System”, *ECJSE*, Ara. 2022, doi: 10.31202/ecjse.1209025.
- [22] S. Sigtia ve S. Dixon, “Improved music feature learning with deep neural networks”, içinde *2014 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, Florence, Italy: IEEE, May. 2014, ss. 6959-6963. doi: 10.1109/ICASSP.2014.6854949.
- [23] V. Kiranoglu, G. Tüysüzoğlu, ve E. Öztürk Kiyak, “Prediction of Crime Occurrence in case of Scarcity of Labeled Data”, *Deu Muhendislik Fakultesi Fen ve Muhendislik*, c. 23, sy 68, ss. 677-687, May. 2021, doi: 10.21205/deufmd.2021236828.
- [24] I. Triguero, J. A. Sáez, J. Luengo, S. García, ve F. Herrera, “On the characterization of noise filters for self-training semi-supervised

- in nearest neighbor classification”, *Neurocomputing*, c. 132, ss. 30-41, May. 2014, doi: 10.1016/j.neucom.2013.05.055.
- [25] Y. Wang vd., “USB: A Unified Semi-supervised Learning Benchmark for Classification”. arXiv, 13 Ekim 2022. <http://arxiv.org/abs/2208.07204>
- [26] B. Zhang vd., “FlexMatch: Boosting Semi-Supervised Learning with Curriculum Pseudo Labeling”. arXiv, 28 Ocak 2022. <http://arxiv.org/abs/2110.08263>
- [27] B. Zoph vd., “Rethinking Pre-training and Self-training”. arXiv, 15 Kasım 2020. <http://arxiv.org/abs/2006.06882>
- [28] M. Li ve Z.-H. Zhou, “SETRED: Self-training with Editing”, içinde *Advances in Knowledge Discovery and Data Mining*, c. 3518, T. B. Ho, D. Cheung, ve H. Liu, Ed., içinde Lecture Notes in Computer Science, vol. 3518. , Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2005, ss. 611-621. doi: 10.1007/11430919_71.
- [29] Y. Zou, Z. Yu, X. Liu, B. V. K. V. Kumar, ve J. Wang, “Confidence Regularized Self-Training”. arXiv, 15 Temmuz 2020. <http://arxiv.org/abs/1908.09822>
- [30] A. Krizhevsky, G. Hinton, ve others, “Learning multiple layers of features from tiny images”, 2009.
- [31] H. Schmutz, O. Humbert, ve P.-A. Mattei, “Don’t fear the unlabelled: safe semi-supervised learning via simple debiasing”. arXiv, 03 Mart 2023. <http://arxiv.org/abs/2203.07512>
- [32] A. Olteanu, “GTZAN Dataset-Music Genre Classification. Kaggle. com (2019)”. <https://www.kaggle.com/datasets/andradaolteanu/gtzan-dataset-music-genre-classification>
- [33] T. Hastie, J. Friedman, ve R. Tibshirani, *The Elements of Statistical Learning*. içinde Springer Series in Statistics. New York, NY: Springer New York, 2001. doi: 10.1007/978-0-387-21606-5.
- [34] T. Cover ve P. Hart, “Nearest neighbor pattern classification”, *IEEE Trans. Inform. Theory*, c. 13, sy 1, ss. 21-27, Oca. 1967, doi: 10.1109/TIT.1967.1053964.
- [35] B. Charbuty ve A. Abdulazeez, “Classification Based on Decision Tree Algorithm for Machine Learning”, *JASTT*, c. 2, sy 01, ss. 20-28, Mar. 2021, doi: 10.38094/jastt20165.
- [36] S. J. Rigatti, “Random Forest”, *Journal of Insurance Medicine*, c. 47, sy 1, ss. 31-39, Oca. 2017, doi: 10.17849/in-sm-47-01-31-39.1.
- [37] M. Belgiu ve L. Drăguț, “Random forest in remote sensing: A review of applications and future directions”, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, c. 114, ss. 24-31, Nis. 2016, doi: 10.1016/j.isprsjprs.2016.01.011.
- [38] T. Chen ve C. Guestrin, “XGBoost: A Scalable Tree Boosting System”, Mar. 2016.
- [39] D. Mustafa Abdullah ve A. Mohsin Abdulazeez, “Machine Learning Applications based on SVM Classification A Review”, *QAJ*, c. 1, sy 2, ss. 81-90, Nis. 2021, doi: 10.48161/qaj.v1n2a50.
- [40] M. Maalouf, “Logistic regression in data analysis: an overview”, *IJDATS*, c. 3, sy 3, s. 281, 2011, doi: 10.1504/IJDATS.2011.041335.
- [41] J. Zou, Y. Han, ve S.-S. So, “Overview of Artificial Neural Networks”, içinde *Artificial Neural Networks*, c. 458, D. J. Livingstone, Ed., içinde *Methods in Molecular Biology™*, vol. 458. , Totowa, NJ: Humana Press, 2008, ss. 14-22. doi: 10.1007/978-1-60327-101-1_2.
- [42] Nart Sooksil ve Vacharapoom Benjaoran, “Non-linear modelling of construction workers’ behaviors for accident prediction”, *Songklanakarin Journal of Science and Technology (SJST)*, c. 43, s. 596602, 2021, doi: 10.14456/SJST-PSU.2021.80.

Robot Tutucu Problemi için Çok Stratejili Aritmetik Optimizasyon Algoritması

Mustafa Yusuf YILDIRIM^{1*}, Rüştü AKAY²

¹Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü, Niğde

²Erciyes Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü, Kayseri

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 31/10/2023
Düzeltilme: 19/12/2023
Kabul: 25/12/2023

Anahtar Kelimeler

Robot Tutucu
Aritmetik
Optimizasyon
Çoklu-Strateji
Metasezgisel

Article Info

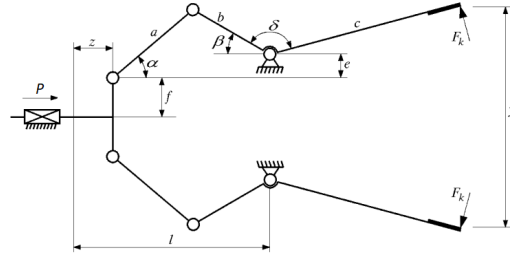
Research article
Received: 31/10/2023
Revision: 19/12/2023
Accepted: 25/12/2023

Keywords

Robot Gripper
Arithmetic
Optimization
Multi-Strategy
Metaheuristic

Grafik Özet (Graphical/Tabular Abstract)

Bu çalışmada, Aritmetik Optimizasyon Algoritmasının (AOA) orijinal güncelleme denkleminin değiştirildiği ve çoklu strateji konseptinin eklendiği yeni bir algoritma önerilmektedir. Önerilen algoritma, robot tutucu probleminde AOA ve diğer güncel algoritmalarından daha iyi performans göstermiştir. / In this study, a new algorithm is proposed in which the original update equation of Arithmetic Optimization Algorithm (AOA) is modified and the multi-strategy concept is added. The proposed algorithm outperformed AOA and other state-of-the-art algorithms in robot gripper problem.



Şekil A: Robot tutucu modeli / Figure A: A robot gripper model

Önemli noktalar (Highlights)

- Keşif-kullanım dengesine odaklanmış bir güncelleme modifikasyonu / An update modification focused on exploration-exploitation balance
- Kendi kendine uyarlanabilir çoklu strateji konsepti / Self-adaptive multi-strategy concept
- Robot tutucu probleminde kayda değer iyileşme / Significant improvement in robot gripper problem

Amaç (Aim): Bu çalışmanın amacı, endüstriyel sistemlerde kullanılan robot tutucularının tasarım optimizasyonunu ele almak ve nesnelerin en az manevrayla ve zarar vermeden tutulabilmesine yönelik bir çözüm sunmaktır. / The aim of this study is to discuss design optimization of robot grippers used in industrial systems and to propose a method to hold objects without damaging them and with minimal maneuvering.

Özgünlük (Originality): Bu çalışmanın özgünlüğü, matematik esinli bir metasezgisel olan AOA'nın arama performansını iyileştirmek için Çok Stratejili Aritmetik Optimizasyon Algoritması (ÇSAOA) adında yeni bir algoritma önerilmesidir. ÇSAOA, farklı bir güncelleme mekanizmasının eklenmesi ve en iyi güncelleme stratejisine odaklanmasıyla kendinden uyarlanabilen bir yapıya sahiptir. / The originality of this study is that a new algorithm called Multi-Strategy Arithmetic Optimization Algorithm (MSAOA) is proposed to improve search performance of AOA, a mathematics-inspired metaheuristic. MSAOA has a self-adaptive structure by adding a different update mechanism and focusing on the best update strategy.

Bulgular (Results): ÇSAOA robot tutucu probleminde, orijinal AOA'ya göre hem performans hem de hesaplama süresi açısından daha iyi sonuçlar elde etmiştir. Ayrıca önerilen algoritma literatürdeki diğer güncel algoritmalarla karşılaştırıldığında da en performanslı yöntem olmuştur. / MSAOA achieved better results in terms of both performance and computation time in the robot gripper problem than original AOA. In addition, the proposed algorithm was the most performant method when compared to other state-of-the-art algorithms in the literature.

Sonuç (Conclusion): ÇSAOA robot tutucuların nesnelerin en az manevrayla ve zarar vermeden tutulabilmesine yönelik etkili bir yöntemdir. Bu çalışma, endüstriyel robotik sistemlerde kullanılan robot tutucularının tasarımında değerli bir katkı sağlamaktadır. / MSAOA is an effective method for robot grippers to grip objects without damaging them and with minimal maneuvering. This study makes a valuable contribution to design of robot grippers used in industrial robotic systems.



Robot Tutucu Problemi için Çok Stratejili Aritmetik Optimizasyon Algoritması

Mustafa Yusuf YILDIRIM^{1*}, Rüştü AKAY²

¹ Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü, ORCID:0000-0003-0302-8466, 51240, Niğde

²Erciyes Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü, ORCID:0000-0002-3585-3332, 38030, Kayseri

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 31/10/2023
Düzeltilme: 19/12/2023
Kabul: 25/12/2023

Anahtar Kelimeler

Robot Tutucu
Aritmetik
Optimizasyon
Çoklu-Strateji
Metahezigisel

Öz

Günümüzde endüstriyel sistemlerde nesnelerin kavranması, taşınması ve sabitlenmesi için kullanılan robot tutucular önemli araçlar olarak öne çıkmaktadır. Özellikle robotik sistemlerde, bir nesneyi en az manevrayla zarar vermeden tutabilme yeteneği büyük önem taşımaktadır. Bundan dolayı, son yıllarda robot tutucularının tasarım optimizasyonu ilgi çeken bir araştırma konusu haline gelmiştir. Bu çalışmada bu tasarım problemi için Aritmetik Optimizasyon Algoritması (AOA) iyileştirilmiş ve Çok Stratejili Aritmetik Optimizasyon Algoritması (ÇSAOA) adında yeni bir algoritma önerilmiştir. Bu algorithmada hem orijinal AOA'nın güncelleme mekanizmasını modifiye edilmiş, hem de farklı bir güncelleme mekanizması eklenilerek kendinden uyarlanabilen bir algoritma haline getirilmiştir. Bu yaklaşım, en iyi güncelleme stratejisine odaklanarak problemi daha verimli bir şekilde çözmeye olanak sağlamıştır. ÇSAOA, robot tutucu problemine uygulandığında, orijinal algorithmaya göre hem performans hem de hesaplama süresi açısından daha iyi sonuçlar ürettiği gözlemlenmiştir. Ayrıca, bu yeni algoritma literatürdeki diğer benzer algoritmalarla karşılaştırılmış ve önerilen ÇSAOA'nın daha performanslı algoritma olduğu görülmüştür.

Multi-Strategy Arithmetic Optimization Algorithm for Robot Gripper Problem

Article Info

Research article
Received: 31/10/2023
Revision: 19/12/2023
Accepted: 25/12/2023

Keywords

Robot Gripper
Arithmetic
Optimization
Multi-Strategy
Metaheuristic

Abstract

Today, robot grippers used for grasping, moving and fixing objects in industrial systems stand out as important tools. Especially in robotic systems, the ability to hold an object without damaging it with minimal maneuvering is of great importance. Therefore, the design optimization of robot grippers has become an interesting research topic in recent years. In this study, Arithmetic Optimization Algorithm (AOA) has been improved for this design problem and a new algorithm called Multi-Strategy Arithmetic Optimization Algorithm (MSAOA) has been proposed. In this algorithm, the update mechanism of original AOA was modified and a different update mechanism was added, making it a self-adaptive algorithm. This approach allowed solving the problem more efficiently by focusing on the best update strategy. When MSAOA was applied to the robot gripper problem, it was observed that it produced better results in terms of both performance and calculation time compared to the original algorithm. Additionally, this new algorithm was compared with other similar algorithms in the literature and it was found that the proposed MSAOA was the most performant algorithm.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Tutucular, bir nesnenin kavranacağı taşıyıcı araç ile arasında kritik bir bağlantı sağlayan alt sistemler olarak işlev görür. Bu bağlantı, nesnenin taşıyıcı araca göre konumunun belirlenmesi ve değiştirilmesi gibi önemli işlemlerde hayati bir rol oynar. Robotik teknolojide tutucular, işlevsellik açısından oldukça çeşitlilik gösteren temel birimler

arasında yer alır. Bu durum, robotların esnek makineler olmalarına karşın, tutucuların belirgin ve özelleştirilmiş görevleri üstlenmelerinden kaynaklanmaktadır. Bu bağlamda, farklı ihtiyaçlara uyum sağlama ve güvenilir sistemler oluşturma arzusu, robot tutucu tasarımının giderek artan bir önem kazanmasına sebep olmaktadır. Robot uygulamalarında kullanılan tutucular, sadece montaj ve kaynak işlemleri gibi temel görevlerle

sınırlı kalmazlar; parçaların taşınmasından yüksek sıcaklıklı kaynak operasyonlarına, radyoaktif maddelerin güvenli bir şekilde tutulmasına, bombaların güvenli patlatılmasına ve hatta mayınların veya gemi enkazlarının araştırılmasına kadar geniş bir yelpazede kullanılırlar. Bu mekanizmalar, iş parçalarını sadece kavramakla kalmaz, aynı zamanda onların konumlarını değiştirebilir ve istenen yönde hareket ettirebilirler. Ek olarak bu sistemler, sistemin içinde herhangi bir parçanın varlığını belirten algılayıcıları da içerebilirler. Bu nedenlerden dolayı, iyi bir tutucu tasarımı robotik sistemlere büyük katkı sağlar. Bu tasarım süreci hafiflik, küçük boyutlar, rijitlik, çoklu görev yeteneği, basitlik ve bakım gerektirmeme gibi güçlü kısıtlamaları dikkate alınmalıdır [1,2].

Optimizasyon çalışmalarının artan önemi ile birlikte, robotik araştırma alanlarında nesnelere kavranması ilgi çekici bir araştırma konusu olmuştur. Özellikle robotik sistemlerde robot tutucuların, nesneye zarar vermeden etkili bir şekilde kavrama yeteneği, robot tasarımında dikkate alınması gereken önemli optimizasyon problemlerinden biri haline gelmiştir. Tutucu tasarım optimizasyonuna yönelik literatürde çeşitli güncel çalışmalar yapılmıştır. Yıldız vd. çekirge optimizasyon algoritması ve Nelder-Mead algoritmasının bir hibrit versiyonunu önermişlerdir. Yazarlar, hızlı ve doğru çözümler gerektiren bir robot tutucu mekanizması tasarlamayı amaçlamıştır. Ancak bu yeni yöntem, avantajlarını göstermek amacıyla bir araç yan çarpma tasarım problemi, çoklu kavrama disk problemi ve üretim optimizasyon problemini çözmek için de kullanılmıştır. Geliştirilen yöntem gerçek dünya mühendislik problemlerini etkili bir şekilde çözebilecek temel bir optimizasyon yaklaşımı olarak ortaya konmuştur [3]. Rao vd. maksimum ve minimum kavrama kuvvetleri arasındaki fark, kuvvet iletim oranı, kaydırma iletim oranı, tutucunun tüm elemanlarının uzunluğu gibi tutucuya ait farklı uygunluk fonksiyonlarını bir arada ele almışlar ve öğrenme-öğretme tabanlı algoritmayı uygulamışlardır. Bu algoritma, literatürdeki diğer optimizasyon algoritmalarına göre daha iyi veya rekabetçi sonuçlar vermiştir [4]. Datta vd. eyleyici modelinin entegre edildiği daha gerçekçi bir tutucu modeli kullanmışlardır. Burada çok amaçlı evrimsel algoritma robot tutucunun boyutları ve eklemlerinin açısı gibi tasarım değişkenlerini en iyi şekilde bulmak için uygulanmıştır. [5]. Mahanta vd. otomatik malzeme taşıma işlemlerinde optimum bir robot tutucunun konfigürasyonunun bulunmasına yönelik çok amaçlı karınca aslanı optimizasyon algoritması

adında yeni bir yöntem önermişlerdir. Çalışmada, bu algoritma kullanılarak üç farklı robotik tutucunun optimum boyutları belirlenmiştir. [6]. Dong vd. 22 tasarım değişkeni içeren üç parmağa sahip iki robot tutucunun optimum tasarımına odaklanmışlardır. Bu tasarım değişkenleri üç parmağın uzunluğu ve genişliği, üç eklemin yarıçapı, avuç genişliği gibi parametreleri içerir. Yazarlar üç uygunluk fonksiyonu ve çok sayıda geometrik kısıtlama içeren bu modelin optimizasyonu için genetik algoritmayı uygulamışlardır [7]. Zhong vd. bal porsuğu algoritmasını Lévy tabanlı bir iyileştirme ekleyerek geliştirmişler ve orijinal algoritmanın optimizasyon performansını artırmışlardır. Bu önerilen algoritma önce CEC2020 problemlerinde ve sonra da robot tutucu tasarım problemine başarıyla uygulanmıştır [8]. Dörterler vd. robot tutucu probleminde parçacık sürü optimizasyonu, yapay alg algoritması ve gri kurt optimizasyonu gibi birkaç metasezgisel algoritmanın çok amaçlı formunu kullanmışlardır. İki farklı robot tutucu konfigürasyonunda, uygulanan algoritmaların performansları pareto-ön eğriler ve hiper hacim metrikleri kullanılarak incelenmiştir [9]. Baskın olmayan sıralamalı genetik algoritmaların [10,11,12] ve topoloji optimizasyonunun [13,14,15] kullanıldığı çalışmalar da mevcuttur.

Literatüre göre, robot tutucu probleminin bazı metasezgisel algoritmalarla çözümlenmesine yönelik çalışmalar olsa da, matematik esinli ve güncel metasezgisellerin bu problem için kullanılmasına yönelik çalışmalara sık rastlanmamaktadır. Bu çalışmanın katkısı son zamanlarda geliştirilen ve matematik esinli bir metasezgisel olan Aritmetik Optimizasyon Algoritması'nın arama performansını geliştirmek için Çok Stratejili Aritmetik Optimizasyon Algoritması adında yeni bir algoritma önerilmesi ve bu algoritmanın robot tutucu problemine uygulanmasıdır. Çalışmada önerilen algoritmanın hem orijinal algoritmayla hem de literatürdeki benzer algoritmalarla performanslarının karşılaştırılması amaçlanmıştır.

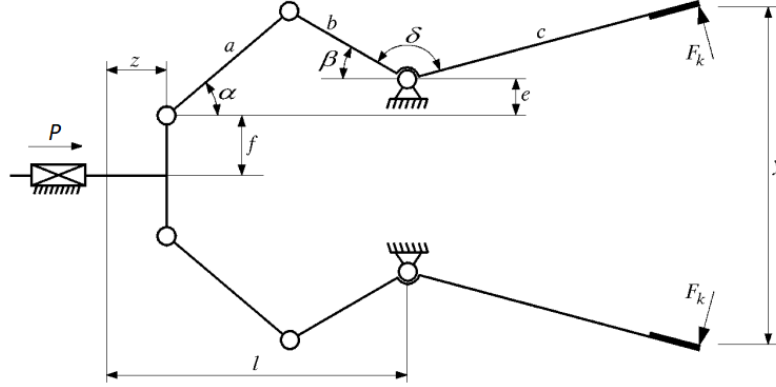
Çalışmanın bölümleri şu şekilde özetlenebilir: İkinci bölüm materyal ve metot bölümüdür. Burada problem tanımı, orijinal ve iyileştirilmiş algoritmadan bahsedilmektedir. Üçüncü bölümde simülasyon verileri ve bulgulara yer verilmiştir. Dördüncü bölüm ise sonuçtur.

2. MATERYAL VE METOD (MATERIALS AND METHODS)

Bu başlıkta robot tutucu problem tanımı, ardından orijinal AOA ve önerilen ÇSAOA algoritmalarından bahsedilmektedir.

2.1. Problem Tanımı (Problem Definition)

Bu çalışmada [16]'de sunulan ve Şekil 1'de gösterilen robot tutucu modeli kullanılmıştır.



Şekil 1. Robot tutucu modeli (The robot gripper model)

Bu tutucu modelinde 7 değişken mevcuttur, bu durumda problem boyutu 7'dir. Denklem 1'de gösterilen bu değişkenler tutucunun fiziksel özelliklerini tanımlar.

$$X = [a, b, c, e, f, l, \delta]^T \quad (1)$$

Burada a, b, c, e, f ve l tutucunun farklı bileşenlerinin boyutlarını temsil etmektedir. Tasarımın bu boyutlara göre şekillendirilmesi gerekmektedir. δ, b ve c uzunlukları arasındaki açıdır ve bu açı tutucunun hareket kabiliyetini etkiler. α ve β, b ve c uzunluklarının yatay referans açılarıdır. Bu açılar, tutucunun nesnelere hangi açılarda yakalayabileceğini belirler. P tutucunun eyleyici kuvvetidir ve tutucunun çalışması için gereken itme veya çekme kuvvetini ifade eder. Tutucunun bir nesneyi kavrama veya taşıma kapasitesi üzerinde önemli bir etkisi vardır. F_k ise nesneye uygulanan kavrama kuvvetidir ve Denklem 2'deki gibi hesaplanır.

$$F_k = \frac{P \cdot b \cdot \sin(\alpha + \beta)}{2 \cdot c \cdot \cos(\alpha)} \quad (2)$$

Bu eşitlikteki parametreler Denklem 3-6'da gösterilmiştir.

$$\alpha = \cos^{-1} \left(\frac{a^2 + g^2 - b^2}{2ag} \right) + \phi \quad (3)$$

$$\alpha = \cos^{-1} \left(\frac{a^2 + g^2 - b^2}{2ag} \right) + \phi \quad (4)$$

$$g = \sqrt{e^2 + (l - z)^2} \quad (5)$$

$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{e}{l - z} \right) \quad (6)$$

Bu çalışmada Şekil 1'deki modelin ilk konfigürasyonuna odaklanılmıştır. Bu konfigürasyonun hedefi, tutulacak nesneyi sabit ve sıkı bir şekilde kavramaktır. Bu da, kavrama kuvvetinin (F_k) maksimum ve minimum değerleri arasındaki farkın minimizasyonu ile sağlanır. Bu minimizasyon Denklem 7'deki uygunluk fonksiyonu ile ifade edilir [17].

$$\min_x f(x) = \max_z F_k(x, z) - \min_z F_k(x, z) \quad (7)$$

Ayrıca bu modelde tasarım değişkeniyle ilişkili ve Denklem 8-14'te gösterilen 7 eşitsizlik kısıtlaması vardır.

$$g_1(x) = Y_{min} - y(x, Z_{max}) \geq 0 \quad (8)$$

$$g_2(x) = y(x, Z_{max}) \geq 0 \quad (9)$$

$$g_3(x) = y(x, 0) - Y_{max} \geq 0 \quad (10)$$

$$g_4(x) = Y_G - y(x, 0) \geq 0 \quad (11)$$

$$g_5(x) = (a + b)^2 - l^2 - e^2 \geq 0 \quad (12)$$

$$g_6(x) = (l - Z_{max})^2 + (a - e)^2 - b^2 \geq 0 \quad (13)$$

$$g_7(x) = l - Z_{max} \geq 0 \quad (14)$$

Burada genel $y(x, z)$ fonksiyonu tutucunun iki ucu arasındaki mesafeyi temsil eder ve Denklem 15'teki gibi hesaplanır.

$$y(x, z) = 2 \cdot (e + f + c \cdot \sin(\beta + \delta)) \quad (15)$$

Y_{min} ve Y_{max} tutulacak nesnenin minimum ve maksimum boyutu, Z_{max} eyleyicinin maksimum

yer değiştirmesi, Y_G ise tutucunun maksimum yer değiştirme aralığıdır.

2.2. Orijinal Aritmetik Optimizasyon Algoritması (Original Arithmetic Optimization Algorithm)

Aritmetik Optimizasyon Algoritması (AOA), 2021 yılında Abualigah vd. tarafından geliştirilen matematik tabanlı bir optimizasyon algoritmadır [18]. Bu algoritma, matematiksel hesaplamaların temelini oluşturan aritmetik işlemlerin dağılım özelliklerini taklit etmek amacıyla tasarlanmıştır. AOA, aritmetik işlemlere dayalı olarak çalışan bir yapıya sahiptir ve bu işlemler toplama, çıkarma, çarpma ve bölme işlemlerini içerir. Bu algoritma, birçok metasezgisel algoritma gibi, arama sürecini keşif ve kullanım olmak üzere iki temel aşamada gerçekleştirir. Keşif aşamasında, aday çözümlerin pozisyonları çarpma ve bölme işlemleri temel alınarak güncellenir. Bu, farklı ve çeşitli çözüm adayları üretmeye ve arama uzayını keşfetmeye yardımcı olur. Kullanım aşaması ise daha iyi çözümlere ulaşmak ve bu çözümleri iyileştirmek için toplama ve çıkartma işlemleri ile ilgilendir. Algoritmanın işleyişi şu şekildedir: Öncelikle rastgele bir başlangıç popülasyonu Denklem 16'daki gibi üretilir.

$$x = LB + (UB - LB).rand(p, d) \quad (16)$$

Burada x başlangıç popülasyonu, LB ve UB problemin sınır değerleri, p popülasyon sayısı ve d problem boyutudur. İteratif süreç başlamadan önce bu başlangıç popülasyonu uygunluk fonksiyonunda değerlendirilir. İteratif süreç başladığında ise matematik optimizasyon hızlandırıcı (math optimizer accelerated, MOA) ve matematik optimizasyon olasılığı (math optimizer probability, MOP) olmak üzere iki fonksiyon sırasıyla Denklem 17 ve 18'deki gibi hesaplanır.

$$MOA(t) = MOA_{min} + t \left(\frac{MOA_{max} - MOA_{min}}{T} \right) \quad (17)$$

$$MOP(t) = 1 - \frac{t^{1/\alpha}}{T^{1/\alpha}} \quad (18)$$

Burada MOA_{min} ve MOA_{max} hızlandırıcı fonksiyonun sınır değerleri, t mevcut iterasyon, T toplam iterasyon sayısı ve α kullanım doğruluğunu tanımlayan bir parametredir. MOA ve MOP fonksiyonları hesaplandıktan sonra her aday çözüm ve her boyut için $[0, 1]$ aralığında rassal bir sayı (r_1) belirlenir. Bu sayı mevcut iterasyondaki MOA değerinden büyükse keşif aşaması devreye girer ve aday çözümler Denklem 19'daki gibi güncellenir.

$$x_{i,j}^{t+1} = \begin{cases} x_{best,j}^t / (MOP + \epsilon) \cdot ((UB_j - LB_j) \cdot \mu + LB_j), & r_2 < 0.5 \\ x_{best,j}^t \cdot MOP \cdot ((UB_j - LB_j) \cdot \mu + LB_j), & r_2 \geq 0.5 \end{cases} \quad (19)$$

Burada $x_{i,j}^{t+1}$ i. çözümün j. boyutunun güncel değeri, $x_{best,j}^t$ j. boyutun mevcut optimum değeri, ϵ küçük bir tamsayı değeri, μ arama sürecini ayarlayan bir kontrol parametresi, r_2 $[0, 1]$ aralığında rassal bir sayı, UB_j ve LB_j ise problemin j. boyutunun sınır değerleridir. Eğer r_1 rassal sayısı mevcut iterasyondaki MOA değerinden küçükse kullanım aşaması devreye girer ve aday çözümler Denklem 20'deki gibi güncellenir.

$$x_{i,j}^{t+1} = \begin{cases} x_{best,j}^t - (MOP + \epsilon) \cdot ((UB_j - LB_j) \cdot \mu + LB_j), & r_3 < 0.5 \\ x_{best,j}^t + MOP \cdot ((UB_j - LB_j) \cdot \mu + LB_j), & r_3 \geq 0.5 \end{cases} \quad (20)$$

Burada r_3 $[0, 1]$ aralığında rassal bir sayıdır. Güncel aday çözümler uygunluk fonksiyonunda tekrar değerlendirilir ve bu adımlar sonlandırma kriteri sağlanana kadar devam eder [19].

2.3. Çok Stratejili Aritmetik Optimizasyon Algoritması (Multi-Strategy Arithmetic Optimization Algorithm)

2.3.1. Orijinal güncelleme stratejilerinin modifiyesi (Modification of original update strategies)

Bu çalışmada Çok Stratejili Aritmetik Optimizasyon Algoritması (ÇSAOA) adında yeni bir algoritma önerilmiştir. Bu algoritmada orijinal AOA'nın arama performansını iyileştirmek için hem keşif hem de kullanım aşamasının dengesine odaklanılmış ve buna göre güncelleme stratejisi modifiye edilmiştir. Böylece orijinal algoritmanın güncelleme stratejisinde sadece optimum değere yakınsama sağlanırken, önerilen algoritmada optimum değere ek olarak hem mevcut değer de hesaba katılmış hem de rassallık artırılmıştır. Bu algoritmada r_1 rassal sayısı mevcut iterasyondaki MOA değerinden büyükse keşif aşaması devreye girer ve çözümler Denklem 21'deki gibi güncellenir.

$$x_{i,j}^{t+1} = \begin{cases} x_{i,j}^t / (MOP + \epsilon) \cdot ((UB_j - LB_j) \cdot \mu + LB_j) + rand(0,1) \cdot (x_{best,j}^t - x_{i,j}^t), & r_2 < 0.5 \\ x_{i,j}^t \cdot MOP \cdot ((UB_j - LB_j) \cdot \mu + LB_j) + rand(0,1) \cdot (x_{best,j}^t - x_{i,j}^t), & r_2 \geq 0.5 \end{cases} \quad (21)$$

Burada $x_{i,j}^{t+1}$ i. çözümün j. boyutunun güncel değeri, $x_{i,j}^t$ i. çözümün j. boyutunun mevcut değeri, $x_{best,j}^t$ j. boyutun mevcut optimum değeridir. Eğer r_1 rassal sayısı mevcut iterasyondaki MOA değerinden küçükse kullanım aşaması devreye girer ve çözümler Denklem 22'deki gibi güncellenir.

$$x_{i,j}^{t+1} = \begin{cases} x_{i,j}^t - (MOP + \epsilon) \cdot ((UB_j - LB_j) \cdot \mu + LB_j) + rand(0,1) \cdot (x_{best,j}^t - x_{i,j}^t), & r_2 < 0.5 \\ x_{i,j}^t + MOP \cdot ((UB_j - LB_j) \cdot \mu + LB_j) + rand(0,1) \cdot (x_{best,j}^t - x_{i,j}^t), & r_2 \geq 0.5 \end{cases} \quad (22)$$

2.3.2. Çoklu strateji konsepti (Multi-Strategy concept)

Çoğu metasezgisel algoritma bir popülasyon içindeki aday çözümleri aynı güncelleme stratejisiyle günceller ve sürecin sonunda en iyi

çözümü seçer. Ancak, tek tip bir güncelleme stratejisi kullanmak algoritmanın arama performansını sınırlayabilir [20]. AOA da bu algoritmalarından biridir ve bu problemin üstesinden gelmek için algoritmaya çoklu strateji konsepti eklenmiştir. Bu konsept, popülasyondaki her aday çözümün kendini güncellerken farklı stratejileri kullanmasına olanak sağlar. Bu çalışma için eklenen güncelleme stratejisi Denklem 23'te gösterilmektedir.

$$x_{i,j}^{t+1} = \begin{cases} x_{R_1,j}^t + F(x_{R_2,j}^t - x_{R_3,j}^t), & \text{rand} < CR \\ x_{i,j}^t, & \text{rand} \geq CR \end{cases} \quad (23)$$

Burada, $x_{R_1,j}^t$, $x_{R_2,j}^t$ ve $x_{R_3,j}^t$ popülasyondaki i . çözümden farklı rastgele aday çözümlerin j . boyutu, F skala faktörü ve CR ise çaprazlama oranıdır. Böylece iki güncelleme stratejisinin olduğu bir strateji havuzu oluşmuştur. Başlangıçta her stratejinin seçilme olasılığı eşit olup %50 olarak ayarlanır. İteratif süreçte her aday çözüm rulet çarkı tekniğini kullanarak kendi stratejisini seçer. Böylece aday çözümler kendi stratejileri kullanılarak kendilerini günceller ve bu stratejilerin seçim sayacıları da güncellenir. Güncelleme sonrası yeni popülasyon uygunluk fonksiyonunda değerlendirilir ve her stratejinin olasılığı Denklem 24'teki gibi hesaplanır.

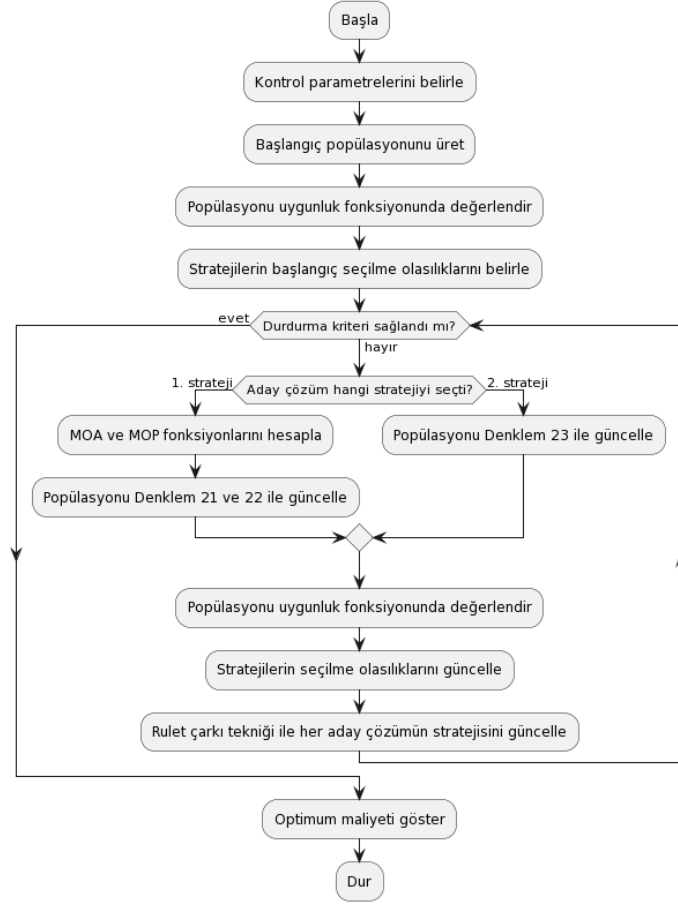
$$p_k^{t+1} = \frac{c_k^t}{\sum_{i=1}^2 c_i^t}, k \in \{1,2\} \quad (24)$$

Burada p_k^{t+1} k . stratejinin güncel seçilme olasılığı ve c_k^t k . stratejinin mevcut seçim sayacıdır. Bu olasılıklara göre aday çözümler yine rulet çarkı tekniğini kullanarak kendi stratejilerini tekrar seçer, bu şekilde iteratif süreç devam eder. Böylece algoritma hangi stratejinin daha iyi sonuçlar ürettiğini öğrenir ve bu stratejiyi daha sık kullanır. Bu yaklaşım, farklı stratejilerin adaptasyonunu içerdiği için, farklı optimizasyon problemlerine daha iyi uyum sağlayabilir ve daha tatmin edici

sonuçlar üretebilir. Bu sayede, optimizasyon işlemlerinde daha esnek ve etkili bir yol sunar. ÇSAOA'nın temel adımları Algoritma 1'de, akış diyagramı ise Şekil 2'de gösterilmiştir.

Algoritma 1: ÇSAOA'nın temel adımları (Basic steps of MSAOA)

- | | |
|-----|---|
| 1: | <i>Algoritmanın kontrol parametrelerini belirle</i> |
| 2: | <i>Denklem (16)'yı kullanarak başlangıç popülasyonunu üret</i> |
| 3: | <i>Popülasyonu bir uygunluk fonksiyonunda değerlendir ve optimum maliyeti belirle</i> |
| 4: | <i>Stratejilerin başlangıç seçilme olasılıklarını belirle</i> |
| 5: | <i>Rulet çarkı tekniği ile her aday çözümün stratejisini belirle</i> |
| 6: | <i>while (durdurma kriteri sağlanana kadar)</i> |
| 7: | <i>Aday çözüm 1. stratejiyi seçmiş ise</i> |
| 8: | <i>Denklem (17) ve (18)'i kullanarak MOA ve MOP fonksiyonlarını hesapla</i> |
| 9: | <i>MOA değerine göre Denklem (21) ve (22)'yi kullanarak aday çözümünü güncelle</i> |
| 10: | <i>Aday çözüm 2. stratejiyi seçmiş ise</i> |
| 11: | <i>Denklem (23)'ü kullanarak aday çözümünü güncelle</i> |
| 12: | <i>Güncel popülasyonu uygunluk fonksiyonunda değerlendir ve optimum maliyeti güncelle</i> |
| 13: | <i>Denklem (24)'ü kullanarak stratejilerin seçilme olasılıklarını güncelle</i> |
| 14: | <i>Rulet çarkı tekniği ile her aday çözümün stratejisini güncelle</i> |
| 15: | <i>end while</i> |
| 16: | <i>Optimum maliyeti göster</i> |
-



Şekil 2. ÇSAOA'nın akış diyagramı (Flow diagram of MSAOA)

3. BULGULAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

Bu çalışma MATLAB programlama dilinde kodlanarak gerçekleştirilmiş ve Windows 10 işletim sistemi, INTEL CORE i7 işlemcisi ve 16 GB RAM'e sahip bir bilgisayar kullanılmıştır. AOA ve ÇSAOA için popülasyon ve iterasyon sayıları sırasıyla 30 ve 1000 olarak belirlenmiştir. Hızlandırıcı fonksiyonun sınır değerleri [0.2, 1] iken, α ve μ sırasıyla 5 ve 0.5'tir. ÇSAOA için F ve

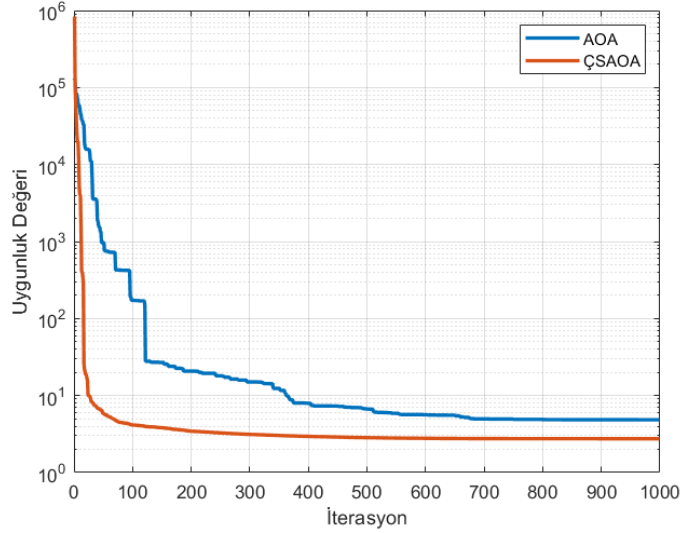
CR değerleri sırasıyla 0.8 ve 0.95'tir. Problemin global değeri $f(x^*)$ 2.5287'dir. Algoritmalar 30 koşma ile çalıştırılmış ve algoritmalarının performansı ortalama uygunluk değerleri ve ortalama hesaplama süreleri açısından karşılaştırılmıştır. Çalışma sonucunda elde edilen bulgular Tablo 1'de, iyileşme oranları Tablo 2'de ve ortalama yakınsama eğrileri Şekil 3'te gösterilmektedir.

Tablo 1. AOA ve ÇSAOA'nın uygunluk değerleri ve ortalama hesaplama süreleri (Fitness and average calculation times of AOA and MSAOA)

Algoritma	Uygunluk Değeri				Ortalama Hesaplama Süresi (sn)
	Ortalama	Minimum	Maksimum	Standart Sapma	
AOA	4.8426	4.0795	6.5807	0.6790	22.9014
ÇSAOA	2.7507	2.5438	4.2893	0.5506	17.9213

Tablo 2. Ortalama uygunluk değeri ve ortalama hesaplama süresi açısından iyileşme oranları (Improvement rates in terms of average fitness value and average calculation time)

Kriter	İyileşme Oranları (%)
Ortalama Uygunluk Değeri	43.39
Ortalama Hesaplama Süresi	21.73



Şekil 3. AOA ve ÇSAOA'nın ortalama yakınsama eğrileri (Average convergence curves of AOA and MSAOA)

Tablo 1 ve 2, ÇSAOA'nın daha düşük uygunluk değerlerine ulaşarak problemi daha etkili bir şekilde optimize ettiğini göstermektedir. Daha düşük uygunluk değeri, robot tutucu probleminde daha verimli çözümler elde edildiği anlamına gelir. ÇSAOA aynı zamanda sonuçları daha hızlı üretmiştir. Genel olarak ÇSAOA'nın hem uygunluk değeri performansında hem de hesaplama süresinde belirgin bir iyileşme sağladığı görülmektedir. Şekil 3'teki yakınsama eğrisi de bu sonuçları desteklemektedir ve önerilen algoritmanın daha hızlı yakınsadığı söylenebilir. Bulgulara göre AOA ve ÇSAOA'nın optimum tasarım değişkenleri Tablo 3'te gösterilmektedir.

Tablo 3'e göre, minimum uygunluk değeri açısından önerilen algoritmanın yine daha üstün bir

sonuçlar verdiği görülmektedir. Bu uygunluk değeri global değere çok yakındır. Bu nedenle önerilen algoritmayla elde edilen tasarım değişkenleri ile optimuma çok yakın bir robot tutucu tasarımı gerçekleştirilebilir. Ayrıca, önerilen algoritma literatürdeki benzer algoritmalarla ortalama uygunluk değeri açısından da kıyaslanmıştır. Bu kıyaslama Tablo 4'te gösterilmektedir.

Tablo 4'te görüldüğü gibi en performanslı algoritma ÇSAOA'dır. TLBO algoritması ortalama uygunluk değeri açısından en kötü sonuca sahipken, AOS ve MVPA algoritmaları daha düşük ve önerilen algoritmaya yakın sonuçlar üretmiştir. JAYA, TLOCTO ve sCMAgES algoritmaları ise TLBO'ya yakın sonuçlar elde etmiştir. Genel olarak bu tablo da önerilen algoritmanın etkinliğini göstermektedir.

Tablo 3. AOA ve ÇSAOA'nın optimum tasarım değişkenleri (Optimum design variables of AOA and MSAOA)

Algoritma	$f(x)$	a	b	c	e	f	l	δ
AOA	4.0795	150.00	141.75	200.00	0.00	150.00	182.84	2.60
ÇSAOA	2.5438	150.00	149.88	200.00	0.00	150.00	100.94	2.29

Tablo 4. Literatürdeki güncel algoritmalarla ortalama uygunluk değeri kıyaslaması (Average fitness value comparison with state-of-the-art algorithms in the literature)

Algoritma	Ortalama Uygunluk Değeri
TLBO [21] (2011)	4.9377
JAYA [22] (2017)	4.9376
sCMAgES [23] (2020)	3.3495
AOS [24] (2021)	2.7917
MVPA [25] (2021)	2.8100
TLOCTO [26] (2023)	3.0924
ÇSAOA	2.7507

4. SONUÇ (CONCLUSIONS)

Endüstriyel robotik sistemlerde robot tutucuların nesnelere zarar vermeden etkili bir şekilde tutabilmesi gerekir. Bundan dolayı, son yıllarda robot tutucularının tasarım optimizasyonu ilgi çeken bir araştırma konusu haline gelmiştir. Bu çalışmada bu tasarım problemi için aritmetik optimizasyon algoritmasına dayalı yeni bir model önerilmiştir. Önerilen modelde orijinal AOA'nın güncelleme mekanizması modifiye edilmiş ve çoklu strateji konsepti eklenerek arama performansı geliştirilmiştir. Önerilen algoritma robot tutucu probleminde uygulandığında hem orijinal algoritmaya göre kayda değer iyileşmeler sağlandığı görülmüş, hem de diğer benzer algoritmalarla karşılaştırıldığında daha iyi performans göstermiştir. Bu bulgular, endüstriyel robotik sistemlerde kullanılan robot tutucularının tasarımında ÇSAOA'nın etkin bir şekilde kullanılmasının, nesnelere zarar görmeden tutulabilmesi için önemli bir adım olduğunu göstermektedir. Bu çalışma, endüstriyel robotik teknolojilerinin geliştirilmesi ve güçlendirilmesi için değerli bir katkı sağlamaktadır.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

Bu çalışma Erciyes Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri programı kapsamında FDK-2021-11472 proje numarası ile desteklenmiştir.

ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazarı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

The author of this article declares that the materials and methods they use in their work do not require ethical committee approval and/or legal-specific permission.

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

Mustafa Yusuf YILDIRIM: Yazılım, görselleştirme, araştırma, kaynaklar, veri iyileştirme ve yazma (orijinal taslak).

Software, visualization, research, references, data curation, writing (original draft).

Rüştü AKAY: Denetim, kavramsallaştırma, metodoloji, yazma (gözden geçirme) ve düzenleme.

Supervision, conceptualization, methodology, writing (reviewing) and editing.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.



There is no conflict of interest in this study.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Saravanan, R., Ramabalan, S., Ebenezer, N. G. R., Dharmaraja, C. Evolutionary multi criteria design optimization of robot grippers. *Applied Soft Computing*. 2009; 9(1): 159-172.
- [2] Avder, A. Robot tutucuların optimum tasarımı için çok amaçlı hibrit bir yöntem önerisi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Bilişim Enstitüsü, Ankara. 2019.
- [3] Yıldız, B. S., Pholdee, N., Bureerat, S., Yıldız, A. R., Sait, S. M. Robust design of a robot gripper mechanism using new hybrid grasshopper optimization algorithm. *Expert Systems*. 2021; 38(3): e12666.
- [4] Rao, R. V., Waghmare, G. Design optimization of robot grippers using teaching-learning-based optimization algorithm. *Advanced Robotics*. 2015; 29(6): 431-447.
- [5] Datta, R., Pradhan, S., Bhattacharya, B. Analysis and design optimization of a robotic gripper using multiobjective genetic algorithm. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*. 2015; 46(1): 16-26.
- [6] Mahanta, G. B., Rout, A., B.B.V.L. D., Biswal, B. B. An improved multi-objective antlion optimization algorithm for the optimal design of the robotic gripper. *Journal of Experimental & Theoretical Artificial Intelligence*. 2020; 32(2): 309-338.
- [7] Dong, H., Asadi, E., Qiu, C., Dai, J., Chen, I. M. Geometric design optimization of an under-actuated tendon-driven robotic gripper. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. 2018; 50: 80-89.
- [8] Zhong, J., Yuan, X., Du, B., Hu, G., Zhao, C. An lévy flight based honey badger algorithm for robot gripper problem. 2022 7th International Conference on Image, Vision and Computing (ICIVC). 2022; 901-905.
- [9] Dörterler, M., Atila, Ü., Durgut, R., Şahin, İ. Analyzing the performances of evolutionary multi-objective optimizers on design optimization of robot gripper configurations. *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*. 2021; 29(1): 349-369.
- [10] Hassan, A., Abomoharam, M. Modeling and design optimization of a robot gripper mechanism. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. 2017; 46: 94-103.

- [11] Datta, R., Deb, K. Optimizing and deciphering design principles of robot gripper configurations using an evolutionary multi-objective optimization method. *KanGAL Report 2011002*. 2011; 1-10.
- [12] Jia, J., Sun, X., Liu, T., Tang, J., Wang, J., Hu, X. Structural optimization design of dual robot gripper unloading device based on intelligent optimization algorithms and generative design. *Sensors*. 2023; 23(19): 8298.
- [13] Wang, R., Zhang, X., Zhu, B., Zhang, H., Chen, B., Wang, H. Topology optimization of a cable-driven soft robotic gripper. *Structural and Multidisciplinary Optimization*. 2020; 62: 2749-2763.
- [14] Liu, C. H., Chen, T. L., Chiu, C. H., Hsu, M. C., Chen, Y., Pai, T. Y., Chiang, Y. P. Optimal design of a soft robotic gripper for grasping unknown objects. *Soft Robotics*. 2018; 5(4): 452-465.
- [15] Sun, Y., Liu, Y., Pancheri, F., Lueth, T. C. Larg: A lightweight robotic gripper with 3-d topology optimized adaptive fingers. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*. 2022; 27(4): 2026-2034.
- [16] Osyczka, A., Krenich, S. Some methods for multicriteria design optimization using evolutionary algorithms. *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*. 2004; 42(3): 565-584.
- [17] Kumar, A., Wu, G., Ali, M. Z., Mallipeddi, R., Suganthan, P. N., Das, S. A test-suite of non-convex constrained optimization problems from the real-world and some baseline results. *Swarm and Evolutionary Computation*. 2020; 56: 100693.
- [18] Hu, G., Zhong, J., Du, B., Wei, G. An enhanced hybrid arithmetic optimization algorithm for engineering applications. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 2022; 394: 114901.
- [19] Abualigah, L., Diabat, A., Mirjalili, S., Abd Elaziz, M., Gandomi, A. H. The arithmetic optimization algorithm. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 2021; 376: 113609.
- [20] Akay, R., Yildirim, M. Y. Multi-strategy and self-adaptive differential sine-cosine algorithm for multi-robot path planning. *Expert Systems with Applications*. 2023; 120849.
- [21] Rao, R. V., Savsani, V. J., Vakharia, D. P. Teaching-learning-based optimization: a novel method for constrained mechanical design optimization problems. *Computer-Aided Design*. 2011; 43(3): 303-315.
- [22] Rao, R. V., Waghmare, G. G. A new optimization algorithm for solving complex constrained design optimization problems. *Engineering Optimization*. 2017; 49(1): 60-83.
- [23] Kumar, A., Das, S., Zelinka, I. A modified covariance matrix adaptation evolution strategy for real-world constrained optimization problems. *Genetic and Evolutionary Computation Conference Companion*. 2020; 11-12.
- [24] Azizi, M., Talatahari, S., Giaralis, A. Optimization of engineering design problems using atomic orbital search algorithm. *IEEE Access*. 2021; 9: 102497-102519.
- [25] Uymaz, S. A. Evaluation of the most valuable player algorithm for solving real-world constrained optimization problems. *Bilişim Teknolojileri Dergisi*. 2021; 14(4): 345-353.
- [26] Wu, X., Li, S., Wu, F., Jiang, X. Teaching-learning optimization algorithm based on the cadre-mass relationship with tutor mechanism for solving complex optimization problems. *Biomimetics*. 2023; 8(6): 462.

Mobilya Üretiminde Malzeme Kombinasyonu Seçimi İçin Çok Kriterli Bir Çözüm Yaklaşımı

Hilal SİNGER^{1*} , Abdullah Cemil İLÇE¹ 

¹Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Bolu, Türkiye

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 28/11/2023
Düzeltilme: 24/01/2024
Kabul: 25/01/2024

Anahtar Kelimeler

BWM
Çok Kriterli Analiz
Mobilya Endüstrisi
Katmanlı Malzeme
WASPAS

Article Info

Research article
Received: 28/11/2023
Revision: 24/01/2024
Accepted: 25/01/2024

Keywords

BWM
Multicriteria Analysis
Furniture Industry
Layered Material
WASPAS

Grafik Özet (Graphical/Tabular Abstract)

Mobilya endüstrisinde, tüketici beklentileri ve teknolojik ilerlemeler mobilya tasarımının temelini oluşturan malzeme ve malzeme kombinasyonu seçimini daha önemli hale getirmiştir. Bu çalışmada, malzeme kombinasyonu seçimi için bütünlük bir çok kriterli karar verme yaklaşımı sunulmaktadır. / In the furniture industry, consumer expectations and technological advancements have made material and material combination selection, which form the basis of furniture design, more important. This study presents an integrated multicriteria decision-making approach for material combination selection.

Karar elemanı	K11	K12	K13	K14	K21	K22	K23	K24	K25
A1	0,47	6,56	0,39	1,08	39,88	5874,33	9,90	43,08	32,04
A2	0,39	5,64	0,29	0,53	26,65	3916,33	4,66	37,10	30,21
A3	0,38	5,52	0,32	0,54	26,23	1434,58	5,13	42,39	21,79
A4	0,60	8,57	0,45	1,19	44,98	6319,33	9,96	53,27	47,94
A5	0,38	5,17	0,30	0,60	21,95	1034,00	7,02	38,34	31,46

Şekil A: Karar matrisi / Figure A: Decision matrix

Önemli noktalar (Highlights)

- Mobilya üretimine yönelik malzeme kombinasyonu seçimi / Material combination selection for furniture production
- Doğu kayını ve polikarbonat levhaların farklı kombinasyonlarının değerlendirilmesi / Evaluation of different combinations of beech wood and polycarbonate sheets
- Bütünlük bir çok kriterli karar verme yaklaşımı ile karar elemanlarının analizi / Analysis of decision elements with an integrated multicriteria decision-making approach

Amaç (Aim): Bu çalışmada, malzeme kombinasyonu seçimi için BWM (best-worst method) ve WASPAS (weighted aggregated sum product assessment) yöntemleri kullanılarak bir karar verme çerçevesinin tasarlanması amaçlanmaktadır. / In this study, it is aimed to devise a decision-making framework for material combination selection using the BWM (best-worst method) and WASPAS (weighted aggregated sum product assessment) methods.



Özgünlük (Originality): Bu çalışma, mobilya endüstrisinde malzeme katman organizasyonu değerlendirme problemini karmaşık bir çok kriterli karar verme problemi olarak formüle etmekte ve malzeme kombinasyonu seçimi için bütünlük bir BWM-WASPAS yaklaşımı sunmaktadır. / This study formulates the material layer organization evaluation problem in the furniture industry as a complex multicriteria decision-making problem and presents an integrated BWM-WASPAS approach for material combination selection.

Bulgular (Results): Bulgulara göre, ilk üç önemli kriter eğilme direnci, özgül ağırlık ve elastikiyet modülüdür. Malzeme kombinasyonları arasında en iyi seçenek ise AABAA (A: kayın papel, B: polikarbonat levha) olmuştur. / According to the findings, the top three important criteria are bending resistance, specific gravity, and modulus of elasticity. The best option among the material combinations is AABAA (A: beech wood, B: polycarbonate sheet).

Sonuç (Conclusion): Bu çalışma, spesifik uygulamalar için farklı malzeme çeşitlerinden üretilen kompozitlerin katman organizasyonunun değerlendirilmesi için bir yol haritası sunmaktadır. / This study presents a roadmap for evaluating the layer organization of composites made from various material types for specific applications.



Mobilya Üretiminde Malzeme Kombinasyonu Seçimi İçin Çok Kriterli Bir Çözüm Yaklaşımı

Hilal SİNGER^{1*} , Abdullah Cemil İLÇE¹ 

¹Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Bolu, Türkiye

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 28/11/2023
Düzeltilme: 24/01/2024
Kabul: 25/01/2024

Anahtar Kelimeler

BWM
Çok Kriterli Analiz
Mobilya Endüstrisi
Katmanlı Malzeme
WASPAS

Öz

Günümüzde, çevresel sürdürülebilirlik ve teknolojiye ilerlemeler endüstrilerin ilgisini çevreye daha duyarlı ve yenilikçi malzemelere yönlendirmiştir. Odun-plastik kompozit (OPK) malzemeler, doğal kaynakların korunmasına ve çevre kirliliğinin azaltılmasına katkıda bulunurken aynı zamanda dayanıklı bir malzeme seçeneği sunmaktadır. Bu kompozit malzemelerin performansı içerdikleri malzemelerin kombinasyonları ile yakından ilişkilidir. En uygun malzeme kombinasyonunun belirlenmesi spesifik uygulama gereksinimlerini karşılayan ürünler geliştirmede üreticilere, tasarımcılara ve malzeme mühendislerine yardımcı olabilmektedir. Bu çalışma, mobilya üretimi için uygun malzeme kombinasyonlarını seçme sürecinde kullanılmak üzere bütünlük bir BWM (best-worst method) - WASPAS (weighted aggregated sum product assessment) yaklaşımı sunmaktadır. Doğru kayını ve polikarbonat levhaların farklı kombinasyonları fiziksel ve mekanik özellikler göz önüne alınarak değerlendirilmektedir. BWM yöntemi karar kriterlerini önceliklendirirken, alternatiflerin öncelik sıralamasını belirlemek için WASPAS yöntemi kullanılmaktadır. Çalışmanın son aşamasında, sıralama sonuçlarını desteklemek için bir duyarlılık analizi gerçekleştirilmektedir. Bu çalışma, mobilya endüstrisinde malzeme katman organizasyonu değerlendirme problemini karmaşık bir çok kriterli karar verme problemi olarak formüle ederek ve malzeme kombinasyonu seçimi için BWM ve WASPAS yöntemlerini bütünlük olarak yeniliğini sunmaktadır.

A Multicriteria Solution Approach for Material Combination Selection in Furniture Production

Article Info

Research article
Received: 28/11/2023
Revision: 24/01/2024
Accepted: 25/01/2024

Keywords

BWM
Multicriteria Analysis
Furniture Industry
Layered Material
WASPAS

Abstract

Today, environmental sustainability and advances in technology have directed industries' attention towards more environmentally friendly and innovative materials. Wood-plastic composites (WPC) contribute to the conservation of natural resources and the reduction of environmental pollution and present a durable material option. The performance of these composite materials is closely related to the combinations of materials they contain. Determining the most suitable material combination assists manufacturers, designers, and materials engineers in developing products that meet specific application requirements. This study presents an integrated BWM (best-worst method) - WASPAS (weighted aggregated sum product assessment) approach to be used in the selection of suitable material combinations for furniture production. Different combinations of beech wood and polycarbonate sheets are evaluated by taking into consideration their physical and mechanical properties. The BWM method is used to prioritize the decision criteria, while the WASPAS method is employed to determine the ranking of the alternatives. In the final stage of the study, a sensitivity analysis is conducted to support the ranking results. This study presents its novelty by formulating the material layer organization evaluation problem in the furniture industry as a complex multicriteria decision-making problem and integrating the BWM and WASPAS methods for material combination selection.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Günümüzde, çevresel sürdürülebilirlik ve teknolojiye ilerlemeler endüstrilerin dikkatini

doğaya daha duyarlı ve yenilikçi malzemelere yönlendirmiştir. Kereste, tarihsel olarak kağıt üretimi, mobilya imalatı ve ambalajlama dâhil olmak üzere çok sayıda endüstriyel uygulamalar

için birincil kaynak olarak kullanılmıştır. Ancak keresteye yönelik artan talep ormanların tükenmesinin arkasında önemli bir etkidir. Öte yandan, plastik şişeler ve poşetler gibi plastik atıkların doğada birikmesi insan sağlığına yönelik risk oluşturmanın yanı sıra, yaban hayatı ve su ekosistemleri üzerinde de zararlı etkilere sahiptir. Plastikler, uygun fiyatları ve dayanıklılıkları nedeniyle endüstriyel uygulamalarda sıkça tercih edilmektedir; ancak kimyasal yapısı doğal bozunma sürecine karşı oldukça dayanıklıdır [1]. Plastik atıkların bu kalıcı doğası, ekosistemler için önemli bir tehdit oluşturmakta ve atık yönetimi açısından zorluklar çıkarmaktadır. Odun-plastik kompozit (OPK) malzemeler, sürdürülebilir orman yönetimini desteklerken aynı zamanda geri dönüştürülmüş plastik kullanarak çevre kirliliğini azaltma potansiyeli sunan bir çözüm olarak öne çıkmaktadır [2].

OPK içindeki ana bileşenler odun ve plastiktir. Bunlara ilave olarak, kaliteyi olumlu yönde etkilemesi için küçük miktarlarda katkı maddeleri içermektedir. Bunlar, birleştirme katkıları, dağıtıcılar, ışık kararlaştırıcılar, pigmentler, yağlayıcılar, mantar önleyiciler ve köpük katkıları gibi değişik miktarlarda kullanılan maddelerdir [3]. OPK'nın popüleritesi, hem ahşap malzemelerin hem de plastik malzemelerin en iyi özelliklerini bir araya getirmesinde yatmaktadır. Bu birleşim, ahşabın sıcak ve doğal estetiğini plastiklerin dayanıklılığı, esnekliği ve uzun ömürlülüğü ile birleştirir. OPK, yapı malzemelerinden mobilyaya dış cephe kaplamalarından otomotiv parçalarına kadar birçok farklı uygulamada kullanılabilir [4].

OPK malzemeler, farklı malzeme türlerinden sağlanan ince levhaların üst üste yapıştırılmasıyla oluşturulur. Dolayısıyla, OPK üretiminde katmanlar önemli bir rol oynamaktadır. Ara katmanlar olarak daha düşük maliyetli veya daha kolay temin edilebilen ağaç türleri ve diğer malzemeler kullanıldığında üretim maliyetleri düşürülebilir ve ürünün daha rekabetçi olması sağlanabilir [5]. Ayrıca, malzemelerin dayanıklılığını artırmak, termal ve nem değişimlerine karşı direncini iyileştirmek veya özel uygulamalara uygun hale getirmek için ara katmanlar farklı malzeme türleri veya kalınlıklarıyla doldurulabilir. Katman organizasyonu, OPK malzemelerin fiziksel ve mekanik özelliklerini şekillendiren temel bir unsurdur [6]. Uygun malzeme kombinasyonunun belirlenmesi spesifik uygulama gereksinimlerini karşılayan ürünler geliştirmede üreticilere, tasarımcılara ve malzeme mühendislerine yardımcı

olur. Farklı malzeme kombinasyonları her bir OPK malzeme özelliği üzerinde kendilerine özgü bir performansa sahiptir. Dolayısıyla, birden çok alternatif ve kriter içeren malzeme kombinasyonu seçim problemi çok kriterli karar verme (ÇKKV) problemi olarak ele alınabilir.

ÇKKV, birden fazla ve genellikle birbiriyle çelişen kriterlerin olduğu durumlarda en iyi çözüme ulaşmak için sıkça uygulanır. Farklı önceliklere ve hedeflere sahip karar vericilerin görüşleri değerlendirme sürecine entegre edilebilmektedir [7]. Problem tanımlama, alternatif seçimi, kriter seçimi, karar matrisi oluşturma, kriter ağırlıklandırma ve alternatif sıralama genellikle ÇKKV süreçlerinin temel adımlarıdır. ÇKKV, en uygun seçeneğin belirlenmesinde kriterlerin fayda ve maliyet bilgisini dikkate alır. Alternatifin performansının artmasıyla avantaj sağlayan kriterler fayda kriterleri iken, dezavantaj sağlayanlar maliyet kriterleridir [8, 9]. Karar problemi yapılandırıldıktan sonra karar elemanlarının değerlendirilmesi ve önceliklendirilmesi için ÇKKV yöntem(ler)i seçilir [10, 11]. Karar vermeye yardımcı olabilecek organize bir prosedür sağlama maksadıyla literatürde çok çeşitli ÇKKV yöntemleri önerilmiştir. AHP (analytic hierarchy process), BWM (best-worst method), TOPSIS (technique for order preference by similarity to ideal solution), VIKOR (VlseKriterijumska Optimizacija I Kompromisno Resenje), EDAS (evaluation based on distance from average solution) ve WASPAS (weighted aggregated sum product assessment) popüler ÇKKV yöntemlerinden bazılarıdır.

Gerçek dünya problemlerinin çoğu aynı önem derecesine sahip olmayan kriterler içerir. Bu nedenle, kriterlerin karar verme süreci üzerindeki etkisini anlamak için önem katsayıları ortaya çıkarılmalıdır. BWM, bu amaç için kullanılacak ÇKKV ağırlıklandırma yöntemlerinden biridir. Bu yöntemde, karar verme sürecini gerçekleştirmek için belirlenen kriterler arasından en iyi kriter ve en kötü kriter seçilir ve karar verici tüm kriterleri seçilen kriterlerle ikili karşılaştırır. İkili karşılaştırmalara dayalı olarak doğrusal bir programlama modeli oluşturulup çözümlenerek her bir kriterin ağırlığı belirlenir [12]. BWM yönteminin önemli avantajlarından biri az sayıda ikili karşılaştırmalar ile oldukça tutarlı sonuçlar sağlamasıdır. BWM yöntemi kriter ağırlıklandırma maksadıyla en yaygın olarak kullanılan AHP yöntemiyle karşılaştırıldığında daha az sayıda hesaplama gerektirir. AHP yönteminde karşılaştırma sayısı $n(n-1)/2$ iken, BWM için karşılaştırma sayısı $2n-3$ şeklindedir.

Bu durum, BMW ağırlıklarının daha fazla tutarlılığını sağlar. Ayrıca, kriterlerin ikili karşılaştırılması için BMW yalnızca tamsayı değerleri gerektirir [13]. BMW yöntemi tutarlı sonuçlar ve zaman, çaba ve kaynak tasarrufu sağladığı için birçok araştırmacı tarafından çeşitli karar problemlerinin çözümü için tercih edilmiştir. Literatürde yürütülen dikkate değer bazı çalışmalar şu şekilde listelenebilir: bulut hizmet seçimi [14], tehlikeli atık envanteri güvenlik risk değerlendirmesi [15], sağlık sektörü değerlendirme [16], iş motivasyonu değerlendirme [17], bakım stratejisi seçimi [18], kaplama malzemesi seçimi [19], güneş paneli teknolojisi seçimi [20], rüzgar çiftliği yer seçimi [21], tedarikçi seçimi [22] ve arazi çökme tehlikesi değerlendirme [23].

Karar verme problemlerinde mevcut alternatifler arasından farklı kriterlere göre en uygun alternatifin seçimi için ÇKKV sıralama yöntemleri kullanılabilir. WASPAS, alternatiflerin sıralanması için sıklıkla kullanılan bir ÇKKV yöntemidir. Bu yöntem, ağırlıklı toplam yöntemi ile ağırlıklı çarpım yönteminin bir kombinasyonudur. İlk yöntem, bir alternatifin skorunu kriter değerlerinin ağırlıklı toplamı şeklinde belirlerken; ikinci yöntem, kriterlerin kendi ağırlığı kadar üssü alınan değerlerinin çarpımı şeklinde hesaplama yapar. WASPAS, ağırlıklı bütünleştirilmiş fonksiyonun incelenmesi ile en iyi sonuca erişmeye uğraşır [24]. WASPAS yönteminin hesaplama adımlarının kısa ve kolay olması yöntemin avantajlarından biridir. Ayrıca, iki farklı yöntemin bir karışımı olduğu için daha fazla doğruluk miktarıyla işlem gerçekleştirir. Öte yandan, bütünleştirme katsayısının değiştirilmesi suretiyle gerçekleştirilen duyarlılık analizi ile sonuçların güvenilirliği araştırılabilir [25]. WASPAS yöntemi tanıtıldığı günden bugüne kadar çok çeşitli karar problemlerinin çözümünde başarıyla uygulanmıştır. Bu çalışmalara endüstriyel robot seçimi [26], yazılım seçimi [24], havayolu hizmet kalitesi ölçümü [27], toplu taşıma için akıllı kart sistemlerini değerlendirme [28], işleme parametrelerinin optimizasyonu [29], tedarikçi seçimi [30], üçüncü parti lojistik sağlayıcısı seçimi [31], hidrojen üretim tesisi yer seçimi [32], endüstriyel parkların sıralanması [33] ve tesis yerleşimi seçimi [34] örnek olarak verilebilir.

Bu çalışma, bütünlük bir BMW-WASPAS yaklaşımına dayalı olarak mobilya üretiminde malzeme kombinasyonu seçimi için bir karar çerçevesi sunma üzerine odaklanmaktadır. Çalışmada, mobilya üretiminde kullanılma maksadıyla doğu kayını ve polikarbonat levhaların farklı kombinasyonları ile elde edilen kompozit malzemeler fiziksel ve mekanik özellikleri dikkate

alınarak sıralanmaktadır. BMW yöntemi ile karar kriterleri ağırlıklandırılırken, WASPAS yöntemi ile alternatifler için bir öncelik sıralaması belirlenmektedir. Bu çalışma, mobilya endüstrisinde malzeme katman organizasyonu değerlendirme problemini karmaşık bir ÇKKV problemi olarak formüle ederek ve malzeme kombinasyonu seçimi için BMW ve WASPAS yöntemlerini bütünleştirerek yeniliğini sunmaktadır.

2. MATERYAL VE METOD (MATERIAL AND METHOD)

2.1. Veri Toplama (Data Collection)

Bu çalışmada, mobilya üretiminde kullanım amacıyla doğu kayını (*Fagus Orientalis* L.) ve polikarbonat levhalardan elde edilen beş adet kompozit malzemenin fiziksel ve mekanik özelliklerine ilişkin veriler çok kriterli karar analizine tabi tutulmaktadır. Öncelikle, endüstri ve ağaç işleri endüstri mühendislerini içeren bir karar verme ekibi oluşturulmuştur. Ekip üyeleri, kişisel bilgi ve uzmanlık temelinde fiziksel ve mekanik özellikleri karşılaştırmış ve böylece kriterlerin önem değerlerinin ortaya çıkmasını sağlamışlardır. Alternatif malzemeler için veri edinme süreci kısaca şu şekilde açıklanabilir. Kesme kaplama olarak gelen ağaç malzemeler işlenmeden önce iki ay üstleri örtülü ve hava alacak şekilde bekletilmiş ve istenilen denge rutubetine ulaşıldıktan sonra işlenmeye başlanmıştır. İlk olarak, kalibre zımpara makinesinde eş kalınlığa getirilmiş ve ardından iklimlendirme dolabında 65 ± 5 bağıl nem ve 20 ± 2 °C sıcaklıkta değişmez ağırlığa gelinceye kadar bekletilmişlerdir. İklimlendirme dolabından çıkarılan parçaların tek yüzeylerine tutkal sürülerek aynı ölçüde kesilen polikarbonat levhalar yapıştırılmıştır. A kayın papel, B polikarbonat levha ve T lif yönüne dik konulan polikarbonat levha olmak üzere ABBBA, ABABA, AABAA, ABTBA ve ATBTA sırasına uygun olarak beş katlı presleme işlemi yapılmış ve tutkal olarak polikloropren kullanılmıştır. Üretilen levhalar, bir ay boyunca 20 ± 2 °C sıcaklık ve 65 ± 5 bağıl nem şartlarında 12 ± 2 denge rutubetine gelmesi için bekletilmiştir. Her bir deney için ayrı bir veri toplama formu hazırlanmıştır.

2.2. BMW Yöntemi (BMW Method)

BMW, karar kriterlerinin ağırlıklarını belirlemek için bir optimizasyon modeli kullanan ÇKKV yöntemidir. Bu yöntem, en iyi kriter ve en kötü kriter tercihinin dayanmaktadır. BMW yönteminde, en iyi kriter diğer kriterlerle, ardından diğer

kriterler en kötü kriterle mukayese edilir [35]. BWM prosedürü aşağıdaki adımlardan oluşur [16-35].

Adım 1: Karar verici(ler) tarafından n sayıda kriter (C_1, C_2, \dots, C_n) belirlenir.

Adım 2: En önemli (iyi) kriter ve en önemsiz (kötü) kriter seçilir.

Adım 3: En iyi kriterin diğer kriterlere göre tercihini belirtmek için 1-9 ölçeği ile ikili değerlendirme yapılır. Karşılaştırma sonuçları en iyi-diğer vektörü olarak şu şekilde temsil edilir:

$$A_B = (a_{B1}, a_{B2}, \dots, a_{Bn}) \quad (1)$$

Burada; a_{Bj} , en iyi kriter B 'nin kriter j 'ye göre tercihini temsil eder ve $a_{BB} = 1$ olmalıdır.

Adım 4: En kötü kriter ile diğer kriterler arasında ikili karşılaştırma yapılır. Karşılaştırma sonuçları en kötü-diğer vektörü olarak şu şekilde temsil edilir:

$$A_W = (a_{1W}, a_{2W}, \dots, a_{nW})^T \quad (2)$$

Burada; a_{jW} , kriter j 'nin en kötü kriter W 'ye göre tercihini temsil eder ve $a_{WW} = 1$ olmalıdır.

Adım 5: Kriter ağırlıkları ($w_1^*, w_2^*, \dots, w_n^*$) ortaya çıkarılır. Bu süreçte, $\left| \frac{w_B}{w_j} - a_{Bj} \right|$ ve $\left| \frac{w_j}{w_W} - a_{jW} \right|$ ifadeleri j 'ler için minimuma indirilir. Ağırlıkların negatif olmama özelliği ve toplam durumu dikkate alınarak problem aşağıdaki gibi sonuçlanır.

amaç fonksiyonu:

$$\min \max_j \left\{ \left| \frac{w_B}{w_j} - a_{Bj} \right|, \left| \frac{w_j}{w_W} - a_{jW} \right| \right\} \quad (3)$$

kısıtlar:

$$\sum_j w_j = 1 \quad (4)$$

$$w_j \geq 0, \text{ her } j \quad (5)$$

Bahsedilen model şu şekilde dönüştürülebilir:

amaç fonksiyonu:

$$\min \xi \quad (6)$$

kısıtlar:

$$\left| \frac{w_B}{w_j} - a_{Bj} \right| \leq \xi, \text{ her } j \quad (7)$$

$$\left| \frac{w_j}{w_W} - a_{jW} \right| \leq \xi, \text{ her } j \quad (8)$$

Denklem 4 ve 5.

Karşılaştırmaların tutarlılık oranı Denklem 9 kullanılarak belirlenebilir. Bu oran ne kadar küçük olursa, sonuçların tutarlılığı o kadar yüksek olur. Tablo 1, farklı sayıda karar kriterine sahip BWM modelleri için tutarlılık indeksini listelemektedir.

$$\text{tutarlılık oranı} = \frac{\xi}{\text{tutarlılık indeksi}} \quad (9)$$

2.3. WASPAS Yöntemi (WASPAS Method)

WASPAS, ağırlıklı toplam ve çarpım yöntemlerini dikkate alarak alternatiflerin genel puanını hesaplayan bir ÇKKV yöntemidir. WASPAS, bu yöntemleri kullanmanın yanı sıra, sonuç bütünlüştürme fonksiyonunun incelenmesi yoluyla tahmin doğruluğunu artırmaya çalışır [36]. WASPAS prosedürü aşağıdaki adımlardan oluşur [37].

Adım 1: Karar elemanları, bir karar matrisinde organize edilir. Karar matrisindeki her x_{ij} elemanı, C_j kriterine göre alternatif A_i 'nin performans değerini temsil eder.

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \dots & x_{mn} \end{bmatrix}; \quad (10)$$

$$i = 0, 1, \dots, m \quad j = 1, 2, \dots, n$$

Adım 2: Karar matrisine normalizasyon işlemi uygulanarak bir normalize karar matrisi oluşturulur. Normalize değerlerin hesaplanmasında, fayda yönlü kriterler için Denklem 11 dikkate alınırken, maliyet yönlü kriterler için Denklem 12 kullanılır.

$$\bar{x}_{ij} = \frac{x_{ij}}{\max_i x_{ij}} \quad (11)$$

Tablo 1. BWM tutarlılık indeksi (BWM consistency index)

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9
indeks	0,00	0,44	1,00	1,63	2,30	3,00	3,73	4,47	5,23

$$\bar{x}_{ij} = \frac{\min_i x_{ij}}{x_{ij}} \quad (12)$$

Adım 3: Ağırlıklı toplam değerleri hesaplanır.

$$Q_i^{(1)} = \sum_{j=1}^n \bar{x}_{ij} w_j \quad (13)$$

Adım 4: Ağırlıklı çarpım değerleri hesaplanır.

$$Q_i^{(2)} = \prod_{j=1}^n \bar{x}_{ij}^{w_j} \quad (14)$$

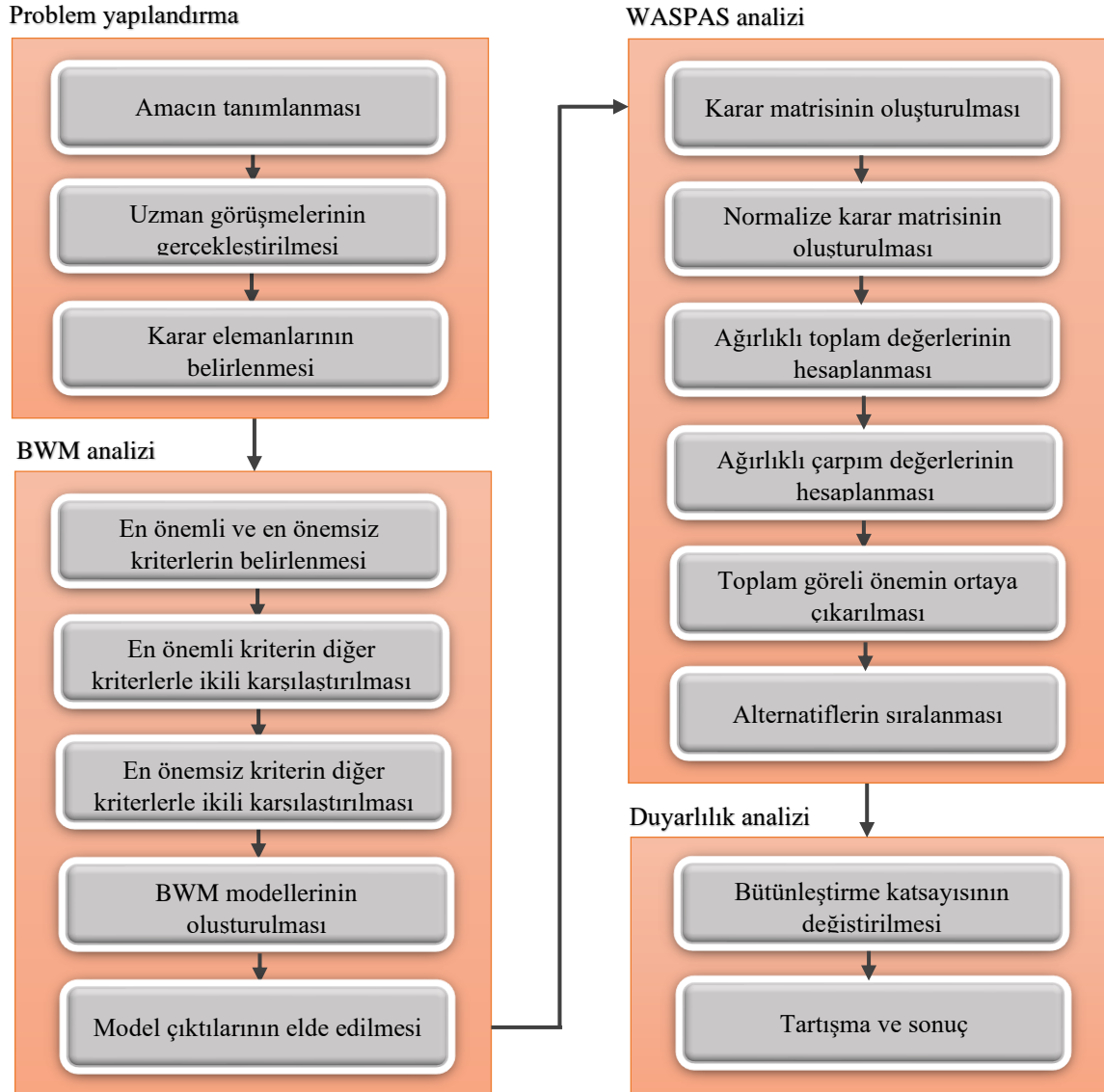
Adım 5: Toplam göreceli önem belirlenir. Alternatifler arasından en yüksek skora sahip olan en iyi karar olarak kabul edilir.

$$Q_i = \lambda Q_i^{(1)} + (1 - \lambda) Q_i^{(2)} \quad (15)$$

3.UYGULAMA (APPLICATION)

3.1. Karar Verme Çerçevesi (Decision-making Framework)

Mobilya endüstrisi, gün geçtikçe değişen ve çeşitlenen tüketici taleplerini karşılamak için sürekli olarak gelişen ve yenilikçi malzemelerin ve tasarım yaklaşımlarının kullanılmasını içeren bir alandır. Tüketici beklentileri ve teknolojik ilerlemeler mobilya tasarımının temelini oluşturan malzeme ve malzeme kombinasyonu seçimini daha önemli hale getirmiştir. Üreticiler, farklı malzemelerin fiziksel ve mekanik özellikleri arasında denge kurarak dayanıklılığı artırmaya ve çevreye duyarlı ürünler tasarlamaya odaklanmışlardır. Uygun malzeme kombinasyonları ürünlerin dayanıklılığını artırmaya, atık miktarını azaltmaya ve çevresel etkileri minimize etmeye yardımcı olabilmektedir.



Şekil 1. Çalışmanın akış şeması (Flow chart of the study)

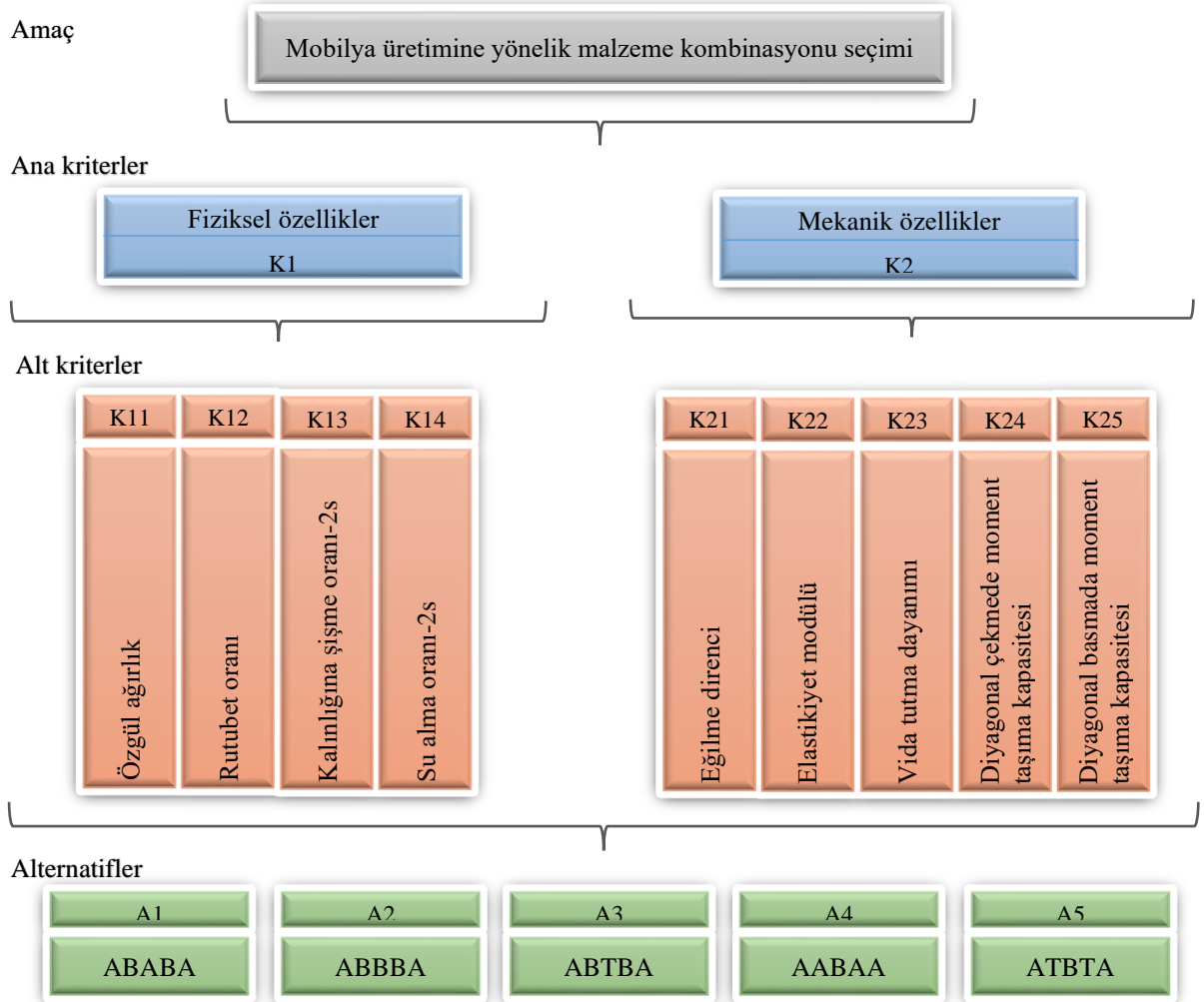
Bu çalışma, mobilya üretimine yönelik malzeme kombinasyonu seçimi için bütünlük bir BWM-WASPAS yaklaşımı sunmaktadır. Çalışmada, doğu kayını ve polikarbonat levhaların farklı kombinasyonlarının oluşturduğu kompozit malzemeler fiziksel ve mekanik özellikleri dikkate alınarak BWM-WASPAS yaklaşımı ile sıralanmaktadır. Bu süreçte, BWM yöntemi kullanılarak karar kriterleri önceliklendirilirken, alternatifler için öncelik sıralaması belirlemek amacıyla WASPAS yöntemi kullanılmaktadır. Çalışmanın son aşamasında ise sıralama sonuçlarını desteklemek için duyarlılık analizi gerçekleştirilmektedir. Şekil 1, çalışmanın işleyişini sunmaktadır.

Mevcut çalışma, literatür araştırması ve uzman görüşmeleri doğrultusunda yapılandırılmıştır. Çalışmanın ana kriterleri fiziksel özellikler ve mekanik özellikler olarak belirlenmiştir. Bu ana kriterler çeşitli alt kriterlere ayrılmıştır. Fiziksel özellikler ana kriterinin alt kriterleri şunlardır: özgül ağırlık, rutubet oranı, kalınlığına şişme oranı-2s ve su alma oranı-2s. Mekanik özellikler

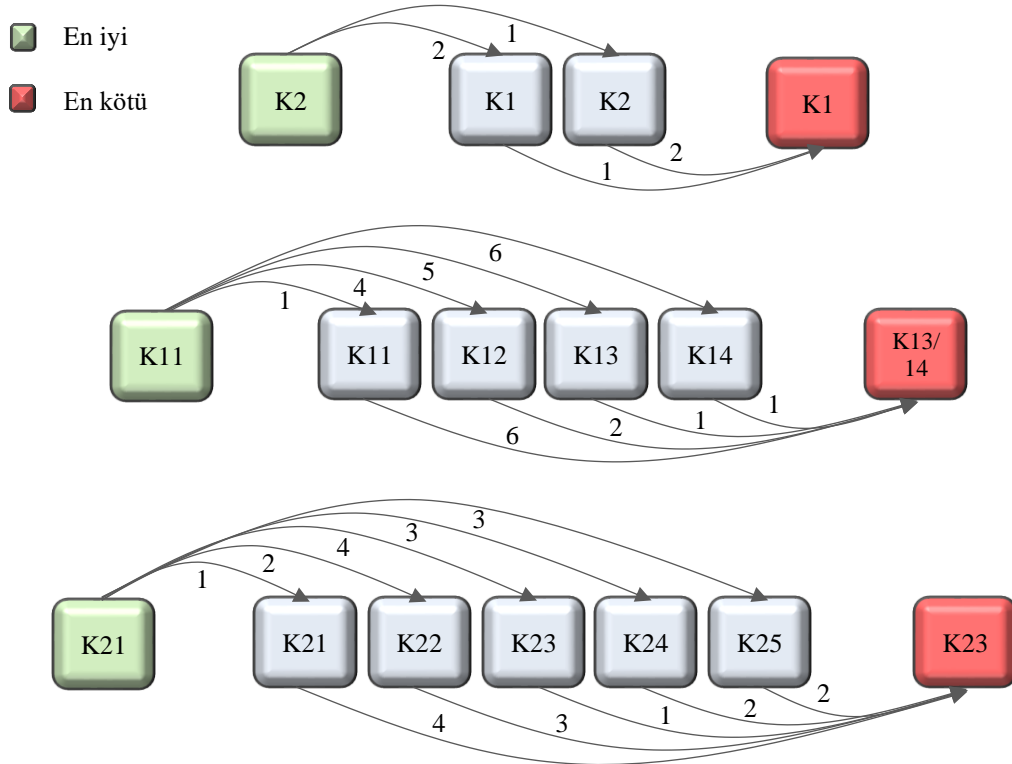
ana kriterinin alt kriterleri ise şöyledir: eğilme direnci, elastikiyet modülü, vida tutma dayanımı, diyagonal çekmede moment taşıma kapasitesi ve diyagonal basmada moment taşıma kapasitesi. Çalışmanın alternatifleri olan ABABA, ABBBA, ABTBA, AABAA ve ATBTA kombinasyonları yukarıda bahsi geçen kriterlere göre değerlendirilmekte ve aralarından en iyi kombinasyon tespit edilmeye çalışılmaktadır. Çalışmadaki karar elemanları Şekil 2’de hiyerarşik düzende görsel olarak sunulmuştur.

3.2. Malzeme Kombinasyonu Seçimi (Material Combination Selection)

Çalışmada, ana kriterler ve alt kriterler BWM yöntemi kullanılarak ağırlıklandırılmış ve bu ağırlıklar daha sonra WASPAS analizi ile malzeme kombinasyonlarını sıralamak için kullanılmıştır. Kriterlerin ikili karşılaştırmaları uzmanlar tarafından yapılmaktadır. Uzmanlar, araştırma konusuyla ilgili deneyimleri, bilgileri ve yayınları dikkate alınarak seçilmiştir. Nitelikli ve tarafsız veri elde etmek için yüz yüze görüşme yöntemi



Şekil 2. Çalışmanın karar elemanları (Decision elements of the study)



Şekil 3. Karar kriterlerinin karşılaştırılması (Comparison of the decision criteria)

seçilmiştir. Malzeme kombinasyonları ise kriterlerin ağırlıkları ile deneysel çıktıların bütünleştirilmesi ile sıralanmaktadır.

Öncelikle, uzmanlardan ana kriterler grubu ile alt kriterler grupları için en iyi ve en kötü kriterleri belirlemeleri istenmiştir. Ardından, uzmanlardan en iyi kriter için diğer kriterlere göre tercih yapmaları ve ayrıca diğer tüm kriterler için en kötü kritere göre öncelik vermeleri talep edilmiştir. Bu süreçte, 1-9 ölçeği kullanılarak sayısal karşılaştırma değerleri elde edilmiştir. Karşılaştırmalar, en iyi-diğer vektörü ve en kötü-diğer vektörü olarak formüle edilmiştir. BWM modelleri, bu vektörler dikkate alınarak

oluşturulmuştur. Şekil 3, seçilen en iyi ve en kötü kriterler ile karşılaştırma sonuçlarını görsel olarak sunmaktadır.

BWM modelleri çözdürülerek kriterlerin ağırlıkları ortaya çıkarılmıştır. Tablo 2, hesaplanan yerel ve global kriter ağırlıklarını sunmaktadır. Burada belirtmekte fayda vardır ki, global ağırlık alt kriterin yerel ağırlığının üyesi olduğu ana kriterin ağırlığı ile çarpımı sonucu elde edilmektedir. Tablo 2’de görülebileceği üzere, uzman görüşleri mekanik özellikleri en önemli ana kriter olarak kılmıştır. Fiziksel özellikler grubunda özgül ağırlık, mekanik özellikler grubunda ise eğilme direnci en yüksek yerel öneme sahiptir. Genel

Tablo 2. BWM çıktıları (BWM outputs)

Ana kriter	Önem	Alt kriter	Yerel önem	Yerel sıra	Global önem	Yerel sıra
Fiziksel özellikler (K1)	0,333	Özgül ağırlık (K11)	0,611	1	0,204	2
		Rutubet oranı (K12)	0,167	2	0,056	6
		Kalınlığına şişme oranı-2s (K13)	0,111	3	0,037	7
		Su alma oranı-2s (K14)	0,111	3	0,037	7
Mekanik özellikler (K2)	0,667	Eğilme direnci (K21)	0,397	1	0,265	1
		Elastikiyet modülü (K22)	0,221	2	0,147	3
		Vida tutma dayanımı (K23)	0,088	4	0,059	5
		Diyagonal çekmede moment taşıma kapasitesi (K24)	0,147	3	0,098	4
		Diyagonal basmada moment taşıma kapasitesi (K25)	0,147	3	0,098	4

Tablo 3. Alternatifler için karar matrisi (Decision matrix for the alternatives)

Karar elemanı	K11	K12	K13	K14	K21	K22	K23	K24	K25
A1	0,47	6,56	0,39	1,08	39,88	5874,33	9,90	43,08	32,04
A2	0,39	5,64	0,29	0,53	26,65	3916,33	4,66	37,10	30,21
A3	0,38	5,52	0,32	0,54	26,23	1434,58	5,13	42,39	21,79
A4	0,60	8,57	0,45	1,19	44,98	6319,33	9,96	53,27	47,94
A5	0,38	5,17	0,30	0,60	21,95	1034,00	7,02	38,34	31,46

K₁₁ g/cm³ biriminden; K₁₂, K₁₃ ve K₁₄ % biriminden; K₂₁, K₂₂ ve K₂₃ N/mm² biriminden; K₂₄ ve K₂₅ N.m biriminden.

sonuçlar, ilk üç önemli alt kriterin eğilme direnci, özgül ağırlık ve elastikiyet modülü olduğunu göstermiştir.

Kriterlerin ağırlıkları WASPAS analizine girdi olarak aktarılmıştır. Öncelikle, alternatif kombinasyonların her bir kriter altındaki performansını içeren bir karar matrisi inşa edilmiştir. WASPAS analizinde kullanılan bu karar matrisi Tablo 3'te sunulmuştur.

Karar matrisinin oluşturulmasının ardından kriterlerin fayda ve maliyet bilgisi dikkate alınarak normalizasyon işlemi gerçekleştirilmiştir. Burada, fiziksel özellikler maliyet yönlü iken, mekanik özellikler fayda yönlüdür. Bu işlem sonucunda elde edilen normalize karar matrisi üzerinden ağırlıklı toplam ve çarpım değerleri hesaplanmıştır. Bütünleştirme katsayısı literatürde en sık kullanılan 0,5 değerine ayarlanmış ve elde edilen toplam ve çarpım değerleri bütünleştirilerek alternatiflerin genel performans değeri tespit edilmiştir. WASPAS çıktıları Tablo 4'te sunulmuştur. Bu tabloya göre, malzeme kombinasyonlarının azalan düzende sıralaması şöyledir: AABAA - ABABA - ABBBA - ABTBA

- ATBTA. Bu sıralama sonucu, en iyi malzeme kombinasyonunun AABAA olduğuna işaret etmiştir.

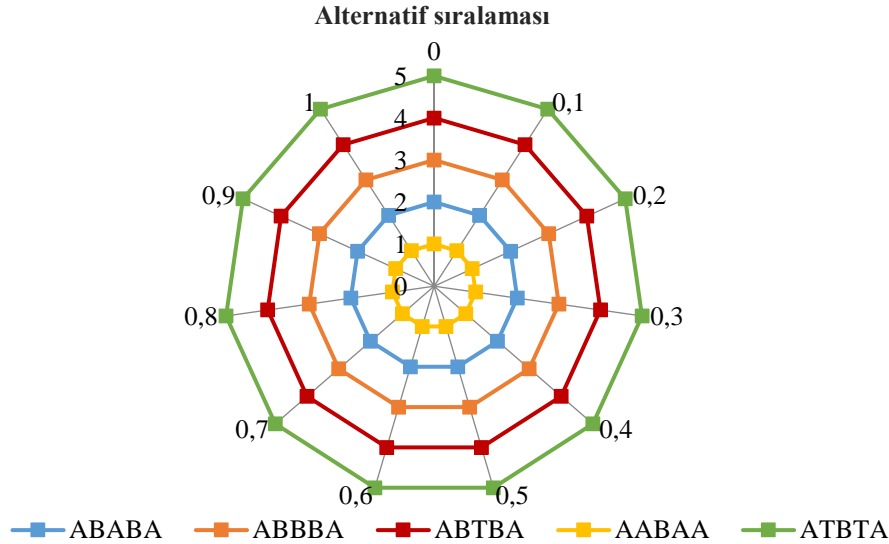
Karar verme uygulamalarında, sonuçların desteklenmesi ve çıktılardaki değişimlerin gözlemlenmesi için duyarlılık analizi sıkça gerçekleştirilmektedir. Bu kapsamda, bütünleştirme katsayısının 0'dan 1'e kadar 0,10'luk artışla değiştirilmesi ile bir duyarlılık analizi gerçekleştirilmiştir. Duyarlılık analizine göre alternatiflerin performans skorları Tablo 5'te, sıralama düzenleri ise Şekil 4'te verilmiştir. Bütünleştirme katsayısındaki değişimin sonuçlar üzerine olan etkisi incelendiğinde, alternatiflerin sıralama düzeninin değişmediği gözlemlenmiştir. Bu bulgu, uygulanan yaklaşımın sağlam sonuçlar verdiğinin bir göstergesidir. Sonuç olarak, AABAA mobilya üretimi açısından en uygun kombinasyon olmuştur. Bu çalışma, spesifik uygulamalar için farklı malzeme çeşitlerinden üretilen kompozitlerin katman organizasyonunun değerlendirilmesi için farklı bir bakış açısı sunmuştur.

Tablo 4. WASPAS çıktıları (WASPAS outputs)

Alternatif	$Q_i^{(1)}$	$Q_i^{(2)}$	Q_i	Sıra
A1	0,828	0,820	0,824	2
A2	0,728	0,708	0,718	3
A3	0,665	0,601	0,633	4
A4	0,869	0,846	0,858	1
A5	0,655	0,572	0,613	5

Tablo 5. Bütünleştirme katsayısındaki değişimin performans skorları üzerine etkisi (Effect of the change in the threshold value on performance scores)

Alternatif	Bütünleştirme katsayısı										
	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
A1	0,820	0,821	0,822	0,822	0,823	0,824	0,825	0,826	0,826	0,827	0,828
A2	0,708	0,710	0,712	0,714	0,716	0,718	0,720	0,722	0,724	0,726	0,728
A3	0,601	0,608	0,614	0,620	0,627	0,633	0,639	0,646	0,652	0,659	0,665
A4	0,846	0,848	0,850	0,853	0,855	0,858	0,860	0,862	0,865	0,867	0,869
A5	0,572	0,580	0,588	0,597	0,605	0,613	0,622	0,630	0,638	0,646	0,655



Şekil 4. Duyarlılık analizinde alternatiflerin sıralama düzeni (Ranking order of the alternatives in the sensitivity analysis)

4. SONUÇ (CONCLUSION)

OPK malzeme, mobilya, inşaat ve dış mekân uygulama alanlarında giderek daha fazla tercih edilen yenilikçi bir malzeme türüdür. Bu malzeme, genellikle geri dönüşümlü plastiklerin doğal ahşap ham maddeleriyle birleştirilmesiyle üretilir. Bu karışım, çevresel sürdürülebilirlik sağlanmasını ve çeşitli tasarım seçeneklerinin sunulmasını mümkün kılar. OPK'lerde katman organizasyonu, malzemenin özelliklerini optimize etmek ve farklı uygulamalara uygun hale getirmek için kritik bir rol oynar. Bu çalışmada, bir BWM-WASPAS yaklaşımı ile mobilya üretimine yönelik doğu kayını ve polikarbonat levha kombinasyonlu OPK malzemeler fiziksel ve mekanik özelliklere göre sıralanmıştır. BWM yöntemi, çalışmanın karar kriterleri olan fiziksel ve mekanik özellikleri önceliklendirmek için kullanılmıştır. WASPAS yöntemi ise alternatif kombinasyonları sıralamak için uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, eğilme direnci, özgül ağırlık ve elastikiyet modülü en önemli ilk üç kriterdir. Alternatiflerin sıralama sonuçlarına göre ise en iyi kombinasyon AABAA olmuştur. Çalışmanın sonuçları, bütünleştirme katsayısının değiştirilmesi suretiyle gerçekleştirilen duyarlılık analizi ile desteklenmiştir.

Mevcut çalışmanın değeri şu şekilde listelenebilir: (i) mobilya üretimine yönelik OPK malzemeler için katman organizasyonunun değerlendirilmesi problemi karmaşık bir ÇKKV problemi olarak ele alınmıştır; (ii) malzeme kombinasyonu seçimi için hibrit BWM-WASPAS yaklaşımı önerilmiştir; (iii) alternatif kombinasyonlar fiziksel ve mekanik özellikler altında incelenmiştir; (iv) mevcut

problemin çözümü için hem uzman perspektifi hem de deneysel çıktılar dikkate alınmıştır; (v) mobilya ürünleri geliştirmede üreticilere, tasarımcılara ve malzeme mühendislerine bir yol haritası sunulmuştur; (vi) malzeme kombinasyonlarının tarafsızca değerlendirilebilmesine ve önceliklendirilebilmesine katkıda bulunulmuştur. İleriki araştırma çalışmalarında; alternatif kombinasyon sayısı artırılabilir, karar çerçevesi farklı malzeme türleri için adapte edilip alternatif kombinasyonlar değerlendirilebilir, farklı karar destek araçları probleme dâhil edilebilir ve karar elemanları arasındaki nedensel ilişkiler incelenebilir. Çalışma, karar vericiler için faydalı bir rehber ve karar destek yaklaşımı sunmaktadır.

BİLGİLENDİRME (INFORMING)

Bu çalışma, ikinci yazarın yürütücülüğünde gerçekleştirilen, Düzce Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü destekli projenin (Proje No: BAP - 2009.03.01.036) deneysel verilerine dayanmaktadır.

This study is based on the experimental data of the project supported by the Düzce University Scientific Research Projects Coordination (Project No: BAP - 2009.03.01.036), conducted under the supervision of the second author.

ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazarları çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

The authors of this article declares that the materials and methods they use in their work do not require ethical committee approval and/or legal-specific permission.

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

Hilal SINGER: Çalışmayı planladı, verileri analiz etti ve yazma işlemini gerçekleştirdi.

She planned the study, analyzed the data, and performed the writing process.

Abdullah Cemil İLÇE: Verileri topladı ve yazma işlemini gerçekleştirdi.

He collected the data and performed the writing process.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

There is no conflict of interest in this study.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Hasanin M.S., Abd El-Aziz M.E., El-Nagar I., Hassan Y.R., Youssef A.M., Green enhancement of wood plastic composite based on agriculture wastes compatibility via fungal enzymes, *Scientific Reports*, 12 (2022) 19197.
- [2] Yu Q., Wang Y., Ye H., Sheng Y., Shi Y., Zhang M., Fan W., Yang R., Xia C., Ge S., Preparation and properties of wood plastic composites with desirable features using poplar and five recyclable plastic wastes, *Applied Sciences*, 11 (2021) 6838.
- [3] Mali J., Sarsama P., Suomi-Lindberg L., Metsä-Kortelainen S., Peltonen J., Vilkki M., Koto T., Tiisala S., Woodfiber-plastic composites, VTT Technical Research Centre of Finland Report, (2003).
- [4] Xiao R., Yu Q., Ye H., Shi Y., Sheng Y., Zhang M., Nourani P., Ge S., Visual design of high-density polyethylene into wood plastic composite with multiple desirable features: A promising strategy for plastic waste valorization, *Journal of Building Engineering*, 63 (2023) 105445.
- [5] Keskisaari A., Kärki T., The use of waste materials in wood-plastic composites and their impact on the profitability of the product, *Resources, Conservation and Recycling*, 134 (2018) 257-261.
- [6] İlçe A.C., Budakçı M., Özdemir S., Akkuş M., Analysis of usability in furniture production of wood plastic laminated board, *BioResources*, 10 (2015) 4300-4314.
- [7] Singer H., Özşahin Ş., Multicriteria evaluation of structural composite lumber products, *Journal of Anatolian Environmental and Animal Sciences*, 5 (2020) 807-813.
- [8] Al Mohamed A.A., Al Mohamed S., Zino M., Application of fuzzy multicriteria decision-making model in selecting pandemic hospital site, *Future Business Journal*, 9 (2023) 14.
- [9] Çalış Boyacı A., Tüzemen M.Ç., Bütünleşik SWARA-MULTIMOORA yaklaşımı ile uçak gövdesi için malzeme seçimi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 8 (2020) 768-782.
- [10] Daş G.S., Tetik T., Bir iletişim uydu operatörünün fırlatma aracı seçim problemi için kesin ve bulanık VZA yaklaşımlarının karşılaştırılması, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 5 (2017) 21-30.
- [11] Alvalı G.T., Balbay A., Şişman T., Güneş S., Çok kriterli karar verme teknikleri kullanılarak elektrikli araç şasi malzemesi seçimi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 9 (2021) 573-588.
- [12] Mi X., Tang M., Liao H., Shen W., Lev B., The state-of-the-art survey on integrations and applications of the best worst method in decision making: Why, what, what for and what's next? *Omega*, 87 (2019) 205-225.
- [13] Stević Ž., Pamučar D., Kazimieras Zavadskas E., Čirović G., Prentkovskis O., The selection of wagons for the internal transport of a logistics company: A novel approach based on rough BWM and rough SAW methods, *Symmetry*, 9(2017) 264.
- [14] Youssef A.E., An integrated MCDM approach for cloud service selection based on TOPSIS and BWM, *IEEE Access*, 8 (2020) 71851-71865.
- [15] Deng F., Li Y., Lin H., Miao J., Liang X., A BWM-TOPSIS hazardous waste inventory safety risk evaluation, *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17 (2020) 5765.
- [16] Torkayesh A.E., Pamucar D., Ecer F., Chatterjee P., An integrated BWM-LBWA-CoCoSo framework for evaluation of healthcare sectors in Eastern Europe, *Socio-Economic Planning Sciences*, 78 (2021) 101052.
- [17] Banihashemi S.A., Khalilzadeh M., Assessing employees' job motivation using BWM method and fuzzy goal programming: a case study of a petrochemical company, *International Journal of Energy Sector Management*, 16 (2022) 1259-1280.

- [18] Avakh Darestani S., Palizban T., Imannezhad R., Maintenance strategy selection: a combined goal programming approach and BWM-TOPSIS for paper production industry, *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 28 (2022) 14-36.
- [19] Kumar S., Bhaumik S., Patnaik L., Maity S.R., Paleu V., Application of integrated BWM Fuzzy-MARCOS approach for coating material selection in tooling industries, *Materials*, 15 (2022) 9002.
- [20] Shayani Mehr P., Hafezalkotob A., Fardi K., Seiti H., Movahedi Sobhani F., Hafezalkotob A., A comprehensive framework for solar panel technology selection: A BWM-MULTIMOOSRAL approach, *Energy Science & Engineering*, 10 (2022) 4595-4625.
- [21] Badi I., Pamučar D., Stević Ž., Muhammad L.J., Wind farm site selection using BWM-AHP-MARCOS method: A case study of Libya, *Scientific African*, 19 (2023) e01511.
- [22] Ishizaka A., Khan S.A., Kheybari S., Zaman S.I., Supplier selection in closed loop pharma supply chain: a novel BWM-GAIA framework, *Annals of Operations Research*, 324 (2023) 13-36.
- [23] Mehrnoor S., Robati M., Kheirkhah Zarkesh M.M., Farsad F., Baikpour S., Land subsidence hazard assessment based on novel hybrid approach: BWM, weighted overlay index (WOI), and support vector machine (SVM), *Natural Hazards*, 115 (2023) 1997-2030.
- [24] Tuş A., Aytaç Adalı E., The new combination with CRITIC and WASPAS methods for the time and attendance software selection problem, *OPSEARCH*, 56 (2019) 528-538.
- [25] Rao C.N., Sujatha M., A consensus-based Fermatean fuzzy WASPAS methodology for selection of healthcare waste treatment technology selection, *Decision Making: Applications in Management and Engineering*, 6 (2023) 600-619.
- [26] Karande P., Zavadskas E.K., Chakraborty S., A study on the ranking performance of some MCDM methods for industrial robot selection problems, *International Journal of Industrial Engineering Computations*, 7 (2016) 399-422.
- [27] Bakır M., Akan Ş., Durmaz E., Exploring service quality of low-cost airlines in Europe: An integrated MCDM approach, *Economics and Business Review*, 5 (2019) 109-130.
- [28] Baç U., An integrated SWARA-WASPAS group decision making framework to evaluate smart card systems for public transportation, *Mathematics*, 8 (2020) 1723.
- [29] Pathapalli V.R., Basam V.R., Gudimetta S.K., Koppula M.R., Optimization of machining parameters using WASPAS and MOORA, *World Journal of Engineering*, 17 (2020) 237-246.
- [30] Singh R.K., Modgil S., Supplier selection using SWARA and WASPAS – a case study of Indian cement industry, *Measuring Business Excellence*, 24 (2020) 243-265.
- [31] Akpinar M.E., Third-party logistics (3PL) provider selection using hybrid model of SWARA and WASPAS, *International Journal of Pure and Applied Sciences*, 7 (2021) 371-382.
- [32] Ao Xuan H., Vu Trinh V., Techato K., Phoungthong K., Use of hybrid MCDM methods for site location of solar-powered hydrogen production plants in Uzbekistan, *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 52 (2022) 101979.
- [33] Moghimi F., Baradaran V., Hosseinian A.H., Identifying the influential factors on the effectiveness of industrial parks and using an MCDM method to rank them: case study of Iran, *Journal of Facilities Management*, (2022). doi:10.1108/JFM-12-2021-0151
- [34] Shivade A.S., Sapkal S.U., Selection of optimum plant layout using AHP-TOPSIS and WASPAS approaches coupled with Entropy method, *Decision Science Letters*, 11 (2022) 545-562.
- [35] Rezaei J., Best-worst multi-criteria decision-making method, *Omega*, 53 (2015) 49-57.
- [36] Amari A., Moussaid L., Tallal S., New parking lot selection approach based on the multi-criteria decision making (MCDM) methods: health criteria, *Sustainability*, 15 (2023) 938.
- [37] Satıcı S., MEREC temelli WASPAS yöntemiyle üniversitelerin girişimci ve yenilikçi performanslarının değerlendirilmesi, *Girişimcilik ve Kalkınma Dergisi*, 17 (2022) 106-128.

Ahşılmanmış İmalat Yöntemi Seçmek İçin Bir Karar Destek Sistemi Önerisi

Leman KARGIN¹, Yusuf Tansel İÇ^{1*}

¹ Başkent Üniversitesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, 06790, Ankara

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 07/12/2023
Düzeltilme: 29/12/2023
Kabul: 04/01/2024

Anahtar Kelimeler

Ahşılmanmış imalat yöntemleri
Karar destek sistemleri
Çok ölçütlü karar verme
İmalat

Article Info

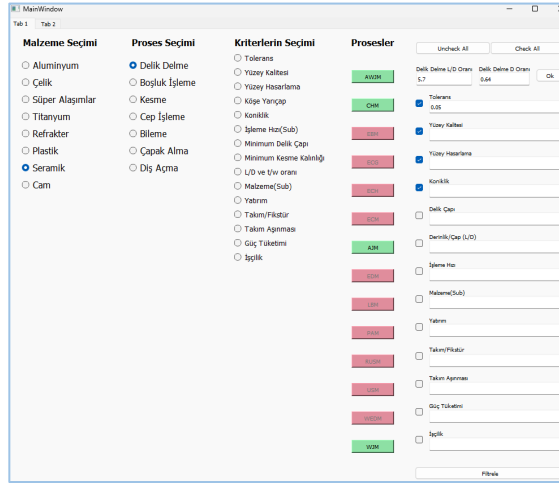
Research article
Received: 07/12/2023
Revision: 29/12/2023
Accepted: 04/01/2024

Keywords

Nontraditional manufacturing processes
Decision support systems
Multi-criteria decision making
Manufacturing

Grafik Özet (Graphical/Tabular Abstract)

Bu çalışmada AHP-TOPSIS yöntemleri bütünleşik olarak kullanılarak ahşılmanmış imalat yöntemlerinin (AİY) seçimine yönelik bir Karar Destek Sistemi (KDS) geliştirilmiştir. Literatürde mevcut olan bilgiler KDS içerisinde bütünleştirilmiş ve kullanıcı yönlendirilerek AHP-TOPSIS yöntemlerini uygulayıp sonuçta yapılacak işleme uygun AİY'lerin en uygun olandan uygun olmayana sıralanması gerçekleştirilebilmiştir. / In this study, a Decision Support System (DSS) was developed for the selection of nontraditional manufacturing processes (NTMPs) by using AHP-TOPSIS methods in an integrated manner. Information that is available in the literature was combined within the DSS, applying the AHP-TOPSIS methods with the guidance of the decision-maker. It is possible to rank the AHPs suitable for the operation from the most suitable one to the most inappropriate.



Şekil A: KDS uygulaması / Figure A: KDS application

Önemli noktalar (Highlights)

- The AHP-TOPSIS bütünleşik yöntemi kullanılmıştır. / AHP-TOPSIS integrated method is used.
- Esnek yapılı bir KDS geliştirilmiştir. / A flexible structured DSS has been improved.
- AİY yöntemleri sıralanmıştır. / NTM processes have been ranked.

Amaç (Aim): Geliştirilen KDS ile yapılacak işe en uygun AİY'nin karar vericiye önerilmesi hedeflenmiştir. / The developed DSS aims to recommend the most suitable NTMP for the operation to the decision-maker.

Originality (Özgünlük): AİY eçimindeki tüm aşamaları bir KDS yapısında toplayan bir model literatürde kazandırılmıştır. Ayrıca gerçek hayat uygulamaları için kullanışlı bir KDS geliştirilmiştir. / A model that collects all stages of NTMP in a DSS structure has been introduced to the literature. Additionally, a useful DSS has been developed for real-life applications.

Bulgular (Results): Geliştirilen KDS literatürde yapılmış olan çalışmalar üzereinde denenmiş ve gerçekleştirilen 4 örnek çalışmada da benzer sıralama sonuçları çok hızlı bir şekilde KDS'den alınabilmiştir. / The developed DSS was tested in the studies conducted in the literature, and similar ranking results could be obtained very quickly from the DSS in 4 sample studies.

Sonuç (Conclusion): Bu makalede özellikle Pratik hayatta yapılacak AİY seçim çalışmalarında kullanışlı olabilecek bir KDS geliştirilmiştir. KDS'nin yapısı hem teknik gereksinimlere uygun olarak bir ön değerlendirme yapmayı, hem de ön değerlendirme sonucu belirlenen alternatifleri kendi aralarında sıralamayı gerçekleştirebilen bir yapıya sahiptir. / In this article, a DSS has been developed that can be useful, especially in NTMP selection studies in practical life. The structure of DSS is such that it can perform both a preliminary evaluation by technical requirements and a ranking of the alternatives determined as a result of the preliminary analysis.



Alışılmamış İmalat Yöntemi Seçmek İçin Bir Karar Destek Sistemi Önerisi

Leman KARGIN¹ , Yusuf Tansel İÇ^{1*} 

¹ Baskent Üniversitesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, 06790, Ankara

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 07/12/2023
Düzeltilme: 29/12/2023
Kabul: 04/01/2024

Anahtar Kelimeler

Alışılmamış imalat yöntemleri
Karar destek sistemleri
Çok ölçütlü karar verme
İmalat

Öz

Günümüz teknolojileri dikkate alındığında, dar toleranslarda çalışma gerektiren küçük ve kırılğan parçalarda, karmaşık geometrilerin işleme zorluğunda kullanıma uygun ve yeni üretim teknolojileri olarak adlandırabileceğimiz Alışılmamış İmalat Yöntemleri (AİY) imalat alanında önemli bir yer almıştır. Bu çalışmada geliştirilen Karar Destek Sistemi (KDS) ile literatürdeki bilgi birikiminden yararlanarak, endüstriyel anlamda gerçek hayattaki kullanım alanlarında uygulanabilir nitelikte olan, hızlı ve dinamik karar verme, gerekirse hangi imalat sistemine yatırım yapma konusunda karar vericilere yardımcı olacak, veri iletişiminin olduğu, parametrik yapısı ile kriterlerin ve alternatiflerin değiştirilebileceği bir sistemin ortaya konulması planlanmıştır. Söz konusu KDS, kullanıcının arzu ettiği proses tipine göre ilgili verilerin girilmesi ile uygun filtrelemelerin yapılması sonrasında alternatif AİY'lerin sıralanması için Çok Kriterli Karar Verme Yöntemlerini uygulayarak kullanıcının karar vermesine yardımcı olmaktadır. KDS Python yazılım dili kullanılarak yazılmıştır.

A Decision Support System Proposal for the Selection of a Nontraditional Manufacturing Process

Article Info

Research article
Received: 07/12/2023
Revision: 29/12/2023
Accepted: 04/01/2024

Keywords

Nontraditional manufacturing process
Decision support systems
Multi-criteria decision making
Manufacturing

Abstract

Considering today's technologies, Nontraditional Manufacturing Processes (NTMPs), which we can call new production technologies, have taken an important place in the field of manufacturing, they emerged due to reasons such as small and fragile parts that require working in minimal processing conditions and difficulties in processing complex geometries. The Decision Support System (DSS) developed in this study, by taking advantage of the knowledge in the literature, has a parametric structure with data communication, which is applicable in real-life industrial use areas, will help decision-makers in fast and dynamic decision-making, and which manufacturing system to invest in if necessary. It is planned to introduce a system where criteria and alternatives can be changed. The DSS in question helps the user decide by applying Multi-Criteria Decision-Making Methods to rank alternative NTMPs by entering the relevant data according to the user's desired process type and making appropriate filters. KDS is written using the Python programming language.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Uzun yıllardır kullanılmasından dolayı ortaya çıkan geleneksel imalat yöntemlerinin yoğun bir bilgi birikimine nazaran, Alışılmamış İmalat Yöntemleri (AİY) kapsamındaki bilgi yoğunluğu ve tecrübe daha azdır. Bu sebeple AİY seçiminde karar vermeyi zorlaştırıcı unsurlar olarak; bilgi birikimi ve tecrübe eksikliği, AİY'lerdeki hızlı gelişmeler ve değişimler gibi sebepler göz önüne alındığında AİY seçiminin zor bir karar süreci olduğu söylenebilir [1,2].

AİY terimi, çeşitli termal, kimyasal, elektrik ve mekanik malzeme kaldırma işlemlerini ifade eder.

AİY'ler; malzeme teknolojisinin gelişmesinden, yeni ürün performansı ve dayanıklılık standartlarına olan talep, karmaşık tasarlanmış ürünlerin şekilleri, takım aşınması ve ekonomik getirisinin dikkate alınmasını önceleyerek, artan hassasiyete yönelik eğilimi karşılamak ve iyileştirilmiş yüzey koşulları sağlamak için ortaya çıkmıştır.

AİY'ler son zamanlarda geliştirilen metalleri ve ametalleri işleme ihtiyacıyla geliştirilmiştir. Bu yeni malzemeler genellikle, geleneksel yöntemlerle işlenmesi zor veya imkansız hale gelebilen özel durumlara (yüksek mukavemet, yüksek sertlik ve yüksek tokluk) sahiptir. Kolayca gerçekleştirilemeyen ve bazı durumlarda geleneksel

işlemeyle elde edilmesi imkansız ve / veya karmaşık parça geometrilerine duyulan ihtiyaçta AİY'ler için diğer gereksinimi ifade eder. Bu gereksinimlerin çoğu, son yıllarda önemli ölçüde büyüyen havacılık ve elektronik endüstrileri ile ilişkilidir. AİY'ler Mekanik İşleme, Kimyasal ve Elektrokimyasal İşleme, Termoelektrik İşleme şeklinde üç ana sınıfa ayrılır [3]. AİY'ler malzeme işlemek üzere çeşitli enerji kaynaklarını kullanırlar. Bu bakımdan malzemeyi işlemek için kullanılan enerji kaynağı, takım ve enerji aktarım ortamı ve malzeme kaldırma mekanizması doğrultusunda Tablo 1'deki gibi bir sınıflandırmaya tabi tutulurlar [4, 5].

Çalışmanın ikinci bölümünde literatür taramasına yer verilmiştir. Üçüncü bölümde KDS uygulamasında kullanılan yöntemler ve KDS'nin geliştirilme aşamalarından bahsedilmiştir. Dördüncü bölümde KDS ile yapılan uygulama çalışmalarına yer verilmiştir. Beşinci bölümde ise çalışmada elde edilen sonuçlar özetlenmiştir.

2. LİTERATÜR TARAMASI (LITERATURE SURVEY)

Literatürde AİY'lerin seçimine yönelik bazı çalışmalara aşağıda değinilmektedir. Coğun [7], uygun olmayan AİY'leri değerlendirme dışı bırakmak ve geri kalan uygun olanları sıralamak için etkileşimli olarak oluşturulmuş 16 basamaklı bir sınıflandırma kodu kullanmıştır. Coğun'un [7] çalışması sltrnatif AİY'ler arasında seçim yapan ilk çalışma olma özelliğini taşımaktadır. Yurdakul ve Cogun [8], Analitik Hiyerarşi Prosesini (AHP) ve İdeal Çözümlere Yakınlığın Değerlendirilmesiyle Tercihlerin Sıralanması Tekniğini (Technique for Order Preferences by Similarity to Ideal Solution-TOPSIS) birleştirerek belirli bir uygulama gereksinimi için bir AİY seçim yöntemi önermiştir. Bu yöntem, AİY seçimi ile ilgili Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV) metodlarının kullanıldığı ilk çalışmadır. Çalışmada on iki AİY on iki kriter kullanılarak AHP ve TOPSIS yöntemleri ile sıralanmıştır.

Tablo 1. Alışılmamış imalat yöntemlerinin enerji kaynağına göre sınıflandırılması (Classification of nontraditional manufacturing processes according to energy source)

Enerji Türü	Yöntem	İngilizcesi	Türkçesi	Enerji Kaynağı	Araç	Transfer Aracı	Malzeme Kaldırma Mekanizması
Mekanik	USM	Ultrasonic Machining	Ultrasonik İşleme	Ultrasonik Titreşim	Sonotrot	Aşındırıcı	Erozyon veya aşınma
Mekanik	AJM	Abrasive Jet Machining	Aşındırıcı Jet İşleme	Pnömatik Basınç	Aşındırıcı Jet	Hava	Erozyon veya aşınma
Mekanik	WJM	Water Jet Machining	Su Jeti İle İşleme	Hidrolik Basınç	Su Jeti	Hava	Erozyon veya aşınma
Mekanik	AWJM	Abrasive Water Jet Machining	Aşındırıcı Su Jeti İle İşleme	Hidrolik Basınç	Aşındırıcı Jet	Hava	Erozyon veya aşınma
Mekanik	IJM	Ice Jet Machining	Buz Jeti İle İşleme	Hidrolik Basınç	Buz Jeti	Hava	Erozyon veya aşınma
Mekanik	AFM	Abrasive Flow Machining	Aşındırıcı Akış İşleme	Hidrolik Basınç	Aşındırıcılar	Macun	Erozyon veya aşınma
Kimyasal	CHM	Electrochemical Machining	Elektrokimyasal İşleme	Yüksek akım	Elektrot	Elektrolit	İyon yer değiştirme yoluyla anot çözünmesi
Elektrokimyasal	ECM	Electrochemical Machining	Kimyasal İşleme	Aşındırıcı ajan	Maske	Dağlayıcı	Kimyasal çözünme
Termal	EDM	Electric Discharge Machining	Elektrik Deşarj İşleme	Yüksek voltaj	Elektrot	Yalıtkan	Erime ve buharlaşma
Termal	EBM	Electron Beam Machining	Elektron Işını İşleme	İyonize malzeme	Elektron demeti	Vakum	
Termal	IBM	Ion Beam Machining	İyon Işını İşleme	İyonize malzeme		İyon ışını	
Termal	LBM	Laser Beam Machining	Lazer Işını İşleme	Güçlendirilmiş ışık	Lazer ışını	Hava	
Termal	PAM	Plasma Arc Machining	Plazma Ark İşleme	İyonize malzeme	Plazma Jeti	Plazma	

Diğer taraftan, Chakraborty ve Dey [9], en uygun AİY'nin belirlenmesi için kalite fonksiyon yayılımı

(QFD) ile bir uzman sistem geliştirmiştir. Çalışmalarında, ürün ve işleme karakteristiklerine

göre kalite evi matrisi oluşturulmuştur. Das Chakladar ve Chakraborty [10], belirli bir iş malzemesi ve şekil özelliği kombinasyonu için en uygun AİY'nin seçilmesi amacıyla TOPSIS ve AHP yöntemlerini birleştirerek Visual Basic ile bir uzman sistem geliştirmişlerdir. Chandrasselan ve ark. [11], en uygun AİY seçimi için endüstriyel öneme sahip yirmi AİY kullanarak, gerçek zamanlı ve web tabanlı olmak üzere üç katmanlı bir bilgi sistemi geliştirmişlerdir. Das Chakladar ve ark. [12], AİY seçimi problemlerini kullanıcı arayüzü yardımıyla çözmek için bir yaklaşım sunmuşlardır. "Diagraph" teorisini kullanarak AİY seçimi için bir uzman sistem önermişlerdir. Sugumaran ve ark. [13], belirlenen bir iş malzemesi üzerinde uygulanacak bir imalat işlemi için en uygun AİY'nin seçimi için mühendislere yardımcı olmak adına yapay sinir ağı tabanlı bir yaklaşım sunmuşlardır. Das ve Chakraborty [14], AİY seçim kararını etkileyen çeşitli kriterler arasındaki karşılıklı bağımlılık ve geri bildirim ilişkilerini dikkate alarak belirli bir işleme uygulanması için en uygun AİY'yi seçmek üzere analitik ağ süreci (ANP) tabanlı bir yaklaşım geliştirmişlerdir. Sadhu ve Chakraborty [15], AİY seçim problemlerini çözmek için veri zarflama analizi (DEA) yöntemini kullanmışlardır. Çalışmanın ilk aşamasında belirli parametreler altında Charnes, Cooper ve Rhodes (CCR) veri zarflama analizi modeli ile en uygun AİY'leri belirlenmişlerdir. İkinci aşamasında AİY'ler ÇKKV ile sıralama yapılmıştır. Karande ve Chakraborty [16], dört adet AİY seçim problemini çözmek için PROMETHEE ve GAIA yöntemi ile entegre bir yaklaşım kullanan bir yöntem geliştirmişlerdir. Kul [17], çalışmada AİY seçim probleminde Bulanık AHP ve Bulanık TOPSIS yöntemlerinin uygulandığı bir yaklaşım ortaya koymuştur. Temuçin ve ark. [18], AİY seçim problemleri için gerekli verilerin bir kısmını uzmanlara uygulanan anketler aracılığıyla toplayarak, TOPSIS ve bulanık TOPSIS yöntemlerini kullanan bir karar destek sistemi geliştirmişlerdir. Choudhury ve ark. [19], AİY seçim problemlerinin çözümü için AHP ve TOPSIS kullanan entegre bir yaklaşımı kullanmışlardır. Chatterjee ve Chakraborty [20], üç açıklayıcı örnek yardımıyla AİY seçim problemlerini çözmek için EVAMIX yöntemini uygulamışlardır. Roy ve ark. [21] AİY seçiminde ilk aşamada bulanık AHP yöntemini uyguladıktan sonra en iyi olan AİY'yi seçmek için AİY'lerin performans puanlarını değerlendirmek üzere QFD yöntemini uygulamışlardır. Azaryoon ve ark. [22], AİY'lerdeki çeşitli performans ölçümlerini değerlendirmek için DEMATEL, ANP ve VIKOR yöntemlerini içeren hibrit bir bilgi tabanlı sistem geliştirmişlerdir. Madić ve ark. [23] çeşitli kalite kriterlerinin göreceli önemini belirlemesi ve

belirli bir imalat prosesi için en uygun AİY'nin seçilmesi için AHP, MOORA ve TOPSIS yöntemlerini kullanmışlardır. Yine Madić ve ark. [24], çok sayıda aday alternatif arasından en iyi AİY'yi seçmek için bir ÇKKV yöntemi olan OCRA yöntemini uygulamışlardır. Roy ve ark. [21], bir AİY'deki farklı teknik gereksinimlerin göreceli önemini araştırmak için bulanık AHP ve QFD yöntemlerinin kullanıldığı bir uygulama önermişlerdir. Chatterjee ve ark. [25], AİY seçimi ve değerlendirilmesinde kriter ağırlıklarının belirlenmesi için öncelikle FARE yöntemi uygulanmış ve alternatif AİY'ler daha sonra MABAC yöntemi kullanılarak sıralanmıştır. Prasad ve Chakraborty [26], uzman sistemler ve bulanık mantık teknikleri kullanan bir AİY seçim metodolojisi oluşturmuşlardır. Uzman olmayan kullanıcının, parça gereksinimlerini temel olarak en uygun işleme yöntemini seçebileceği bir süreç sunulmaya çalışılmıştır. Talib ve Asjad [27], 27 değerlendirme kriterine göre çeşitli AİY'nin önceliklendirilmesi ve sıralanması için AHP yöntemini kullanan bir model geliştirmişlerdir. Yurdakul ve İç [28], belirli bir iş malzemesi ve şekil özelliği kombinasyonları için AİY seçimine yönelik AHP ve TOPSIS yöntemlerinin bulanık tabanlı modellerinin uygulamalarını sunmuşlardır. Yurdakul ve ark [29], sezgisel ve üçgensel bulanık AİY sıralama modelini geliştirerek elde edilen sıralama sonuçlarını bulanık olmayan sıralama modellerinin sonuçlarıyla kıyaslamışlardır. Chakraborty ve ark. [30, 31] akıllı bir karar modeli tasarlanmış ve ilgili mühendisin belirli bir parametrik kombinasyon için çeşitli AİY'ler hakkında fikir sahibi olmasına rehberlik etmek üzere önerilen model VBASIC'te geliştirilmiştir. Kumari ve Acherjee [32] AİY seçiminde CRITIC-CODAS bütünleşik yöntemini önermiştir. Roy ve ark [33] Analitik Ağ Süreci (ANP) ve QFD yöntemlerini bütünleşik olarak uygulayarak AİY seçim çalışması gerçekleştirmişlerdir. Jagtap ve Karande [34] m-polar bulanık set ELECTRE-I ve AHP yöntemlerini bütünleşik olarak kullanarak AİY seçimine yönelik bir model önermişlerdir.

Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde; belirli bir alternatif AİY seçenek kümesi içerisinde belirli kriterler doğrultusunda bir sıralama yapılmasının hedeflendiği veya sadece proses için uygun olabilecek parametreler değerlendirilerek bir eleme yapılmak suretiyle en uygun AİY'nin tespit edilmesinin amaçlandığı çalışmalara odaklanıldığı görülmektedir. Literatürdeki çalışmalarda belirli bir işe uygun olarak uygun AİY'leri bir ön eleme ile belirledikten sonra, birçok ölçütlü karar verme yöntemiyle sıralayan yapıda sunulmuş çalışmaya rastlanamamaktadır. Bu çalışmada bu açığı

kapatmaya yönelik olarak, literatürde en fazla bütünlük olarak kullanımı tercih edilen ve bilgisayar programlama süreci kolaylıkla gerçekleştirilebilen AHP ve TOPSIS yöntemleri kullanılarak, payton programı ile bir karar destek sistemi geliştirilmiş ve literatürdeki tüm aşamaları bir sistem içerisinde değerlendirebilen bir karar destek sistemi yapısı kurulmuştur.

3. ALIŞILMAMIŞ İMALAT YÖNTEMLERİ SEÇİMİ İÇİN KARAR DESTEK SİSTEMİ (A DECISION SUPPORT SYSTEM FOR NONTRADITIONAL MANUFACTURING PROCESS SELECTION)

3.1. Analitik Hiyerarşik Prosesi (Analytic Hierarchy Process)

Analitik Hiyerarşik Prosesi (AHP) 1981 yılında L. Thomas Saaty tarafından ortaya konan bir çok kriterli karar verme yöntemidir [35]. AHP'de öncelikle problem belirlenir ve probleme ait kriterler alt kriterler ve alternatifler ortaya konur. Bu şekilde bir hiyerarşi oluşturulur. Hiyerarşi oluşturulduktan sonra ikili karşılaştırma matrisi elde edilir ve bu verilerden her kriterin önem derecesi belirlenir. Yöntemin uygulama adımları aşağıda kısaca özetlenmiştir:

- Amaç, kriterler, karar alternatifleri belirlenir ve hiyerarşik yapı oluşturulur.
- İkili karşılaştırma matrisi oluşturulur (Eş.1).

$$K = \begin{array}{c|ccc} & K_1 & K_2 & K_n \\ \hline K_1 & w_1/w_1 & w_1/w_2 & \dots & w_1/w_n \\ K_2 & w_2/w_1 & w_2/w_2 & \dots & w_2/w_n \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ K_n & w_n/w_1 & w_n/w_2 & \dots & w_n/w_n \end{array} \quad (1)$$

Matriste K_i , $i=1, \dots, n$ değerine kadar değer almak üzere kriter sayısını, w_i ise kriterin ağırlık değerini ifade eder. Ağırlık değerleri belirlenirken Tablo 2'den yararlanır.

- Normalize edilmiş ikili karşılaştırma matrisi bulunur (Eş.2). Bu amaçla önce her bir sütun elemanının toplanması ile sütun toplamları elde edilir.

$$K = \begin{array}{c|ccc} & K_1 & K_2 & K_n \\ \hline K_1 & w_1/w_1 & w_1/w_2 & \dots & w_1/w_n \\ K_2 & w_2/w_1 & w_2/w_2 & \dots & w_2/w_n \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ K_n & w_n/w_1 & w_n/w_2 & \dots & w_n/w_n \\ \hline Sütun Toplamı & \sum_{i=1}^n w_i & \sum_{i=1}^n w_i & \dots & \sum_{i=1}^n w_i \end{array} \quad (2)$$

Tablo 2. Saaty'nin İkili karşılaştırmada ölçeği (Saaty's pair-wise comparison scale) [35]

Önem Dereceleri	Derece Tanımları
1	Eşit önem
3	Orta önem
5	Güçlü önem
7	Çok güçlü önem
9	En üst düzey önem
2,4,6,8	Ara Değerler

Ardından her bir satır elemanı ait olduğu sütun toplamına bölünerek normalize matris elde edilir (Eş.3).

Daha sonra, normalize matrisin satır elemanları toplanıp kriter sayısına bölünerek kriter öncelik (ağırlık) değerleri bulunmuş olur (Eş.4 ve 5).

Geliştirilen KDS kapsamında kriter ağırlıkları AHP yöntemi ile hesaplanarak TOPSIS yöntemine aktarılmıştır.

$$L = \begin{array}{c|ccc} & L_1 & L_2 & L_n \\ \hline L_1 & \frac{(w_1/w_1)/\sum_{i=1}^n w_i}{w_1} & \frac{(w_1/w_2)/\sum_{i=1}^n w_i}{w_2} & \dots & \frac{(w_1/w_n)/\sum_{i=1}^n w_i}{w_n} \\ L_2 & \frac{(w_2/w_1)/\sum_{i=1}^n w_i}{w_1} & \frac{(w_2/w_2)/\sum_{i=1}^n w_i}{w_2} & \dots & \frac{(w_2/w_n)/\sum_{i=1}^n w_i}{w_n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ L_n & \frac{(w_n/w_1)/\sum_{i=1}^n w_i}{w_1} & \frac{(w_n/w_2)/\sum_{i=1}^n w_i}{w_2} & \dots & \frac{(w_n/w_n)/\sum_{i=1}^n w_i}{w_n} \\ \hline Toplam & 1 & 1 & \dots & 1 \end{array} \quad (3)$$

Eş.(3), Eş. (4) şeklinde düzenlenebilir. Ardından Eş (5) kullanılarak öncelik vektörü (W) belirlenir.

$$L = \begin{array}{c|ccc} & L_1 & L_2 & L_n \\ \hline L_1 & y_{11} & y_{12} & \dots & y_{1n} \\ L_2 & y_{21} & y_{22} & \dots & y_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ L_n & y_{n1} & y_{n2} & \dots & y_{nn} \\ \hline Toplam & 1 & 1 & \dots & 1 \end{array} \quad (4)$$

$$W = \begin{bmatrix} w_1 = \frac{\sum_{j=1}^n y_{1j}}{n} \\ w_2 = \frac{\sum_{j=1}^n y_{2j}}{n} \\ \dots \\ w_n = \frac{\sum_{j=1}^n y_{nj}}{n} \end{bmatrix} \quad (5)$$

AHP yönteminde, CR (Tutarlılık Oran/Consistency Ratio) ile ikili karşılaştırma matrisinin tutarlılığı kontrol edilir. K matrisiyle W öncelik vektörü arasında aşağıdaki gibi matematiksel bir ilişki yazılır [35]:

$$K \cdot W = \lambda \cdot W \quad (6)$$

$$K \cdot W \cdot W^{-1} = \lambda \cdot W \cdot W^{-1} \quad (7)$$

$$(K \cdot W)/W = \lambda \cdot I \quad (8)$$

$$(K \cdot W)/W = \lambda \quad (9)$$

Burada λ öz vektörü göstermektedir. Tutarlılık indeksi (CI) aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$CI = \frac{\lambda - n}{n - 1} \quad (10)$$

CI ve rassal indeks (RI) olarak tanımlanan ve Tablo 3'de gösterilen veriler ile CR hesaplanır:

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (11)$$

Burada CR'nin 0,10'dan küçük hesaplanması ikili karşılaştırma matrisinin tutarlı olduğunu gösterir.

Tablo 3. RI değerleri (RI values) [36]

Kriter Sayısı (n)	RI
1	0
2	0
3	0,58
4	0,90
5	1,12
6	1,24
7	1,32
8	1,41
9	1,45
10	1,49
11	1,51
12	1,48
13	1,56

3.2. Tercihlerin İdeal Çözüme Benzerlikleri Yoluyla Sıralanması Tekniği (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS))

KDS, kullanıcının belirlediği proses tipine ve seçtiği kriterlere göre AHP metodu ile kriter ağırlıklarını belirler. Ardından alternatif AİY'lerin

TOPSIS metoduna uygun olarak sıralaması gerçekleştirilir. Yöntem Hwang ve Yoon tarafından geliştirilmiştir [36]. TOPSIS yöntemi farklı seçim çalışmalarında uygulanmıştır [37-45]. TOPSIS yönteminin uygulama adımları aşağıdaki gibidir:

Adım 1: Karar matrisinin normalize edilmesi

Öncelikle bir karar matrisi, satırlarında alternatifler ($i=1, \dots, m$), sütunlarda kriterler ($j=1, \dots, n$) olacak şekilde elde edilir. Eş.(12) kullanılarak normalize matris (R) elde edilir (Eş.13).

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n x_{ij}^2}} \quad i=1, \dots, m \text{ ve } j=1, \dots, n. \quad (12)$$

$$R = (r_{ij})_{m \times n} = \begin{pmatrix} x_{11} & K & x_{1n} \\ M & O & M \\ x_{m1} & L & x_{mn} \end{pmatrix} \quad (13)$$

Adım 2: Ağırlıklı normalize matris

AHP ile hesaplanmış olan kriter ağırlıkları kullanılarak ağırlıklı normalize matris oluşturulur (Eş. 14 ve Eş. 15).

$$V = [v_{ij}]_{m \times n} \quad (14)$$

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

Adım 3: Pozitif ve negatif ideal çözümlerin elde edilmesi

Eş.(16) ve Eş. (17) kullanılarak ideal çözümler belirlenebilir.

$$A^+ = \{v_1^+, \dots, v_n^+\} = \left\{ (\max_j v_{ij} \mid i \in I^I), (\min_j v_{ij} \mid i \in I^{II}) \right\} \quad (16)$$

$$A^- = \{v_1^-, \dots, v_n^-\} = \left\{ (\min_j v_{ij} \mid i \in I^I), (\max_j v_{ij} \mid i \in I^{II}) \right\} \quad (17)$$

Adım 4: Pozitif ve negatif ideal çözümlere uzaklıkların bulunması

Eş.(18) ve Eş.(19) ile ideal çözüme uzaklıklar hesaplanır:

$$S_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_{ij}^+)^2} \quad (18)$$

$$S_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_{ij}^-)^2} \quad (19)$$

Adım 5: Sıralama puanlarının hesaplanması

Eş.(20) kullanılarak bulunan sıralama puanlarına göre alternatifler sıralanır.

$$C_i^* = \frac{S_i^-}{S_i^- + S_i^+} \quad C_i \in [0,1] \quad i = 1, \dots, m \quad (20)$$

4. KARAR DESTEK SİSTEMİNİN GELİŞTİRİLMESİ VE UYGULANMASI (DEVELOPMENT OF THE DECISION SUPPORT SYSTEM AND ITS APPLICATION)

AİY seçimi için geliştirilen KDS iki safhada geliştirilmiştir. İlk aşamada en iyi AİY'nin seçimi için karar vericinin arzu ettiği proses tipine uygun AİY'ler ve ilgili kriterler belirlenmiştir. Ardından kriter ağırlıklandırması için AHP ve alternatif AİY'lerin sıralanması için TOPSIS uygulanmıştır. Uygulamada en yaygın kullanıma sahip olduğu değerlendirilen 14 AİY ve alternatif AİY'lerin performansları için değerlendirme kriterleri Tablo 4'de verilmiştir.

KDS'nin giriş ekranı Şekil 1'de gösterilmiştir. Bu ekranda karar verici malzeme, proses ve seçimde kullanacağı kriterleri belirleyerek "filtrele" butonuna basarak sonraki aşamaya ilerleyebilir. Bu aşamaların işleyişi ile ilgili detaylı bilgiler ilerleyen bölümlerde sunulmuştur.

Tablo 4. KDS'de kullanılan AİY yöntemleri ve kriterler (NTM processes and criteria used in DSS)

Ahşılmamış İmalat Yöntemleri	Kriterler
USM-Ultrasonic Machining -Ultrasonik İşleme	<input type="checkbox"/> <u>Kalite</u>
AJM-Abrasive Jet Machining-Aşındırıcı Jet İşleme	<input type="checkbox"/> Yüzey Hasarlama
WJM-Water Jet Machining-Su Jeti İle İşleme	<input type="checkbox"/> Yüzey Kalitesi
AWJM-Abrasive Water Jet Machining-Aşındırıcı Su Jeti İle İşleme	<input type="checkbox"/> Koniklik
IJM İce Jet Machining Buz Jeti İle İşleme	<input type="checkbox"/> Köşe yarıçap
AFM Abrasive Flow Machining Aşındırıcı Akış İşleme	<input type="checkbox"/> Tolerans
CHM Electrochemical Machining Elektrokimyasal İşleme	<input type="checkbox"/> <u>İşleme Hızı</u>
ECM Chemical Machining Kimyasal İşleme	<input type="checkbox"/> İşleme Hızı
EDM Electric Discharge Machining Elektrik Deşarjı İşleme	<input type="checkbox"/> <u>Delme/Kesme Sınırları</u>
EBM Electron Beam Machining Elektron Işını İşleme	<input type="checkbox"/> Minimum Çapı
IBM Ion Beam Machining İyon Işını İşleme	<input type="checkbox"/> Minimum Kalınlık
LBM Laser Beam Machining Lazer Işını İşleme	<input type="checkbox"/> L/D ve t/w
PAM Plasma Arc Machining Plazma Ark İşleme	<input type="checkbox"/> <u>Malzeme</u>
	<input type="checkbox"/> Minimum Delik Çapı
	<input type="checkbox"/> <u>Maliyet</u>
	<input type="checkbox"/> Yatırım
	<input type="checkbox"/> Takım/Fikstür
	<input type="checkbox"/> Takım Aşınması
	<input type="checkbox"/> Güç Tüketimi
	<input type="checkbox"/> İşçilik

AİY'lerden uygun olmayanlar kırmızı olarak ekranda gösterilir.

4.2. Proses Seçimi (Process Selection)

Kullanıcı, malzeme üzerinde yapılması istediği prosesin tipini KDS'de Şekil 3'deki ekran üzerinden seçer. Uygulama, girilen bilgiler doğrultusunda Tablo 6' daki şekilsel yeterliliklere göre uygun AİY'leri belirler. Delik Delme seçilirse, L/D oranı, Boşluk İşleme; Kesme veya Cep İşleme seçilirse t/w oranının kullanıcı tarafından girilmesi istenir.

Malzeme Seçimi

Alüminyum

Çelik

Süper Alaşımlar

Titanyum

Refrakter

Plastik

Seramik

Cam

Şekil 2. KDS'de malzeme seçim ekranı (Material selection screen of the DSS)

Proses Seçimi

Delik Delme

Boşluk İşleme

Kesme

Cep İşleme

Bileme

Çapak Alma

Diş Açma

Şekil 3. Proses seçimi (Process selection)

4.3. Uygun Kriterlerin Belirlenmesi (Determination of the Appropriate Criteria)

Kullanıcının önceki aşamada girmiş olduğu bilgilere göre uygun olan kriterlerin kullanıcıya sunulması için uygulama Tablo 7' yi kullanır [8]. Sonrasında kullanıcıya Şekil 4'de gösterilen kriter içerisinden seçim yapması sağlanır.

4.4. Ön Eleme (Pre-Election)

Önceki adımda belirlenmiş olan kriterler ve kullanıcının proses için belirlediği değerlere göre uygun olmayan AİY'lerin elenme işlemi için Tablo 8 kullanılır. Tablo 8'de sırasıyla takımlama, güç

gereksinimi ve yatırım konularında AİY'lerin uzman görüşleriyle değerlendirilmesi, ardından proses kabiliyetlerine göre kriterler bazında spesifikasyonları ifade edilmektedir. Girilmiş bilgilere göre ekrandaki ara yüz için Şekil 5 örnek verilebilir. Ardından Uygun olan AİY'ler ve kriterler kullanıcı ekranına yansıtılır.

Tablo 6. Alışılmamış imalat yöntemleri ile yapılan işlemler [28] (Processes that carried out with nontraditional manufacturing processes)

PROSES	Delik Delme Operasyonları						Boşluk İşleme	
	L/D<20			L/D>20			t/w <1 0	t/w >1 0
	D<0,05	0,20>D>0,05	D>0,2	D<0,05	0,20>D>0,05	D>0,2		
EDM	0	1	1	0	1	1	1	
USM	1	1	1	0	1	1	0	
ECM	0	0	1	0	0	1	1	
AJM	0	1	1	0	0	0	1	
RUSM	1	1	1	1	1	1	1	
WJM	0	1	1	0	0	1	1	
ECG	0	0	0	0	0	0	0	
WAJM	0	1	1	0	0	1	1	
ECH	0	0	0	0	0	0	0	
CHM	0	1	1	0	0	0	1	

Kriterlerin Seçimi

Tolerans

Yüzey Kalitesi

Yüzey Hasarlıama

Köşe Yarıçap

Koniklik

İşleme Hızı(Sub)

Minimum Delik Çapı

Minimum Kesme Kalınlığı

L/D ve t/w oranı

Malzeme(Sub)

Yatırım

Takım/Fikstür

Takım Aşınması

Güç Tüketimi

İşçilik

Şekil 4. Kriter belirleme ekranı (Criteria determination screen)

Tablo 7. Kriterler için uygunluk tablosu (Compliance table for criteria)

Kriter	Şekillendirme											
	Silindirik delik işleme						Boşluk işleme	Kesme	Cep İşleme	Taşlama	Çapak alma	Diş açma
	L/D < 20			L/D > 20								
	D<0.05	0.20>D>0.05	D>0.20	D<0.05	0.20>D>0.05	D>0.20						
Tolerans	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Yüzey bitirme	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Yüzey hasarlama	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1
Köşe Yarıçap	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0
Koniklik	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0
Delik çapı	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0
Derinlik/Çap (L/D)	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0
Derinlik/genişlik (t/w)	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0
Kesme kalınlığı	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
İşleme hızı	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Tablo 8. Proses yeterlilik kriterleri (Process qualification criteria) [8,28,29]

Kriterler	Takım/Fikstür			İşçilik			Güç Tüketimi			Takım Aşınması			Yatırım		
	L	M	U	L	M	U	L	M	U	L	M	U	L	M	U
Proses	L	M	U	L	M	U	L	M	U	L	M	U	L	M	U
PAM	2	3	4	1	2	3	2	3	4	1	2	3	1	2	3
AJM	2	3	4	3	4	5	1	2	3	5	6	7	1	2	3
AWJM	2	3	4	2	3	4	1	3	4	5	6	7	3	4	5
RUSM	6	7	8	5	6	7	2	3	4	6	7	8	3	4	5
WJM	2	3	4	2	3	4	1	2	3	3	4	5	2	3	4
LBM	1	2	3	7	8	9	1	2	3	1	2	3	7	8	9
USM	5	6	7	5	6	7	3	4	5	5	6	7	2	3	4
CHM	2	3	4	2	3	4	6	7	8	1	2	3	5	6	7
ECM	7	8	9	6	7	8	8	9	1	2	3	4	8	9	1
ECG	6	7	8	5	6	7	8	9	1	3	4	5	7	8	9
ECH	6	7	8	5	6	7	8	9	1	3	4	5	7	8	9
EDM	8	9	1	2	3	4	2	3	4	8	9	1	7	8	9
WEDM	2	3	4	2	3	4	2	3	4	8	9	1	7	8	9
EBM	1	2	3	7	8	9	2	3	4	1	2	3	8	9	1

Kriter değerleri uzman görüşünü yansıtmakta olup, 1 en düşük, 9 en yüksek değeri gösterir.

Tablo 8. Proses yeterlilik kriterleri-devam (Process qualification criteria- continued) [8,28,29]

Kriterler	Yüzey Hasarlama (mm)			Köşe Yarıçap (mm)			Yüzey Kalitesi (μmRa)			Koniklik (mm/mm)			Tolerans (mm)		
	L	M	U	L	M	U	L	M	U	L	M	U	L	M	U
PAM	0,9000	0,8000	0,7000	5,00	4,00	3,00	7,50	6,00	5,00	0,080	0,070	0,070	3,000	1,300	0,800
AWJM	0,0300	0,0250	0,0200	0,60	0,50	0,40	0,40	0,30	0,20	0,004	0,003	0,003	0,060	0,040	0,026
EBM	0,0300	0,0250	0,0250	0,35	0,25	0,15	4,00	3,00	1,00	0,250	0,200	0,150	0,030	0,020	0,010
RUSM	0,0300	0,0250	0,0250	0,09	0,08	0,07	0,75	0,50	0,25	0,005	0,004	0,003	0,022	0,012	0,008
WJM	0,0003	0,0002	0,0001	0,60	0,50	0,40	0,40	0,30	0,20	0,004	0,003	0,003	0,050	0,030	0,020
USM	0,0300	0,0250	0,0200	0,09	0,08	0,07	0,75	0,50	0,25	0,005	0,004	0,003	0,025	0,013	0,010
ECG	0,0030	0,0020	0,0010	0,14	0,13	0,12	0,50	0,30	0,20	0,003	0,002	0,001	0,030	0,025	0,010
ECM	0,0060	0,0050	0,0040	0,25	0,20	0,15	1,50	1,00	0,20	0,003	0,002	0,001	0,100	0,050	0,025
ECH	0,0030	0,0020	0,0010	0,14	0,13	0,12	0,80	0,50	0,20	0,003	0,002	0,001	0,015	0,013	0,010
AJM	0,0300	0,0250	0,0200	0,25	0,20	0,15	1,25	0,60	0,25	0,006	0,005	0,004	0,120	0,050	0,030
CHM	0,0060	0,0050	0,0040	1,35	1,25	1,15	2,50	2,00	0,50	0,400	0,300	0,200	0,080	0,030	0,010
EDM	0,0300	0,0200	0,0100	0,50	0,40	0,30	3,00	2,00	0,30	0,003	0,002	0,001	0,100	0,025	0,010
WEDM	0,0300	0,0200	0,0100	0,25	0,20	0,15	1,25	0,75	0,30	0,060	0,050	0,040	0,025	0,015	0,007
LBM	0,1500	0,1000	0,0500	0,60	0,50	0,40	1,50	1,00	0,40	0,060	0,050	0,040	0,030	0,020	0,010

Kriterler "maliyet" türü kriterler olup, L değeri en kötü spesifik değeri, U değeri ise düşük değer olmasına rağmen en iyi spesifik değeri ifade eder.

Tablo 8. Proses yeterlilik kriterleri-devam (Process qualification criteria- continued) [8,28,29]

Kriterler	Delik Çapı (mm)			Kesme Kalınlığı (mm)			L/D - t/w oranı			İşleme Hızı (mm ³ /dak)		
	L	M	U	L	M	U	L	M	U	L	M	U
PAM	2,200	2,00	1,800	2,200	2,00	1,800	8,00	10,00	12,00	20000	50000	75000
EDM	0,160	0,150	0,140	0,060	0,050	0,040	25,0	30,0	35,0	100,0	800,0	1300,0
AJM	0,160	0,150	0,140	0,150	0,100	0,090	8,0	10,0	12,0	20,0	50,0	200,0
ECH	115,0	100,0	85,0	115,0	100,0	85,0	0,8	1,0	1,2	100,0	700,0	2000,0
AWJM	0,160	0,150	0,140	0,160	0,150	0,140	25,0	30,0	35,0	300,0	600,0	2000,0
ECM	0,600	0,500	0,400	0,110	0,100	0,090	25,0	30,0	35,0	500,0	2000,0	14000,0
EBM	0,100	0,040	0,035	0,100	0,040	0,035	12,0	15,0	18,0	0,3	2,0	6,0
WJM	0,160	0,150	0,140	0,160	0,150	0,140	25,0	30,0	35,0	250,0	500,0	2000,0
USM	0,060	0,050	0,040	0,060	0,050	0,040	2,0	2,5	3,0	300,0	600,0	2100,0
RUSM	0,060	0,050	0,040	0,060	0,050	0,040	160,0	180,0	200,0	400,0	800,0	2400,0
ECG	115,0	100,0	85,0	115,0	100,0	85,0	0,8	1,0	1,2	70,0	1000,0	6000,0
CHM	0,110	0,100	0,090	0,110	0,100	0,090	2,0	3,0	3,5	15,0	40,0	140,0
WEDM	0,120	0,110	0,100	0,160	0,150	0,140	0,8	1,0	1,2	95,0	250,0	300,0
LBM	0,060	0,050	0,040	0,110	0,100	0,090	17,0	20,0	23,0	0,1	2,0	5,0

Kriterler "maliyet" türü kriterler olup, L değeri en kötü spesifik değeri, U değeri ise düşük değer olmasına rağmen en iyi spesifik değeri ifade eder.

4.5. Karar Matrisinin Oluşturulması (Obtaining of the Decision Matrix)

Uygulama üzerinden girilen bilgiler ve elemeler neticesinde AİY'ler ve kriterlerden oluşan karar matrisi oluşturulur. Veri tabanında ilgili kriterlere ait olan alt limit, ortalama ve üst limit değerleri literatürden derlenmiştir.

Geliştirilen KDS'de her üç değer de kullanılabilir durumda olup, çalışmamızda yapılan uygulamada bulanık ÇKKV yöntemi kullanılmamış, ortalama (M) değerleri baz alınarak AHP-TOPSIS yöntemi

uygulanmıştır. KDS, L ve U verileri veya karma bir şekilde uygulanabilir niteliktedir. Bu durum kullanıcıya farklı uygulamalar için esneklik sağlamaktadır. Uygulama ekranlarından AHP yöntemi için ikili karşılaştırma matrislerine veri girişi yapılabilmektedir. Kriter ağırlık vektörünün tutarlılık oranları da uygulama sonucunda kontrol edilebilmektedir. Kullanıcının girmiş olduğu bilgilere ve proseslerin yeterliliklere göre oluşturulan karar matrisinin ve kriter ağırlık vektörünün TOPSIS metoduna otomatik aktarılması sonucunda TOPSIS yöntemiyle sıralama sonuçları elde edilmektedir.

The screenshot shows the 'MainWindow' application interface with the following sections:

- Malzeme Seçimi (Material Selection):** Radio buttons for Aluminyum, Çelik, Süper Alaşım, Titanyum, Refrakter, Plastik, Seramik (selected), and Cam.
- Proses Seçimi (Process Selection):** Radio buttons for Delik Delme (selected), Boşluk İşleme, Kesme, Cep İşleme, Bileme, Çapak Alma, and Diş Açma.
- Kriterlerin Seçimi (Criteria Selection):** Radio buttons for Tolerans, Yüzey Kalitesi, Yüzey Hasarlama, Köşe Yarıçap, Koniklik, İşleme Hızı(Sub), Minimum Delik Çapı, Minimum Kesme Kalınlığı, L/D ve t/w oranı, Malzeme(Sub), Yatırım, Takım/Fikstür, Takım Aşınması, Güç Tüketimi, and İşçilik.
- Prosesler (Processes):** A list of processes with colored buttons: AWJM (green), CHM (green), EBM (red), ECG (red), ECH (red), ECM (red), AJM (green), EDM (red), LBM (red), PAM (red), RUSM (red), USM (red), WEDM (red), and WJM (green).
- Parameters:** Fields for 'Delik Delme L/D Oranı' (5,7) and 'Delik Delme D Oranı' (0,64) with an 'Ok' button.
- Criteria Checkboxes:** Checkboxes for Tolerans (checked, 0,05), Yüzey Kalitesi (checked), Yüzey Hasarlama (checked), Koniklik (checked), Delik Çapı, Derinlik/Çap (L/D), İşleme Hızı, Malzeme(Sub), Yatırım, Takım/Fikstür, Takım Aşınması, Güç Tüketimi, and İşçilik.
- Buttons:** 'Uncheck All', 'Check All', and 'Filtrele'.

Şekil 5. Örnek1: Proses ve kriter bilgilerinin girilmesi (Example 1: Entering process and criteria information)

Kriter Ağırlıklarını Giriniz		tolerans	yuzey_kalitesi	yuzey_hasarlama	koniklik
tolerans	1.0	3.0	5.0	3.0	
yuzey_kalitesi	0.333	1.0	5.0	3.0	
yuzey_hasarlama	0.2	0.2	1.0	1.0	
koniklik	0.333	0.333	1.0	1.0	

Kriter Ağırlıklarını Hesapla

Karar Matrisi		tolerans	yuzey_kalitesi	yuzey_hasarlama	koniklik
AJM	0.05	0.6	0.025	0.005	
WJM	0.03	0.3	0.0002	0.003	
AWJM	0.04	0.3	0.025	0.003	
CHM	0.03	2	0.005	0.3	

Özet

```

best_distance [0.22204712 0.2968896 0.26715397 0.1407722 ]
worst_distance [0.1510605 0. 0.08986695 0.25915793]
worst_similarity [0.40487113 0. 0.25171341 0.64800802]
rank_to_worst_similarity [2, 3, 1, 4]
best_similarity [0.59512887 1. 0.74828659 0.35199198]
rank_to_best_similarity [4, 1, 3, 2]
rank_to_best_similarity as process NAME :CHM AJM AWJM WJM
CR Value : 0.07 and The solution is consistent
weights : [0.507, 0.293, 0.088, 0.113]

```

Şekil 6. Örnek1:AHP ve TOPSIS sonuçlarının gösterimi (Example1: Displaying AHP and TOPSIS results)

Literatürde yer alan çalışmalardaki vakalar göz önünde bulundurularak geliştirilen KDS ile yapılan bazı uygulama örnekleri, ekran görüntüleri ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Örnek 1 [2, 8]: İşlenecek malzemenin seramik; işlemin delik delme; proses yeterlilikte D'nin 0,64 mm, L/D oranının da 5,7 mm olduğu bir örnek uygulama KDS'ye girildiğinde Şekil 5 ve Şekil 6'da yer alan ekran görüntüleri sunulur. Neticede en uygun AİY karar verici tarafından son karar verilerek seçim yapılabilmesi için Şekil 6'daki gibi ekranda gösterilmektedir. Buna göre Şekil 5'de yer alan seçili kriterlere göre ve girilen kriter ağırlıkları

ile kriter verileri doğrultusunda Şekil 6'daki sonuçlar elde edilir. Buna göre, CHM birinci sırada, AJM ise 2. sırada yer alan AİY olarak karşımıza çıkmıştır. AWJM ve WJM yöntemleri ise karar verici tarafından göz önünde bulundurulabilecek diğer 2 yöntem olarak önerilmektedir. AHP-TOPSIS yönteminin uygulama adımları ve sonuçları ise Tablo 9'da verilmiştir.

Örnek 2 [2,8]: İşlenecek malzemenin Çelik 4140; işlemin cep işleme; proses yeterlilikte tolerans = 0,13 mm, t/w = 3,86 olduğu bir örnek KDS'ye girildiğinde Şekil 7 ve Şekil 8'de yer alan ekran görüntüleri elde edilir.

Şekil 7. Örnek 2: Proses ve kriter bilgilerinin girilmesi (Example 2: Entering process and criteria information)

Kriter Ağırlıklarını Hesapla

	tolerans	yuzey_kalitesi	yuzey_hasarlaması	yatırım	iscilik
tolerans	1.0	3.0	5.0	7.0	9.0
yuzey_kalitesi	0.333	1.0	2.0	4.0	6.0
yuzey_hasarlaması	0.2	0.5	1.0	3.0	5.0
yatırım	0.143	0.25	0.333	1.0	4.0
iscilik	0.111	0.167	0.2	0.25	1.0

Kriter Ağırlıklarını Hesapla

	tolerans	yuzey_kalitesi	yuzey_hasarlaması	yatırım	iscilik
AJM	0.05	0.6	0.025	2	4
USM	0.013	0.5	0.025	3	6
RUSM	0.012	0.5	0.025	4	6
ECM	0.05	1	0.005	9	7
CHM	0.03	2	0.005	6	3
EDM	0.025	2	0.02	8	3

Özet

```

best_distance      [0.10857463 0.25944361 0.26460658 0.09451241 0.140643 0.1586507 ]
worst_distance     [0.24687878 0.06078732 0.06106693 0.24491685 0.15914762 0.14722607]
worst_similarity   [0.6945461 0.18982338 0.18751557 0.72155491 0.53086257 0.48132478]
rank_to_worst_similarity [3, 2, 6, 5, 1, 4]
best_similarity     [0.3054539 0.81017662 0.81248443 0.27844509 0.46913743 0.51867522]
rank_to_best_similarity [4, 1, 5, 6, 2, 3]
rank_to_best_similarity as process NAME :ECM AJM CHM EDM USM RUSM
CR Value : 0.05 and The solution is consistent
weights : [0.521, 0.23, 0.144, 0.072, 0.033]

```

Şekil 8. Örnek 2:AHP ve TOPSIS sonuçlarının gösterimi (Example 2: Displaying AHP and TOPSIS results)

Bu örnekte en uygun olandan uygun olmayana AIY sıralaması girilen kriter ağırlıkları ve kriter verileri doğrultusunda ECM, AJM, CHM, EDM, USM ve RUSM olarak tespit edilmiştir.

Örnek 3 [2,8]: İşlenecek malzemenin süper alaşım; işlemin delik delme; proses yeterliliğinin $D = 0,9$ mm, tolerans= 0,05mm, $L/D = 1,22$ olduğu bir örnek KDS'ye girildiğinde Şekil 9 ve Şekil 10'da yer alan ekran görüntüleri ekrana yansır. Bu örnekte ise sıralama girilen kriter ağırlıkları ve kriter verileri doğrultusunda ECM, AJM, EDM, CHM, AWJM, WJM olarak belirlenmiştir.

Örnek 4: Çoğun'un [8,46] çalışmasında iş parçası malzemesi Çelik; işlem; silindirik delik işleme;

proses gereksinimleri: Delik için $D=52$ mm, boyut toleransı 0,5 mm, koniklik 0,05 mm/mm'den az, delik uzunluğu 7,6 mm, $L/D=5$ olarak uygulanan işlem bu örnekte ele alınmıştır. Kullanılan iş malzemesi nedeniyle Cogun [8,42] çalışmasında, AJM ve WJM'yi hariç tutmuş ve EDM, ECM, LBM ile EBM alternatif seçenekler olarak belirlenmiştir. Çalışmamızda geliştirilen KDS'ye ilgili değerler girildiğinde en uygun yöntem olarak LBM yöntemi ÇKKV aşamasına geçmeden ön eleme aşamasında belirlenebilmiştir. Çoğun'un [8,42] çalışmasında da yine LBM yöntemi en uygun yöntem olarak belirlenmiştir. Geliştirdiğimiz KDS daha ön eleme aşamasında en uygun yöntemi yakalayabilmiştir (Şekil 11).

Şekil 9. Örnek3: Proses ve kriter bilgilerinin girilmesi (Example 3: Entering process and criteria information)

Kriter Ağırlıklarını Giriniz					
	tolerans	yuzey_kalitesi	yuzey_hasarlama	isleme_hizi	yatirim
tolerans	1.0	3.0	5.0	7.0	9.0
yuzey_kalitesi	0.333	1.0	2.0	4.0	6.0
yuzey_hasarlama	0.2	0.5	1.0	3.0	5.0
isleme_hizi	0.143	0.25	0.333	1.0	2.0
yatirim	0.111	0.167	0.2	0.5	1.0

Kriter Ağırlıklarını Hesapla

Karar Matrisi					
	tolerans	yuzey_kalitesi	yuzey_hasarlama	isleme_hizi	yatirim
AJM	0.05	0.6	0.025	50	2
WJM	0.03	0.3	0.0002	500	3
AWJM	0.04	0.3	0.025	600	4
ECM	0.05	1	0.005	2000	9
CHM	0.03	2	0.005	40	6
EDM	0.025	2	0.02	800	8

Özet

```

best_distance [0.11944689 0.19462123 0.144874 0.10257131 0.14130103 0.14262557]
worst_distance [0.16417115 0.03040426 0.12077064 0.15882991 0.13211328 0.14754963]
worst_similarity [0.57884592 0.13511474 0.45463234 0.60760968 0.48319811 0.50848465]
rank_to_worst_similarity [2, 3, 5, 6, 1, 4]
best_similarity [0.42115408 0.86488526 0.54536766 0.39239032 0.51680189 0.49151535]
rank_to_best_similarity [4, 1, 6, 5, 3, 2]
rank_to_best_similarity as process NAME :ECM AJM EDM CHM AWJM WJM
CR Value : 0.03 and The solution is consistent
weights : [0.523, 0.232, 0.144, 0.063, 0.038]

```

Şekil 10. Örnek 3:AHP ve TOPSIS sonuçlarının gösterimi (Example 3: Displaying AHP and TOPSIS results)

Örnek 5 [8,46]: Örnek parçanın elektrokimyasal işleme ile elde edilmiş eşit aralıklı 16 adet cebi vardır. Cepler yaklaşık $16,5 \times 8,9$ mm ölçülerindedir ve 2,3 mm derinliğe sahiptir. Tolerans 0,13 mm olacak şekilde tüm cepler işlenmiştir. ECM sayesinde çapaksız 6 dakikadan kısa süren tek operasyonda işlem gerçekleştirilmiş olup, malzeme bilgisi verilmemiştir. Çalışmada 4140 kalıp çeliğinin kullanıldığı varsayılmıştır. Böylece söz konusu uygulamada; çalışma malzemesi; çelik, işlem; cep açma; proses gereksinimleri ise cep boyutları; uzunluk: 16,5 mm, genişlik: 8,9 mm, derinlik: 2,3 mm($t/w=3,86$), boyut toleransı: 0,13 mm olarak alınmıştır.

Ön eleme sonucunda alternatif AİY'ler AJM, USM, RUSM, ECM, CHM ve EDM olarak tespit edilmiş olup, AHP-TOPSIS uygulaması sonucunda ilk üç AİY; ECM, EDM ve CHM olarak belirlenmiştir (Şekil 12). AHP yönteminde kriter ağırlıkları literatürdeki uygulamada kullanılan ağırlıklarla eşdeğer olarak belirlenmiştir. Böylece, elde edilen sıralama sonuçları literatürde gerçekleştirilmiş olan çalışma sonuçlarıyla karşılaştırılabilir.

Sıralama karşılaştırılması sonucunda KDS'den elde edilen sıralamanın literatürdeki yöntemlerle yapılan sıralama sonuçlarıyla benzer olduğu görülmektedir (Tablo 10). Tüm sıralamalarda KDS'de ilk sırada yer alan ECM birinci sırada yer almakta, KDS'de ikinci sırada yer alan EDM ise literatürdeki diğer çalışmalarda ilk üç sırada yer alabilmektedir.

Bu sonuçlara göre geliştirilen KDS'nin pratik uygulamalarda kullanışlı, hızlı sonuç verebilen ve esnek yapısıyla AİY seçimine uygun bir KDS olduğu söylenebilir.

5. SONUÇ (CONCLUSION)

Sonuç olarak, geliştirilen KDS ile AİY seçim problemine uygun bir araç AHP ve TOPSIS yardımıyla geliştirilmiştir. Geliştirilen KDS kullanıcıya kriter verilerini kullanma aşamasında esnek bir seçim olanağı sunmakta ve belli işlemler için proses kabiliyetlerine yönelik olarak daha hassas veya alt sınır verileri tercih edilerek de bir sıralama yapma imkanı vermektedir.

Tablo 9. AHP-TOPSIS uygulama örneği (Application example for the AHP-TOPSIS)

AHP-İkili Karşılaştırma Matrisi	Tolerans	Yüzey Kalitesi	Yüzey Hasarlar	Koniklik	Normalize Matris				Satır Top.	Kriter Ağırlığı
Tolerans	1	3	5	3	0.536	0.662	0.417	0.375	1.989	0.4973
Yüzey Kalitesi	0.333	1	5	3	0.179	0.221	0.417	0.375	1.191	0.2977
Yüzey Hasarlar	0.2	0.2	1	1	0.107	0.044	0.083	0.125	0.360	0.0899
Koniklik	0.333	0.333	1	1	0.179	0.074	0.083	0.125	0.460	0.1151
Toplam	1.8667	4.533	12.0	8	CR= 0.07					1.0
TOPSIS-Karar Matrisi	Tolerans	Yüzey Kalitesi	Yüzey Hasarlar	Koniklik						
AJM	0.050	0.600	0.025	0.005						
WJM	0.030	0.300	0.000	0.003						
AWJM	0.040	0.300	0.025	0.003						
CHM	0.030	2.000	0.005	0.300						
Kare top. Karekök	0.077	2.131	0.036	0.300						
AHP - Kriter Ağırlığı	0.4973	0.2977	0.0899	0.1151						
AJM	0.3237	0.0838	0.0629	0.0019						
WJM	0.1942	0.0419	0.0005	0.0012						
AWJM	0.2590	0.0419	0.0629	0.0012						
CHM	0.1942	0.2794	0.0126	0.1151						
A ⁺	0.1942	0.0419	0.0005	0.0012						
A ⁻	0.3237	0.2794	0.0629	0.1151						
	S ⁺	S ⁻	C [*]	Sıralama						
AJM	0.1497	0.2260	0.6015	3						
WJM	0.0000	0.3001	1.0000	1						
AWJM	0.0899	0.2713	0.7510	2						
CHM	0.2637	0.1389	0.3450	4						

Tablo 10. Örnek 5 için elde edilen sonuçların literatürdeki çalışmalarla karşılaştırılması (Comparison of the results obtained for Example 5 with studies in the literature)

Alternatif	Önerilen KDS	Yurdakul ve Cogun [8, 46]	ÇKKV Uygulamaları				
			AHP-TOPSIS** [2,17]	Bulanık AHP-TOPSIS [2,17]	BNP temelli Bulanık TOPSIS [48]	Genelleştirilmiş ort. Dayalı [2, 17]	Bulanık TOPSIS (Chen'in [47] yöntemi)
ECM	1	1	1	1	1	1	1
EDM	2	3	4	3	4	4	4
CHM	3	*	*	*	*	*	*
RUSM	4	*	3	2	2	3	2
USM	5	*	*	*	*	*	*
AJM	6	2	2	3	3	2	3

*İlgili çalışmada alternatif olarak değerlendirmeye alınmamıştır.

**Farklı kriterler ve ağırlık puanları ile yapılmış sıralamayı göstermektedir. Önerilen KDS'de bu sıralamaya yakın bir değerlendirme yapılarak kriter ağırlıkları belirlenmiştir.

MainWindow
Tab 1 | Tab 2

Malzeme Seçimi

- Alüminyum
- Çelik
- Süper Alaşımlar
- Titanyum
- Refrakter
- Plastik
- Seramik
- Cam

Proses Seçimi

- Delik Delme
- Boşluk İşleme
- Kesme
- Cep İşleme
- Bileme
- Çapak Alma
- Dış Açma

Kriterlerin Seçimi

- Tolerans
- Yüzey Kalitesi
- Yüzey Hasarlaması
- Kose Yarıçap
- Koniklik
- İşleme Hızı(Sub)
- Minimum Delik Çapı
- Minimum Kesme Kalınlığı
- L/D ve t/v oranı
- Malzeme(Sub)
- Yatırım
- Takım/Fikstür
- Takım Ağırlığı
- Güç Tüketimi
- İşçilik

Prosesler

- AJM
- USM
- RUSM
- ECM
- CHM
- EDM
- LBM
- PAM
- BUSH
- LHM
- WEDM

Uncheck All

Delik Delme L/D Oranı: 5, Delik Delme D Oranı: 1.52

Tolerans: 0.5

Yüzey Kalitesi

Yüzey Hasarlaması

Koniklik: 0.05

Delik Çapı

Derinlik(Çap (L/D))

İşleme Hızı

Malzeme(Sub)

Yatırım

Takım/Fikstür

Takım Ağırlığı

Güç Tüketimi

İşçilik

Şekil 11. Örnek 4: KDS ön eleme sonucu (Example 4. Pre-selection result for DSS)

Tab 1 | Tab 2

Kriter Ağırlıklarını Giriniz

	yuzey_kalitesi	yuzey_hasarlama	kose_yaricap	koniklik	isleme_hizi	yatirim
yuzey_kalitesi	1.0	6.0	6.0	6.0	1.0	1.0
yuzey_hasarlama	0.167	1.0	1.0	1.0	0.167	0.167
kose_yaricap	0.167	1.0	1.0	1.0	0.167	0.167
koniklik	0.167	1.0	1.0	1.0	0.167	0.167
isleme_hizi	1.0	6	6	6	1.0	1.0
yatirim	1.0	6	6	6	1.0	1.0

Kriter Ağırlıklarını Hesapla

Karar Matrisi

	yuzey_kalitesi	yuzey_hasarlama	kose_yaricap	koniklik	isleme_hizi	yatirim
AJM	0.6	0.025	0.2	0.005	50	2
USM	0.5	0.025	0.08	0.004	600	3
RUSM	0.5	0.025	0.08	0.004	800	4
ECM	1	0.005	0.2	0.002	2000	9
CHM	2	0.005	1.25	0.3	40	6
EDM	2	0.02	0.4	0.002	800	8

Özet

```

best_distance      [0.30546664 0.25431357 0.23013012 0.11118982 0.24248634 0.1555027 ]
worst_distance    [0.02234458 0.07257712 0.10103761 0.27581813 0.17001958 0.20321076]
worst_similarity  [0.06816296 0.22202261 0.30509497 0.71269372 0.41216276 0.56649885]
rank_to_worst_similarity [1, 2, 3, 5, 6, 4]
best_similarity    [0.93183704 0.77797739 0.69490503 0.28730628 0.58783724 0.43350115]
rank_to_best_similarity [4, 6, 5, 3, 2, 1]
rank_to_best_similarity as process NAME :ECM EDM CHM RUSM USM AJM
CR Value : 0.0 and The solution is consistent
weights : [0.286, 0.048, 0.048, 0.048, 0.284, 0.286]

```

Şekil 12. Örnek 5: AHP ve TOPSIS sonuçlarının gösterimi (Example 5: Displaying AHP and TOPSIS results)

Bu çalışmada geliştirilen KDS'nin diğer bir avantajı yeni yöntemler ve değerlerini ekleme/çıkarma yapılmasına olanak verir bir yapıda olmasıdır. Günümüzde sürekli gelişen AIY alanındaki gerek malzeme özellikleri, gerekse işlem kabiliyetlerine dair güncellenen verilerin sisteme girilerek güncel verilerle seçim yapılabilmesine olanak tanıyan bir yapıda olması da geliştirilen KDS'nin diğer bir avantaj olarak karşımıza çıkmaktadır. İlerideki çalışmalarda yeni AIY yöntemleri alternatif kümesine eklenebilir ve böylece geliştirilmiş olan KDS teknolojik gelişmelere göre adapte edilebilir.

ETİK STANDARTLARIN BEYANI

(DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazarı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

The author of this article declares that the materials and methods they use in their work do not require ethical committee approval and/or legal-specific permission.

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

Leman Kargın: Literatür tarama, KDS geliştirilmesi, uygulama sonuçlarının analizi, makale yazımı.

Literature review, development of the DSS, analysis of application results, performing the writing process.

Yusuf Tansel İç: Sürecin yönetimi, konsept tasarımı, sonuçların analiz ve yorumlanması, makalenin yazımı.

Supervising the process, conceptual design, analysis, and interpretation of the results, and performing the writing process.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

There is no conflict of interest in this study.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

[1] Rajurkar, K.P. ve Ross, R.F. The role of nontraditional manufacturing processes in future manufacturing industries. ASME Manufacturing International. 1992; 23–37.

[2] Kul Y, Seker A, Yurdakul M. Bulanık Çok Kriterli Karar Verme Yöntemlerinin Alışılmamış İmalat Yöntemlerinin Seçiminde Kullanılması. Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der. 29(3):589–603.

[3] Youssef H.A. and El-Hofy H. Nontraditional Machine Tools and Operations”, Machining Technology Machine Tools and Operations, CRC Press Taylor and Francis Group, Florida, 2008: 391-524 .

[4] El-Hofy H. A.-G. Advanced Manufacturing Processes. Nontraditional and Hybrid Machining Processes. New York: McGraw Hill, 2005.

[5] Gupta K., Jain N.K., Laubscher R.F. Hybrid Machining Processes. Perspective on machining and finishing. Heidelberg: Springer, 2016.

[8] Yurdakul, M., Cogun, C. Development of a multi-attribute selection procedure for nontraditional machining processes, Proc. of the Institution of Mechanical Engineers, Journal of Engineering Manufacture. 2003; 217(7), 993-1009.

[9] Chakraborty, S., Dey, S. QFD-based expert system for non-traditional machining processes selection, Expert Systems with Applications. 2007; 32(4), 1208-1217.

[10] Das Chakladar, N., Chakraborty, S. A combined TOPSIS-AHP method based approach for nontraditional machining processes selection, Proc. of the Institution of Mechanical Engineers, Journal of Engineering Manufacture. 2008; 222(12), 1613-1623.

[11] Chandraseelan, E.R., Jehadeesan, R., & Raajenthiren, M. Web-based knowledge based system for selection of non-traditional machining processes. Malaysian Journal of Computer Science. 2008; 21(1), 45-56.

[12] Das Chakladar N., Das, R., Chakraborty, S. A digraph-based expert system for non-traditional machining processes selection, International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2009; 43(3-4): 226-237.

[13] Sugumaran, V., Muralidharan, V., & Hegde, B.K. Intelligent process selection for NTM - A neural network approach. International Journal of Industrial Engineering Research and Development. 2010; 1(1): 87-96.

[14] Das, S., Chakraborty, S. Selection of non-traditional machining processes using analytic Network process, Journal of Manufacturing Systems. 2011; 30(1): 41-53.

- [15] Sadhu, A., Chakraborty, S. Non-traditional machining processes selection using data envelopment Analysis (DEA). *Expert Systems with Applications*; 2011; 38(7): 8770-8781.
- [16] Karande, P., Chakraborty, S. Application of PROMETHEE-GAIA method for non-traditional machining processes selection, *Management Science Letters*. 2012; 2(6): 2049-2060.
- [17] Kul Y. Alışılmamış İmalat Yöntemlerinin Seçiminde Çok Kriterli Karar Verme Metotlarının Kullanılması”, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2012.
- [18] Temuçin, T., Tozan, H., Valíček, J., & Harničárová, M. A fuzzy based decision support model for non-traditional machining process selection. *Tehnicki vjesnik - Technical Gazette*. 2013; 20(5): 787-793.
- [19] Choudhury, T., Das, P. P., Roy, M. K., Shivakoti, I., Ray, A., Pradhan, B. B. Selection of nontraditional machining process: A distance based approach, in *Proceedings of Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM)*. IEEE International Conference. 2013: 852-856.
- [20] Chatterjee, P., & Chakraborty, S. Nontraditional machining processes selection using evaluation of mixed data method. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2013; 68(5–8): 1613–1626.
- [21] Roy, M. K., Ray, A., Pradhan, B. B. Non-traditional machining process selection-an integrated approach, *International Journal for Quality Research*. 2017; 11(1): 71-94.
- [22] Azaryoon, A., Hamidon, M., & Radwan, A. An expert system based on a hybrid multi-criteria decision making method for selection of non-conventional machining processes. In *Applied Mechanics and Materials*, Trans Tech Publications Ltd. 2015; 735: 41-49.
- [23] Madić, M., Radovanović, M., Petković, D. Non-conventional machining processes selection using multi-objective optimization on the basis of ratio analysis method. *Journal of Engineering Science and Technology*. 2015;(10)11: 1441-1452.
- [24] Madić, M., Petković, D., & Radovanović, M. Selection of non-conventional machining processes using the OCRA method. *Serbian Journal of Management*. 2015; 10(1): 61–73.
- [25] Chatterjee, P., Mondal, S., Boral, S., Banerjee, A., & Chakraborty, S. A novel hybrid method for non-traditional machining process selection using factor relationship and multi-attributive border approximation method. *Facta Universitatis Series: Mechanical Engineering*. 2017; 15(3): 439–456.
- [26] Prasad, K., & Chakraborty, S. A decision guidance framework for non-traditional machining processes selection. *Ain Shams Engineering Journal*. 2018; 9(2): 203–214.
- [27] Talib, F., & Asjad, M. Prioritisation and selection of non-traditional machining processes and their criteria using analytic hierarchy process approach. *International Journal of Process Management and Benchmarking*. 2019; 9(4): 522-546.
- [28] Yurdakul, M., & İç, Y.T. Comparison of fuzzy and crisp versions of an AHP and TOPSIS model for nontraditional manufacturing process ranking decision. *Journal of Advanced Manufacturing Systems*. 2019; 18(2): 167-192.
- [29] Yurdakul, M., İç, Y.T., & Atalay, K.D. Development of an intuitionistic fuzzy ranking model for nontraditional machining processes. *Soft Computing*. 2019; 24(1): 1-16.
- [30] Chakraborty, S., Dandge, S.S., & Agarwal, S. Non-traditional machining processes selection and evaluation: A rough multi-attributive border approximation area comparison approach. *Computers & Industrial Engineering*. 2020; 139: 106-201.
- [31] Chakraborty, S. Kumar, V. Development of an intelligent decision model for non-traditional machining processes. *Decision Making: Applications in Management and Engineering*. 2021; 4(1): 194-214.
- [32] Kumari, A., Acherjee, B. Selection of non-conventional machining process using CRITIC-CODAS method. *Materials Today: Proceedings*. 2022; 56: 66-71.
- [33] Roy, M. K., Das, P. P., Mahto, P. K., Singh, A. K., & Oraon, M. (2021). Non-Traditional Machining Process Selection: A Holistic Approach From a Customer Standpoint. In *Data-Driven Optimization of Manufacturing Processes* (pp. 165-178). IGI Global.

- [34] Jagtap, M., Karande, P. The m-polar fuzzy set ELECTRE-I with revised Simos' and AHP weight calculation methods for selection of non-traditional machining processes. *Decision Making: Applications in Management and Engineering*. 2023; 6(1): 240-281.
- [35] Saaty, T.L. *Fundamentals of Decision Making and Priority Theory with Analytic Hierarchy Process*, Vol.VI of the AHP Series, RWS Publications, Pittsburg, USA, 2006.
- [36] İç YT, Apaydın İ. Küçük ve Orta Ölçekli Makine İmalat Firmaları İçin Dış Ticaret Kabiliyeti Analizi. *MATİM*. 2016;14(2):54-68.
- [37] Hwang, C.L. ve Yoon, K. *Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications. A State-of-the-Art Survey*, New York, Springer-Verlag, 1981.
- [38] Abo-Sinna, M. A. ve Amer, A. H. Extensions of TOPSIS for multi objective large-scale nonlinear programming problems. *Applied Mathematics and Computation*. 2005;162: 243–256.
- [39] Cheng, S., Chan, C. W., & Huang, G. H. An integrated multi-criteria decision analysis and inexact mixed integer linear programming approach for solid waste management. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 2003; 16: 543–554.
- [40] Feng, C. M., & Wang, R. T. Performance Evaluation for Airlines Including the Consideration of Financial Ratios. *Journal of Air Transport Management*. 2000; 6: 133–142.
- [41] Jee, D. H. ve Kang, K. J. A method for optimal material selection aided with decision making theory. *Materials and Design*. 2000; 21: 199–206.
- [42] Olson, D. L. Comparison of Weights in TOPSIS Models. *Mathematical and Computer Modelling*. 2004; 40: 721–727.
- [43] Opricovic, S. ve Tzeng, G. H. Compromise Solution by MCDM Methods: A Comparative analysis of VIKOR and TOPSIS. *European Journal of Operational Research*. 2004; 156: 445–455.
- [44] Tzeng, G. H., Lin, C. W., ve Opricovic, S. Multi-criteria analysis of alternative fuel buses for public transportation. *Energy Policy*. 2005; 33: 1373–1383.
- [45] Alvali, G. T., Balbay, A., Şişman, T., & Güneş, S. Selection of Electric Vehicle Chassis Material Using Multi-Criteria Decision Making Techniques. *Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology*. 2021; 9(4): 573-588.
- [46] Cogun, C. Computer aided preliminary selection of nontraditional machining processes. *Int. J. Mach. Tools Mf*. 1994; 34(3): 315-326.
- [47] Chen, T. C. Extensions of the TOPSIS for group decision-making under fuzzy environment. *Fuzzy Sets and Systems*. 2000; 114(1): 1-9.
- [48] Kusumawardani, R. P., Agintiara, M. Application of fuzzy AHP-TOPSIS method for decision making in human resource manager selection process. *Procedia computer science*. 2005; 72: 638-646.

Design and Performance Analysis of an Outer-Rotor PMSynRM

Burak YENİPİNAR^{1,2*}, Ali SAYGIN³, Yusuf SÖNMEZ⁴, Cemal YILMAZ^{3,6}, Cemil OCAK³

¹ Department of Electronic Technology, Vocational School, Ostim Technical University, Ankara, Turkey

² Gazi University, Graduate School of Natural and Applied Science, 06500, Ankara, Turkey

³ Department of Electrical and Electronics Engineering, Faculty of Technology, Gazi University, Ankara, Turkey

⁴ Department of Computer Engineering, Faculty of Technology, Gazi University, Ankara, Turkey

⁵ Department of Energy Engineering, Faculty of Engineering, Mingachevir State University, Mingachevir, Azerbaijan

Article Info

Research article

Received: 21/11/2023

Revision: 28/12/2023

Accepted: 05/01/2024

Keywords

Electric Motor Design
Demagnetization Analysis
Outer-Rotor PM Motor
Traction Motor
PMSynRM

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi

Başvuru: 21/11/2023

Düzeltilme: 28/12/2023

Kabul: 05/01/2024

Anahtar Kelimeler

Elektrik Motor Tasarımı
Demagnetizasyon Analizi
Dış Rotorlu KMSM
Tahrik Motoru
Traction Motor
MD-SRM

Graphical/Tabular Abstract (Grafik Özet)

In this study, unlike the commonly used inner-rotor PMSynRMs in the literature, the design and electromagnetic performance analysis of an outer-rotor PMSynRM are presented. / Bu çalışmada, literatürde yaygın olarak kullanılan iç rotorlu MD-SRM'lerden farklı olarak, dış rotorlu bir MD-SRM tasarımı ve elektromanyetik performans analizi sunulmaktadır.

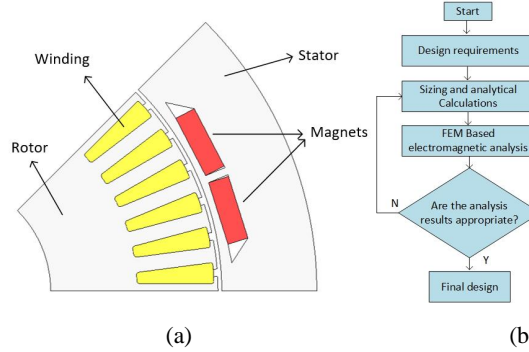


Figure A: a) Cross-section of the outer-rotor PMSynRM b) The flowchart of the proposed motor design / **Şekil A:** a) Dış rotorlu MD-SRM'nin kesiti, b) Önerilen motor tasarımının akış şeması

Highlights (Önemli noktalar)

- Outer-rotor permanent-magnet-assisted synchronous reluctance motor / Dış rotorlu kalıcı mıknatıs destekli senkron relüktans motor
- Torque performance under different phase currents / Farklı faz akımlarında tork performansı
- Demagnetization performance under different phase currents / Farklı faz akımlarında demagnetizasyon performansı

Aim (Amaç): This study aims to design and electromagnetic performance analysis outer-rotor permanent-magnet-assisted synchronous reluctance motor / Bu çalışma, dış rotorlu, kalıcı mıknatıs destekli senkron relüktans motorunun tasarımını ve elektromanyetik performans analizini amaçlamaktadır.

Originality (Özgünlük): This study presents the outer-rotor PMSynRM design for use in electric propulsion vehicles. / Bu çalışma, elektrik tahrikli araçlarda kullanılmak üzere dış rotorlu MD-SRM tasarımını sunmaktadır.

Results (Bulgular): The presented PMSynRM, exhibiting low demagnetization risk and high performance, can be utilized as a traction motor in electric vehicles. / Geliştirilen MD-SRM modeli düşük demagnetizasyon riski ve yüksek performans sergilemesi sebebiyle elektrikli araçlarda tahrik motoru olarak kullanılabilir.

Conclusion (Sonuç): The conducted study resulted in obtaining an PMSynRM design without the risk of demagnetization, featuring a maximum torque exceeding 35 Nm and achieving 90% efficiency at rated conditions. / Yapılan çalışma sonucunda demagnetizasyon riski olmayan, maksimum momenti 35 Nm üzerinde, ancak noktasında %90 verime sahip olan bir MD-SRM tasarımı elde edilmiştir.



Design and Performance Analysis of an Outer-Rotor PMSynRM

Burak YENİPİNAR^{1,2*} , Ali SAYGIN³ , Yusuf SÖNMEZ⁴ , Cemal YILMAZ^{3,6} , Cemil OCAK³

¹ Department of Electronic Technology, Vocational School, Ostim Technical University, Ankara, Turkey

² Gazi University, Graduate School of Natural and Applied Science, 06500, Ankara, Turkey

³ Department of Electrical and Electronics Engineering, Faculty of Technology, Gazi University, Ankara, Turkey

⁴ Department of Computer Engineering, Faculty of Technology, Gazi University, Ankara, Turkey

⁵ Department of Energy Engineering, Faculty of Engineering, Mingachevir State University, Mingachevir, Azerbaijan

Article Info

Research article

Received: 21/11/2023

Revision: 28/12/2023

Accepted: 05/01/2024

Keywords

Electric Motor Design
Demagnetization Analysis
Outer-Rotor PM Motor
Traction Motor
PMSynRM

Abstract

Permanent magnet synchronous motors (PMSMs) are consciously used as traction motors in electric vehicles (EVs) and hybrid electric vehicles (HEVs). The rotor position (inner-rotor, outer-rotor) and topology of PMSMs significantly impact their torque profile, efficiency, and demagnetization characteristics. This article focuses on designing an outer-rotor permanent-magnet-assisted synchronous reluctance motor (PMSynRM) under traction motor requirements and investigating its electromagnetic performance using the finite element method (FEM). This study's primary challenge is achieving optimal machine performance, considering high maximum torque and the risk of demagnetization at low levels. The design, derived from analytical calculations, was subjected to Finite Element Method (FEM) analyses. These analyses investigated motor performance in terms of efficiency, the ability to generate torque at different drive currents, and the risk of demagnetization. As a result of the study, the proposed PMSynRM design was obtained that provides an adequate demagnetization performance even under 300% loading, has a maximum torque exceeding 35 Nm, and achieves an efficiency of 90% at rated conditions.

Dış Rotorlu MD-SRM Tasarımı ve Performans Analizi

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi

Başvuru: 21/11/2023

Düzeltilme: 28/12/2023

Kabul: 05/01/2024

Anahtar Kelimeler

Elektrik Motor Tasarımı
Demagnetizasyon Analizi
Dış Rotorlu KMSM
Tahrik Motoru
Traction Motor
MD-SRM

Öz

Kalıcı mıknatıslı Senkron Motorlar (KMSM) tahrik motoru olarak elektrikli (EA) ve hibrit elektrikli (HEA) araçlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. KMSM'lerin rotor pozisyonu (iç rotorlu, dış rotorlu) ve mıknatıs yerleşim topolojisi, tork profili, verimi ve demagnetizasyon özellikleri üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Bu makalenin ana amacı tahrik motoru isterlerine uygun bir şekilde dış rotorlu Mıknatıs Destekli Senkron Relüktans Motor (MD-SRM)'nin tasarımı ve elektromanyetik performansının sonlu eleman yöntemi (SEY) ile analiz edilmesidir. Bu çalışmadaki temel zorluk, yüksek maksimum tork ve düşük demagnetizasyon riski açısından en iyi makina performansını elde etmektir. Analitik hesaplamalar ile elde edilen tasarımın SEY analizleri yapılmış ve motor performansı verimlilik, farklı sürücü akımlarında tork üretme kabiliyeti ve demagnetizasyon riski araştırılmıştır. Yapılan çalışma sonucunda %300 yüklenme durumunda demagnetizasyon riski olmayan, maksimum momenti 35 Nm üzerinde, ancak noktasında %90 verime sahip olan bir MD-SRM tasarımı elde edilmiştir.

1. INTRODUCTION (GİRİŞ)

Electric Vehicles (EVs) and hybrid Electric Vehicles (HEVs) are optimal solutions for reducing carbon emissions, contributing to environmental preservation, and achieving high-energy efficiency in transportation. Therefore, research studies on these vehicles and their components have increased in recent years [1-3]. Indeed, the electric motor

stands out as a critical component in EVs and HEVs, directly impacting the vehicle's range and performance.

Due to their advantages, such as high power density and efficiency, Permanent Magnet Synchronous Motors (PMSMs) are widely preferred in EVs and HEVs [4]. PMSMs are generally designed in two different topologies. The first is the Surface

Permanent Magnet Synchronous Motor (SPMSM), where magnets are located on the rotor surface, and the second is the Interior Permanent Magnet Synchronous Motor (IPMSM), where magnets are embedded within the rotor. In contrast to SPMSMs, IPMSMs can produce a high reluctance torque component [5]. IPMSMs with high reluctance torque production capability are also referred to as Permanent-Magnet-Assisted Synchronous Reluctance Motors (PMSynRMs). This reluctance torque capability allows PMSynRMs to generate the same torque with less magnet volume than SPMSMs. The magnet placement geometry is the most crucial factor influencing the reluctance torque component. Hence, numerous studies in the literature regarding magnet geometries commonly used in PMSynRMs, such as V-shaped, double V-shaped, U-shaped, and Delta-shaped, are illustrated in Figure 1. These studies are summarized below.

Xiangdong and colleagues conducted a comparative study on four different PMSynRM rotor topologies. It has been noted that the V-shaped geometry possesses the highest reluctance torque component, while the Tangential-type exhibits the highest average torque and the lowest cogging torque, torque ripple, and Total Harmonic Distortion (THD%) [5]. Ling and colleagues performed performance analyses on a motor with five different rotor geometries: Tangential-type, V-shaped, double V-shaped, Delta-shaped, and U-shaped. They presented the results comparatively, and the motor with a V-shaped rotor has been found to outperform its competitors when evaluated for the lowest demagnetization risk, the lowest manufacturing cost of rotor sheet (\$), and the highest saliency ratio [6]. Sheng-Ching and colleagues conducted a design optimization study to increase the torque of a V-shaped motor with a rated power, speed, and torque of 34 kW, 2250 Rpm, and 144.3 Nm, respectively [7].

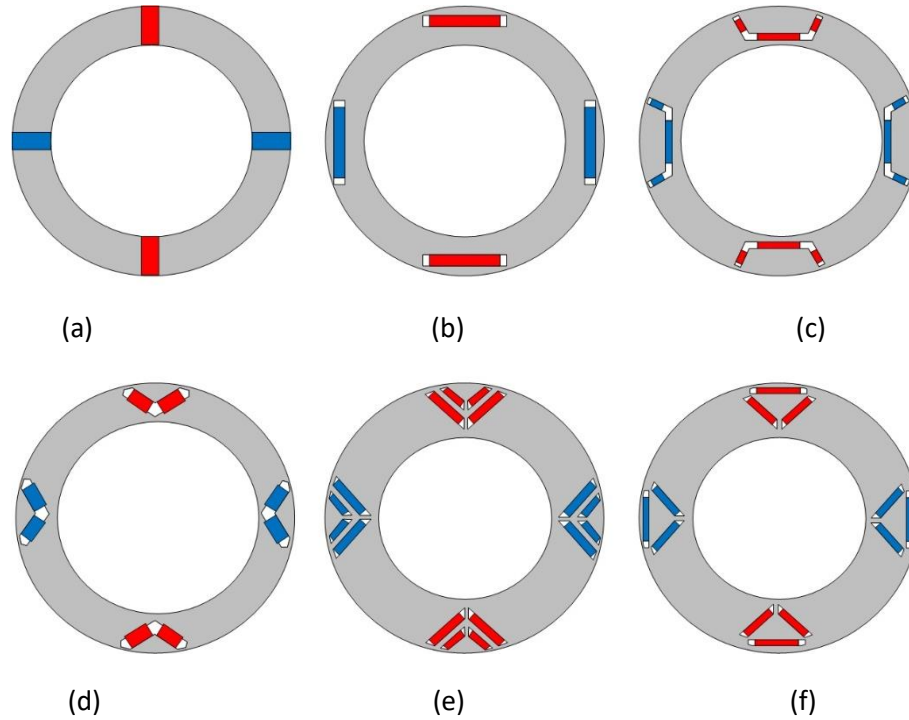


Figure 1. Cross-sections of six basic PMSynRM models. (a) Spoke-type. (b) Tangential-type. (c) U-shaped. (d) V-shaped. (e) Double V-shaped. (f) Delta-shaped (Altı temel MD-SRM kesiti)

Dalcalı conducted a design optimization for a V-shaped PMSynRM, considering crucial geometric parameters such as magnet geometry and flux barriers based on cost and efficiency criteria. Three designs were obtained based on the criteria of maximum output power, maximum efficiency/cost ratio, and maximum efficiency. The study results revealed that the motor optimized for maximum output power resulted in low efficiency and high

cost, while the motor developed for maximum efficiency ended up with high costs. The study results indicate that the criterion of maximum efficiency/cost ratio is the most suitable approach [8]. Wang and colleagues conducted analyses of five different rotor topologies, which include surface, V-shaped, Tangential-type, two-segment Tangential-type, and a hybrid geometry of V-shaped and Tangential-type. The analyses presented

the comparative values of back EMF, magnet mass, iron loss, and torque ripple for the different motors. The analyses revealed that the topology with the highest torque production per unit magnet mass is the V-shaped [9].

When evaluating the studies in the literature, PMSynRM has been seen widely used in the literature for the last years. However, it is observed that these studies have predominantly focused on inner-rotor PMSynRMs. Additionally, upon reviewing the literature, it can be observed that each of the PMSynRMs presented in Figure 1 above has its own advantages and disadvantages relative to one another. The V-shaped inner-rotor topology stands out when considering parameters such as low demagnetization risk, low production cost, and a high reluctance torque component. Therefore, this study introduces a distinctive V-type outer-rotor PMSynRM design, differing from the literature.

Additionally, examining the studies on outer-rotor PMSM from the literature reveals a predominant focus on surface-mounted structures [10-13]. When examining outer-rotor PMSM, it is observed that these motors effectively meet the demand for high torque at low speeds and are suitable for direct drive applications. However, their saliency ratios are 1 (or close to 1), so these motors do not provide a sufficient reluctance torque component [14]. Additionally, they are not the most suitable candidates for variable-speed applications due to their low field-weakening capabilities [15].

In this study, unlike the commonly used inner-rotor PMSynRMs in the literature, the design and electromagnetic performance analysis of a V-shaped outer-rotor PMSynRM are presented. Efficiency map, torque-speed performance, demagnetization characteristics under different drive currents, and magnetic flux distributions of the proposed design have been examined.

2. MATERIALS AND METHODS (MATERİYAL VE METOD)

2.1. Design Requirements (Tasarım Gereksinimleri)

The design of traction motors requires specific design criteria compared to industrial motors. These can be summarized as high maximum torque for acceleration, low volume due to high power density, and high efficiency across a wide speed and torque range [4]. The design requirements considered in this study are given in Table 1 below.

Table 1. Targeted design requirements (Hedeflenen tasarım gereksinimleri)

DC Supply Voltage (V)	72
Peak Current (A)	150
Maximum Torque	>30
Slot Fill Factor	%45
Base Speed	2000 Rpm
Rated Torque	10 Nm
Torque Ripple Rate	<10
Efficiency Rated Power	%85
Rated Current Density	<6

Current and voltage limits were selected considering the requirements of light EVs. The ability of the traction motor to produce high maximum torque is crucial for the climbing and acceleration capabilities of the vehicle. Therefore, the maximum torque value should be at least 300% of the rated. The outer-rotor PMSynRM design flowchart that meets the given requirements is shown in Figure 2.

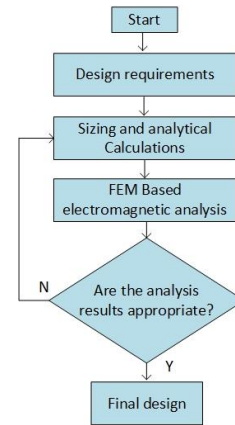


Figure 2. The flowchart of the proposed motor design (Önerilen motor tasarımın akış şeması)

Initially, analytical calculations were conducted to obtain a design meeting the requirements. Some of these calculations are provided in the next section. Subsequently, FEM analyses were performed to examine and verify the motor's performance based on the obtained results, and the outcomes are presented. JMAG Designer 22.1 was used for analysis studies on a computer with an i5-10400 CPU and 8GB of RAM.

2.2. Basic Design Equations (Temel Tasarım Eşitlikleri)

Sizing calculations are the starting point for designing electric machines. Three independent variables are used to determine the size of the electric motor. These are the shape ratio (SR), the torque per rotor volume (TRV), and the torque density (TD) [16]. These variables are used to

determine the rotor diameter, core length, and stator diameter of the motor. SR, TRV, and TD can be expressed by the following equations, respectively:

$$SR = \frac{L_{STK}}{D_R}, \quad TRV = \frac{T_{MAX}}{\frac{\pi}{4}D_R^2 L_{STK}}, \quad TD = \frac{T_{MAX}}{\frac{\pi}{4}D_S^2 L_{STK}} \quad (1)$$

L_{STK} represents the core length, T_{MAX} is the maximum torque, D_S is the stator outer diameter, and D_R is the rotor diameter. These three parameters are also employed as independent variables in the design process when calculating the motor's geometric parameters, such as stator slot geometry, magnet geometry, and stator back iron distance. After dimension calculation, some design equations used to achieve the requirements specified in Table 1 are as follows. The equations in the d-q reference plane for PMaSynRM are as follows [17].

$$U_d = i_d R_s + L_d \frac{di_d}{dt} - w_e L_q i_q \quad (2)$$

$$U_q = i_q R_s + L_q \frac{di_q}{dt} - w_e L_d i_d + w_e \phi_{pm} \quad (3)$$

In this context, U_d and U_q represent the stator voltage components in the direct and quadrature axes, i_d and i_q stand for the stator current components in the direct and quadrature axes, ϕ_{pm} designates the magnet flux linkage, w_e is the electrical angular velocity, L_d and L_q are the self-inductance components in the d-q axes, and R_s is the stator winding resistance. The electromagnetic torque generated by the motor can be computed using the following formula [18, 19].

$$T_e = \frac{3}{2} p [\phi_{pm} i_q + (L_d - L_q) i_d i_q] \quad (4)$$

Here, p represents the number of pole pairs. In PMaSynRM, the motor torque consists of two components: the magnet torque and the reluctance torque.

$$T_{magnet} = \frac{3}{2} p \phi_{pm} i_q \quad (5)$$

$$T_{reluctance} = \frac{3}{2} p (L_d - L_q) i_d i_q \quad (6)$$

In IPM motors, the saliency ratio L_d/L_q directly influences the amount of reluctance torque, as seen in Eq. 6. The variation of the two torque components and the total output torque of a typical PMaSynRM, depending on the current phase angle is presented in Figure 3 below. The reluctance torque component, typically depicted in the torque-current angle graph, varies depending on the

geometry of the magnet inside the rotor and the flux barriers.

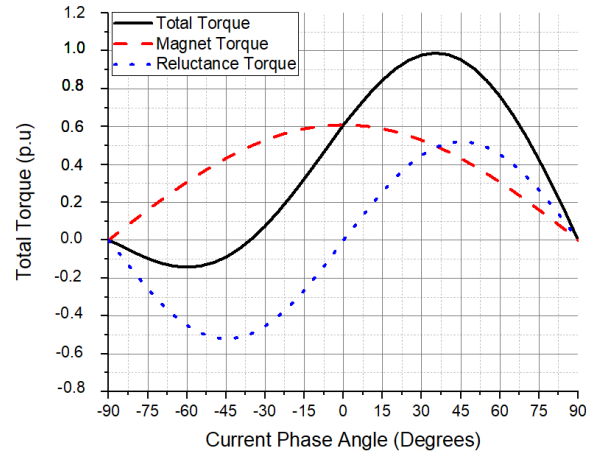


Figure 3. The torque component of a PMaSynRM (MD-SRM'nin tork bileşenleri)

Torque ripple is also an important performance parameter for electric motors and can be expressed as the equation below [20].

$$T_{ripple} = \frac{T_{pp}}{T_{avg}} \times 100\% \quad (7)$$

Where T_{pp} and T_{avg} are peak-to-peak torque and average torque, respectively. The efficiency of the motor can be calculated as follows:

$$\eta = \frac{P_e}{P_e + P_{loss}} \times 100\% \quad (8)$$

Here, P_e represents the electromagnetic power, and P_{loss} is the motor losses.

2.3. Specification of the Designed Motor (Tasarlanan Motorun Özellikleri)

As a result of the calculations and FEM analyses conducted in line with the design requirements, the overall geometry of the PMaSynRM, as shown in Figure 4, has been obtained.

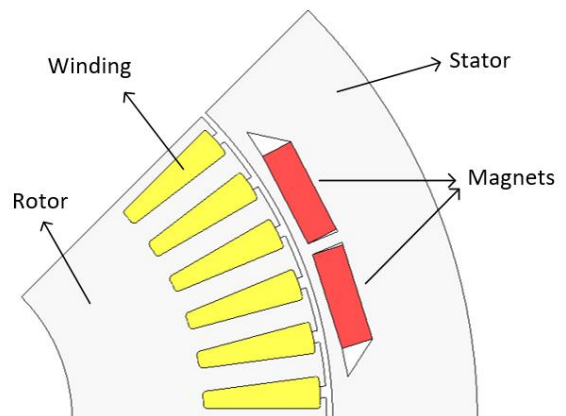


Figure 4. Cross-section of the outer-rotor PMaSynRM (Dış rotorlu MD-SRM'nin kesiti)

The general geometric dimensions of the obtained motor, the core material, materials used for magnets, and stator winding connection details are provided in the following Table 2.

Core losses contribute significantly to the overall losses of an electric motor. Silicon steel laminations with low W/kg values are typically used to minimize core losses [1]. Therefore, in this study, M270-35A material has been preferred. Additionally, for its high energy density, an N30-grade neodymium magnet has been chosen as the permanent magnet in the design. The B-H curves for the magnet and core material are given in Figure 5 below. Furthermore, slot geometries with high fill factor have been obtained for minimizing stator copper losses.

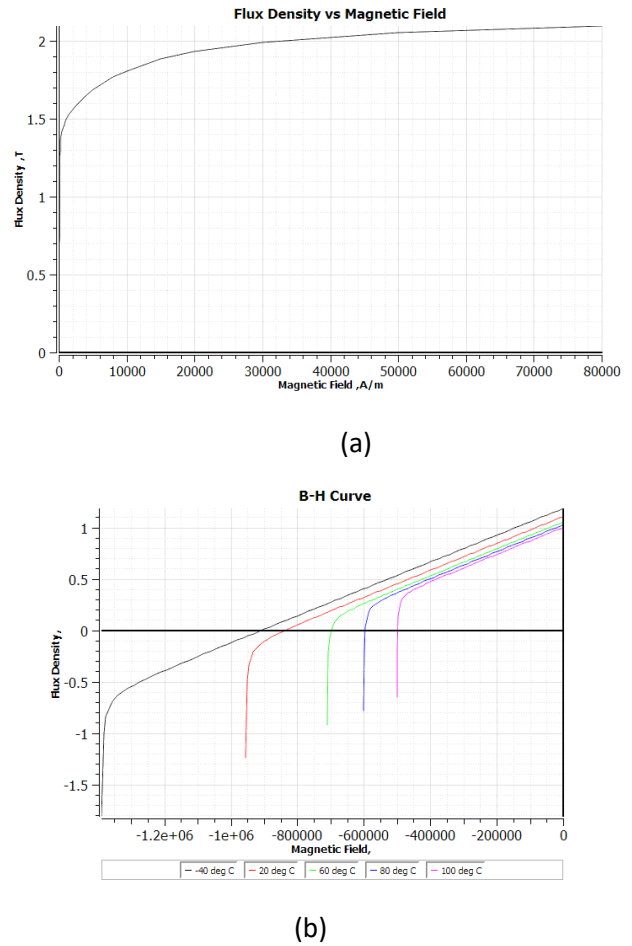


Figure 5. B-H Curve. (a) M270-35 Steel sheet. (b) N30 permanent magnet (B-H Eğrisi. (a) M270-35 Silisli sac. (b) N30 mıknatıs)

Table 2. Specification of the proposed motor (Önerilen motorun özellikleri)

Basic Motor Parameters		Geometric Parameters	
Outer radius of the Rotor	100 mm	H1 (mm)	2.5
Inner radius of the Rotor	75 mm	BS (mm)	6
Outer radius of the Stator	74 mm	TW (mm)	3.4
Inner radius of the Stator	30 mm	H2 (mm)	13.2
Axial length	50 mm	MT (mm)	4
Stator/Rotor Number	48/8	ML (mm)	12.4
Connection Type	Star	Rib1 (mm)	5.7
Number of turns	4	Rib2 (mm)	3.6
Core Material	M270-35A	Rib3 (mm)	1
Magnet Material	N30	Angle	170

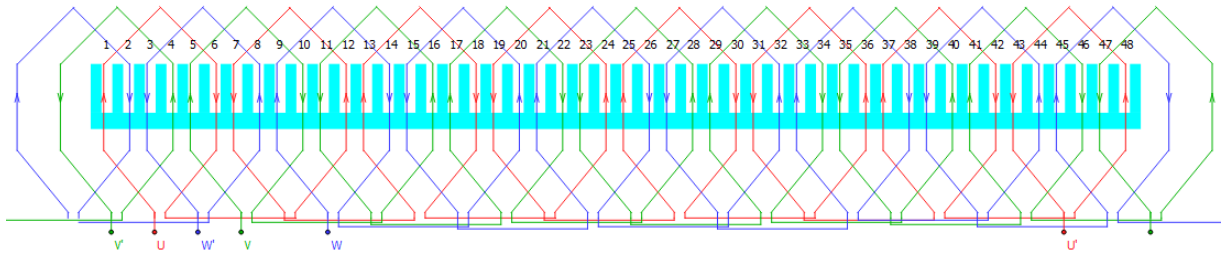


Figure 6. Winding diagram of the proposed design (Önerilen tasarımın sargı diyagramı)

To reduce copper losses in an electric motor, a fundamental method commonly employed involves increasing the slot cross-sectional area and the wire diameter, thus decreasing current density. This method is commonly applied if the motor does not have critical constraints, such as core size and magnetic circuit. In the designed motor, attention was paid to this aspect when determining the stator tooth thickness, ensuring that the area of stator slots is set to avoid core saturation. After determining the slot fill factor, decisions were made regarding the number of turns and stator winding topology, which significantly affects the rated and maximum speed, the rated and maximum torque, and the field-weakening capability of the motor. The winding diagram of the designed motor is given in Figure 6 above.

In this study, a distributed winding configuration has been preferred, as shown in Figure 6 above, due to its superior torque-speed characteristics, torque ripple, efficiency, and power factor compared to the concentrated winding PMSMs [22].

3. RESULTS (BULGULAR)

In this section, the results of the FEM analysis for the outer-rotor PMSynRM are given. The distribution of magnetic flux density, efficiency map, torque-speed performance under different drive currents, and demagnetization risk analyses obtained by FEM analyses are conducted and presented. A dense mesh is applied to the stator teeth and magnets to obtain a high-accuracy analysis study, as seen in Figure 7. Although this extends the analysis time, it increases the accuracy of the results. Figure 8 shows the flux density distribution and flux lines of the stator and rotor of the proposed motor.

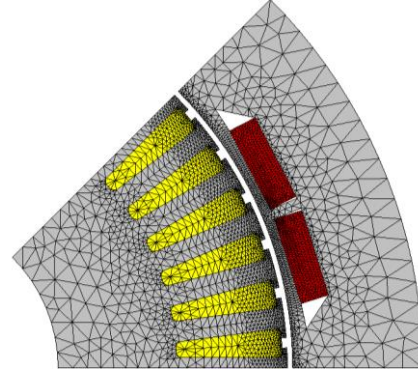


Figure 7. Distribution of mesh (Ağ dağılımı)

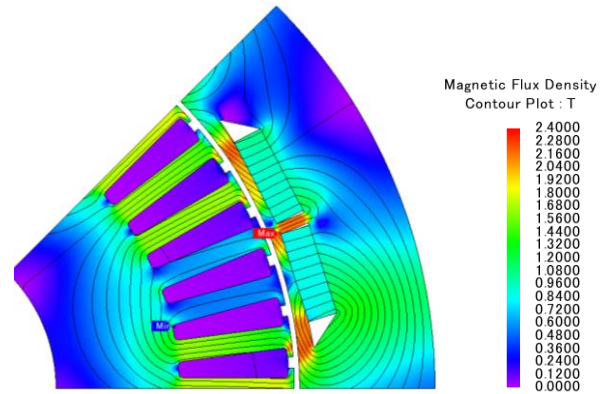


Figure 8. Distribution of magnetic flux density and flux lines (Manyetik akı yoğunluğu ve akı çizgilerinin dağılımı)

In Figure 8, it can be seen that the maximum magnetic flux density in the stator teeth is around 1.8 Tesla, while in the rotor and stator back iron regions, it is significantly lower. To minimize leakage magnetic flux in the rotor, the region between the flux barrier and the inner diameter of the rotor has been designed as short as mechanical limits allow. In the specified region, the core has been saturated to minimize leakage magnetic flux. Considering the B-H curve of the M270-35A core material provided in Figure 4-a, it is observed that the magnetic flux values meet the requirements.

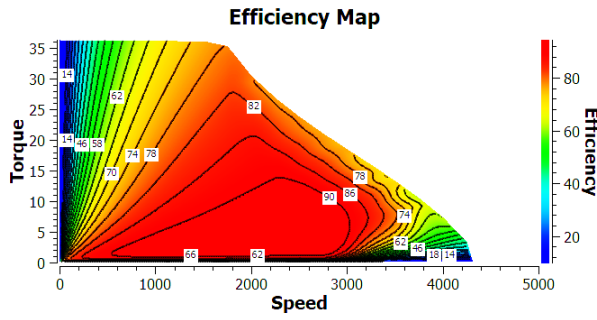


Figure 9. Efficiency map of the proposed motor (Önerilen motorun verimlilik haritası)

Analyzing the results presented in Figure 9, it is evident that the motor exhibits a maximum torque exceeding 35 Nm. Moreover, within the range of 1000 to 3000 RPM and 5 Nm to 10 Nm, the motor attains an efficiency of approximately 90%. The torque-speed characteristics of the traction motors used in EVs and HEVs are directly affected by the maximum phase current that the motor drive can supply. Figure 10 shows the output torque of the proposed motor under different drive currents. Upon careful examination of the outcomes, it becomes apparent that the torque values produced per ampere exhibit noteworthy uniformity across nearly four current density levels. It can be asserted that this situation represents another analysis output indicating that the core has not undergone saturation.

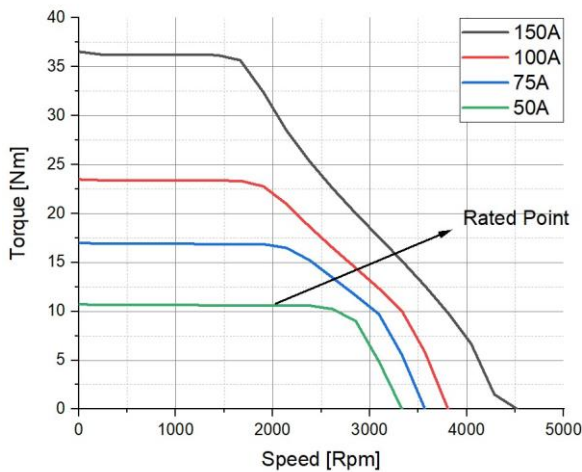


Figure 10. Torque performance under different phase currents (Farklı faz akımlarında tork performansı)

The maximum torque and speed values the motor produces also vary depending on the motor phase current. In the proposed design, the winding cross-sectional area is 10 mm². In this case, the current

density at the rated point is 5 A/mm². The determined current density is a suitable value for motors operating in the S2-60 min duty cycle cooled by natural convection and belonging to the H insulation class. In permanent magnet motors, the demagnetization of permanent magnets adversely affects the motor performance [21]. Therefore, the demagnetization characteristics of these motors are a crucial parameter that needs to be examined for motor performance. Magnet temperature dramatically influences the magnet's operating point; hence, demagnetization prediction analyses were conducted at a constant ambient temperature of 40°C.

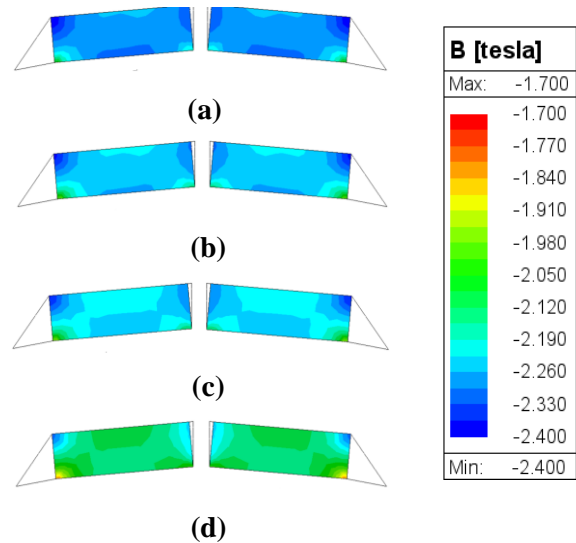


Figure 11. Demagnetization performance of the designed motor under different phase currents. (a) 50 A, (b) 75 A, (c) 100 A, (d) 150 A (Tasarlanan motorun farklı faz akımlarında demagnetizasyon performansı)

In Figure 11 above, the demagnetization risk of the magnets can be observed at four different phase currents. When the "demagnetization proximity" value is negative in these graphs with the unit Tesla, it can be regarded as there is no demagnetization risk. As the temperature increases, the risk of demagnetization will also increase. In this study, apart from the current density, the thermal performance of the motor has yet to be examined.

4. CONCLUSIONS (SONUÇLAR)

In this study, a design and analysis of a V-shaped Outer-Rotor PMSynRM applicable to EVs and HEVs utilizing a 72V DC battery pack was conducted. The design phase was culminated and

verified by electromagnetic performance analysis, assessing motor performance under various conditions.

The efficiency of the proposed motor under rated conditions was determined to be 90%, and its maximum torque was observed to exceed 35 Nm based on the performed analyses. The torque-speed characteristics of the motor were examined at phase currents of 50A, 75A, 100A, and 150A, considering the different capacity motor drives used in light electric vehicles. The approximately consistent maximum torque values per ampere across each phase current indicate that the core is not undergoing saturation. Similarly, the demagnetization performance of the magnets was examined at the specified current values. The investigation concluded that there is no risk of demagnetization in the current design.

In the further stages of this study, a design optimization study for different magnet placement geometries will be conducted, and the electromagnetic and thermal performance parameters of the optimized designs will be comparatively analyzed and presented.

ACKNOWLEDGMENTS (TEŞEKKÜR)

This work has been supported by Gazi University Scientific Research Projects Coordination Unit (BAP) under grant number FDK-2022-7686.

DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS (ETİK STANDARTLARIN BEYANI)

The author of this article declares that the materials and methods they use in their work do not require ethical committee approval and/or legal-specific permission.

Bu makalenin yazarı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

AUTHORS' CONTRIBUTIONS (YAZARLARIN KATKILARI)

Burak YENİPINAR: He conducted the research, analyzed the results and performed the writing process.

Araştırmayı yapmış, sonuçlarını analiz etmiş ve makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

Ali SAYGIN: He conducted literature review and interpretation of results.

Literatür taraması ve sonuçların yorumlanması işlemini gerçekleştirmiştir.

Yusuf SÖNMEZ: He conducted literature review and interpretation of results.

Literatür taraması ve sonuçların yorumlanması işlemini gerçekleştirmiştir.

Cemal YILMAZ: He has contributed subject and article evaluation.

Konu ve makale değerlendirmesinde katkıda bulunmuştur.

Cemil OCAK: He has contributed subject and article evaluation.

Konu ve makale değerlendirmesinde katkıda bulunmuştur.

CONFLICT OF INTEREST (ÇIKAR ÇATIŞMASI)

There is no conflict of interest in this study.




Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

REFERENCES (KAYNAKLAR)

- [1] Ocak, C., & Yenipınar, B. (2021). Hafif Elektrikli Araçlar için Asenkron Motor Tasarımı ve Uygulaması. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (26), 228-233.
- [2] Kerem, A., & Gürbak, H. (2020). Elektrikli Araçlar için Hızlı Şarj İstasyonu Teknolojileri. *Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology*, 8(3), 644-661.
- [3] Cao, R., Mi, C., & Cheng, M. (2012). Quantitative comparison of flux-switching permanent-magnet motors with interior permanent magnet motor for EV, HEV, and PHEV applications. *IEEE Transactions on magnetics*, 48(8), 2374-2384.
- [4] Husain, I., Ozpineci, B., Islam, M. S., Gurpinar, E., Su, G. J., Yu, W., ... & Sahu, R. (2021). Electric drive technology trends, challenges, and opportunities for future electric vehicles. *Proceedings of the IEEE*, 109(6), 1039-1059.
- [5] Liu, X., Chen, H., Zhao, J., & Belahcen, A. (2016). Research on the performances and parameters of interior PMSM used for electric vehicles. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 63(6), 3533-3545.
- [6] Ding, L., Cheng, Y., Zhao, T., Yao, K., Wang, Y., & Cui, S. (2023). Design and Optimization of an Asymmetric Rotor IPM Motor with High

- Demagnetization Prevention Capability and Robust Torque Performance. *Energies*, 16(9), 3635.
- [7] Wang, S. C., Nien, Y. C., & Huang, S. M. (2022). Multi-objective optimization design and analysis of V-shape permanent magnet synchronous motor. *Energies*, 15(10), 3496.
- [8] Dalcali, A. (2018). Optimal Design of High Performance Interior PM Motor for Electric Vehicle. *The International Journal of Energy and Engineering Sciences*, 3(2), 46-54.
- [9] Wang, A., Jia, Y., & Soong, W. L. (2011). Comparison of five topologies for an interior permanent-magnet machine for a hybrid electric vehicle. *IEEE transactions on Magnetics*, 47(10), 3606-3609.
- [10] Tovar-Barranco, A., Briz, F., López-de-Heredia, A., & Villar, I. (2017, September). Comparison of permanent magnet synchronous machines with concentrated windings and different rotor configurations. In *2017 19th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'17 ECCE Europe)* (pp. P-1). IEEE.
- [11] Shi, Z., Sun, X., Cai, Y., Tian, X., & Chen, L. (2020). Design optimisation of an outer-rotor permanent magnet synchronous hub motor for a low-speed campus patrol EV. *IET Electric Power Applications*, 14(11), 2111-2118.
- [12] Sundaram, M., Anand, M., Chelladurai, J., Varunraj, P., Joshua Smith, S., Sharma, S., ... & Alayi, R. (2022). Design and FEM Analysis of High-Torque Power Density Permanent Magnet Synchronous Motor (PMSM) for Two-Wheeler E-Vehicle Applications. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 2022.
- [13] Bdewi, M. Y., Ali, M. M. E., & Mohammed, A. M. (2022). In-wheel, outer rotor, permanent magnet synchronous motor design with improved torque density for electric vehicle applications. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, 12(5), 4820.
- [14] Ghahfarokhi, P. S., & Faiz, J. (2018). Design of four pole permanent magnet motor with different rotor topologies. *Journal of Electromotion*, 20, 1-4.
- [15] Paitandi, S., & Sengupta, M. (2020). Analysis, fabrication and detailed comparative study of surface and interior rotor PMSM prototypes of identical nominal ratings and stators. *Sādhanā*, 45(1), 69.
- [16] Kim, H. J., Jeong, J. S., Yoon, M. H., Moon, J. W., & Hong, J. P. (2017). Simple size determination of permanent-magnet synchronous machines. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 64(10), 7972-7983.
- [17] Diab, A., Rashed, M., Li, J., Gerada, C., & Bozhko, S. (2018, November). Performance analysis of PMSM for high-speed starter-generator system. In *2018 IEEE International Conference on Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles & International Transportation Electrification Conference (ESARS-ITEC)* (pp. 1-7). IEEE.
- [18] Shen, Q., Sun, N., Zhao, G., Han, X., & Tang, R. (2010, March). Design of a permanent magnet synchronous motor and performance analysis for subway. In *2010 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference* (pp. 1-4). IEEE.
- [19] Estima, J. O., & Cardoso, A. M. (2010, September). Performance analysis of a PMSM drive for hybrid electric vehicles. In *The XIX International Conference on Electrical Machines-ICEM 2010* (pp. 1-6). IEEE.
- [20] Bdewi, M. Y., Mohammed, A. M., & Ezzaldeen, M. M. (2021). Design and performance analysis of permanent magnet synchronous motor for electric vehicles application. *Engineering and Technology Journal*, 39(03 Part A), 394-406.
- [21] You, Y. M., & Yoon, K. Y. (2021). Multi-objective optimization of permanent magnet synchronous motor for electric vehicle considering demagnetization. *Applied Sciences*, 11(5), 2159.
- [22] Pop-Pîgleşan, F., Pop, A. C., & Marțiș, C. (2021). Synchronous reluctance machines for automotive cooling fan systems: numerical and experimental study of different slot-pole combinations and winding types. *Energies*, 14(2), 460.

Kohezyonsuz Zeminlerde Kesme Bant Kalınlığı ve Rölatif Sıklık Arasındaki İlişki

Doğucan RESULOĞULLARI^{1*}  Gökhan ALTAY¹  Cafer KAYADELEN¹ 

¹Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği, Osmaniye, Türkiye

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 26/07/2023
Düzeltilme: 03/10/2023
Kabul: 12/11/2023

Anahtar Kelimeler

Kesme bant
Rölatif sıklık
Görüntü işleme
Kohezyonsuz zemin

Article Info

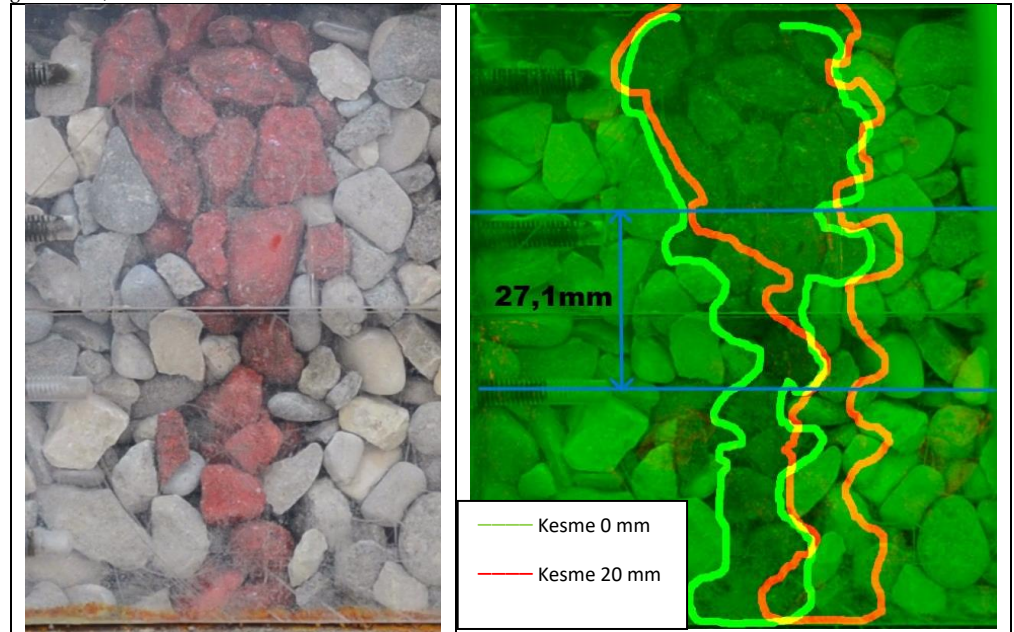
Research article
Received: 26/07/2023
Revision: 03/10/2023
Accepted: 12/11/2023

Keywords

Shear band
Relative density
Image processing
Cohesionless soil

Grafik Özet (Graphical/Tabular Abstract)

Bu çalışmada 3 farklı sıklıkta iri taneli zemin numunesi geotekstili ve geotekstilsiz olarak direk kesmeye tabi tutulup, kesme bant kalınlıkları incelenmiştir. / In this study, coarse grained soil samples with 3 different relative densities were subjected to direct shearing without interfacial material and using geotextile, and the shear band thicknesses were examined.



Şekil A: Rölatif sıklık %30 için zemin-zemin kesme bant kalınlığı / **Figure A:** Soil-Soil shear band thickness for relative density 30%

Önemli noktalar (Highlights)

- En yüksek kesme dayanımı %80 sıklıkta elde edilmiştir. Geotekstil kullanımı deney zemin numunesinin kesme dayanımı düşürmüştür. / The highest shear strength was obtained at 80% relative density. The use of geotextile decreased the shear strength of the test soil sample.
- Geotekstilin arayüzeyde kullanımı taneler arasındaki sürtünmeyi azaltmasıyla birlikte dilatasyon açıları azalma görülmüştür. / As the use of geotextile at the interface reduced the friction between soil particles, a decrease in dilatation angles was observed.
- Geotekstil altında kalan zemin içerisinde kesme bant oluşumuna rastlanılmamıştır. / No shear band formation was found in the soil under the geotextile.

Amaç (Aim): Bu çalışmanın amacı kaba taneli zeminlerde, geotekstilin arayüzde kullanılması durumunda kesme bant oluşumlarını incelemektir. / The aim of this study is to examine shear band formations when geotextile is used at the interface in coarse grained soils.

Özgünlük (Originality): Geotekstil alt-üst bölgelerinde kesme bant formasyonu açısından dijital görüntü işleme metodunun kullanılması ile literature katkı yapılmıştır. / A contribution to the literature was made by using the digital image processing method in terms of shear band formation in the upper and lower zones of geotextile.

Sonuç (Conclusion): En yüksek kesme bant kalınlığı 27.1 mm ile rölatif sıklık %30 için zemin-zemin kesme durumunda elde edilmiştir. / The highest shear band thickness was obtained in the soil-soil shearing case for 27.1 mm and relative tightness of 30%.



Kohezyonsuz Zeminlerde Kesme Bant Kalınlığı ve Rölatif Sıklık Arasındaki İlişki

Doğucan RESULOĞULLARI^{1*} Gökhan ALTAY¹ Cafer KAYADELEN¹

¹Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği, Osmaniye, Türkiye

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 26/07/2023
Düzeltilme: 03/10/2023
Kabul: 12/11/2023

Anahtar Kelimeler

Kesme bant
Rölatif sıklık
Görüntü işleme
Kohezyonsuz zemin

Öz

Bu çalışmada iri daneli zemin üzerinde, kesme kutusu deneyleri yapılarak kesme bant kalınlığı incelenmiştir. Standart kesme kutusu deneyi cihazının boyutları 15 cm x 15 cm x 9 cm olacak şekilde modifiye edilmiştir. Ayrıca, kesme kutusu deney cihazının bir yüzeyinde şeffaf plaka kullanılarak kesmebant kalınlığı bütün kesme aşaması süresince gözlemlenmiştir. Deneyler %30-%50-%80 sıklık oranlarında ve sabit 54 kPa normal gerilme altında yapılmıştır. Deneyler yüksek çözünürlüklü kamerayla kayıt altına alınarak görüntü işleme yöntemiyle kesme bant kalınlığı belirlenmiştir. Deneylerde geotekstil kullanılarak, zemin-zemin ve zemin-geotekstil ara yüzey kesme durumlarında ortaya çıkan kesme bantları karşılaştırılmıştır. Geotekstil kullanılmadan gerçekleştirilen deneylerde %30, %50 ve %80 sıklık durumları için sırasıyla kesme bant kalınlıkları 27.1 mm, 26.7 mm ve 25.2 mm bulunmuştur. Geotekstil in ara-yüzeye dahil edilmesiyle birlikte ise sırasıyla %30, %50 ve %80 kalınlıklar için kesme bant kalınlıkları 25.9 mm, 23.2 mm ve 20.2 mm olarak belirlenmiştir. Geotekstil kullanımı ile kesme bant kalınlıklarının azaldığı ve kesme bant oluşumunun geotekstil altında görülmeyeceği belirlenmiştir.

Relationship between Shearband Thickness and Relative Density for Cohesionless Soil

Article Info

Research article
Received: 26/07/2023
Revision: 03/10/2023
Accepted: 12/11/2023

Keywords

Shear band
Relative density
Image processing
Cohesionless soil

Abstract

In this study, shear band thickness was examined by performing shear box tests on coarse-grained soil. The dimensions of the standard shear box experiment device were modified to be 15 cm x 15 cm x 9 cm. Additionally, the shear band thickness was observed throughout the entire shear phase by using a transparent plate on one surface of the shear box test device. The experiments were carried out at 30%-50%-80% relative densities and under a constant 54 kPa normal stress. The experiments were recorded with a high-resolution camera and the shear band thickness was determined by image processing method. By using geotextile in the experiments, reinforced and unreinforced conditions were compared. In the experiments carried out without using geotextile, the shear band thicknesses were found to be 27.1 mm, 26.7 mm and 25.2 mm for 30%, 50% and 80% tightness conditions, respectively. With the inclusion of geotextile in the interface, the shear band thicknesses were determined as 25.9 mm, 23.2 mm and 20.2 mm for 30%, 50% and 80% thicknesses, respectively. It was determined that shear band thicknesses decreased with the use of geotextile and shear band formation was not observed under the geotextile.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Zemin arayüz kesme davranışı ile ilgili karşılaşılan problemler genelde kazık temel, dayanma duvarları veya güçlendirme uygulamalarında karşımıza çıkmaktadır. Bu problemler granüler zeminlerde vorteksler, kesme bantları olarak belirmektedir. Kesme esnasında zeminin yenilmesi ile birlikte kesme bant formasyonu olduğu önceki çalışmalarla belirlenmiştir [1–3]. Bu yenilme esnasında kesme bantları kesme alanları içerisinde gerçekleşmektedir. Lu, Wang ve Peng [4],

yaptıkları çalışmada kesme alanı içerisindeki zemin tanelerinin üniform olmayan bir deformasyon yaptığını açıklamışlardır. Zemin arayüz sürtünmesi esnasında zemin tanelerinin ilk etapta kesme alanı doğrultusunda var olan boşluklara yerleştiği ve ikinci aşamada ise bu tanelerin birbirlerine kenetlendiği daha sonraki çalışmalarla ispatlanmıştır [5]. Büyük kütlelerde ise açılmal kesme bant oluşumları kinematik, reolojik ve geometrik parametreler ile teorik analizlerle açıklanmıştır. Bu analizler sonucunda düktil kesme bölgelerinde makro ve mikro kesme bantları

oluşumu gözlemlenmiş olup mikro ölçekte kesme bantları 500-1500 μm , makro ölçekteki kesme bantlarının ise 40 cm'e kadar ulaştığı görülmüştür [6]. Shen vd. [7] yaptıkları çalışmada ise modifiye kesme kutusu cihazı kullanarak zemin arayüz davranışını incelemiş, kalker içerikli kuru kum üzerinde kesme uygulamışlardır. Bu deney sonucunda kesme bantlarının kesme kutu halkalarının birleştiği doğrultuda oluştuğunu ve 0.79-1.59 mm arasında kesme bant kalınlığı saptamışlardır. Maksimum kayma deformasyonun kutu halkaları kesişim düzleminde gerçekleştiği ve deney öncesine oranla zemin daneleri pozitif y eksenine 90° açı yaptığı gözlemlenmiştir. Başka bir çalışmada ise kesme esnasında, kesme bölgesi içerisindeki kum zemin danelerinin kesme bant içerisinde yumuşama eğiliminde olduğu iki kesme bant arasında ise elastik yük boşaltması yaptığı gözlemlenmiştir. Triantafyllidis vd. [8] yapmış oldukları çalışma “bookshelf” deformasyon mekanizması üzerine kurulmuş olup, kesme uygulamasına tabi tutulan bölgede oluşan açıl kesme bantları arasındaki mesafe incelenmiştir. Analitik ve deneysel metotlarla incelenen bu davranış sonucunda, kesme bantları arasındaki yatay uzaklığın numune yüksekliği ve sıklık parametrelerine bağlı olduğu açıklanmıştır [8]. Khan ve Latha [9] yaptıkları çalışmada ise farklı morfolojik özelliklere sahip kum numunesi ile geotekstil arasındaki arayüz etkileşimlerini incelemiş, daha düzensiz şekilli ve köşeli dane yapısındaki zemin numunesinin kesme sonucunda daha yüksek içsel sürtünme açısı verdiğini dijital görüntü korelasyon yöntemi ile açıklamışlardır. Pan vd [10] beton-zemin arayüz etkileşimi ve kesme bant oluşumunu incelemek amacıyla parçacık görüntülemeli akış ölçüm yöntemini kullanmışlardır. Zemin siltli kil seçilmiş olup deney sonucunda kesme bant oluşumunun, kesme yenilmesinin hemen öncesinde gerçekleştiği görülmüştür. An vd [11] tek eksenli basınç altında kül modifiyeli zeminde oluşan kesme bantları ve çatlakları x-ray bilgisayarlı tomografi yöntemi ile gözlemledikleri çalışmalarında, kesme bant oluşumunun zeminin kırılma noktasında belirmesiyle birlikte düzensiz ve eğimli bir şekle sahip olduğunu belirtmişlerdir. Bu çalışmada ise farklı şekil boyutları içeren karma ince çakıl zemin numunesinin farklı sıklıklarda kullanılarak zemin-geotekstil ve zemin-zemin arayüz etkileşimleri incelenmiş, bu iki etkileşim durumlarına göre kesme bant kalınlıkları, kesme dayanımları ve dilatasyonlar belirlenmiştir. Aynı zamanda geotekstilin iyileştirme malzemesi olarak kullanımı durumunda kesme bölgesi altında, kesmenin gerçekleşme ve görelî dane ötelenmesinin

anlaşılması açısından literatüre katkı sağlayacağı düşünülmüştür.

2.MATERYAL VE METHOD (MATERIALS AND METHODS)

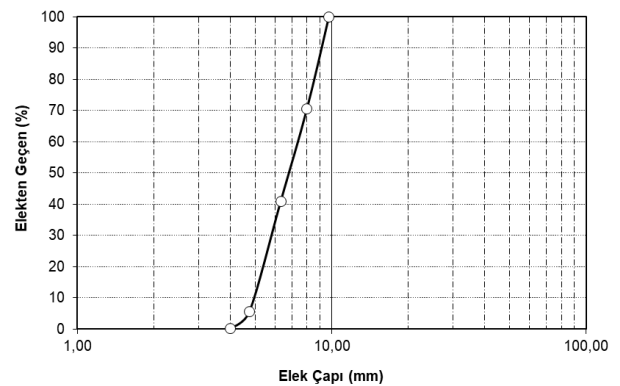
2.1. Malzeme (Material)

Bu çalışmada 4–9 mm arası elenmiş ince dere çakılı kullanılmış olup, numune Adana'nın Ceyhan ilçesinden temin edilmiştir (Şekil 1). Numuneler hazırlanırken Sıklık Oranları %30, %50 ve %80 olarak belirlenmiştir.



Şekil 1. Deney zemin numunesi (Test soil sample)

Bu çalışmada arayüz sürtünme davranışının zemin-materyal etkisini gözlemek amacıyla yüksek yoğunluklu polipropilen beyaz geotekstil kullanılmıştır. Yüksek çekme gerilmesi kabiliyeti nedeniyle genellikle geotekstil malzemeler geoteknik mühendisliğinde sıklıkla kullanılmaktadır. Kullanılan geotekstilin özellikleri aşağıda tabloda verilmiştir (Tablo 1).



Şekil 2. Deneyde kullanılacak zemin numunesinin elek analizi (Sieve analysis of the soil sample to be used in the experiment)

Tablo 1. Geotekstil Parametreleri (Geotextile Parameters)

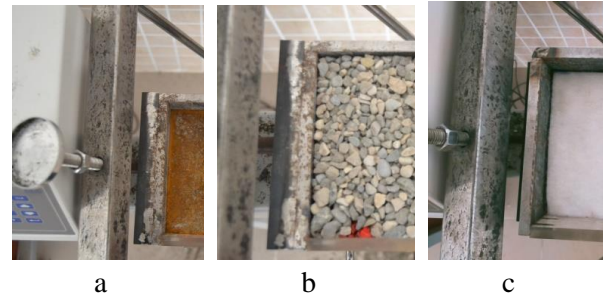
Özellik	Birim	Değer
Malzeme Bileşeni	-	Polypropylene (PP), beyaz
Malzeme Yoğunluğu	g/cm ²	1000
Çekme Dayanımı, md/cmd	kN/m	47/49
Elongation at Break	%	50
Statik Delme Dayanımı	N	8000
Dinamik Delme Dayanımı	mm	0.25
Sıvı Geçirgenliği	m/s	0.01
Görünür Açılma	mm	0.12
UV Direnci	%	70

Deney numunesi üzerinde yapılacak olan kesme ve görüntü işleme için ilk olarak standart kesme kutusu deneyi cihazı modifiye edilmiştir. Kutu boyutları 15x15x9 cm haline, kutunun bir yüzeyi ise kesme bant kalınlığını bütün kesme aşaması süresince gözlemlemek amacıyla da şeffaf hale getirilmiştir. Şeffaf hale getirilecek yüzey, rijit saydam pleksiglas malzeme kullanılarak oluşturulmuş ve kutunun iki kenarına montelenmiştir [12]. Modifiye edilmiş kesme kutusu cihazı maksimum 12 mm ye kadar kesme yapabilmektedir. Bu çalışma için belirlenen maksimum kesme miktarı 11 mm olmuştur. İki LVDT ve bir load-cell aparatlarıyla cihaz otomatik olarak, yatay deplasman, düşey deplasman, kesme gerilmesi okuması yapabilmektedir (Şekil 2). Düşey normal gerilme sabit 54 kPa olarak tüm numunelere uygulanmıştır. Görüntü işleme için Fiji İmagej programı kullanılmıştır.

**Şekil 3.** Modifiye direkt kesme sistemi (Modified direct shear system)

2.2. Yöntem (Method)

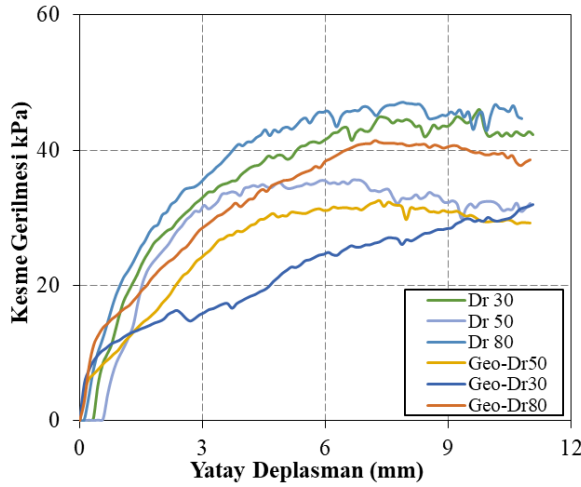
Deney kutusu iç yüzeyi yükseklikle orantılı olarak her 1.5 cm de bir olmak kaydıyla toplamda 6 belirteçli parçaya ayrılmıştır. Zemin numunesi belirlenen sıklıklara göre ağırlık hesapları yapılarak yükleme esnasında eksantrite problemleri oluşmaması adına her 1.5 cm e düzgün serilecek şekilde yerleştirilip sıkıştırılmıştır. Sıkıştırma işlemi 14.8 x 14.8 cm'lik metal plaka üzerine numunenin düzgün yerleştirilmesi amacıyla, plaka ortasına uygulanan vuruşlarla ve her bir 1.5 cm de 25 vuruş olacak şekilde iğneleme ile sağlanmıştır. Vuruş sayısı numune yerleşme yüksekliği ile orantılı olarak artırılmıştır. Görüntü işleme kullanılarak kesme bant gözlemi yapılacak bölge için hazırlanan zemin daneleri kırmızı renge boyanmıştır [13]. Kırmızı boyanan zemin kısmı şerit halinde yerleştirilip sıkıştırılma yapılmıştır. Bu boyalı şerit zemin ağırlığı ise rölatif sıklığa bağlı kalınarak toplam numune ağırlığı içerisinde hesap edilmiştir. Geotekstil, iki kutu halkası arasında zemin danelerini kaplayacak şekilde kesilip, kesme esnasında büzülme, yuvarlanma gibi etkenlerden kaçınmak amacıyla kutu tabanına yatayda 7 cm'lik kısmı yerleştirilip numune doldurulduktan sonra iki halka arasında hizalanacak şekilde kapatılmıştır (Şekil 3).

**Şekil 4.** Sırasıyla geotekstil yerleştirme aşamaları; (a) Geotekstilin tabana yerleştirilmesi (b) Zeminin yerleştirilmesi (c) Geotekstilin doldurulan zemin üzerine kapatılması (Geotextile placement stages respectively; (a) Placing the geotextile on the base (b) Placing the soil (c) Covering the geotextile on the filled soil)

Görüntü işleme aşamasında ise numunenin yerleştirilmesinin hemen ardından tüm kesme süreci video kaydına alınıp numunenin kesme öncesi (kesme 0 mm) ve deney sonu durumları (kesme 11 mm) Fiji İmagej programı kullanılarak tek bir görüntü haline getirilmiştir. Kesme etkisiyle boyalı kolonun yatayda ötelenme miktarına göre ise kesme bant oluşum alanı belirlenip kesme bant kalınlıkları hesaplanmıştır (Şekil 9-14).

3.BULGULAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

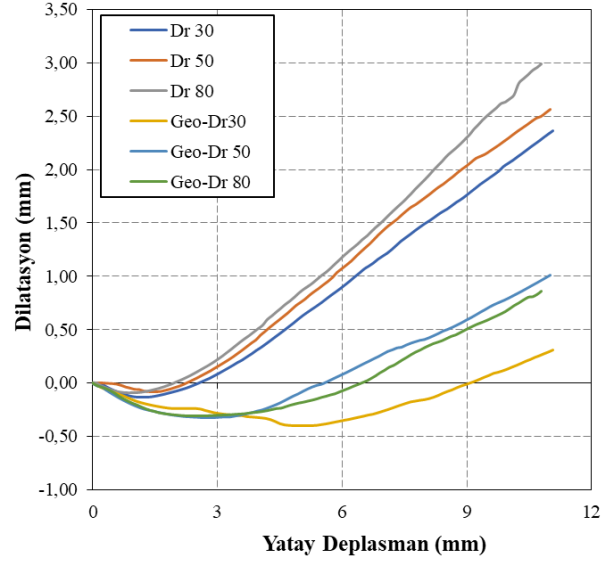
ASTM D3080 [14] standardına bağlı kalınarak 54 kPa normal düşey gerilme altında yapılan kesme testleri sonucunda %30, %50 ve %80 zemin sıklıklarında elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir. Şekil 4 de gösterildiği gibi Geotekstil malzeme kullanılmadan yapılan kesme deneyi süresince %30 sıklıkta yerleştirilen zemin pik kesme dayanımına 10 mm de ulaşmış ardından yenilme gerçekleşmiştir. %50 sıklıkta ise pik kesme dayanımı %30 ve %80 sıklıkta gerçekleştirilen deneylere görece daha düşük elde edilmesiyle birlikte pik dayanıma 6 mm yatay deformasyonda ulaşılmıştır. %80 sıklık durumunda numune maksimum kesme dayanımına 8 mm yatay deplasmanda ulaşmış olup yenilmesini tamamlamıştır [5]. Her bir yenilme anına karşılık gelen yatay deformasyon durumlarında kesme bantları numune üzerinde belirgin hale gelmiştir [15]. Geotekstil arayüzeye dahil edilerek yapılan testlerde ise maksimum kesme dayanımları, numunelerin zemin-zemin arayüzey kesme sonuçlarına oranla yaklaşık olarak 10 kPa'lık bir düşüş göstermiştir [16].



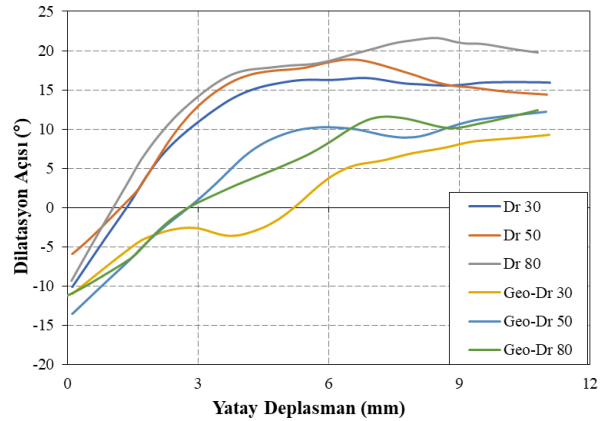
Şekil 5. Arayüzey kesme sonuçları (Interface shear results)

Dilatasyon, normal gerilme altında zeminde meydana gelen hacim değişimi olarak tanımlanır [17]. Bu hacim değişimine ise plastik deformasyonun neden olduğu söylenebilir [18]. Zemin-zemin arayüzey kesme testlerinde zemin danelerinin kendi aralarındaki yüzey sürtünmeleri pürüzlü iki yüzey alanı arasında daha çok gerçekleştiği için taneler ilk etapta boşlukları doldurma eğiliminde olup, kesmenin ilerleyen safhalarında ise normal gerilme etkisiyle birbirlerinden ayrılma eğilimi göstermişlerdir. Geotekstil-zemin arayüzey etkileşiminde ise kesme alanında zemin taneleri arasındaki kenetlenme

geotekstil etkisiyle azalmış, kesme yüzeyinde tanelerin geotekstil üzerinde hareketi veya dönmesi ile dilatasyon değerlerinde ve dilatasyon açılarında düşüş gözlemlenmiştir (Şekil 5-6).



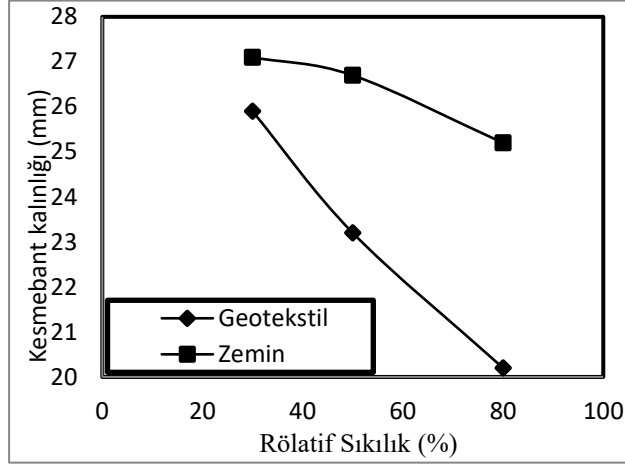
Şekil 6. Farklı sıklıklardaki dilatasyon deplasman ilişkisi (Dilation-displacement relationship at different relative densities)



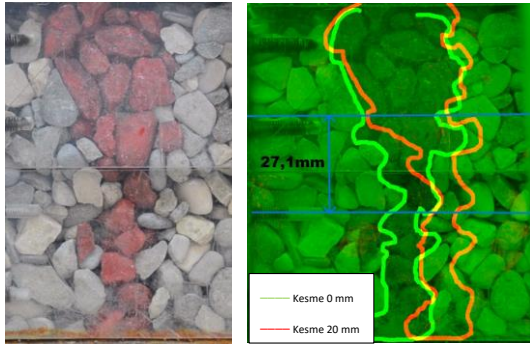
Şekil 7. Farklı sıklıklardaki dilatasyon açısı deplasman ilişkisi (Dilation angle-displacement relationship at different relative densities)

Kesme bant kalınlıkları ve kesme kaynaklı zemin tanelerine bağlı, görelî ötelenmeler Şekil 7-12'deki gibi gösterilmiştir. Görüntü işleme sonrası kesmenin 0 mm olduğu an zemin kolunu yeşil hat, kesmenin yatayda 20 mm olduğu andaki boyalı zemin kolunu kırmızı hat ile çizilmiştir. Kesme bant kalınlıkları belirlenirken zemin tanelerinin kesme ekseninde görelî ötelenme başlangıç ve bitiş pozisyonları kabul edilmiştir [13]. Zemin-zemin arayüz etkileşimi ve zemin-geotekstil arayüz etkileşiminde de sıklık arttıkça Kesme bant kalınlıkları azalma eğilimi göstermiştir. Geotekstilin arayüz malzemesi olarak kullanılması ile geotekstil bir alt sınır işlevi görmüş, bu hattın altında kesme kaynaklı görelî hareket

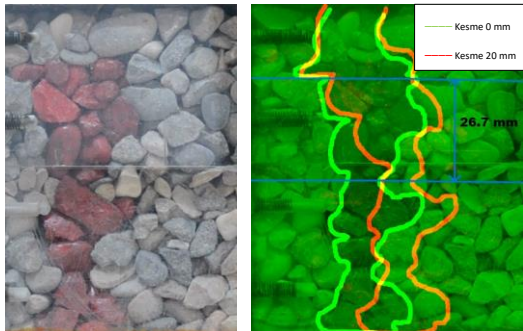
gerçekleşmediği saptanmıştır. Bu duruma bağlı olarak aynı sıklıkta geotekstil kullanımında kesme bant kalınlığı geotekstilsiz duruma göre 1.2-5 mm arasında kısalma göstermiştir.



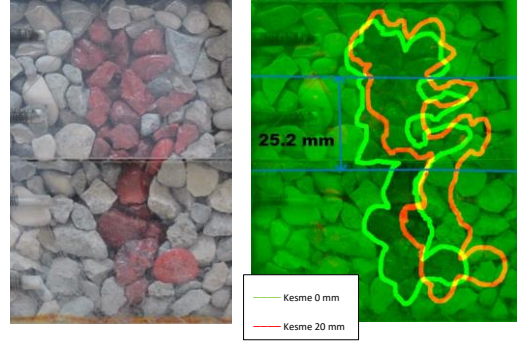
Şekil 8. Rölafif sıklığa bağlı kesme bant kalınlıkları (Shear band thicknesses depending on relative densities)



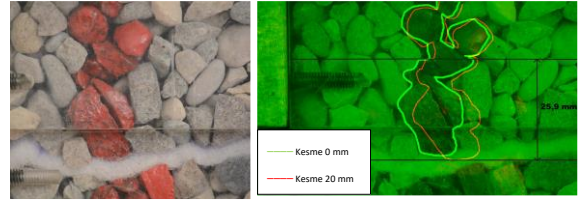
Şekil 9. Rölafif sıklık %30 için zemin-zemin kesme bant kalınlığı (soil-soil shear band thickness for relative density 30%)



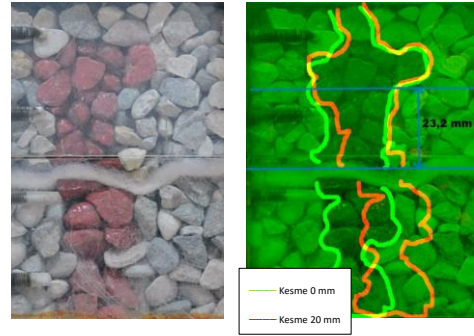
Şekil 10. Rölafif sıklık %50 için zemin-zemin kesme bant kalınlığı (soil-soil shear band thickness for relative density 50%)



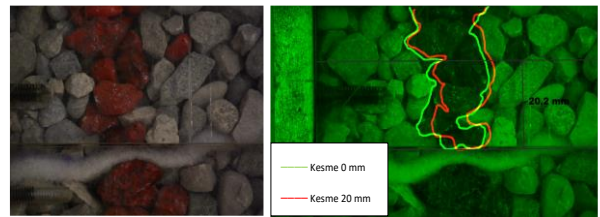
Şekil 11. Rölafif sıklık %80 için zemin-zemin kesme bant kalınlığı (soil-soil shear band thickness for relative density 80%)



Şekil 12. Rölafif sıklık %30 için geotekstil-zemin kesme bant kalınlığı (geotextile-soil shear band thickness for relative density 30%)



Şekil 13. Rölafif sıklık %50 için geotekstil-zemin kesme bant kalınlığı (geotextile-soil shear band thickness for relative density 50%)



Şekil 14. Rölafif sıklık %80 için geotekstil-zemin kesme bant kalınlığı (geotextile-soil shear band thickness for relative density 80%)

4.SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada zemin numunesinin 3 farklı sıklıkta direk kesme deneyi verilerine göre elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi sıralanmıştır;

- Zemin numunesinin maksimum kesme dayanımları %80 rölatif sıklıklarda elde edilmiş olup, sıklığın azalmasıyla birlikte maksimum kesme dayanımlarında düşüş gözlemlenmiştir. Zemin-zemin kesme durumu için maksimum kesme dayanımı %80 sıklığa ait olup 47.10 kPa olarak elde edilmiştir. Sıklığın %30 a düşürülmesiyle kesme dayanımı %2.33 azalırken, bu değer sıklığın %50 ye düşürülmesiyle %24.42 oranında azalmıştır.

- Geotekstil-zemin arayüz etkileşiminde ise %80 sıklıkta maksimum kesme dayanımları elde edilmiş olmasına rağmen, geotekstilin arayüz malzemesi olarak kullanılması daneler arası sürtünmeyi kısmen azaltmıştır. Kesme dayanımlarında maksimum değer %80 sıklıkta görülmüş olup 41.42 kPa olarak elde edilmiştir. %50 sıklıkta maksimum kesme dayanımı %21.26 oranında azalmıştır. %30 sıklıkta ise maksimum kesme dayanımında %22.96 düşüş görülmüştür.

- Geotekstil kullanımı zemin daneleri arasındaki sürtünme ve kenetlenmeleri kesme bölgesinde azaltmasıyla birlikte dilatasyon oluşumunu da azaltmıştır. Buna bağlı olarak en yüksek dilatasyon 3 mm ile %80 rölatif sıklıkta elde edilmiştir.

- Kesme bant oluşumları bütün testlerde net bir şekilde gözlemlenmiştir. Kesme etkisiyle görelî hareket baz alınarak belirlenen kesme bant kalınlıkları hem sıklığın artması durumunda hem de geotekstil kullanılması durumunda azalmıştır. Aynı sıklıklarda geotekstil kullanımı ise kesme bölge alanlarını azaltmıştır ve geotekstil hattı altında kesme bant oluşumu gözlemlenmemiştir.

ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazarı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

The author of this article declares that the materials and methods they use in their work do not require ethical committee approval and/or legal-specific permission.

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

Yazarlar bu çalışmaya eşit şekilde katkı sunmuşlardır.

The authors contributed equally to this work.

ÇIKAR ÇATIŞMASI CONFLICT OF INTEREST (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

There is no conflict of interest in this study.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] T. W. Lambe and R. V. Whitman, "Soil Mechanics." John Wiley & Sons, p. 548, 1969.
- [2] X. Y. Jing, W. H. Zhou, H. X. Zhu, Z. Y. Yin, and Y. Li, "On the interface shearing behavior between granular soil and artificial rough surfaces," Springer Series in Geomechanics and Geoengineering, vol. 2, pp. 437–444, 2017, doi: 10.1007/978-3-319-52773-4_52.
- [3] D. Lesniewska and M. Pietrzak, "Experimental investigations of micro-structural phenomena inside strain localisation in granular materials," AIP Conf Proc, vol. 1542, no. June 2013, pp. 425–428, 2013, doi: 10.1063/1.4811958.
- [4] X. B. Lu, S. Y. Wang, and C. Peng, "On the evolution of simple shear in saturated soil," Int J Numer Anal Methods Geomech, vol. 28, no. 3, pp. 269–278, 2004, doi: 10.1002/nag.335.
- [5] M. I. Peerun, D. E. L. Ong, and C. S. Choo, "Interpretation of Geomaterial Behavior during Shearing Aided by PIV Technology," Journal of Materials in Civil Engineering, vol. 31, no. 9, 2019, doi: 10.1061/(asce)mt.1943-5533.0002834.
- [6] A. Roy, N. Roy, P. Saha, and N. Mandal, "Factors Determining Shear-Parallel Versus Low-Angle Shear Band Localization in Shear Deformations: Laboratory Experiments and Numerical Simulations," J Geophys Res Solid Earth, vol. 126, no. 10, pp. 1–23, 2021, doi: 10.1029/2021JB022578.
- [7] J. Shen, X. Wang, W. Liu, P. Zhang, C. Zhu, and X. Wang, "Experimental study on mesoscopic shear behavior of calcareous sand material with digital imaging approach," Advances in Civil Engineering, vol. 2020, 2020, doi: 10.1155/2020/8881264.
- [8] T. Triantafyllidis, L. Röchter, A. Niemunis, and L. F. Prada-Sarmiento, "Shear banding in geomaterials under extensional plane strain conditions: Physical and analytical model," Acta Geotech, vol. 6, no. 2, pp. 93–103, 2011, doi: 10.1007/s11440-011-0136-5.
- [9] R. Khan and G. M. Latha, "Multi-scale understanding of sand-geosynthetic interface shear response through Micro-CT and shear band analysis," Geotextiles and Geomembranes, vol. 51, no. 3, pp. 437–453,

- Sep. 2023, doi:
10.1016/j.geotxmem.2023.01.006.
- [10] J. Pan et al., “Thickness of the shear band of silty clay–concrete interface based on the particle image velocimetry technique,” *Constr Build Mater*, vol. 388, Jul. 2023, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2023.131712.
- [11] R. An, X. Zhang, Y. Wang, C. Chen, and X. Chen, “Dynamic Evolution of Cracks in Slag-Modified Soil under Uniaxial Loading Using Real-Time X-Ray Computed Tomography,” *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 35, no. 6, Jun. 2023, doi: 10.1061/jmcee7.mteng-14491.
- [12] R. A. Jewell, “Direct shear tests on sand,” *GEOTECHNIQUE*, vol. 39, no. 2, pp. 309–322, 1989.
- [13] P. Vangla and G. M. Latha, “Influence of Particle Size on the Friction and Interfacial Shear Strength of Sands of Similar Morphology,” *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, vol. 1, no. 1, 2015, doi: 10.1007/s40891-014-0008-9.
- [14] A. D3080, “ASTM D 3080 - 03 Direct Shear Test of Soilds Under Consolidated Drained Conditions,” *ASTM International*, vol. 04, p. 7, 2003, [Online]. Available: www.astm.org
- [15] L. K. Park, M. Suneel, and I. J. Chul, “Shear strength of jumunjin sand according to relative density,” *Marine Georesources and Geotechnology*, vol. 26, no. 2, pp. 101–110, 2008, doi: 10.1080/10641190802022445.
- [16] A. Lashkari and V. Jamali, “Global and local sand–geosynthetic interface behaviour,” *Geotechnique*, vol. 71, no. 4, pp. 346–367, 2021, doi: 10.1680/jgeot.19.P.109.
- [17] J. Lubliner, *PLASTICITY THEORY*. Pearson Education, Inc., 1990.
- [18] X. G. Zhao and M. Cai, “A mobilized dilation angle model for rocks,” *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, vol. 47, no. 3, pp. 368–384, 2010, doi: 10.1016/j.ijrmms.2009.12.007.

Drug Solubility Prediction: A Comparative Analysis of GNN, MLP, and Traditional Machine Learning Algorithms

Veysel GİDER^{1*}  Cafer BUDAK² 

^{1*}Batman University, Distance Education Application and Research Center, Batman, Turkey

^{1,2}Dicle University, Faculty of Engineering, Department of Electrical and Electronics Engineering, Diyarbakır, Turkey

Article Info

Research article
Received: 05/10/2023
Revision: 05/12/2023
Accepted: 05/12/2023

Keywords

Machine Learning
Drug Solubility
Graph Neural Networks
Regression Models

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 05/10/2023
Düzeltilme: 05/12/2023
Kabul: 05/12/2023

Anahtar Kelimeler

Makine Öğrenmesi
İlaç Çözünürlük
Grafik Sinir Ağları
Regresyon Modelleri

Graphical/Tabular Abstract (Grafik Özet)

This study evaluates drug solubility prediction models, highlighting Random Forest's superior efficacy compared to Graph Neural Networks. / Bu çalışma ilaç çözünürlük tahmin modellerini değerlendirerek, Rastgele Orman'ın Grafik Sinir Ağlarına göre üstün etkililiğini vurgulamaktadır.

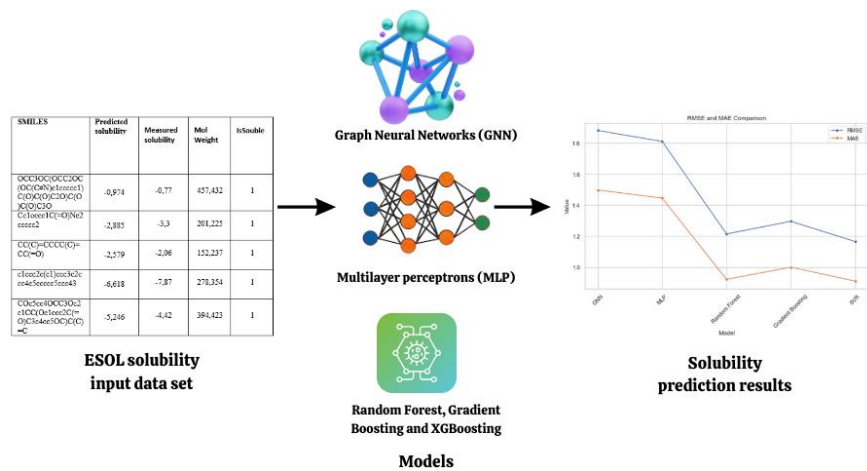


Figure A: Illustrates the schematic representation of the proposed methodology through a flow diagram. / **Şekil A:** Önerilen metodolojinin şematik gösterimini bir akış diyagramı aracılığıyla göstermektedir.

Highlights (Önemli noktalar)

- The Random Forest model stands out in drug solubility prediction with minimal error rates and superior efficacy. / Rastgele Orman modeli, ilaç çözünürlüğü tahmininde minimal hata oranları ve üstün etkinlikle öne çıkıyor.
- The GNN model exhibits lower performance with higher error rates and lower explanatory power compared to other models. / GNN modeli, diğer modellere göre yüksek hata oranları ve düşük açıklama gücü ile daha düşük bir performans sergiliyor.
- Study emphasizes differences among modeling approaches, highlighting Random Forest's effectiveness. / Çalışma, modelleme yaklaşımları arasındaki farkları vurgular, Random Forest'in etkinliğini öne çıkarır.

Aim (Amaç): To analyze Random Forest, GNN and traditional ML models for drug resolution in detail and to identify the most effective model for pharmaceutical design. / İlaç çözünürlüğü için Random Forest, GNN ve geleneksel ML modellerini ayrıntılı bir şekilde analiz etmek ve farmasötik tasarım için en etkili modeli belirlemektir.

Originality (Özgünlük): The study contributes by deeply assessing models' performances and comparing their accuracy and explanatory powers. / Çalışma, modellerin performanslarını derinlemesine değerlendirerek doğruluk ve açıklama güçlerini karşılaştırmasıyla literatüre katkı sağlamaktadır.

Results (Bulgular): Results reveal Random Forest's superior efficacy (RMSE: 1.2145, MAE: 0.9221) compared to GNN (RMSE: 1.8389, MAE: 1.4684, R2: 0.2147). / Sonuçlar, Random Forest'in üstün etkinliğini (RMSE: 1.2145, MAE: 0.9221) ve GNN'nin nispeten daha düşük etkinliğini (RMSE: 1.8389, MAE: 1.4684, R2: 0.2147) ortaya koyar.

Conclusion (Sonuç): The Random Forest model showed superior efficiency with minimal error rates, whereas the GNN model showed inferior performance. / Random Forest modeli, minimal hata oranları ile üstün bir etkinlik gösterirken, GNN modeli daha düşük performans sergilemiştir.



Drug Solubility Prediction: A Comparative Analysis of GNN, MLP, and Traditional Machine Learning Algorithms

Veysel GİDER^{1*} Cafer BUDAK²

^{1*}Batman University, Distance Education Application and Research Center, Batman, Turkey

^{1,2}Dicle University, Faculty of Engineering, Department of Electrical and Electronics Engineering, Diyarbakır, Turkey

Article Info

Research article
Received: 05/10/2023
Revision: 05/12/2023
Accepted: 05/12/2023

Keywords

Machine Learning
Drug Solubility
Graph Neural Networks
Regression Models

Abstract

The effective development and design of pharmaceuticals hold fundamental importance in the fields of medicine and the pharmaceutical industry. In this process, the accurate prediction of drug molecule solubility is a critical factor influencing the bioavailability, pharmacokinetics, and toxicity of drugs. Traditionally, mathematical equations based on chemical and physical properties have been used for drug solubility prediction. However, in recent years, with the advancement of artificial intelligence and machine learning techniques, new approaches have been developed in this field. This study evaluated different modeling approaches consisting of Graph Neural Networks (GNN), Multilayer Perceptron (MLP), and traditional Machine Learning (ML) algorithms. The Random Forest (RF) model stands out as the optimal performer, manifesting superior efficacy through the attainment of minimal error rates. It attains a Root Mean Square Error (RMSE) value of 1.2145, a Mean Absolute Error (MAE) value of 0.9221, and an R-squared (R²) value of 0.6575. In contrast, GNN model displays comparatively suboptimal performance, as evidenced by an RMSE value of 1.8389, an MAE value of 1.4684, and an R² value of 0.2147. These values suggest that the predictions of this model contain higher errors compared to other models, and its explanatory power is lower. These findings highlight the performance differences among different modeling approaches in drug solubility prediction. The RF model is shown to be more effective than other methods, while the GNN model performs less effectively. This information provides valuable insights into which model should be preferred in pharmaceutical design and development processes.

İlaç Çözünürlüğü Tahmini: GNN, MLP ve Geleneksel Makine Öğrenimi Algoritmalarının Karşılaştırmalı Analizi

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 05/10/2023
Düzeltilme: 05/12/2023
Kabul: 05/12/2023

Anahtar Kelimeler

Makine Öğrenmesi
İlaç Çözünürlük
Grafik Sinir Ağları
Regresyon Modelleri

Öz

İlaçların etkin bir şekilde geliştirilmesi ve tasarlanması, tıp ve ilaç endüstrisi alanlarında temel öneme sahiptir. Bu süreçte, ilaç molekülünün çözünürlüğünün doğru bir şekilde tahmin edilmesi, ilaçların biyoyararlanımını, farmakokinetiğini ve toksisitesini etkileyen kritik bir faktördür. Geleneksel olarak, ilaç çözünürlüğü tahmini için kimyasal ve fiziksel özelliklere dayalı matematiksel denklemler kullanılmıştır. Ancak son yıllarda yapay zekâ ve makine öğrenimi tekniklerinin ilerlemesiyle bu alanda yeni yaklaşımlar geliştirilmiştir. Bu çalışmada, Grafik Sinir Ağları (GNN), Çok Katmanlı Algılayıcı (MLP) ve geleneksel Makine Öğrenmesi (ML) algoritmalarından oluşan farklı modelleme yaklaşımları değerlendirilmiştir. Rastgele Orman (RF) modeli, minimum hata oranlarına ulaşarak üstün etkinlik gösteren en iyi performans gösteren model olarak öne çıkmaktadır. Kök Ortalama Kare Hata (RMSE) değeri 1,2145, Ortalama Mutlak Hata (MAE) değeri 0,9221 ve R-kare (R²) değeri 0,6575'tir. Buna karşılık GNN modeli, 1,8389 RMSE değeri, 1,4684 MAE değeri ve 0,2147 R² değeri ile kanıtlandığı üzere nispeten düşük bir performans sergilemektedir. Bu değerler, bu modelin tahminlerinin diğer modellere kıyasla daha yüksek hata içerdiğini ve açıklayıcı gücünün daha düşük olduğunu göstermektedir. Bu bulgular, ilaç çözünürlüğü tahmininde farklı modelleme yaklaşımları arasındaki performans farklılıklarını vurgulamaktadır. RF modelinin diğer yöntemlere göre daha etkili olduğu, GNN modelinin ise daha az etkili performans gösterdiği görülmektedir. Bu bilgi, farmasötik tasarım ve geliştirme süreçlerinde hangi modelin tercih edilmesi gerektiği konusunda değerli bilgiler sağlamaktadır.

1. INTRODUCTION (GİRİŞ)

In today's world, drug discovery and development represent paramount domains in the pharmaceutical industry and medical research. In this intricate process, the accurate anticipation of drug molecule solubility assumes a pivotal significance. The solubility of a drug molecule is considered a fundamental parameter in drug design and formulation. Solubility determines how well a compound can dissolve in water or another solvent, which can impact the pharmacokinetics, bioavailability, and toxicity of the drug. Therefore, accurately predicting the solubility of a drug candidate during its development stage is essential for the early detection and resolution of potential issues [1, 2].

Over the years, the landscape of drug solubility prediction has transitioned from conventional methodologies to embrace advanced techniques rooted in artificial intelligence (AI) and machine learning (ML). These technological advancements have provided access to vast amounts of molecular data, enabling the development of new approaches in solubility prediction. While traditional methods attempt to predict drug solubility using mathematical equations based on the chemical and physical properties of the compound, AI and ML offer a more flexible and data-driven approach, capable of recognizing complex molecular interactions and patterns [2, 3].

In this context, Graph Neural Networks (GNNs) have attracted considerable attention. GNNs exhibit success in handling graph-structured datasets across diverse domains and under various learning paradigms, including supervised, semi-supervised, self-supervised, and unsupervised settings. The majority of graph-based methodologies fall within the domain of unsupervised learning, frequently relying on Auto-encoders, contrastive learning, or concepts related to random walks.

GNNs differ from traditional neural networks in that they are specifically designed to operate on graph structures rather than sequences. The use of graphs has experienced significant growth and recognition in recent years, primarily due to their remarkable ability to effectively represent complex real-world problems characterized by interconnections. These applications include structured data where information is used in unstructured formats such as test cases. Furthermore, graphs have proven valuable in modeling a variety of domains, including social networks, molecular structures, web link data, and more, enabling extensive

analysis and interpretation. GNNs have proven their efficacy in image analysis tasks such as image segmentation and object detection by employing graphs as representations for images. In conclusion, the use of GNNs allows for a specialized approach to processing graph-structured data, facilitating improved performance and results in a variety of domains where interconnectedness and structured relationships are paramount considerations.

GNNs find application across a diverse spectrum of tasks and domains, including but not limited to network embedding, graph classification, node classification, spatial-temporal graph forecasting, and graph generation. Their utility spans a wide array of activities and fields. Their adaptability positions GNNs as pivotal tools for tackling intricate problems characterized by relational structures and dependencies. GNNs utilize a graph-based approach to represent and analyze molecular structures. This approach represents molecular structures as graphs and can make solubility predictions by analyzing these graphs. GNNs can contribute to a better understanding of molecular interactions and accelerate drug design [4, 5].

However, traditional regression models and conventional ML algorithms are still considered effective tools in this field. Traditional machine learning methodologies, particularly exemplified by Multilayer Perceptron (MLP), have exhibited their efficacy in the domain of solubility predictions and are widely adopted within the pharmaceutical industry [6]. Additionally, prominent ML algorithms such as XGBoost, Gradient Boosting (GB), and Random Forest (RF) have demonstrated robust predictive capabilities, particularly on extensive molecular datasets [7].

This study aims to compare AI-based models with traditional ML methods in drug solubility prediction. Specifically, we will evaluate the performance of GNNs and MLP in predicting drug solubility. We will also examine the role of popular ML algorithms like RF, GB, and XGBoost in this context. This research could guide which model performs best in drug design and development processes and contribute to future drug discovery studies.

1.1. Literature Review (Literatür Taraması)

The prediction of drug solubility is widely recognized as a longstanding challenge in the pharmaceutical industry, leading to extensive research in this field. Traditional methods utilize various mathematical equations and rules to predict

drug solubility by considering factors such as chemical groups in molecular structure, bond lengths, and atomic charges. However, these methods often achieve limited success in predicting the solubility of individual drug molecules.

In recent epochs, substantial advancements have materialized within the purview of computational modeling, with a specialized emphasis on the intricate task of predicting the aqueous solubility of diverse substances. Due to the limitations of traditional methods, AI and machine learning techniques have become more appealing for drug solubility prediction. These techniques offer greater flexibility in analyzing large datasets and identifying complex patterns in molecular interactions. Specifically, AI methods such as deep learning and GNNs have been employed to better represent molecular structures and improve solubility predictions [8]. Various prediction techniques, including Multiple Linear Regression (MLR), Principal Component Analysis (PCA), Partial Least Squares (PLS), Artificial Neural Network (ANN), K-Nearest Neighbors (k-NN), Support Vector Machine (SVM), and RF, are utilized to forecast the properties of molecules. These predictions rely on descriptors that capture the characteristics of chemical structures [9-11].

GNNs represent molecular structures using a graph-based approach, modeling atoms as nodes and chemical bonds as edges. GNNs play an effective role in a range of applications, from predicting drug-protein binding values to analyzing drug similarities, predicting drug side effects without extracting drug scaffolds, and more. The use of GNNs has emerged as a significant tool to accelerate the drug discovery process, reduce costs, and discover new drug candidates by allowing for a more detailed analysis of molecular interactions [12]. In contrast, traditional regression models like MLP represent molecular features as vectors and make predictions using these feature vectors [13].

The potential of GNNs in drug solubility prediction has been explored in several recent studies. In one investigation, diverse deep learning models were developed for solubility prediction. Four discrete GNN models were postulated to encapsulate molecular representation, and among them, the AttentionFP model showcased noteworthy superiority in performance [14]. Simultaneously, an innovative Multi-Ordered Graphical Attention Network (MoGAT) was introduced as an advanced framework for the prediction of solubility. The primary objectives of this proposition were to enhance prediction performance and facilitate the

explication of the predicted results. Findings indicated that MoGAT outperformed contemporary methods in terms of performance and demonstrated the compatibility of predicted results with established chemical knowledge [15]. In a different investigation, a novel graph framework was proposed to anticipate the water solubility of pharmaceutical compounds. This conceptual framework introduced a distinct GNN model named ALIGNN, explicitly tailored for the QM9 dataset [16].

The collective findings from these studies suggest that GNNs have the potential to enhance solubility predictions by offering a more nuanced understanding of molecular interactions. Nevertheless, traditional regression models such as MLP continue to be acknowledged as effective tools in this domain and are widely utilized by various pharmaceutical companies. For example, one research project employed multiple machine learning algorithms (MLR, ANN, RF, ET, and SVM) to predict drug solubility in different solvents [17]. In a separate investigation, Kernel Ridge Regression (KRR), Least Angle Regression (LAR), and MLP were applied to forecast the solubility of Lenalidomide, a drug used in the treatment of specific bone marrow-related conditions in adults [18]. Another study focused on developing an AI-based model using a SVM to examine the solubility data of the drug Busulfan [19]. Additionally, three distinct machine learning approaches, namely k-NN, MLP, and KRR, were employed to predict the solubility of the drug Nystatin [20].

Additionally, popular machine learning algorithms such as RF, GB, and XGBoost have been employed for drug solubility prediction, yielding successful results. These algorithms are considered valuable tools for making predictions on large molecular datasets and are deemed necessary for drug solubility prediction [21].

2. MATERIALS AND METHODS (MATERIALS AND METHODS)

This research endeavors to undertake a comparative analysis of diverse ML and AI methodologies concerning the prediction of drug solubility. In pursuit of this objective, an assembly of drug data is initially amassed, and various modeling strategies are scrutinized through the lens of this dataset.

The drug dataset includes the chemical properties, structures, and solubility values of various drug molecules. This dataset is obtained from a database widely used in drug design and development

processes and encompasses a variety of drug molecules.

Various methodologies are employed in the prediction of drug molecule solubility, encompassing models such as GNNs, MLP, RF, GB, and XGBoost. These models employ different mathematical and graphical approaches to represent the molecular features and structures of drugs.

The methods of the study encompass the preparation and preprocessing of the drug dataset as the initial steps. Subsequently, the training of

various models and their utilization for solubility predictions are executed. The results are then employed to compare the performance of different models, ultimately determining which model is the most effective for drug solubility prediction. Figure 1 diagram shows the flowchart of the proposed method.

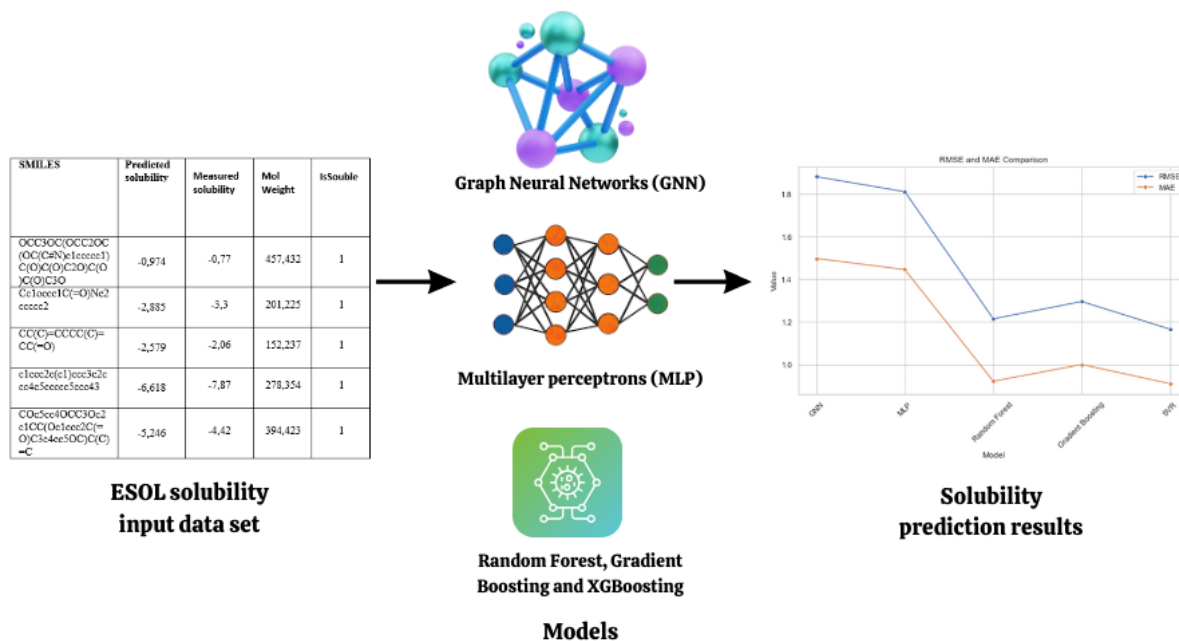


Figure 1. Illustrates the schematic representation of the proposed methodology through a flow diagram. (Önerilen metodolojinin şematik gösterimini bir akış diyagramı aracılığıyla göstermektedir)

2.1. Dataset (Veri Seti)

This study utilizes the "ESOL (Estimated Aqueous Solubility)" dataset, which is employed for predicting the solubility of drugs. The ESOL dataset serves as a data source created with the purpose of measuring and estimating the aqueous solubility of various chemical compounds. This dataset finds application in drug design, chemical analysis, pharmacokinetic investigations, and molecular modeling studies [22, 23].

The ESOL dataset comprises 1,125 chemical compounds, each with its solubility provided as a logarithmically transformed value. These values represent solubility predictions in micromolars. Additionally, it includes independent variables representing the chemical structure and molecular properties of each compound. These molecular properties constitute the fundamental data used for solubility predictions [22, 23].

This dataset is employed to contribute to the understanding of critical pharmaceutical parameters such as the bioavailability, pharmacokinetics, and toxicity of drugs. Furthermore, it is extensively investigated to comprehend how artificial intelligence-based regression models and deep learning techniques can be utilized to expedite drug design processes.

Regarded as a pivotal asset within the pharmaceutical industry, chemical research, and molecular modeling domains, this dataset holds substantial importance. The objective of this study is to predict solubility utilizing the ESOL dataset, with the anticipation that these predictions will provide invaluable insights for the design and development of pharmaceutical compounds.

The esol dataset consists of 10 columns and 1128 rows. Table 1 below shows the relevant attribute columns for 19 drugs for this data.

Table 1. ESOL dataset (ESOL veriseti)

Compound - ID	Minimum Degree	Molecular Weight	H-Bond Donors	Rings	Rotatable Bonds	Polar Surface Area	measured log solubility in mols per liter	SMILES
Amigdalın	1	457,432	7	3	7	202,32	-0,77	OCC3OC(OCC2OC(OC(C#N)c1ccccc1)C(O)C(O)C2O)C(O)C(O)C3O
Fenfuram	1	201,225	1	2	2	42,24	-3,3	Cc1occc1C(=O)Nc2ccccc2
citral	1	152,237	0	0	4	17,07	-2,06	CC(C)=CCCC(C)=CC(=O)
Picene	2	278,354	0	5	0	0	-7,87	c1ccc2c(c1)ccc3c2ccc4c5ccc cc5ccc43
Thiophene	2	84,143	0	1	0	0	-1,33	c1ccsc1
benzothiazole	2	135,191	0	2	0	12,89	-1,5	c2ccc1scnc1c2
2,2,4,6,6'-PCB	1	326,437	0	2	1	0	-7,32	Clc1cc(Cl)c(c(Cl)c1)c2c(Cl)cccc2Cl
Estradiol	1	272,388	2	4	0	40,46	-5,03	CC12CCC3C(CC4cc(O)ccc34)C2CCC1O
Dieldrin	1	380,913	0	5	0	12,53	-6,29	ClC4=C(Cl)C5(Cl)C3C1CC(C2OC12)C3C4(Cl)C5(Cl)Cl
Rotenone	1	394,423	0	5	3	63,22	-4,42	COc5cc4OCC3Oc2c1CC(Oc1ccc2C(=O)C3c4cc5OC)C(C)=C
2-pyrrolidone	1	85,106	1	1	0	29,1	1,07	O=C1CCCN1
2-Chloronaphthalene	1	162,619	0	2	0	0	-4,14	Clc1ccc2ccccc2c1
1-Pentene	1	70,135	0	0	2	0	-2,68	CCCC=C
Primidone	1	218,256	2	2	2	58,2	-2,64	CCC1(C(=O)NCNC1=O)c2ccccc2
Tetradecane	1	198,394	0	0	11	0	-7,96	CCCCCCCCCCCC
2-Chloropropane	1	78,542	0	0	0	0	-1,41	CC(C)Cl
2-Methylbutanol	1	88,15	1	0	2	20,23	-0,47	CCC(C)CO
Benzonitrile	1	103,124	0	1	0	23,79	-1	N#Cc1ccccc1
Diazinon	1	304,352	0	1	7	53,47	-3,64	CCOP(=S)(OCC)Oc1cc(C)nc(n1)C(C)C

2.2. Graph Neural Networks (Grafik Sinir Ağları)

GNNs represent an artificial intelligence approach that graphically depicts the molecular structures of chemical compounds and utilizes deep learning techniques to analyze these graphical structures. The molecular graph representations of chemical compounds encompass the bonds between atoms and molecular properties. GNNs possess the ability to make solubility predictions by processing this graphical structure [24].

GNNs offer several crucial features that assist in a better understanding of the molecular properties and chemical structures of chemical compounds. In

particular, GNNs can make solubility predictions by considering the local structure of the molecular graph. This is highly valuable in evaluating the interactions and bonds between different atoms in chemical compounds. Additionally, they can take into account the topology and structural characteristics of chemical compounds.

Within the framework of this investigation, the pivotal function of GNNs is to augment and refine the regression model deployed for the anticipation of chemical compound solubility within the confines of the ESOL dataset. This model generates solubility predictions by utilizing the molecular graph representations of chemical compounds.

These predictions can contribute to the comprehension and improvement of critical parameters in drug design processes, such as the bioavailability and pharmacokinetics of drugs.

The integration of GNNs in this study serves the overarching purpose of catalyzing the evolution of pioneering solubility prediction methodologies

within the spheres of pharmaceuticals and chemistry. This strategic inclusion aims to expedite and enhance the intricate processes involved in drug design. Consequently, a GNN-based solubility prediction model can serve as a valuable tool in drug development processes and assist in the more effective and safe design of drugs. Figure 2 shows the working structure of a GNN.

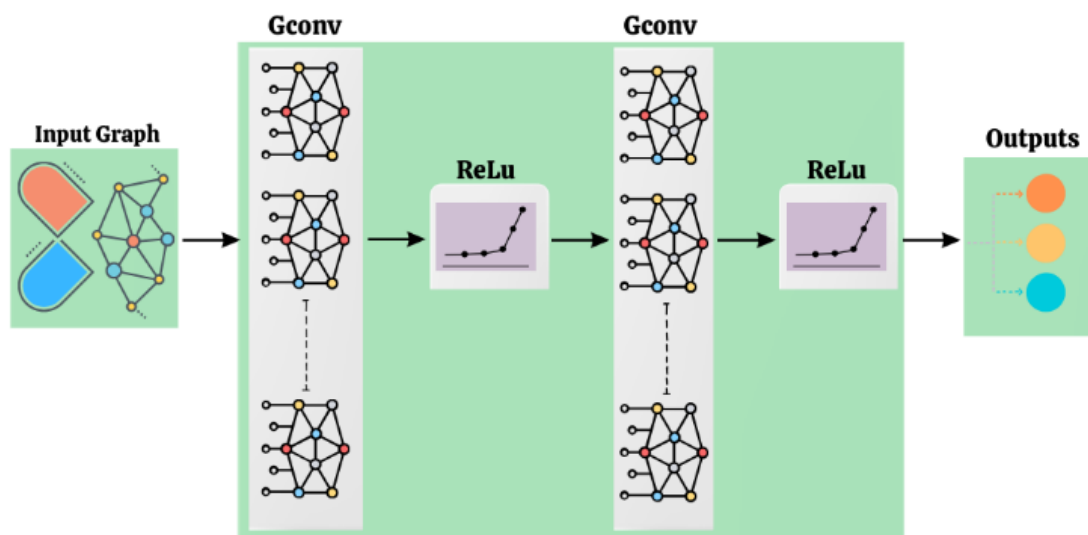


Figure 2. GNNs work structure (GNN'lerin çalışma yapısı)

2.3. Multilayer Perceptron (MLP) (Çok Katmanlı Algılayıcı)

Within the scope of this study, the MLP is employed as a deep learning model derived from artificial neural networks. MLP is a widely used regression and classification model in the fields of data mining and pattern recognition. It is known for its capability to learn complex functions and is particularly successful in prediction problems involving structured and unstructured data types.

The multi-layered architecture is a distinctive feature of MLP. MLP architecture comprises no fewer than three essential layers: an initial input-layer, followed by one or more hidden-layers, and culminating in output-layer. Neurons within these layers are fully interconnected, establishing connections with every neuron in both the preceding and succeeding layers. This structural characteristic

augments the model's capacity to adeptly represent and learn intricate functions [6].

Every neuron undertakes the processing of incoming data through the application of an activation function. Frequently employed activation functions encompass sigmoid, Rectified Linear Unit (ReLU), and tanh. The selection of activation functions plays a crucial role in determining the outputs of neurons, facilitating the model's capacity to acquire and comprehend non-linear relationships.

Training MLP is typically performed using a process called backpropagation. This process involves comparing the model's predictions to actual values and propagating errors arising from this comparison backward between layers. This allows for the updating of weights and the training of the model. Figure 3 illustrates the structure of an MLP.

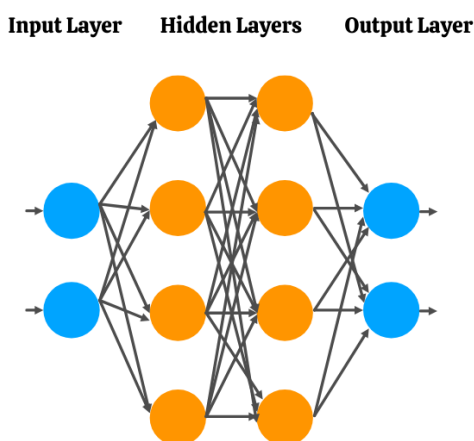


Figure 3. An MLP structure (Bir MLP yapısı)

2.1. Machine Learning (ML) (Makine Öğrenmesi)

This study encompasses a diverse array of ML algorithms utilized in the prediction of drug molecule solubility. These algorithms are employed in the fields of data mining and pattern recognition with the purpose of accomplishing the critical task of solubility prediction, which plays a significant role in drug development processes and drug design. Here is a brief description of some fundamental ML algorithms utilized in this study:

- a. **Random Forest (RF):** RF is an ensemble learning algorithm where multiple decision trees are constructed and combined. Each decision tree evaluates data samples independently and aggregates their results. This approach enhances the overall performance of the model while reducing the risk of overfitting [25].
- b. **Gradient Boosting (GB):** GB is a technique of ensemble learning where simple models, referred to as weak learners, are combined to create a powerful model. This method employs an iterative process where each new model attempts to correct the errors of the previous ones. GB can create a robust regression model capable of achieving high accuracy [26].
- c. **XGBoost (Extreme Gradient Boosting):** XGBoost is a variation of GB and is often known for its high-performance and scalability. XGBoost is frequently preferred, especially in structured datasets and regression tasks like solubility prediction in tabular data [27].

These ML algorithms are integral to this study's objective of predicting drug solubility, aiding in the advancement of drug design processes, and contributing to pharmaceutical research.

3. PERFORMANCE METRICS AND THE RESEARCH FINDINGS (Performans Metrikleri ve Araştırma Bulguları)

Performance metrics are criteria used to assess how close a model's predictions are to the actual values. The metrics utilized in this study include:

1. **Root Mean Square Error (RMSE):** RMSE is a measure of how much a model's predictions deviate from the actual values. When calculating RMSE, the difference between each prediction and the actual value is computed, the squares of these differences are averaged, and finally, the square root of this value is taken. RMSE shares the same units as the predicted variable, making it directly interpretable. The mathematical formula is shown in Equation 1.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i^{pre} - y_i^{exp})^2}{n}} \quad (1)$$

2. **Mean Absolute Error (MAE):** MAE serves as a metric indicating the extent to which a model's predictions deviate from the actual values by utilizing the absolute values of these differences. It involves computing the average of the absolute differences between each prediction and its corresponding actual value. MAE provides insight into the average magnitude of deviations between predictions and actual values. The mathematical expression for MAE is presented in Equation 2.

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |y_i^{pre} - y_i^{exp}|}{n} \quad (2)$$

3. **R-squared (R²):** R² measures how well a model explains the variance in the dataset. R², ranging between 0 and 1, signifies the goodness of fit of the model to the data, where higher values denote a superior fit. As R² approaches 1, the model explains the data well. However, R² can also be negative, indicating the model's failure to predict the data. The mathematical formula is shown in Equation 3.

$$R^2 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i^{pre} - y_i^{exp})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i^{exp} - \bar{y})^2}} \quad (3)$$

These metrics are commonly used in evaluating the performance of regression models. RMSE and MAE determine the accuracy of predictions, while R² indicates how well the model fits the dataset. Utilizing these metrics is essential for assessing a model's effectiveness and accuracy, providing fundamental tools for understanding and comparing results.

The analyses were performed in PYTHON environment on a computer with 32 GB RAM and GPU RTX3060 graphics processor. The parameters

of the models were chosen as epoch=50, optimizer=Adam, learning rate= 0.01. The dataset was partitioned into distinct training and test subsets, with the training set encompassing 80% of the data and the test set constituting the remaining 20%. The subsequent assessment and measurement of outcomes were exclusively conducted on the designated test set. The findings of the study show the impact of different modeling approaches on drug resolution prediction. The results show that GNN and MLP perform poorly compared to other traditional machine learning methods. In particular, performance measures such as RMSE, MAE and R² reveal that the predictions made by GNN and MLP contain more errors compared to other models.

ML algorithms such as RF, GB, and XGBoost achieved better results in this regression task. These outcomes suggest that traditional machine learning methods are more effective for drug solubility prediction compared to AI-based approaches like GNN and MLP.

However, it's essential to note that results can vary depending on numerous factors, including dataset quality, feature engineering, hyperparameter tuning, and other considerations. Therefore, further research and consideration of different model structures and data characteristics may be necessary for improving drug solubility prediction.

Table 2. The solubility prediction error amounts of the models (Modellerin çözünürlük tahmin hata miktarları)

Models	RMSE	MAE	R ²
Random Forest	1.2145	0.9221	0.6575
Gradient Boosting	1.2955	1.0002	0.6102
MLP	1.1473	0.8586	0.6943
GNN	1.8389	1.4684	0.2147

The results in Table 2 indicate that RF and MLP exhibited superior performance in drug solubility prediction compared to other models. Lower RMSE and MAE values along with higher R² scores signify the better performance of these models in predicting drug solubility. Specifically, MLP achieved the lowest RMSE and the highest R² score.

In contrast, the GNN model showed lower performance compared to other models. High RMSE and MAE values along with a low R² score suggest that the GNN model contained more errors in drug solubility prediction and was less successful compared to other models.

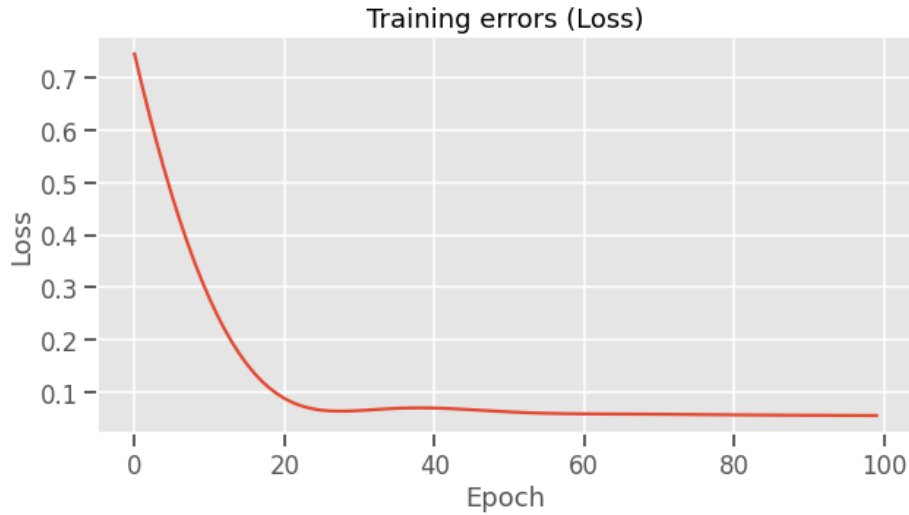


Figure 4. Loss values during training (Eğitim sırasındaki kayıp değerleri)

Figure 4 illustrates the loss values during training. After 100 iterations, the training loss value was completed at 0.082. A trained GNN model can be utilized to predict the solubility of new molecules.

Table 2 demonstrate that the RF model had the lowest error rates compared to other models. This indicates that the RF model predicted solubility more accurately and provided results closer to the actual values. On the other hand, the GNN model exhibited higher error rates compared to other models, suggesting that it made less accurate

predictions for this specific dataset and needs improvement.

This graph aids in a clear comparison of the performance of each model and helps us understand which model excelled in drug solubility prediction and which one has more room for improvement. This information guides the selection of the appropriate model in drug design and development processes.

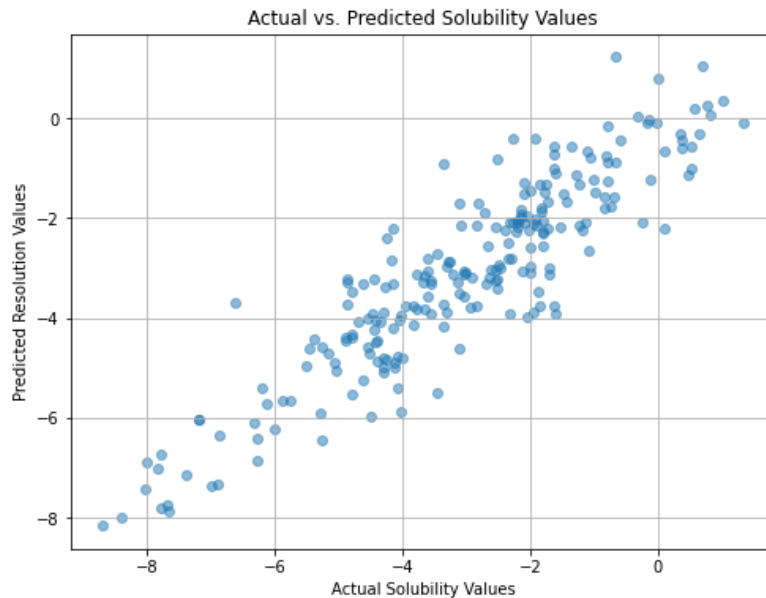


Figure 5. Graphical representation of actual and predicted solubility values (Gerçek ve tahmin edilen çözünürlük değerlerinin grafiksel gösterimi)

The real and predicted solubility graphs are essential tools for evaluating the performance of different models used in drug solubility prediction. Figure 5 visually represents how well each model predicts the actual solubility and the extent of

deviation between their predictions and the actual values.

4.DISCUSSION AND CONCLUSION (Tartışma ve Sonuç)

This study was conducted to evaluate the performance of different ML algorithms in predicting drug solubility. Solubility prediction holds critical importance in drug development processes and pharmaceutical design. Therefore, accurate and reliable solubility prediction models play a significant role in the success of the pharmaceutical industry.

At the outset of the study, the ESOL dataset was employed. This dataset encompasses experimentally measured solubility values of various drug molecules. In the preprocessing and preparation phase of the dataset, molecular graph features were extracted, and the data was partitioned into training and test sets.

In the first stage of the study, the GNN model was utilized. GNN is a AI-based approach used for drug solubility prediction. However, when the performance of the GNN model was compared to other ML models in this study, it was found to be inferior. Upon examination of performance metrics such as RMSE, MAE, and R^2 , it was observed that the GNN model's predictions contained more errors compared to other models. These results indicate that the GNN model was not effective for solubility prediction in this specific dataset.

In the second stage, the MLP model and traditional ML algorithms (RF, GB, XGBoost) were employed. These models are commonly used ML approaches for regression tasks. The results show that these traditional ML algorithms achieved higher success in solubility prediction. Particularly, algorithms like RF, GB, and XGBoost performed better with lower RMSE and MAE values and higher R^2 scores, indicating more accurate predictions.

These findings suggest that traditional ML algorithms may be more effective than AI-based approaches (such as GNN) in regression tasks like drug solubility prediction. However, these results can vary depending on factors like the dataset, feature engineering, hyperparameter tuning, and model selection. Therefore, further research and consideration of different model structures and data characteristics may be necessary for drug solubility prediction.

In conclusion, this study provides a comparative analysis of ML and artificial intelligence models used in drug solubility prediction. It emphasizes that traditional ML algorithms may perform better for a specific dataset and should be considered in model selection. Accurate solubility predictions can offer

a significant advantage in the design and discovery of new drugs in pharmaceutical development processes.

ACKNOWLEDGMENTS (TEŞEKKÜR)

If the study was supported by a research institution or fund, the name of the supporting institution/organization and the project number should be written. / Çalışma araştırma kurumu veya fonu tarafından desteklenmiş ise destek sağlayan kurum/kuruluş adı ve proje numarası yazılmalıdır.

DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS (ETİK STANDARTLARIN BEYANI)

The author of this article declares that the materials and methods they use in their work do not require ethical committee approval and/or legal-specific permission.

Bu makalenin yazarı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

AUTHORS' CONTRIBUTIONS (YAZARLARIN KATKILARI)

Veysel GİDER: He contributed to the implementation of the study, analysis of the results and writing of the manuscript.

Araştırmanın uygulanmasına, sonuçların analizine ve makalenin yazılmasına katkıda bulunmuştur.

Cafer BUDAK: He contributed to the design and implementation of the study

Araştırmanın tasarımına ve uygulanmasına katkıda bulunmuştur.

CONFLICT OF INTEREST (ÇIKAR ÇATIŞMASI)

There is no conflict of interest in this study.

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

REFERENCES (KAYNAKLAR)

- [1] Prieto-Martínez, F. D., López-López, E., Juárez-Mercado, K. E., & Medina-Franco, J. L. (2019). Computational drug design methods—current and future perspectives. *In silico drug design*, 19-44.
- [2] Barrett, Jaclyn A., et al. "Discovery solubility measurement and assessment of small molecules with drug development in mind." *Drug Discovery Today* 27.5 (2022): 1315-1325.

- [3] Vora, Lalitkumar K., et al. "Artificial Intelligence in Pharmaceutical Technology and Drug Delivery Design." *Pharmaceutics* 15.7 (2023): 1916.
- [4] Budak, Cafer, Vasfiye Mençik, and Veysel Gider. "Determining similarities of COVID-19–lung cancer drugs and affinity binding mode analysis by graph neural network-based GEFA method." *Journal of Biomolecular Structure and Dynamics* 41.2 (2023): 659-671.
- [5] Gider, Veysel, and Cafer Budak. "Instruction of molecular structure similarity and scaffolds of drugs under investigation in ebola virus treatment by atom-pair and graph network: A combination of favipiravir and molnupiravir." *Computational biology and chemistry* 101 (2022): 107778.
- [6] Gardner, Matt W., and S. R. Dorling. "Artificial neural networks (the multilayer perceptron)—a review of applications in the atmospheric sciences." *Atmospheric environment* 32.14-15 (1998): 2627-2636.
- [7] Hu, Pingfan, et al. "Development of solubility prediction models with ensemble learning." *Industrial & Engineering Chemistry Research* 60.30 (2021): 11627-11635.
- [8] Selvaraj, Chandrabose, Ishwar Chandra, and Sanjeev Kumar Singh. "Artificial intelligence and machine learning approaches for drug design: challenges and opportunities for the pharmaceutical industries." *Molecular diversity* (2021): 1-21.
- [9] Kherouf, Soumaya, et al. "Modeling of linear and nonlinear quantitative structure property relationships of the aqueous solubility of phenol derivatives." *Journal of the Serbian Chemical Society* 84.6 (2019): 575-590.
- [10] Eros, Daniel, et al. "Comparison of predictive ability of water solubility QSPR models generated by MLR, PLS and ANN methods." *Mini Reviews in Medicinal Chemistry* 4.2 (2004): 167-177.
- [11] Sinha, Priyanka, et al. "Integrating Machine Learning and Molecular Simulation for Material Design and Discovery." *Transactions of the Indian National Academy of Engineering* 8.3 (2023): 325-340.
- [12] Reiser, Patrick, et al. "Graph neural networks for materials science and chemistry." *Communications Materials* 3.1 (2022): 93.
- [13] Qin, Yongfei, et al. "MLP-based regression prediction model for compound bioactivity." *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology* 10 (2022): 946329.
- [14] Ahmad, Waqar, Hilal Tayara, and Kil To Chong. "Attention-Based Graph Neural Network for Molecular Solubility Prediction." *ACS omega* 8.3 (2023): 3236-3244.
- [15] Lee, Sangho, et al. "Multi-order graph attention network for water solubility prediction and interpretation." *Scientific Reports* 13.1 (2023): 957.
- [16] Hamdi, Mohammad Erfan, et al. "Prediction of Aqueous Solubility of Drug Molecules by Embedding Spatial Conformers Using Graph Neural Networks." *2022 29th National and 7th International Iranian Conference on Biomedical Engineering (ICBME)*. IEEE, 2022.
- [17] Ge, Kai, and Yuanhui Ji. "Novel computational approach by combining machine learning with molecular thermodynamics for predicting drug solubility in solvents." *Industrial & Engineering Chemistry Research* 60.25 (2021): 9259-9268.
- [18] Alzhrani, Rami M., Atiah H. Almalki, and Sameer Alshehri. "Novel numerical simulation of drug solubility in supercritical CO₂ using machine learning technique: Lenalidomide case study." *Arabian Journal of Chemistry* 15.11 (2022): 104180.
- [19] Sadeghi, Arash, et al. "Machine learning simulation of pharmaceutical solubility in supercritical carbon dioxide: Prediction and experimental validation for busulfan drug." *Arabian Journal of Chemistry* 15.1 (2022): 103502.
- [20] Meng, Di, and Zhenyu Liu. "Machine learning aided pharmaceutical engineering: Model development and validation for estimation of drug solubility in green solvent." *Journal of Molecular Liquids* 392 (2023): 123286.
- [21] Li, Mengshan, et al. "Prediction of the aqueous solubility of compounds based on light gradient boosting machines with molecular fingerprints and the cuckoo search algorithm." *ACS omega* 7.46 (2022): 42027-42035.
- [22] Sadybekov, Anastasiia V., and Vsevolod Katritch. "Computational approaches streamlining drug discovery." *Nature* 616.7958 (2023): 673-685.

- [23] KAGGLE, Online (2023). <https://www.kaggle.com/code/mmelahi/physical-chemistry-esol/input> Access: 02.09.2023.
- [24] Gong, Weiyi, and Qimin Yan. "Graph-based deep learning frameworks for molecules and solid-state materials." *Computational Materials Science* 195 (2021): 110332.
- [25] Liu, Yanli, Yourong Wang, and Jian Zhang. "New machine learning algorithm: Random forest." *Information Computing and Applications: Third International Conference, ICICA 2012, Chengde, China, September 14-16, 2012. Proceedings 3*. Springer Berlin Heidelberg, 2012.
- [26] Friedman, Jerome H. "Greedy function approximation: a gradient boosting machine." *Annals of statistics* (2001): 1189-1232.
- [27] Bentéjac, Candice, Anna Csörgő, and Gonzalo Martínez-Muñoz. "A comparative analysis of gradient boosting algorithms." *Artificial Intelligence Review* 54 (2021): 1937-1967.

Binalarda Enerji Verimliliğinde Son Gelişmeler: Türkiye Örneği

Cemre YILDIZ^{1*} 

¹İstanbul Teknik Üniversitesi, Enerji Enstitüsü, Maslak Kampüsü, İstanbul, Türkiye

Makale Bilgisi

Derleme makalesi
Başvuru: 07/05/2023
Düzeltilme: 04/07/2023
Kabul: 14/07/2023

Anahtar Kelimeler

Enerji Verimliliği
Türk Enerji Verimliliği
Politikaları
Enerji Depolama
Enerji Yoğunluğu
Binalarda Enerji
Verimliliği

Article Info

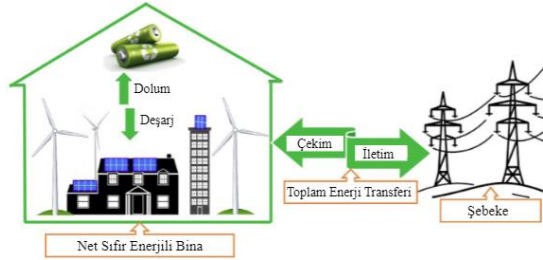
Review article
Received: 07/05/2023
Revision: 04/07/2023
Accepted: 14/07/2023

Keywords

Energy Efficiency
Turkish Energy Efficiency
Policies
Energy Storage
Energy Density
Energy Efficient Buildings

Grafik Özet (Graphical/Tabular Abstract)

Bu çalışmada, küresel enerji tüketimi ve karbon salınımının başlıca sorumlularından olan konut sektöründeki güncel enerji verimliliği çalışmalarıyla ilgili yerli ve yabancı kaynaklar taranarak olası çözüm önerileri aktarılmıştır. Sonuç olarak Türkiye’de, geniş ölçekli bir yenileme hareketi ile önemli miktarda enerji tasarrufu sağlanabileceği tespit edilmiştir. / In this study, local and foreign sources regarding current energy efficiency studies in the housing sector, which is one of the main responsible for global energy consumption and carbon emissions, were scanned and solution suggestions were presented. As a result, it is shared that significant amounts of energy savings can be achieved in Türkiye with a large-scale renewal movement.



Şekil A Hibrit PV-Rüzgâr-BS tabanlı NZEB'lerin blok diyagramı /Figure A: Block diagram of hybrid PV-Wind-BS based NZEBs.

Önemli noktalar (Highlights)

- Tüm yaşam döngüsü boyunca (inşa, işletme, yıkım) yoğun miktarda enerjinin tüketildiği konutlarda, yapılacak yatırımlar ile hızlı ve yüksek verim artışlarının yakalanabileceği görülmektedir. / It is seen that rapid and high efficiency increases can be achieved with investments in residences where a large amount of energy is consumed throughout the entire life cycle (construction, operation, demolition).
- Enerji verimliliği çalışmalarında gerçeğe en yakın projeksiyon ancak verinin doğru kaynaktan belirli bir süreklilik içerisinde toplanmasıyla oluşturulabilmektedir. / The most accurate projection for energy efficiency studies can only be estimated by gathering information from the appropriate sources on certain basis.
- Yürütülecek çalışmaların verimli bir şekilde ilerleyebilmesi için öncelikle durum tespitinin doğru yapılması, sonrasında da ulaşılabilir gerçekçi hedeflerin belirlenmesi gerekmektedir. / To ensure that the work is completed efficiently, it is essential to first assess the situation accurately and then set achievable targets.

Amaç (Aim): Türkiye'nin enerji görünümü, yürürlükte olan verimlilik politikaları derlenerek, binalardaki enerji verimliliğini artırmaya yönelik çalışmalar yürütecek akademi ve özel sektör çalışanlarına katkıda bulunulması amaçlanmıştır / By compiling Turkey's energy outlook and current efficiency policies, it is aimed to contribute to academic and private sector employees who will conduct studies to increase energy efficiency in buildings.

Özgünlük (Originality): Küresel enerji tüketimine bağlı olarak giderek artan çevresel sorunlarda önemli payı olan konut sektöründeki güncel enerji verimliliği çalışmaları, yerli ve yabancı kaynaklar taranarak belirli bir düzen içerisinde bir araya getirilmeye çalışılmıştır. / Current energy efficiency studies in the housing sector, which has a significant share in the increasing environmental problems due to global energy consumption, have been tried to be brought together in a certain order by scanning domestic and foreign sources.

Bulgular (Results): Türkiye'deki toplam tüketimin yaklaşık %48'nin binalarda tüketildiği ortaya çıkmaktadır. / It has been determined that buildings consume around 48% of overall consumption in Türkiye.

Sonuç (Conclusion): Yapı stoğunun %62,8'i ilgili (5627) yönetmeliklerden öncesine ait olan Türkiye'de, geniş ölçekli bir yenileme hareketi ile yıllık 7 milyar doların üzerinde bir tutarın boşa harcanmasının önüne geçilebileceği tespit edilmiştir. / It has been calculated that a large-scale restoration initiative in Türkiye, where 62,8% of the building stock belongs before the relevant legislation (5627), can avert an annual waste of more than \$7 billion dollars.



Binalarda Enerji Verimliliğinde Son Gelişmeler: Türkiye Örneği

Cemre YILDIZ^{1*}

¹İstanbul Teknik Üniversitesi, Enerji Enstitüsü, Maslak Kampüsü, İstanbul, Türkiye

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 07/05/2023
Düzeltilme: 04/07/2023
Kabul: 14/07/2023

Anahtar Kelimeler

Enerji Verimliliği
Türk Enerji Verimliliği
Politikaları
Enerji Depolama
Enerji Yoğunluğu
Binalarda Enerji
Verimliliği

Öz

2021 yılındaki ortalama küresel sıcaklık değerinin, sanayi devrimi öncesi döneme göre üst üste yedinci kez (2015–2021) 1°C'nin üzerinde seyretmesi, artış miktarının 1,5°C'de tutulması gerektiğini nedenleriyle ortaya koyan Paris Anlaşması'nın önemini artırmaktadır. Anlaşma ile belirlenen hedeflere ulaşmaya çalışan Avrupa Birliği'nde, binaların enerji tüketiminin %40'ından, sera gazı emisyonlarının ise %36'sından sorumlu olması, bu alandaki enerji verimliliği çalışmalarına hız kazandırmaktadır. Binaların yaşam döngüsü boyunca ortaya çıkardıkları karbon emisyonlarının %70'inin işletme aşamasında oluşması, enerji verimliliği politikalarına temel teşkil etmektedir. Bu derlemede, küresel enerji tüketimi ve karbon salınımının başlıca sorumlularından olan konut sektöründeki güncel enerji verimliliği çalışmalarıyla ilgili yerli ve yabancı kaynaklar taranarak, ulaşılan olası çözüm önerileri başlıklar altında aktarılmıştır. Araştırmalar sonucunda, bina cephelerinde yapılacak yalıtım çalışması ile ısıtma giderlerinde %12-47, eski tip ampulleri yeni nesil LED ampuller ile yenileyerek aydınlatma kaynaklı elektrik tüketiminde %50-75, fueloil kullanan verimsiz kazanların modern biyoyakıt kazanlarıyla değiştirilmesiyle de yakıt giderlerinde %20 ile %30 arasında tasarruf sağlanabileceği tespit edilmiştir. Isı pompalarının kullanılmasıyla ısıtma giderlerinde %36, enerji depolama çözümlerinden olan termal depolamanın güneş enerjisiyle birlikte kullanılmasıyla da CO₂ emisyonlarında %21,42 düşüş saptanmıştır. Rüzgâr ve güneş enerjisinin birlikte kullanıldığı hibrit sistemler elektrik giderlerinde %34 tasarruf sağlarken, yağmur suyu hasadıyla birlikte su faturalarının ortalama %45 azaltılabileceği hesaplanmaktadır. Çalışmanın devamında, Türkiye'nin enerji görünümü, yürürlükte olan verimlilik politikaları ile güncel konut istatistikleri derlenerek, binalardaki enerji verimliliğini artırmaya yönelik çalışmalar yürütecek akademi ve özel sektör çalışanlarına katkıda bulunulması amaçlanmıştır. Yapı stoğunun %62,8'i ilgili (5627) yönetmeliklerden öncesine ait olan Türkiye'de, geniş ölçekli bir yenileme hareketi ile yıllık 7 milyar doların üzerinde bir tutarın boşa harcanmasının önüne geçilebileceği tespit edilmiştir.

Recent Developments in Energy Efficiency of Buildings: The Case of Türkiye

Article Info

Research article
Received: 07/05/2023
Revision: 04/07/2023
Accepted: 14/07/2023

Keywords

Energy Efficiency
Turkish Energy Efficiency
Policies
Energy Storage
Energy Density
Energy Efficient Buildings

Abstract

The fact that the average global temperature in 2021 will be higher than 1 °C for the seventh time in a row (2015-2021) compared to the pre-industrial revolution period emphasizes the significance of the Paris Agreement, which clarifies why the increase should be limited to 1,5 °C. The knowledge that buildings are responsible for 40% of energy consumption and 36% of greenhouse gas emissions in the European Union, which is attempting to meet the agreement's targets, has accelerated energy efficiency research in this field. The fact that 70% of the carbon emissions created by buildings during their life cycle occur during the operation phase serves as the foundation for energy efficiency strategies. Local and international resources related to current energy efficiency studies in the housing sector, which is one of the major factors to world energy consumption and carbon emissions, are investigated in this review, and feasible alternatives are offered under each of the topics. According to the study outcomes, it is estimated that the insulation to be applied to the building facades will save between 12% and 47% in heating costs, while the saving rate of electricity consumption due to lighting will be between 50% and 75% as a result of the replacement of old-type bulbs with new-generation LED bulbs. It has been determined that replacing inefficient boilers that use fuel oil with contemporary biofuel boilers can save 20% to 30% on fuel expenses. Using heat pumps led to a 36% reduction in heating expenses and a 21,42% reduction in CO₂ emissions when solar energy was combined with thermal storage, one of the energy storage options. Hybrid systems, which combine solar and wind power, reduce electricity costs by 34%, while it has been calculated that rainwater harvesting can cut down on water expenditures by 45% on average. It has been calculated that a large-scale restoration initiative in Türkiye, where 62,8% of the building stock belongs before the relevant legislation (5627), can avert an annual waste of more than \$7 billion dollars.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Yapılan ölçümlere göre 2021 yılındaki ortalama küresel sıcaklığın, sanayi öncesi (1850–1900) döneme göre yaklaşık 1,11 °C daha yüksek olduğu hesaplanmaktadır. Bu durum 2021'i, ortalama sıcaklığın sanayi öncesi düzeye kıyasla 1 °C üzerinde olduğu üst üste yedinci yıl (2015–2021) yapmaktadır [1]. Etkisi giderek artan küresel ısınma ekosistem ve toplum üzerinde ciddi sorunlara neden olmaktadır [2, 3]. İklim değişikliği ve küresel ısınmanın yarattığı problemler hem Paris Anlaşması'nda hem de Glasgow İklim Anlaşması'nda [4] küresel olarak tanınmıştır; 153 ülke, Glasgow'daki COP26'da net sıfır emisyon hedefine ulaşmayı en önemli amaç olarak beyan etmiştir. Paris Anlaşması ise, ortalama küresel sıcaklık artışının sanayi öncesine göre 2 °C ile sınırlandırılmasını ve artışın 1,5 °C'de tutulabilmesi için daha fazla çaba gösterilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır [1].

Küresel iklim değişikliğinin en önemli nedenlerinden biri olarak sera gazı emisyonları gösterilmektedir [5]. Küresel karbon emisyonları 2000 yılında 25,2 milyar ton olarak hesaplanırken, bu değer 2020'de 34,8 milyar tona çıktığı görülmüştür [6]. Qian ve arkadaşları 2007'den 2035'e kadar küresel petrol tüketiminin %30, doğal gaz ve kömür tüketiminin ise %50 artacağını ve bunun sonucunda karbon emisyonunun yıllık artışının %2'den fazla olacağını belirtmektedir [7]. Ortaya çıkan çevresel etki ve risklerin başlıca nedenlerden birisi de küresel enerji tüketiminde yüksek paya sahip olan inşaat sektörüdür [8, 9].

Binalar inşa halinde, kullanımları sırasında ve ömürlerini tamamladıktan sonraki yıkım aşamaları dahil olmak üzere tüm yaşam döngüleri (life-cycle assessment) boyunca önemli miktarda enerji tüketirken aynı zamanda karbon salınımına da yol açmaktadır. Örnek olarak, İsviçre'de inşaat sektörü, toplam enerji tüketiminin yaklaşık %45'ini oluşturmaktadır. Binalarda tüketilen enerjinin çoğu fosil yakıtlardan geldiği için, İsviçre'nin CO₂ emisyonlarının yaklaşık üçte birinden bu sektör sorumludur [10]. Ayrıca konut sektörü, İsviçre'deki nihai enerjinin %27,2'sini tüketmektedir. Hanelerin nihai enerji tüketiminin yarısından fazlası petrol veya doğal gazdan kaynaklanmaktadır [11].

Avrupa Birliği (AB) yaptığı araştırma sonucunda, binaların Birliğin enerji tüketiminin %40'ından, sera gazı emisyonlarının ise %36'sından sorumlu olduğunu ortaya koymaktadır [12]. Küresel enerji kaynaklı karbon emisyonlarının yaklaşık %18'i binalarda kullanılan elektrik ve ısı üretiminden,

%9'u ise fosil yakıtların binalarda kullanılmasından kaynaklanmaktadır [13].

Enerji tüketiminin en yüksek olduğu aşamalar sırasıyla işletme ve inşaat süreçleridir. Binaların yaşam döngüsü boyunca toplam karbon emisyonları işletme sırasında kullanılan enerjiden, malzemelerin gömülü (embodied) enerjisi ve taşıma sırasında tüketilen enerjiden kaynaklanırken, bina işletme aşaması toplam karbon emisyonlarının en büyük kısmını (%70) oluşturmaktadır. Bunu taşıma (%24) ve gömülü karbon (%6) enerjisi takip etmektedir [14].

Skillington ve arkadaşları bir binanın gömülü enerjisini (EE), binanın üretim (ham madde eldesi, imalat, nakliye), inşa, yenileme veya bakım ve kullanım ömrü sonundaki yıkım aşamalarında ihtiyaç duyduğu enerjinin toplamı olarak tanımlanırken, bütün bu aşamalar boyunca ortaya çıkan emisyonlara da Gömülü Enerji Sera Gazı Emisyonları (EGHG) denmektedir [15]. Bir yapının EE enerjisinin gerçeğe en yakın şekilde tespit edilebilmesi için genellikle Yaşam Döngüsü Analizi (LCA) uygulanmaktadır [16]. LCA, bir binanın yaşam döngüleri sırasında ortaya çıkardığı çevresel etkileri belirlemek için gerekli olan girdileri (su, enerji ve ham maddeler gibi) kullanarak emisyonlar ve atık gibi çıktıları sayısallaştırarak ortaya konmasını sağlar.

Önceki araştırmalara göre EE miktarının binanın yaşam döngüsü boyunca tükettiği enerjinin en fazla %10'unu oluşturduğu düşünüldüğünde [17], son çalışmalara göre bu oranın düşük enerji tüketen yapılarda %26'yı, neredeyse sıfır enerjili binalarda (nZEB) ise %100'ü bulduğu tespit edilmiştir [18].

AB yapı stoğunun %85'i (220 milyondan fazla) 2000 yılından önce günümüze kıyasla enerji mevzuatının daha az kısıtlayıcı olduğu dönemde inşa edilmiş olup, bu yapıların %85 ila %95'nin 2050 yılına kadar kullanımda kalmaya devam edeceği öngörülmektedir [19]. AB hedeflerine ulaşmak için, 2015 seviyelerine kıyasla bina sektöründen kaynaklanan emisyonların %60, nihai enerji tüketiminin %14 ve iklimlendirme ile ilgili enerji tüketiminin ise %18 oranında azaltılması gerekmektedir [20]. AB'nin Uzun Vadeli Yenileme Stratejisi'ne (LTRS) göre [21], 2050 yılına kadar sıfır enerjili binalara geçişin tamamlanması gerekmektedir. Polonya özelinde yapılan bir çalışmada yenilenmesi gereken 14,2 milyon bina olduğu tespit edilirken, yine aynı çalışmaya göre 2020 sonrası yapılan binaların bile %30'nun termal iyileştirmeye ihtiyacı olduğu ortaya çıkmıştır [22].

Yapılan çalışmalara göre mevcut binaların yenilenmesi AB'nin toplam enerji tüketimi ve karbon emisyonlarını yaklaşık %5 oranında azaltırken, AB'deki ulusal bina stoklarının her yıl ortalama olarak %1'den azı yenilenebilmektedir [23]. 2050 hedeflerinin yakalanabilmesi için bu oranın 2030'a kadar ikiye katlanması gerektiği ifade edilmektedir [19]. İyileştirme yapılacak düşük enerji verimliliğine sahip hanelerin başarılı bir şekilde belirlenmesi, gereksiz yakıt kullanımının önüne geçilerek ülkelerin fosil yakıt tüketimlerinin azaltılmasına katkı sağlayacaktır [24].

Binaların enerji verimliliği potansiyelinin gerçekçi tahmini, küresel karbon emisyonunun azaltılması ile ilgili hedeflerin yakalanabilmesini kolaylaştıracağı gibi, aynı zamanda bireysel konut sahiplerinin yapacakları yatırımların geri dönüş süresini öngörebilir hale getirecektir [25]. Hane halkının enerji tercihlerini etkileyen iki ana faktör bulunmaktadır [26–30].

- Konut tipi, var olan ısıtma sistemi ve inşaat yılı gibi konut faktörleri
- Hane halkı geliri, yaş, cinsiyet ve eğitim düzeyi gibi sosyoekonomik faktörler
- İklim yapısı gibi etkenlere göre değişen bölgesel faktörler

Bu çalışmada, küresel enerji tüketimi ve karbon salınımının başlıca sorumlularından olan konut sektöründeki güncel enerji verimliliği çalışmaları yerli ve yabancı kaynaklar taranarak belirli bir düzen içerisinde bir araya getirilmeye çalışılmıştır. Çalışmanın ileriki bölümlerinde, Türkiye'nin enerji görünümü, yürürlükte olan verimlilik politikaları ile güncel konut istatistikleri derlenerek binalardaki enerji verimliliğini artırmaya yönelik çalışmalar yürütecek olan paydaşlara katkıda bulunulması amaçlanmıştır.

2. BİNALARDA ENERJİ VERİMLİLİĞİ (ENERGY EFFICIENCY IN BUILDINGS)

Binaların enerji performansının iyileştirilmesi, Avrupa Komisyonu (EC) tarafından dayatılan enerji verimliliği hedeflerine ulaşmak için esas teşkil etmektedir [31]. Binaların Enerji Performansı Direktifi (EPBD), ilk olarak 2002 yılında Avrupa Parlamentosu tarafından yürürlüğe konulmuştur. En son 2018'de revize edilen yönetmelik, Avrupa Yeşil Mutabakatı'nda (European Green Deal) belirtilen AB 2050 karbon nötr hedefleri doğrultusunda yeni yapılacak binaların verimliliğini performansa dayalı incelediği gibi, var olan yapıların da enerji

verimliliğini artıracak yöntemlerle yenilenebilmesini hedeflemektedir.

Direktif, Nesnelerin İnterneti (IoT) teknolojileri ile Yapay Zekâ (AI) mekanizmalarını Isıtma, Havalandırma ve İklimlendirme (HVAC) sistemlerine dahil etmeyi önermektedir [32].

Enerji Tasarrufu Önlemleri (ECMs), binaların enerji kullanımını azaltmak için uygulanan her türlü teknolojik uygulama olarak tanımlanırken, üç başlık altında örneklendirilebilir [33]:

- Pasif ECM'ler (ısı yalıtımlı camların kullanılması ve harici gölge elemanlarının eklenmesi)
- Aktif ECM'ler (HVAC sistemlerinin enerji verimliliğinin artırılması ile enerji tasarruflu ampullerin tercihi)
- Yenilenebilir enerji kaynağı ECM'ler (güneş kolektörleri, fotovoltaik paneller, jeotermal ısı pompaları ve rüzgâr türbinlerinin entegrasyonu)

Pasif önlemlere örnek olarak Weglarz ve Narowski'nin meskenlerdeki termal konfor ile maliyet dengesini araştırdıkları çalışmalarında, duvarlarda 25 cm, çatıda ise 35 cm kalınlığında taş yünü ve ekstrüde polistiren (XPS) kullanılmasını önermektedir [34]. Aktif önlem olarak, Kisilewicz ve arkadaşları araştırmalarında yapılarındaki dış duvarların önüne, içerisinde soğutucu sıvıların sirküle ettiği bir boru sistemi bulunan beton bir katman ekleyerek, dış duvarlardan kaynaklanan ısı kaybının ortalama olarak %63 azaltılabildiğini paylaşmaktadırlar [35]. Bu sistemin yeni yapıların yanı sıra, harici olarak eski yapılara da entegre edilebileceği aktarılmaktadır. Binalara yenilenebilir enerjinin entegrasyonu için de Cholewa ve arkadaşlarının dokuz apartman projesinin 20 yıllık verilerini inceledikleri çalışma gösterilebilir [36]. Çalışmalarının sonucunda, eski binalarda sıcak su eldesinde ısı pompaları kullanılarak %56,7 ile %70,5 arasında tasarruf sağlanabileceği bulunmuştur. Isı pompalarıyla PV sistemlerinin birlikte kullanılması durumunda ise maliyetlerin daha da düşürülebileceği aktarılmaktadır [37].

Binaların enerji talebini azaltabilmek adına işletme yönetimini iyileştirmeye yönelik temel eylem planları belirlenmiştir [38]. Örnek olarak, enerji denetimleri [39], enerji yönetim sistemleri [40], akıllı kontrol sistemleri ve yeşil bina sertifikaları [41] gösterilebilir. Yeşil sertifika sistemleri, yeni ve yenilenmiş binaların belirli çevre ve enerji

verimliliği standartlarını karşılandığının belgelenmesi yöntemidir.

Yeşil bina sertifikalarının en popüler örnekleri:

- İngiliz Bina Araştırmaları Kuruluşu Çevresel Değerlendirme Metodu (BREEAM)
- Amerikan Enerji ve Çevre Dostu Tasarımda Liderlik (LEED)
- Energy Star [42]

Bu planları bir bütünlük içerisinde sunan Neredeyse Sıfır Enerjili Binalar (nZEB) standardı EPBD kapsamında 31 Aralık 2018 tarihinden sonra AB ülkelerindeki tüm kamu binalarının, 2020 sonundan itibaren yapılacak yeni binaların gerekli şartları sağlamasını şart koşmaktadır [32]. Komisyon, yeni binaların enerji performansını daha da artırarak 2050 hedefleri kapsamında AB'nin karbon nötr hale gelebilmesi için Aralık 2021'de mevcut nZEB direktifini revize ederek Sıfır Emisyonlu Binalar (ZEB) planını ortaya koymuştur [43]. Plan kapsamında 1 Ocak 2030 tarihinden sonra yapılacak yeni binaların ZEB standardını karşılaması gerekmektedir.

Konutlarda enerji verimliliğini artırabilmek adına yapılan çalışmaların çıktuları incelendiğinde, karşılaşılan zorluk veya eksikliklerin genellikle yürürlükte olan yönetmeliklerin yetersizliğinden kaynaklanmadığı tespit edilmiştir [15]. Yönetmelik ve yönergelerin çoğu zaman en güncel uluslararası standartları karşıladığı, ancak çalışmaların uygulanması aşamasında; çalışmalara yeterli özenin gösterilmediği, çalışmaların sonrasında yeterince denetlenmediği, ortaya çıkan atıkların mevzuatlara göre bertaraf edilmediği ve en önemlisi uygulama sonrasında konutları kullanacak hane halkının yapılan çalışmalar hakkında yeterince bilgilendirilmediği ortaya çıkmıştır.

Blasch [44] ve Boogen [45] tarafından yapılan araştırmalar, mesken sahiplerini bilgilendirmek için yürütülen kampanyalar ile enerji sertifika programlarının, hane halkını enerjinin maliyeti hakkında bilinçlendirerek enerji tasarrufu yapmaya teşvik ettiğini ortaya çıkarmıştır.

Geçtiğimiz on yıllar boyunca yürütülen yoğun çalışmaların ardından hane halkı, toplam enerji tüketimi ve sera gazı salınımları içerisinde önemli bir yer tutan konutlardaki enerji tüketimlerini daha verimli çözümleri tercih ederek azaltabileceklerini ve dolaylı olarak da iklim değişikliğinin önüne geçebilecekleri konusunda bilinçlendi [46]. Buna karşılık, yatırımı daha önceden yaparak baştan

itibaren yüksek enerji verimliliğine sahip binalara geçmek konusunda kararsızlık yaşanmaya devam edilmektedir. İnsanlar, enerji verimliliği potansiyeli çoğunlukla teorik hesaplamalara dayalı olan yeşil bina etiketlerini yeterince ikna edici olarak görmemektedir. Bu yapıların sahip olduğu avantajların sadece kâğıt üzerinde kalmadığını kanıtlayacak çalışmaların artması, yüksek enerji verimliliğine sahip yapıların hem inşa hem de kullanımının yaygınlaşmasını hızlandıracaktır.

Buna karşılık hane sakinleri için yeşil sertifikalı bir evde yaşamının gerçekten vaat edilen miktarda enerji tasarrufu sunup sunmadığını bilmek önemlidir. Önceki yıllarda yapılan araştırmalar, enerji verimliliği sertifikasına sahip binaların genellikle tahmin edilenden daha yüksek tüketim değerlerine sahip olduğunu ortaya koymaktadır [47]. Binaların tükettiği enerjinin analiz edilerek gerçekçi tahminlerde bulunabilmek için uygulanan geleneksel araştırma metotları, mühendislik hesaplamalarını, simülasyon modellerine dayalı karşılaştırmalı değerlendirmeyi ve istatistiksel modellemelerin üretimini içermektedir [48].

Mevcut tahmin yöntemlerinin çoğu, elde edilmesi güç olan iki tür veri setine dayanmaktadır. İlk olarak, mevcut araştırmalarda, konutlarda yaşayan kişi sayısına ve tercih ettikleri ısıtma ayar sıcaklığı gibi kullanıcıya göre değişkenlik gösteren veri setleri kullanılmaktadır. Enerji tüketiminin büyük ölçüde kullanıcıların davranışlarından etkilenmesi sebebiyle, akıllı sayaçlar veya hane halkıyla yapılacak anketler değerlendirilmeden doğru veriye ulaşılması oldukça zordur. Ayrıca kiralık evlerde, kiracıların değişim sıklığı nedeniyle davranış kalıpları da değişim göstermektedir. Bu durum veri setinin güncel tutulabilmesi için sık sık anket yaptırma gerekliliğini ortaya koymaktadır. İkinci olarak, bu araştırmalar konutların neden olduğu CO₂ emisyonları ile yapının güneşlenme süresine bağlı olarak değişim gösteren duvarların güneş emilimi gibi enerji tüketimini doğrudan etkileyen göstergeleri dikkate almaktadır [49]. Bu tür verileri doğru biçimde elde edebilmenin yarattığı zorluklar ve kullanılan veri seti ile tahmin sonuç değerleri arasındaki son derece yüksek korelasyon, mevcut yöntemlerin kapsamlı enerji verimliliği tahmin çalışmaları için geniş çaplı kullanımına engel teşkil etmektedir.

2.1. Yenileme Sürecinde Karşılaşılan Zorluklar (The Challenges of a Renovation Process)

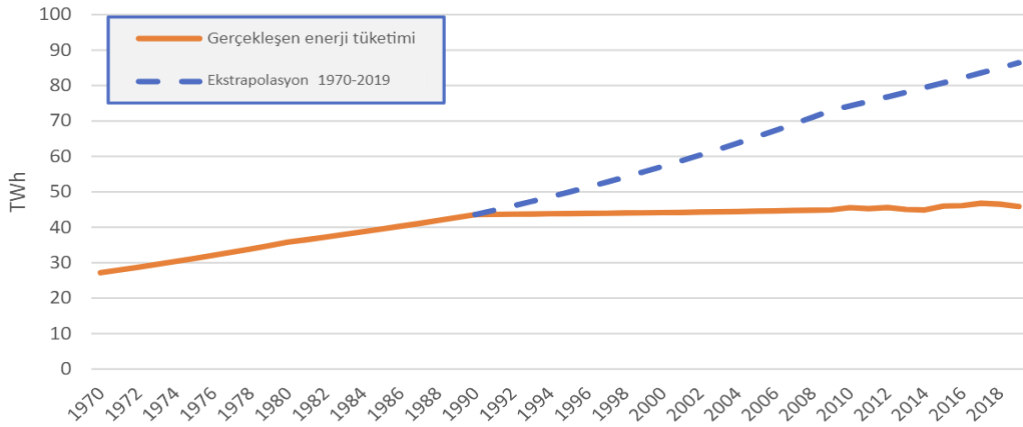
Binaların enerji verimliliğini artıracak şekilde yenilemesi teknik, ekonomik ve sosyal yönleri bir arada içerdiğinden oldukça karmaşık bir süreçtir [50, 51]. Dahası, tüm bu yenileme süreci boyunca aşılması gereken pek çok engel bulunmaktadır. Çok sayıda çalışmada, çeşitli ülkelerdeki binaların yenilenmesinde karşılaşılan engeller ve zorluklar analiz edilmiştir [52–57]. Bunlara örnek olarak Alam ve arkadaşlarının Avustralya'daki kamu binalarının yenilenmesi sırasında yaşanan zorlukları derledikleri çalışmaları gösterilebilir [52]. Karşılaşılan zorlukları Alam dört başlık altında değerlendirmektedir:

- Bilgi eksikliği (bilgi, farkındalık, beceri ve motivasyon eksikliği)
- İdari engeller (bürokratik engeller, yavaş karar alma mekanizması ve paydaşların çoğunluğunun onayının alınması)

- Sosyal engeller (çevresel etkenler ile operasyonun kesintiye uğraması)
- Mali engeller (teşvik ve kredi eksikliği, yatırım öncelikleri)

2.2. Hane Halkının Enerji Tüketimini Etkileyen Faktörler ve Norveç Örneği (The Factors Affecting the Household Energy Consumption and Example of Norway)

Norveç'te yapılan bir çalışmada ülkedeki hane halkı tarafından tüketilen enerjinin 1970-2019 yılları arasındaki değişimi incelenmiştir. Enerji tüketiminde, 1990'dan sonraki yıllık tüketim artışının önceki yıllara göre belirgin bir biçimde azaldığı gözlemlenmiştir (Şekil 1). 1970'ten 1990'a kadar olan trendin 2019'a kadar devam etmesi durumunda enerji tüketiminin 86,4 TWh olarak gerçekleşmesi öngörülmüşken, gerçekleşen sonuç 45,9 TWh olarak açıklanmaktadır. 1970 ile 1990 arasındaki yıllık artış %2,4 olurken, 1990–2019 dönemindeki yıllık artış %0,15 olarak hesaplanmaktadır [58].



Şekil 1. Norveç hane halkının 1970-2019 arasındaki öngörülen enerji tüketimi ile gerçekleşen tüketimin karşılaştırılması (Comparison of predicted and actual consumption of Norwegian households between 1970-2019) [58]

1990'a kadar olan dönemi analiz eden Hille ve arkadaşları, 1990 civarında enerji kullanımında yaşanan değişimi açıklayan en önemli faktörün kişi başına düşen mesken alanı (dwelling area) olduğunu belirtmektedir [59]. Kişi başına düşen mesken alanındaki değişimde iki faktör belirleyici görünmektedir [58]:

- Norveç'e Avrupa dışından gelen göç dalgası ile emlak fiyatlarında yaşanan yükseliş
- Yaşlanan nüfusun bir sonucu olarak insanların daha küçük konutları tercih etmeye başlamaları

Yine 2013'te yapılan bir araştırmada, Afrika, Asya ve Güney Amerika'dan gelen göçmen nüfusun kişi başına düşen yaşam alanının Norveçlilere göre %43 daha küçük olduğu tespit edilmiştir [60].

3. ISI POMPASI (HEAT PUMP)

Meskenlerdeki enerji tüketimini ve CO₂ emisyonlarını azaltmak amacıyla ısı pompası kullanımı günümüzde giderek artmaktadır. Isı pompalarının kullanımı, var olan yapıların emisyon değerlerinin azaltılmasına olanak sağlayacağı gibi aynı zamanda işletme maliyetleri de diğer ısıtma çözümlerine göre daha düşük olmaktadır [61].

Isı pompaları temel olarak: Toprak Kaynaklı Isı Pompaları (GSHP's) ve Hava Kaynaklı Isı Pompaları (ASHP's) olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır [62]. GSHP'ler, belirli alanlara ısı enerjisi sağlamak için arazi yüzeyinden 10-20 m derinlikten [63] sonraki kaya, toprak ve suyun sabit sıcaklığını kullanarak binalara sıcak su

sağlamaktadır [64]. Binalarda ASHP'ler tarafından sağlanan termal enerjinin kaynağı ise dış ortamdaki havanın ısısidir [65].

Isı pompası yüksek verimli bir ısıtma ve soğutma sistemi olmasına rağmen, performansı birçok faktöre bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Ortam hava sıcaklığındaki yıllık değişim, toprak koşulları, yeraltı veya yüzey suyunun mevcudiyeti ve ulaşılabilir olması, mimari yapı, saha konumu, gürültü, alan kısıtlamaları, sermaye ve işletme limitleri gibi birçok etken sistem türünün seçiminde rol oynamaktadır [66]. Bir ısı pompası sisteminin verimi, ısı kaynağı sıcaklığı ile oda sıcaklığı arasındaki sıcaklık farkı düştükçe artmaktadır. Dolayısıyla ısı dağıtım elemanının sıcaklığı ne kadar düşükse ısı pompasının verimi de o kadar yüksek olmaktadır. Bu amaçla, düşük sıcaklıklı yerden ısıtma veya 55 °C su sıcaklığına sahip düşük sıcaklık radyatörlerin kullanıldığı büyük boyutlu ısı dağıtım elemanı seçmek doğru olacaktır [66].

Yılmaz ve arkadaşlarının çalışmalarının sonucunda, yerden ısıtmaya sahip ısı pompalı sistemin aynı yapıda kullanılacak doğalgaz kazanlı sisteme göre işletme maliyetinde yıllık %36 tasarruf kazandırabileceği tespit edilmiştir [66]. Isı pompalı çözümlerin ilk yatırım maliyetleri geleneksel ısıtma sistemlerine göre daha yüksek olmakla birlikte, gelişen teknolojiye bağlı düşen maliyetler ile özellikle ılıman iklim bölgelerindeki kullanımını giderek artacağı öngörülmektedir.

Temel [67] ise yaptığı araştırmada hava, su ve toprak kaynaklı ısı pompalarının Türkiye'nin çeşitli bölgelerindeki uygulanabilirliğini inceleyerek, örnek olarak ele aldığı villa projesindeki ısı pompalarının tasarım ve ilk yatırım maliyetlerinin hesaplarını paylaşmıştır. İlk yatırım maliyetlerinin düşüklüğü nedeniyle ısı pompaları içinde ilk tercih edilen kaynak hava olmasına rağmen, İç Anadolu, Doğu Anadolu ve Güney Doğu Anadolu'nun bazı illerinde dış hava koşullarının kışın -5°C'nin altında seyretmesi nedeniyle verimin düştüğü ve ısıtma gereksinimlerini karşılamak için ek kurulum gerektiği belirlenmiştir. Bu bölgelerde toprak veya su kaynaklı ısı pompalarının tercih edilmesinin daha uygun olacağı aktarılmaktadır. Karadeniz, Marmara, Ege ve Akdeniz bölgelerinde ise soğutma ihtiyacının en az ısıtma kadar yüksek olması sebebiyle, hava kaynaklı ısı pompalarının kullanılmasının daha verimli olacağı tespit edilmiştir. Gaur ve arkadaşlarının [68] yaptıkları çalışmada da benzer sonuçlar aktarılmaktadır. Hava

kaynaklı ısı pompalarında düşük sıcaklıklarının verimi düşüreceği ve sistemin ısı yükünü karşılamada yetersiz kalacağı belirtilmektedir. Bu sebeple su toprak kaynaklı ısı pompalarının soğuk bölgeler için daha uygun seçenekler olduğu söylenmektedir. Yüksek güneş radyasyonuna sahip bölgelerde, ısı pompasının güneş enerjisi elemanları ile desteklenmesinin verimi artıracığı sonucuna varılmıştır.

4. BİNALARDA ENERJİ DEPOLAMA (ENERGY STORAGE FOR BUILDINGS)

İklim değişikliğiyle mücadele kapsamında, enerji taleplerini karşılamak amacıyla hane halkının fosil yakıtlara alternatif olarak yenilenebilir enerji kaynaklarına (RES) yönelmeleri ve sıfır enerjili binaları tercih etmeleri teşvik edilmektedir [69]. Yeni inşa edilecek binaların yanı sıra, var olan yapı stoğuna da yenilenebilir enerji sistemleriyle birlikte enerji depolama çözümlerinin entegre edilmesi, çevresel etkilerin önüne geçebilmek adına önemli bir adım olacaktır [70].

4.1. Bataryalı Enerji Depolama (Battery Energy Storage)

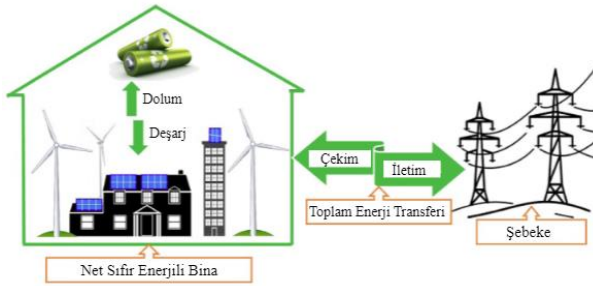
PV panellerin azalan maliyeti ve artan enerji fiyatları, elektrik faturalarını düşürmek isteyen hane halkını binalarına güneş panelleri kurmaya yöneltmektedir [71]. Binalarda güneş enerjisi parçalarının kullanılmasıyla birlikte ortaya çıkan ikincil kazançlardan biri de hava şartlarına daha az maruz kaldığı için kullanım ömürleri uzayan çatı bileşenleri olmaktadır [72]. Binaya entegre fotovoltaiik sistemler, genel olarak şebekeden bağımsız (Off Grid) ve şebekeye bağlı (On Grid) olmak üzere iki kategoriye ayrılmaktadır. Ayrıca, şebekeden bağımsız PV sistemleri de kendi içerisinde bataryalı ve bataryasız sistemler olmak üzere iki grupta değerlendirilebilmektedir.

Kurulum maliyetleri daha yüksek olmakla birlikte, bataryalı sistemler enerjinin ihtiyaç anında kullanılmak üzere depolanabilmesine olanak sağlarken, bu durum güneş enerjisinin doğası gereği sahip olduğu düzensiz üretim sorununa karşı bir çözüm getirmektedir [73–75]. Fotovoltaiiklerin bataryalı enerji depolama sistemleri ile kullanılması üzerine ortaya konan ekonomik analizler, genellikle son kullanıcıyı ilgilendiren konutlar üzerine yapılmaktadır [76]. Buna karşılık, kamu binaları ve ofisleri de içine alan ticari kurulumlar da son zamanlarda hızla artmaktadır [77, 78]. Güncel elektrik fiyatları göz önüne alınarak yapılan

projeksiyonlar göre, depolamalı fotovoltaik kurulumların herhangi bir ek sübvansiyon devreye alınmaksızın 7 yıldan kısa sürede kendini geri ödeyeceği belirtilmektedir [71]

4.2. Bataryalı Hibrit Enerji Üretim Sistemi (Hybrid PV-Wind-Battery Storage System)

Bir binanın en azından yıllık enerji talebi kadar üretimi kendi bünyesinde gerçekleştirebiliyor olmasına Net Sıfır Enerji (NZE) denmektedir. Binaın tükettiği kadar enerjiyi üretebilmesi için öne sürülen, güneş ve rüzgâr enerjilerinin birlikte kullanıldığı hibrit sistemler üzerine birçok araştırma yapılmaktadır [79]. Tekil güneş ve rüzgâr kurulumları her ne kadar günümüzde yaygınlaşmış olsa da birlikte kullanılmaları halen yüksek maliyetlere neden olmaktadır. Buna ek olarak, yenilenebilir enerjiye dayalı dağıtık üretim modellerinde ihtiyaca göre anlık olarak şebekeye aktarım ya da şebekeden alım yapıyor olması şebeke yükümü artırmaktadır. Bu nedenle, ekonomik ve sürdürülebilir enerji üretimi için arz ve talebi tam olarak örtüşürecek biçimde RES'in optimum boyutlandırılması esastır [80, 81]. Aksi takdirde fazla ya da az üretim sonucu yaşanacak şebeke trafiği iletim hatlarında meydana gelen kayıp miktarını artırırken [82, 83], güç kalitesi ve voltaj kararlılığını da olumsuz etkileyecektir [84].



Şekil 2. Hibrit PV-Rüzgâr-BS tabanlı NZEB'lerin blok diyagramı (Block diagram of hybrid PV-Wind-BS based NZEBs) [85]

Optimizasyon sorunlarına karşın en etkili çözüm olarak bataryalı depolamanın (BS) yapıya entegresinin sağlanması ve bu sayede sistem güvenilirliği artarken, net sıfır enerjili binaların (Şekil 2) şebekeyle olan etkileşiminin azaltılabileceği aktarılmaktadır [82, 86, 87]. Çalışmalara göre, rüzgâr ve güneş sistemlerinden oluşan hibrit kurulumların tek enerji kaynağının kullanıldığı yapılara göre daha düşük kapasiteli bataryalara ihtiyaç duyduğu ortaya çıkmıştır [88, 89].

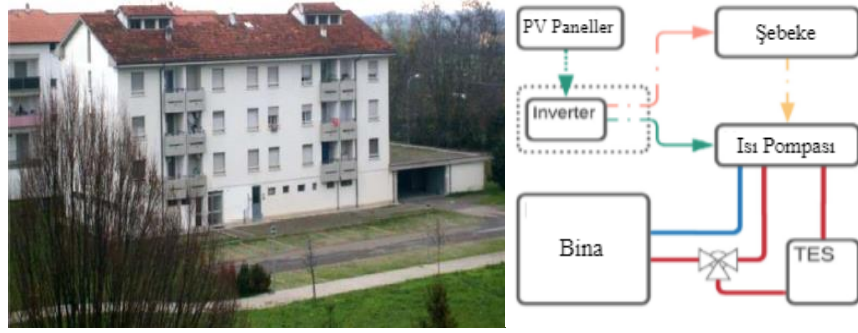
4.3. Termal Enerji Depolama (Thermal Energy Storage)

İlerleyen teknolojiyle birlikte düşen kurulum maliyetleri, enerji verimliliğini artırmak amacıyla binalarda termal enerji depolama (TES) yöntemlerinin kullanılmasını hızlandırmaktadır [90]. Enerjinin depolanmak istenmesindeki en önemli etken, üretilen enerji ile tüketim değerleri arasında çeşitli nedenlerle (zaman, sıcaklık, güç farkı, lokasyon) yaşanacak uyumsuzlukların en aza indirilmek istenmesidir [91].

Gelişmekte olan diğer teknolojilerde olduğu gibi, TES'nin de kullanımının yaygınlaşması için toplum tarafından bilinirlik ve kabulünün artması gerekmektedir [92]. Enerji depolama ile elde edilecek ikincil kazançların topluma anlatılmasının bu süreci hızlandıracağı düşünülmektedir [93]. Artan sistem verimliliği sonucu elde edilecek maddi kazancın yanı sıra, düşen enerji yoğunluğunun çevre, halk sağlığı ve toplumsal ekonomik kalkınmaya olan olumlu etkileri depolama çözümlerinin kullanımını teşvik edici etmenlerdir [94]. Yapılan literatür taraması sonucunda TES kullanımının tespit edilen başlıca avantajları şunlardır [91, 95, 96]:

- Enerji sistemlerinin verimlilik ve güvenilirliğinin artırılması
- Yatırımın ve maliyetlerin azaltılması
- Kirletici emisyonların azaltılması [97, 98]
- CO₂ Emisyonlarının düşürülmesi
- İklimlendirme sistemlerine entegre kullanımda artan iç hava kalitesi
- Yeşil çatı ve cephe gibi pasif TES uygulamaları ile biyoçeşitliliğin korunması [94, 99-101]

Bunların yanı sıra, TES binaya entegre fotovoltaik sistem (BIPV) tarafından üretilen arz fazlası termal enerjiyi depolamak için de kullanılabilir. Üretimin talebi karşılamadığı (akşam saatleri, kışın) anlarda ise depolanan enerji deşarj edilerek sistemin şebekeden çekeceği miktar düşürülebilir [102, 103]. Bu konuya örnek olarak Amini ve arkadaşları [70], İtalya'da 1985 yılında yapılmış bir aile apartmanının (Şekil 3a) Horizon 2020 HEART [104] projesi kapsamında 2022 yılında yenilenmesi üzerine araştırmada bulunarak, yapıya entegre edilen fotovoltaikler ile hava-su ısı pompalarının termal enerji depolama sistemleri (Şekil 3b) arasındaki uyumunu incelemişlerdir.



Şekil 3. a) İtalya'daki aile apartmanı, b) binaya entegre edilen sistemin şeması (a) Family apartment in Italy, b) diagram of the system integrated into the building) [70]

Binanın yenilenmesi aşamasında, yapıya entegre edilecek fotovoltaik sistem ile termal enerji depolama ünitelerinin yaratacağı enerji tasarrufunun CO₂ olarak eşdeğerinin tespit edilebilmesi adına, binadaki ısıtma, soğutma ve sıcak su ihtiyacının yıllık enerji tüketim verileri kullanılarak üç farklı kurulum senaryosu EnergyPlus üzerinden simüle edilmiştir.

- Senaryo 1: Bina, BIPV ve TES olmaksızın elektrik şebekesine bağlıdır.
- Senaryo 2: Yıllık tüketimi karşılamak adına binaya 10 kW BIPV kurulmuştur.
- Senaryo 3: Binaya BIPV yanında TES sistemi de eklenmiştir.

Yapılan çalışmalar sonucunda, fotovoltaik sistemlerin termal depolamayla birlikte kullanıldığı üçüncü senaryonun en verimli kurulum planı olduğu ortaya çıkmıştır. Bu sistem ile binanın 30 yıllık kullanım ömrü boyunca toplam 34,77t CO₂ salınımının önüne geçileceği hesaplanırken, bu değer birinci senaryoda yer alan standart kurulumla göre %21,42 azalma anlamına gelmektedir. Kurulumun çevresel geri ödeme süresinin 15 yıl olacağı öngörülmektedir [70].

4.4. Hidrojen Bazlı Enerji Depolama (Hydrogen Energy Storage)

20 Kanada şehrinde yürütülen çalışmada, hidrojen bazlı enerji depolamanın binalara entegrasyonu ile sera gazı emisyonlarının azaltılması amaçlanmıştır [105]. Hesaplamalar sonucunda ortalama 122.686 Kanada doları yatırım ile yıllık ortalama 10t'nun üzerindeki CO₂'in çevreye vereceği zararın önüne geçilebileceği aktarılmaktadır. Mehrjerdi ve arkadaşlarının çalışmalarına göre ise, hidrolik güç ve güneş enerjisiyle birlikte hidrojen bazlı depolamanın kullanıldığı örnek kurulum sonucunda CO₂ emisyonlarında %50 düşüş gözlemlenmiştir [106].

Kanada'daki enerji depolama ile ilgili yaşanan zorlukların başında, ülkenin yüksek enlem bölgesinde yer almasından dolayı meydana gelen ekstrem mevsimsel düzensizlikler neticesinde yaşanabilecek belirsizliklere karşı yüksek yoğunluklu ve uzun vadeli depolamaya ihtiyaç duyulmasıdır [107]. Konutlardaki enerjinin depolanması için düşük enerji yoğunluğuna sahip bataryaların yerine, yüksek enerji yoğunluğu ve düşük sızıntı riski ile hidrojen tercih edilebilir. Ayrıca hidrojenin, evsel sıcak su veya mutfak ihtiyaçlarının karşılanması amacıyla yakılarak birincil enerji kaynağı olarak da kullanılabilmesi aktarılmaktadır [108].

Güneş enerjisi ile entegre hidrojen bazlı enerji depolama sistemlerinin (SESH2ES) kullanılması, yeni inşa edilecek yapıların net sıfır emisyonlu bina (NSEB) koşullarını karşılamasına yardımcı olmaktadır [109]. Buna karşılık SESH2ES'lerin yaygınlaşmaya başlaması beraberinde depolama alanı ihtiyacıyla birlikte olası güvenlik endişelerini de artırmaktadır [110]. Özellikle entegre bir dağıtım ağına sahip olmayan bölgelerde büyük miktarda hidrojenin güvenli şekilde taşınabilmesi için sıvı organik hidrojen taşıyıcılar (LOHC) kullanılmaktadır.

LOHC'nin sahip olduğu yüksek depolama yoğunluğu ve düşük kullanım maliyetleri ile, hidrojen bazlı depolamada alternatiflerine kıyasla konutlar için daha uygun bir çözüm olduğu aktarılmaktadır [111]. Örneğin Knosala ve arkadaşları, kırsal bölgelerde yer alan binalarda LOHC'nin kullanılmasının yüksek basınçlı depolamaya göre %76-80 arasında daha ekonomik olacağını belirtmektedir [112]. Teichmann ve arkadaşları ise Bavyera bölgesinde yaptıkları örnek çalışmada, 2.000 litrelik yakıt tanklarında 3,2 MWh'lik hidrojenin depolanabileceğini tespit etmişlerdir [113].

5. NESNELERİN İNTERNETİ VE AKILLI BİNALAR (IoT AND SMART BUILDINGS)

IoT, uygun şekilde iletilen ve bulut veya mesken içi sistemler aracılığıyla işlenerek anlamlı bilgilere dönüştürülen büyük miktarda verinin toplanmasına olanak sağlar. Görselleştirilen ve AI araçları aracılığıyla analiz edilen veri setleri, toplandıkları kaynak hakkında geniş çaplı bilgi içermektedir. Kaynak sistemler hakkında alınacak kararların bu bilgi havuzuna dayandırılması, çözüm olasılıklarını artıracak gibi maliyetlerin düşürülmesi konusunda da katkı sağlayabilmektedir [114].

Akıllı bina kavramı, çevresel değişimleri anlık olarak ölçerek kullanıcıyı ve/veya ana yönetim birimini değişiklikler hakkında bilgilendiren birçok sensörün bir arada ve birbirleriyle iletişim halinde olmasına dayanmaktadır. IoT tabanlı teknolojilerinin bina sistemlerine entegre edilmeye başlanması, sağlanan düzenli veri akışı sayesinde kullanıcı alışkanlıklarının ölçülebilmesini kolaylaştırmaktadır. Toplanan verinin incelenmesi neticesinde, enerji tüketimi ve karbon ayak izi konusunda yapı bazlı tekil çözümlerin ortaya konması mümkün kılınmaktadır [115].

5.1. IoT ve Termal Konfor (IoT and Thermal Comfort)

Kullanıcıların termal konforunu olumsuz etkilemeden en az enerjinin tüketildiği sıcaklıkların tespit edilebilmesi için yapılan araştırmalar sonucunda, kamu binalarında yer alan iklimlendirme sistemlerinin iç ortam sıcaklığını kışın 17-21°C, yaz aylarında ise 26-27°C arasında tutmak üzere ayarlanmaları gerektiği tespit edilmiştir [116].

Termal konforun artırılması için yaygın olarak kullanılan yalıtım malzemeleri veya yalıtımlı camlar gibi verim artırıcı geleneksel çözümler, sahip oldukları yüksek gömülü enerji nedeniyle ön görülen miktarın üzerinde nihai tüketim maliyetlerine yol açmaktadır. Verimliliğin artırılmasına katkı sağlayan IoT ekosistemleri ise, kurulum ve operasyonel maliyetlerinin düşüklüğü nedeniyle ekonomik ve çevreci çözüm kaynakları olarak değerlendirilmektedir [116]. Binaların farklı bölgelerine yerleştirilecek sensörler üzerinden toplanacak anlık sıcaklık verileri işlenerek, gereğinden fazla ya da az ısıtılan bölgelerin tespit edilmesi kolaylaşmaktadır. Ek olarak toplanan veriler sayesinde yapılardaki olası termal izolasyon sorunları da tespit edilebilecektir.

Termal konforun sağlanabilmesi adına faydalanılan IoT sistemlerine örnek olarak Avustralya'da yapılan bir çalışma gösterilebilir. Avustralya'daki dört ofis binasına entegre edilen ortam takip sistemlerinden sağlanan veri akışı anlık olarak analiz edilerek, iklimlendirme sistemleri ofislerdeki termal konfor düzeyini çalışanların en verimli şekilde çalışmalarına olanak sağlayacak aralıkta tutmaktadır [117].

5.2. IoT ve Bina Yönetim Sistemleri (IoT and Building Management Systems)

IoT ve bina yönetim sistemleri (BMS), gelişen teknoloji ve artan kullanıcı bilinciyle birlikte popüleritesi giderek yükselen iki güncel araştırma konusudur. Günümüzde bu iki sistemin bir arada yaygın bir biçimde kullanılmasının önündeki en büyük engel olarak, son kullanıcı tarafından yüksek bulunan maliyetler gösterilmektedir [118]. Ouedraogo ve arkadaşları tarafından geliştirilen [119] ve 30\$'lık eklenti maliyeti ile binaya entegre hibrit güneş ve rüzgâr enerjisi kurulumlarının [120, 121], üretim verilerini anlık olarak cep telefonu üzerinden kontrol edilebilmesine [122] olanak sağlayan sistemin hali hazırda piyasadaki alternatiflerine göre (100\$ to 600\$) çok daha ucuz olduğu aktarılmaktadır. İçerisinde klima, buzdolabı, bulaşık ve çamaşır makinelerinin yer aldığı ve rüzgâr-güneş hibrit kurulumun gerçekleştirildiği örnek çalışma sonucunda [119]:

- Elektrik faturasında %34 azalma
- Termal konfor seviyesinde %4 artış
- Anlık tepe güç ihtiyacında %53 düşüş gözlemlenmiştir.

Elde edilen sonuçlar doğrultusunda, herhangi bir güç kontrol sistemine sahip olmayan kamu binaları ve okullar gibi eski yapılara, düşük kurulum maliyetleri ile enerji yönetim sistemlerini entegre ederek enerji verimliliklerinin yükseltilebileceği anlaşılmaktadır.

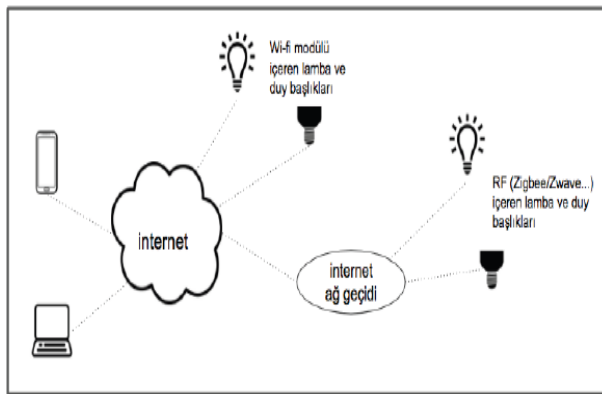
6. AYDINLATMA (LIGHTING)

Binaların elektrik tüketiminde aydınlatma sistemleri önemli bir yer tutmaktadır. Toplam elektrik enerjisinin %20-%25'i aydınlatma sektöründe kullanılmaktadır, bu değer ısıtma-soğutma sistemlerinden sonra en yüksek ikinci tüketim kalemidir [123]. Aydınlatmada enerji verimliliği uygulamaları hayata geçirilirken, kullanılan armatür sayısını azaltacak veya ışıkları kapatıp ortamın aydınlık miktarını düşürecek

yöntemlerin yerine verimlilik artırıcı çözümlerin benimsenmesi gerekmektedir. Atılacak ilk adım ortamın doğal aydınlatma potansiyelinden yararlanılması, sonrasında ise kullanılacak mekân için gerekli görülen miktarda armatürün seçilmesi tavsiye edilmektedir. Mekâna ve kullanım amacına uygun ışık rengi ve şiddetinin seçilmesi ortamda bulunanların termal konforunu [124] yükselteceği gibi, enerji verimliliğinin artması sonucunda yapılacak yatırımı ortalama olarak 2-3 yıl içinde geri ödeyecek miktarda tasarruf sağlanabilmektedir [125]. Yapılan işin gereklerine uygun aydınlatma altyapısının kurulması, çalışanların iş güvenliğini artırdığı gibi aynı zamanda iş verimine de %16 katkısı olduğu tespit edilmiştir [126]. Aydınlatma temelde, yapay ve doğal aydınlatma yöntemleri olarak iki türlü sağlanmaktadır.

6.1. Yapay Aydınlatma (Artificial Lighting)

İnsan yapımı kaynaktan beslenen yapay aydınlatmada enerji verimli uygulamalar, 1990'larda kompakt flüoresan lambaların (KFL) kullanılmasıyla başladı. Sonrasında LED ışık kaynaklarının hızla gelişmesi ve genel aydınlatmada kullanılabilir hale gelmesi ile E27 ve E14 duyu başlı LED ışık kaynakları, konutlarda KFL'lerin yerini almaya başladı. Diğer yandan, birçok alanda kullanımı giderek artan IoT'lerin aydınlatma sistemlerine entegre olmasıyla hem mevcut aydınlatma sistemleri kontrol edilebilir hale gelmiş, hem de LED teknolojisinde yaşanan teknolojik ilerlemeler ile daha fazla tasarruf imkânı yakalanmıştır [127].



Şekil 4. Konutlarda kullanılan IoT destekli aydınlatma sistemleri (IoT supported lighting systems used in residences) [127]

Akıllı aydınlatma sistemleri elektrik tasarrufu sağlamanın ötesinde, kullanıcıların talepleri doğrultusunda çeşitli aydınlık düzeyi ve renk

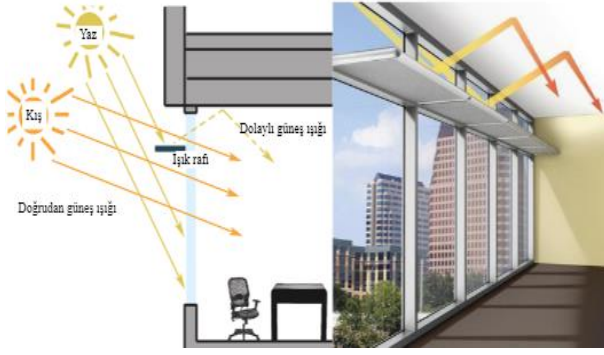
alternatiflerini kullanıma sunabilmektedir. IoT tabanlı akıllı LED lamba olarak tanımlanan ürünler genellikle 2.4 GHz bandında çalışan Zigbee kablosuz iletişim standardını kullanmaktadır [128]. IoT tabanlı aydınlatma sistemlerinin çalışma prensibi Şekil 4'te gösterilmektedir [127].

Yeni nesil LED'ler, geleneksel aydınlatma çözümlerine göre daha gelişmiş optik özelliklere sahiptir. Geleneksel armatürler ürettikleri ışığı çevrelerine 360° yaydıklarından, ihtiyaç duyulan alanın dışına aktarılan enerji aydınlatma veriminin düşmesine sebep olmaktadır. LED'ler sahip oldukları teknolojik yeterlilik ile sadece gerekli görülen yeri aydınlatarak yüksek verim sunabilmektedir [129]. LED'ler kullandıkları enerjinin %95'ini ışığa dönüştürerek floresan lambalara göre %50 enerji tasarrufu sağlamaktadır.

6.2. Doğal Aydınlatma (Natural Lighting)

Bir yapı daha tasarım aşamasındayken inşa edileceği bölgenin doğal aydınlatma özellikleri göz önünde bulundurulmalı ve güneş ışığından en yüksek verimle yararlanabilmesi için gerekli hesaplamalar yapılmalıdır. Yapının yerleşim yönü, dış cephesinin mimari tasarımı, kullanılacak pencere türü gibi bina kabuğunun güneş ışığıyla etkileşimini değiştirecek etmenler ile yapıya gelen güneş ışığının seviyesinin değiştirilebilmesini sağlayan kontrol sistemleri tasarım aşamasına dahil edilmelidir. Tüm bu parametrelere özen göstererek yapay aydınlatma ihtiyacı en aza indirebilirken aynı zamanda ekonomik kazancın yanı sıra çevrenin korunumuna da katkı sağlanabilir [130].

Doğal aydınlatmanın doğru kullanımı ile güneş ışınlarının doğrudan alınmadığı saatlerde bile ortamın aydınlatması sağlanabilir ve bu sayede gün içinde yapay aydınlatma kullanımını 6 ile 12 saat arasında düşürülebilir. Örneğin doğal aydınlatmadan yararlanan bir binada yer alan 40 W gücündeki 30 adet ampulün 12 yerine 4 saat kullanılması, yıllık enerji tüketimini yaklaşık 3.500 kWh azaltmış olacaktır [131]. Doğal aydınlatma çözümlerinde genellikle ışık rafları, yönlendirici camlar, prizmatik sistemler ve güneş gölgeleme olanağı sağlayan cephe kaplamaları kullanılmaktadır. Bu ürünler yapıya etkileyen gün ışığının istenen bölgeye yönlendirilmesine olanak sağladığı gibi, gereğinden fazla ışık alan coğrafya ya da mevsimlerde ortamın fazla ısınmasının da önüne geçmektedir.



Şekil 5. Işık Rafları (Light Shelves) [129]

Örnek olarak ışık rafları (Şekil 5), gün ışığını yönlendirerek aydınlatma sağlayan ve bu sayede verimli, doğal aydınlatma imkânı veren sistemlerdir. Işık raflarının üst yüzeyi yansıtıcı bir tabaka ile kaplanarak, gelen ışığı yatay veya açılı plakalara yönlendirecek şekilde tasarlanan elemanlardır. Pencerelelerin iç veya dış yüzeyinde konumlandırılarak bilmektedirler [132]



Şekil 6. Yapıya entegre ve kontrol edilebilir ışık rafları (Integrated and controllable light shelves) [133]

Çetegen ve arkadaşları İTÜ Ayazağa Kampüsünde yaptıkları çalışmada kurulması muhtemel ışık raflarının mevsimsel enerji tasarrufunu araştırmışlardır. Çalışmaları sonucunda, yaklaşık olarak bahar döneminde %25, kış aylarında %19,5, yazın ise %11,4 olmak üzere yıllık ortalama %20,4 oranında enerji tasarrufu sağlanabileceğini belirtmişlerdir [134].

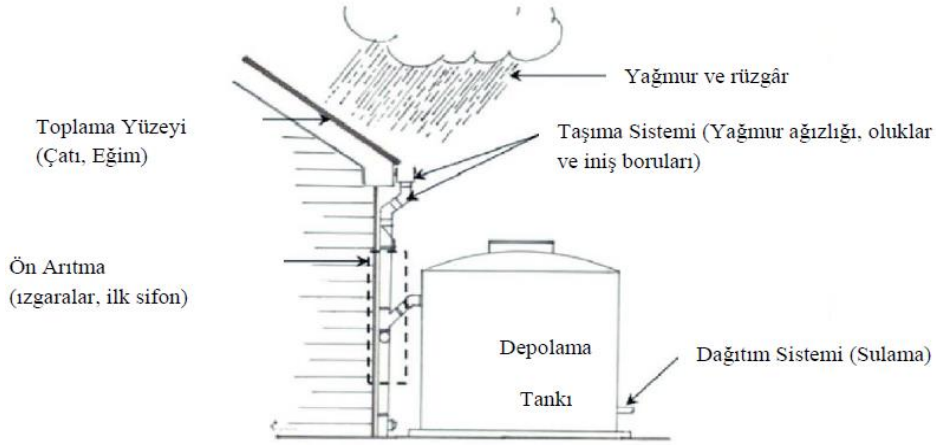
Özet olarak, aydınlatma sistemlerinin ihtiyacı karşılar nitelikte seçerken aynı zamanda mümkün olduğunca doğal aydınlatmadan yararlanılması durumunda %20 ve üzeri oranlarda tasarruf sağlayabilmek mümkün gözükmektedir. Sadece aydınlatma sistemlerinin enerji verimliliğini yükselterek Türkiye'nin toplam elektrik tüketiminin %5 azaltılabileceği hesaplanmıştır [129].

7. SU TÜKETİMİ (WATER CONSUMPTION)

Birleşmiş Milletler (UN) Dünya Su Kalkınma Raporu 2023'e göre, nüfus ve gelir değişikliklerine bağlı olarak 2050 yılına kadar su talebinde %20-30'luk bir artış olacağı öngörüldürken, aynı zamanda küresel su kaynaklarının azalması sonucunda yaklaşık 3 milyar insanın şiddetli su kıtlığı olan bir bölgede yaşayacağı aktarılıyor. Ayrıca raporda, iklim değişikliğinin su arzını, talebini ve kalitesini etkilemedeki rolü vurgulamakta [135]. Qin ve arkadaşları, günlük evsel su kullanımı ile günlük ortalama sıcaklık arasında pozitif bir ilişki olduğunu belirtiyorlar. Araştırmalarının sonucunda ortalama sıcaklıklardaki her 1°C'lik artışın, evsel su tüketimini günlük 3,3 l artıracacağı tespit edilmiştir [136].

Tatlı su kaynaklarının sınırlı olması ve temiz su elde etmenin yüksek maliyeti insanları çeşitli arayışlara yöneltmiştir. Çoğalan nüfusun su talebine karşın temiz su miktarını artırmak adına deniz suyunun arıtılması teknik açıdan mümkün olsa da ekonomik olarak geniş kitleler için uygulanabilir değildir [137-141]. Bunun yerine, düşük kurulum ve işletme maliyetleri ile binalarda toplanacak yağmur suyu evsel ihtiyaçların karşılanması için tercih edilebilir [142].

Yol, kaldırım, otopark gibi boş arazilerden ve özellikle apartman çatılarından borularla toplanan yağmur suları (Şekil 7) filtre edildikten sonra depolara alınmakta ve burada depolanan su bahçe sulama, araç yıkama, tuvalet rezervuarları ve diğer temizlik işleri için kullanılabilir [143]. Yağmur suyu hasadıyla, yağmur toplama alanının büyüklüğü ve mesken kullanıcılarının günlük tüketim talebine göre değişmekle birlikte %30-60 arasında tasarruf sağlanabileceği hesaplanmaktadır [144]. Yapının yer aldığı bölgenin iklim ve yağış karakteristikleri, su hasadında kullanılacak sistemin tasarımındaki en önemli etkidir. Bir bölgenin yağış potansiyelinin belirlenebilmesi için yağış verilerinin düzenli kaydedilmiş olması gerekmektedir [145]. Küresel iklim değişikliği nedeniyle yağış düzenlerinde değişiklikler yaşanırken, bu durum yağmur potansiyelinin gerçekçi şekilde belirlenebilmesini güçleştirmektedir [142].



Şekil 7. Yağmur Suyu Toplama Sistemlerinin Bileşenleri (Components of a rainwater harvesting system) [146]

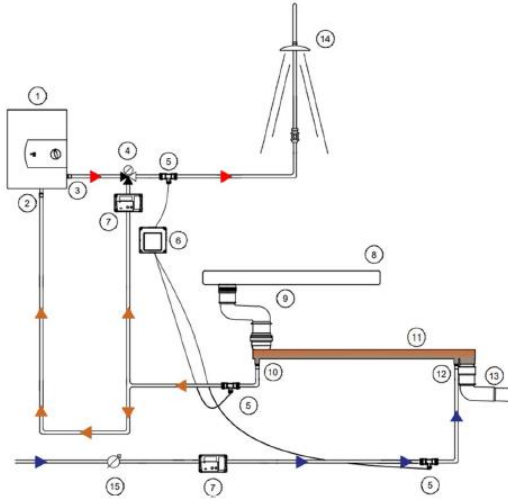
Son yıllarda etkisini artıran küresel ısınmanın kısıtlı tatlı su kaynakları üzerindeki olumsuz etkisi sebebiyle, özellikle nüfus yoğunluğunun yüksek olduğu kentsel alanlarda sürdürülebilir bir su yönetiminin sağlanmasını zorunlu hale getirmektedir [147]. Su yönetiminin sağlıklı bir biçimde gerçekleştirilebilmesi için, öncelikle su tüketiminin gerçeğe en yakın şekilde ölçülmesi gerekmektedir. Halihazırda su tüketiminin ölçülmesinde yaygın olarak manuel sayaç okuma (MMR) yöntemi kullanılmaktadır. Bu yöntemde genel olarak sayaçları tek tek gezerek kontrol eden görevliler bulunmaktadır, bazı durumlarda ise son kullanıcıların da sayaçlarını düzenli takip ederek yetkili kurumlara bildirmesi gerekmektedir. Geleneksel olarak kabul edilen bu yaklaşım, sadece bu işlem için görevlendirilen birçok çalışan olması sebebiyle pahalı ve idaresi karmaşık bir organizasyonu içermektedir [148].

Bununla birlikte iletişim teknolojilerinde yaşanan gelişmelere paralel olarak, birbirine entegre biçimde sensör verilerini karşılıklı olarak işleyebilen birçok cihaz IoT ekosistemine dahil olmaya başlamıştır [149]. Bu gelişim, kaydedilen verilerin gerçek zamanlı iletişimine izin veren Otomatik Sayaç Okuma (AMRs) cihazlarının yaygınlaşmasına olanak sağlamıştır [150]. Bu cihazlar düşük enerji tüketimi ile uzun mesafeler arasında iletişim kurulabilmesine olanak veren düşük güçlü geniş alan ağı (LPWAs) altyapısını kullanmaktadır [151–153]. LPWA ekosistemi içerisinde ise sahip olduğu teknik avantajlar nedeniyle yaygın olarak LoRaWAN çözümü tercih edilmektedir [154]. Radyo frekansları ile veri iletimi sağlayan sistem, elektromanyetik iletimin kısıtlı olduğu ortamlarda yer alan sayaçların (örneğin yer altı bodrum katları) merkezi sisteme bilgi iletebilmesini mümkün kılmaktadır.

LoRaWAN iletişiminin uzun menzilli iletişimi, 1 GHz'in altındaki frekans bandında çalışan chirp yayılma spektrumu (CSS) modülasyon tekniğine dayanmaktadır [155, 156]. Sadece verinin iletileceği anlarda sistemi aktif hale getiren teknoloji, pilli bataryaya sahip sayaçların herhangi bir bakım gerektirmeden uzun süre aktif olarak kullanılmasına izin vermektedir.

Giderek yaygınlaşan akıllı binaların su tüketimi alanındaki bir diğer getirisi, akıllı su yönetimi sayesinde boru arızalarının zamanında ve hızlı tespit edilmesini kolaylaştırarak olası kaçakların önüne geçilebilmesini sağlamasıdır. Akıllı su sayaçları, su tüketim verilerini depolayarak olası boru arızaları hakkında yapay zekâ yardımıyla sonuca varabilmektedir. Sistem tarafından algılanan arıza, web uygulaması aracılığıyla olası bir su sızıntısı hakkında kullanıcıya veya sisteme alarm göndermektedir. Ayrıca makine öğrenmesi yoluyla merkezi idare sistemi kullanıcı alışkanlıklarını takip ederek son kullanıcıya yönelik tasarruf tavsiyeleri sunmaktadır [154].

Yapılan bir çok çalışmada, çok katlı binalarda veya su tüketiminin yüksek olduğu müstakil evlerde gri sudan ısı geri kazanımının enerji verimliliği konusunda önemli bir potansiyel içerdiği belirtilmektedir [157–160]. Konutlarda oluşan ısı değeri yüksek gri suyun %80-%90'nı duş başlığı kaynaklı meydana gelmektedir [161]. Bir araştırmaya göre atık sıcak sudan ısı geri kazanımı (DWHR) sisteminin kullanılması ile sıcak su üretiminde kullanılan enerji %26,3 oranında azaltılabilmektedir [162]. Bu sistem ile özellikle duşta kullanılan atık sıcak suyun ısı enerjisi geri kazanılarak, kombi veya şofben kazanında bulunan soğuk suyun ön ısıtılmasında kullanılmaktadır.



Şekil 8. Isı geri kazanım modelinin şeması (Heat recovery system diagram) [162]

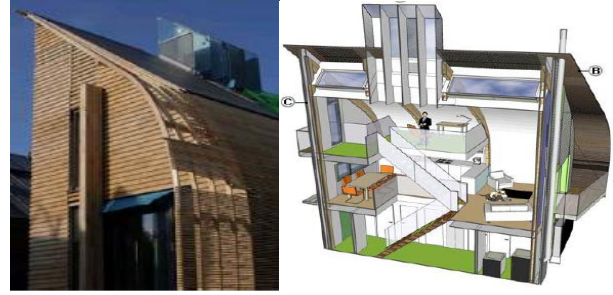
DWHR (Şekil 8) sistemleri sağladıkları elektrik tasarrufu ile elektrikli şofbenlerle birlikte kullanıldıkları zaman yapılacak yatırımın geri ödeme süresi 4 ile 9 yıl arasında değişmektedir. Elektrik fiyatlarının olası yükselişi ile bu sürenin daha da kısılacağı öngörülmektedir. Doğal gazla çalışan şofbenler söz konusu olduğunda ise geri ödeme süreleri 15 yılı aşmaktadır, bu durumda geri kazanım sistemleri ancak gaz fiyatlarında yaşanacak büyük yükselişlerden sonra avantajlı hale gelebilecektir [162].

8. PASİF SOĞUTMA YÖNTEMLERİ (PASSIVE COOLING METHODS)

Binaların soğutma ihtiyaçlarının azaltabilmesi amacıyla günümüzde pasif soğutma yöntemlerine yapıların tasarımı sırasında önem verilmeye başlanmıştır. Örnek olarak farklı boyutlarda pencerelerin tercih edilmesi endüstriyel yöntemler kullanılmadan binalarda pasif soğutma sağlarken, ısınarak yükselen havanın tahliyesi için yükseğe konumlandırılan pencereler ile kullanıcıları rahatsız edecek hava akımlarının önüne geçilebilmektedir. Doğal havalandırma, özellikle küçük boyutlu alanlarda daha etkili olurken mutfak gibi özel havalandırma gereksinimi duyan iç mekanlarda tek çözüm yolu olarak kullanılması önerilmemektedir [163]. Doğal havalandırmadan en yüksek verimin alınabilmesi için yapıların tasarımı sırasında bölgedeki rüzgarların esiş yönüne dikkat edilmesi gerekmektedir.

Kuru ve sıcak bölgeler için rüzgâr bacaları (Şekil 9) enerji tasarrufu sağlayan doğal havalandırma yöntemlerinden biridir. Dışarıdan gelen serin ve

temiz hava, içeride bulunan kirli ve ısınmış havayı vakum etkisiyle dışarı yönlendirmektedir [164]. Bina tasarım ve inşasında yaşanan teknolojik gelişimlere rağmen, binlerce yıldır kullanılan geleneksel çözümler ile sıfır enerjili binaların havalandırma ihtiyacına doğal çözümler üretilebilmektedir. Özellikle Ortadoğu bölgesinde yüzlerce yıldır kullanılan rüzgâr kulesi ve rüzgâr kepçesi gibi uygulamalar, günümüz mimari tasarımlarında (Şekil 10 ve 11) kendine yer bulmaya başlamıştır [165].



Şekil 9. Sıfır enerjili bir ofis ve rüzgâr bacası kullanımı (A zero energy office and the use of a windcatchers) [163]



Şekil 10. Rüzgâr kepçesi örneği, Masdar Enstitüsü Abu Dabi (Windcatcher example, Masdar Institute Abu Dhabi) [166]



Şekil 11. Rüzgâr kepçesi örneği, Prenses Nora Üniversitesi Suudi Arabistan (Windcatcher example, Princess Nora University Saudi Arabia) [166]

Sıcak iklim bölgelerinde yer alan yapılardaki geniş saydam yüzeyler, optik özelliklerine bağlı olarak güneş ışınlarının taşıdığı ısıyı iç mekâna ileterek soğutma ihtiyacının artmasına neden olmaktadır. Mimari tasarımından ödün vermeden kullanılacak gölgeleme elemanları (Şekil 12) ile ısı kayıpları en aza indirilebilmektedir [167].

Pencere	Yatay Gölgeleme Elemanı	Yatay Çift Gölgeleme Elemanı	Tek Yöne Eğimli Gölgeleme Elemanı	Tek Yöne Eğimli Çift Gölgeleme Elemanı	Yatay Panjur	Yatay İç Yöne Eğimli Panjur
						
Yatay Dış Yöne Eğimli Panjur	Düsey Panjur	Tüm Cepheyi Kaplayan Güneş Kırıcı	Yarım Cepheyi Kaplayan Güneş Kırıcı	Cepheyi Yarım Kaplayan Panjur Güneş Kırıcı	Konsol Olarak Entegre Edilen Panjur	Pencere Çeperini Saran Gölgeleme Elemanı
						

Şekil 12. Gölgeleme elemanlarının bina kabuğuna entegrasyon türleri (Types of integration of shading elements into the building envelope) [167]

Günümüzde gölgeleme elemanları otomasyon sistemleri ile kontrol edilerek, iç ortamdaki aydınlık düzeyi ve iç mekâna etkileyen ısı şiddet seviyesi kontrol altında tutulabilmektedir. Abu Dabi'de 2012 yılında tamamlanan 29 katlı, Al Bahar Kulesi'nin bina kabuğuna entegre hareketli gölgeleme elemanları (Şekil 13) otomasyon ile yönetilmektedir [165]. Aktif gölgeleme elemanlarının Al Bahar Towers'da kullanılmaya başlamasıyla birlikte, soğutma kaynaklı elektrik tüketiminde dönemsel olarak %50 ila %81 arasında düşüş yaşandığı belirtilmektedir [168].



Şekil 13. Al Bahar Towers hareketli gölgeleme elemanı tasarımı (Dynamic shading element design for Al Bahar Towers) [169]

Bina kabuğunun açık renkli olması, yapıya gelen güneş ışınlarını yansıtarak güneş ışınımı kaynaklı ısı transferini en aza indirmeye yardımcı olmaktadır. Bu uygulamanın örneklerine, sıcak kuru iklime sahip Güneydoğu Anadolu bölgesinde yer alan Mardin, Urfa ve Diyarbakır'daki geleneksel konutlarda rastlamak mümkündür [165]

Bir diğer pasif soğutma yöntemi olan yeşil çatı ve dikey yeşil giydirmeye gibi yöntemler binaya etkileyen güneş ışınlarının ısıtıcı etkisini kontrol altına almaya yardımcı olmaktadır. Yapılan literatür araştırmalarına göre, bina üzeri ve çevresine uygulanan yeşil peyzaj çalışmalarıyla bina içi sıcaklıklarında 5°C ila arasında 9°C düşüş gözlenirken, soğutma ihtiyacında yaşanan azalma ile enerji tüketimlerinde %6 ile %20 arasında tasarruf yapılabileceği tespit edilmiştir [170].

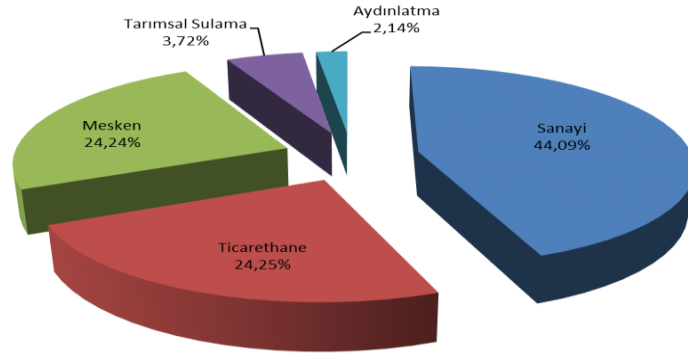
9. TÜRKİYE ÖRNEĞİ (THE CASE OF TURKEY)

Konforlu yaşam isteği ve zamana bağlı değişen alışkanlıklar nedeniyle enerji tüketimi artan bir eğilim içerisinde, dünya genelinde olduğu gibi Türkiye'de de yaşanan nüfus artışı bu eğilimi destekliyor. Enerji talebinin büyük bölümünün ithal edildiği düşünüldüğünde, bu durum zaman içerisinde cari açığın artmasına neden olacağı gibi ulusal bağımsızlık önünde de engel teşkil etmekte. Enerjide dışa bağımlı olan Türkiye için, bu tüketimin karşılanabilmesi adına enerji tüketiminde verimlilik ilkesinin izlenmesi daha da önem kazanmaktadır. Enerji verimliliği çalışmaları ile konutlardaki yaşam standardı yükseltilebileceği gibi, aynı zamanda enerjinin boşa harcanmasının da önüne geçilebilecektir.

9.1. Elektrik Tüketimi (Electricity Consumption)

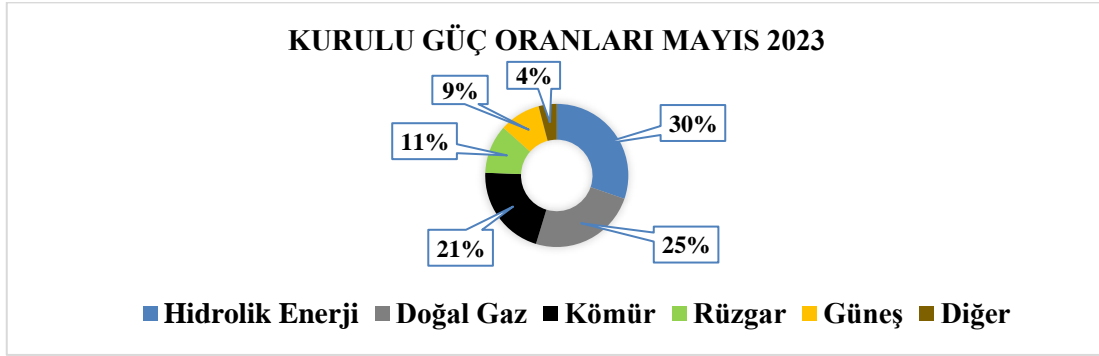
Türkiye'nin, Ulusal Enerji Planına göre elektrik tüketiminin 2000'den 2020'ye kadar yıllık ortalama %4,4 artışla 128 TWh'ten 306,1 TWh'e çıktığı ifade edilmekle birlikte, 2035 yılına kadar ortalama %3,5 artışla tüketimin 510,5 TWh'e ulaşacağı öngörülmüştür. Projeksiyonlara göre bu süreç boyunca hane halkının elektrik tüketiminde ortalama %2,3 artış beklenirken, bu oranın hizmet sektöründe %2,2 olacağı tahmin ediliyor [171].

Türkiye genelinde faturalanan elektrik tüketimi incelendiğinde, 2021 yılında 253 TWh olarak gerçekleştiği görülmüştür [172]. Şekil 14'te gösterilen dağılım incelendiğinde, tüketilen toplam elektriğin yaklaşık %25'i meskenlerde kullanıcı konforunu sağlamak üzere ısıtma, soğutma, havalandırma ve aydınlatma gereksinimleri için kullanılmaktadır. Bu oranın üzerine ticari binaların tüketim değerleri de eklendiği zaman, Türkiye'deki toplam tüketimin yaklaşık %48'nin binalarda tüketildiği ortaya çıkmaktadır.



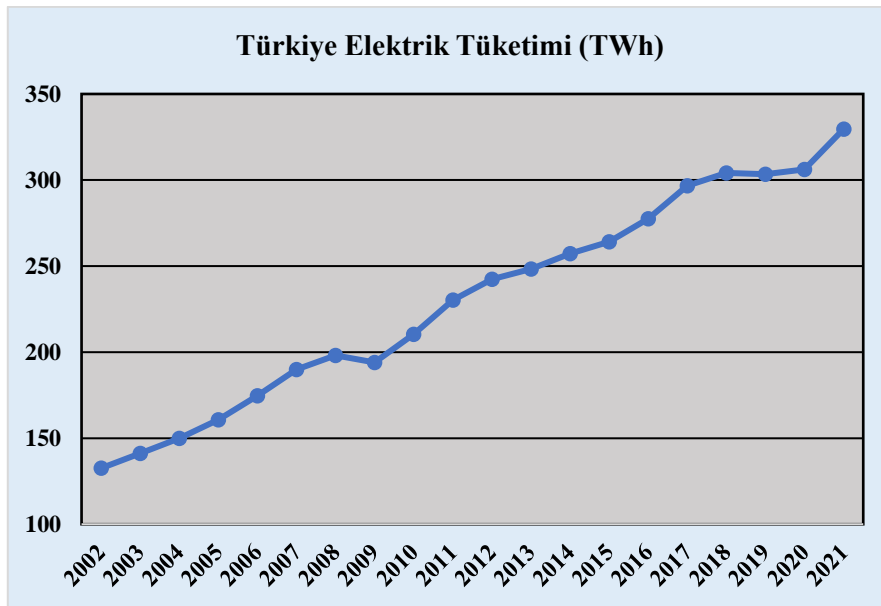
Şekil 14. 2021 Yılı Faturalanan Tüketimin Tüketici Türüne Göre Dağılımı (%) (Consumer Type Distribution of Invoiced Consumption in 2021) [172]

2023 Mayıs sonu itibarıyla kurulu güç miktarı 104.691 MW'a ulaşırken, kaynaklara göre dağılımı Şekil 15'te gösterilmektedir. Elektrik tüketimine bakıldığı zaman ise, yıl boyunca 328,7 TWh olarak gerçekleştiği saptanmıştır.



Şekil 15. Mayıs 2023 itibarıyla kurulu güç oranları (%) (Installed capacity rates as of May 2023) [173]

Türkiye'nin elektrik tüketiminin 2002-2021 yılları arasındaki değişimi incelendiğinde ise (Şekil 16), 2008 yılındaki global ekonomik kriz ile 2019 yılındaki COVID-19 pandemi süreci haricinde sürekli artan bir trend içerisindedir [173].



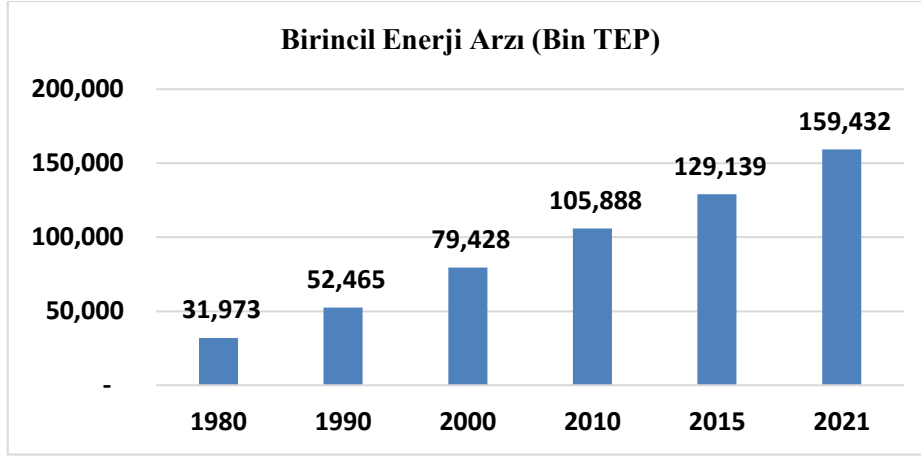
Şekil 16. 2002-2021 yılları arasında Türkiye elektrik tüketiminin değişimi (Change in Türkiye's electricity consumption between 2002-2021)

9.2. Enerji Görünümü ve Enerji Verimliliği

Kavramı (Energy Outlook and Energy Efficiency Concept)

Türkiye'nin 2021 itibarıyla %93,2'yi bulan şehirlileşme oranı [174] enerjiye olan talebi de artırmaktadır. Şekil 17'de görüldüğü gibi 1980 yılında 31,9 milyon TEP olan birincil enerji arzı,

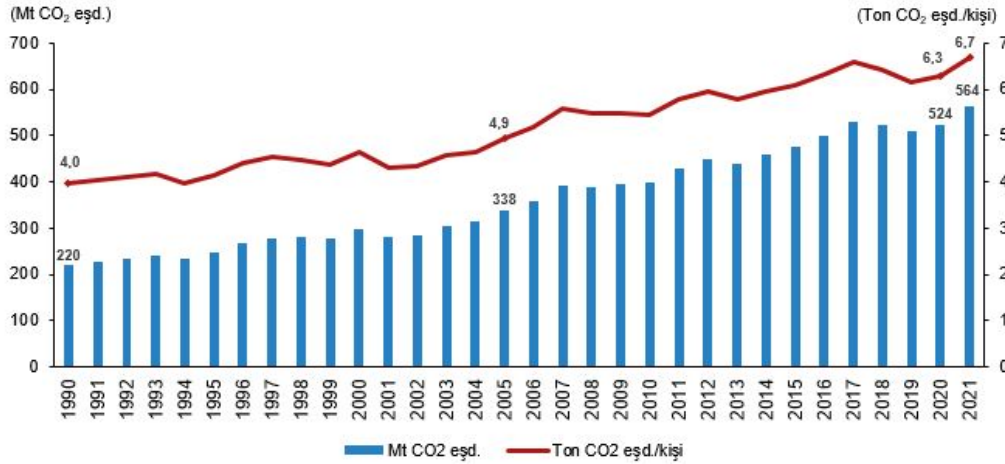
2021 yılında 159,4 milyon TEP'e ulaşmıştır [175]. Türkiye'nin enerji talebi üzerine yapılan bir çalışmada 2040 yılı için enerji talep tahmini 220,8 milyon TEP olarak hesaplanmıştır [176]. Bu veriler ışığında Türkiye'nin enerji talebinin zaman içerisinde daha da artacağını tahmin etmek doğru olacaktır.



Şekil 17. Türkiye'nin yıllar içerisindeki enerji arzı (Turkey's energy supply over the years)

1990-2021 yılları arasındaki trendin incelendiği sera gazı emisyon istatistiklerine göre (Şekil 18), 2021 yılı toplam sera gazı emisyonu bir önceki yıla göre %7,7 artarak 564,4 milyon ton (Mt)

CO₂ eşdeğeri olarak hesaplanmakta [177]. 1990 yılındaki kişi başı toplam sera gazı emisyonu 4 ton CO₂ olurken, 2021 yılında bu değer 6,7 ton CO₂ seviyesine çıktığı görülmüştür.



Şekil 18. Toplam ve kişi başı sera gazı emisyonu, 1990-2021 (Total and per capita greenhouse gas emissions, 1990-2021) [177]

1972-2002 dönemini kapsayan ve 82 ülkenin incelendiği çalışmada, ekonomik büyüme ile enerji tüketimi arasında pozitif korelasyon olduğu tespit edilmiştir [178]. Benzer üç çalışmada, 1970-2006 [179], 1980-2015 [180] ve 1990-2019 [181] yılları arasında içerecek şekilde Türkiye özelinde gerçekleştirilerek aynı sonuca ulaşılmıştır. Sektörel enerji tüketimi ile kişi başına düşen milli gelir

arasındaki ilişkiyi inceleyen bir diğer çalışmada ise, 132 ülkenin verileri üzerinde çalışılarak enerji tüketiminin kişi başına düşen milli geliri olumlu yönde etkilediği ileri sürülmüştür [183]. Yapılan çalışmalar ışığında, ekonomik büyüme ile enerji tüketiminin birbirlerini çift yönlü olarak etkiledikleri anlaşılmaktadır.

Ekonomik büyüme için gerekli olduğu sonucuna varılan enerji tüketimini düşürmeden, gerekli büyümeyi sağlayabilmenin en ucuz ve çevreci yolu olarak tüketilen enerjinin daha verimli kullanılması gösterilebilir. Enerji verimliliği ve enerji tasarrufu, her zaman örtüşmeyen iki ayrı kavramdır. Artan enerji verimliliği, enerji tasarrufu ile sonuçlanmayabilir veya bu kavramlar bağımsız olarak var olabilir ve politika müdahalesi ile ayrı ayrı hedeflenebilir. Enerji tasarrufu, enerji verimliliğinin iyileştirilmesinden ayrılabilir ve davranış değişiklikleri (kullanılmadığında ekipmanı kapatmak) veya sistem koşullarındaki değişiklikler (düşük iç ortam sıcaklığı, daha düşük üretim veya kullanım seviyeleri gibi) nedeniyle gerçekleşebilir [182]. Enerji tasarrufu var olan kullanımı kısıtlamaya odaklanırken, enerji verimliliği ise kullanıcıların konfor seviyesini düşürmeden enerjiyi daha etkin kullanmayı önceler.

Günümüzde enerji verimliliği yaygın olarak uygulanabilen, ekonomik ve güvenli enerji kaynaklarından biri olarak kabul edilmekte ve dünya genelinde enerji geçiş stratejilerinin önemli bir ayağı olarak görülmektedir. Enerji verimliliği konusunda yapılan akademik çalışmalar, politika yapıcılara olduğu kadar uygulayıcılara da yol

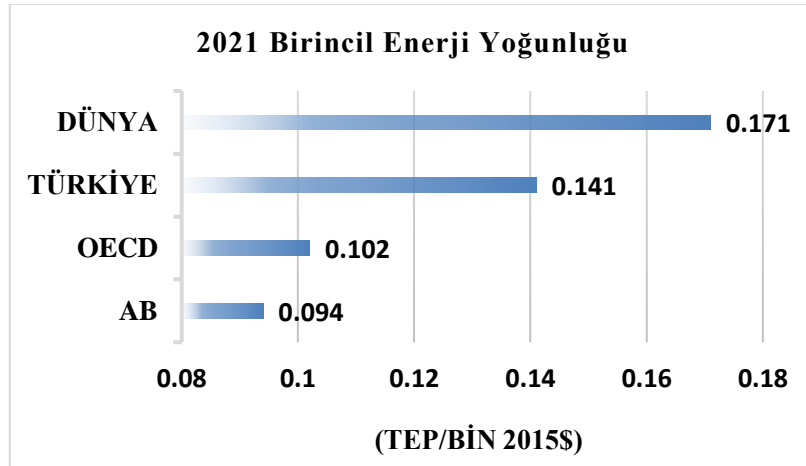
göstermektedir [183]. Dünyada enerji verimliliği genel olarak enerji yoğunluğu kavramı ile ölçülmektedir. Enerji yoğunluğu değerinin düşük olması, enerjinin verimli kullanıldığını göstermektedir. Enerji yoğunluğu genel olarak iki şekilde tanımlanabilir.

- Bir birim ürün elde edilebilmesi için harcanan enerji miktarı (özellik/spesifik enerji tüketimi)
- Gayri Safi Yurtiçi Milli Hasıla (GSYİH) başına tüketilen enerji miktarı (TEP: ton eşdeğer petrol)/belli bir baz yılına göre 1000 \$ GSYİH eldesi için tüketilen TEP cinsinden enerji miktarı

Enerji yoğunluğu ve kişi başına enerji tüketimi verisi, enerji verimliliğinin en yaygın kullanılan ölçütlerdir. Tablo 1'de görüldüğü gibi Türkiye'nin 2000 yılında 0,192 olan enerji yoğunluğu 2021 yılında 0,141'e düşmüştür. Aynı süreçte ekonomik büyümenin bir göstergesi olan fert başına enerji tüketiminin 1,19 TEP seviyesinden 1,88 TEP'e çıktığı görülmektedir. Tüketim artarken enerji yoğunluğunun düşüyor olması, enerjinin daha verimli kullanılarak ekonomik büyümenin sağlandığı sonucunu ortaya koymaktadır [175].

Tablo 1. Türkiye’de enerji yoğunluğu ve fert başına düşen enerji tüketimi (Energy intensity and energy consumption per capita in Türkiye) [175]

Yıl	Enerji Yoğunluğu	Fert Başına Enerji Tüketimi (TEP)
2000	0,192	1,19
2005	0,169	1,27
2010	0,172	1,43
2015	0,149	1,64
2021	0,141	1,88



Şekil 19. Birincil enerji yoğunluğu karşılaştırması (Primary energy intensity comparison) [175]

Uluslararası bir karşılaştırma yapabilmek adına Şekil 19'da enerji yoğunluğunun 2021 yılı itibariyle AB'de 0,094, OECD ülkelerinde 0,102, dünyada ise 0,171 olduğu gösterilmektedir [175].

1980'lerden sonra dünya genelinde enerji politikalarında enerji verimliliği uygulamaları önem kazanmaya başlamıştır [184]. Enerji verimliliği, sera gazı azaltımı ve enerjiye yönelik maliyetlerin düşürülmesi amacıyla geliştirilen politikalar, stratejiler ve yeni teknolojileri kapsayan çalışmalar olarak tanımlanmakta [185], sürdürülebilir kalkınmanın ve enerji arz güvenliğinin sağlanmasında önemli bir faktör olduğu

değerlendirilmektedir [176]. Yapılan çalışmalar sonucunda küresel enerji yoğunluğu 1990-2019 arasında yaklaşık %35 azalmıştır [186].

Enerji verimliliği ile ilgili bir diğer çalışmada, Amerika Enerji Verimli Ekonomi Konseyi'nin (ACEEE) 2022 yılı raporudur. 2022 yılı Uluslararası Enerji Verimliliği Puan Tablosu (The 2022 International Energy Efficiency Scorecard) adlı raporda Türkiye dahil 25 ülkenin uyguladıkları enerji verimliliği politikalarına göre karşılaştırma yapılmıştır. Aldıkları toplam puanlara göre ülkeler Tablo 2'de sıralanmaktadır [187].

Tablo 2. 2022 Uluslararası enerji verimliliği puan durumu (2022 International energy efficiency standings) [187]

Sıralama	Ülkeler	Puan	Sıralama	Ülkeler	Puan
1	Fransa	74,5	14	Meksika	46
2	İngiltere	72,5	15	Türkiye	45,5
3	Hollanda	71,5	16	Hindistan	41,5
3	Almanya	71,5	17	Endonezya	38
5	İtalya	68,5	18	Avustralya	35,5
6	İspanya	66	19	Brezilya	34
7	Japonya	63,5	20	Mısır	31,5
8	Tayvan	58,5	20	Tayland	31,5
9	Çin	57,5	22	Rusya	28
10	Amerika	54	23	Suudi Arabistan	25
11	Güney Kore	53	24	Güney Afrika	23,5
12	Polonya	51	25	Birleşik Arap Emirlikleri	21,5
13	Kanada	49,5			

9.3. Enerji Verimliliği Politikaları (Energy Efficiency Policies)

Enerji verimliliği alanında yaşanan gelişmelere rağmen Türkiye'nin, gelişmiş ülkelere kıyasla 'enerji yoğun' ekonomilerden biri olduğu Şekil 12'de görülmektedir. Uluslararası Enerji Ajansı (IEA) ve Eurostat verilerine göre ülkemizin enerji yoğunluğunun OECD ve AB-27 ortalamalarının üzerinde olması sebebiyle, enerji yoğunluğunu azaltıcı çalışmaların devlet politikalarıyla da desteklenmesi gerekmektedir. Enerji verimliliği alanındaki en kapsamlı yasal düzenleme 2 Mayıs 2007 tarihinde 26510 sayılı Resmî Gazete'de yayımlanan 5627 sayılı Enerji Verimliliği Kanunu'dur.

Enerji verimliliği kanununun yayınlanmasından sonra enerji verimliliği ile ilgili politikalara yönelik düzenlemeler, strateji belgeleri ve eylem planları

açıklanarak enerji politikalarının çerçevesi belirlenmiştir [176]. Koçtaşlan'nın yürürlükte olan yönetmelik ve mevzuatları incelediği çalışmasında, Türkiye'nin enerji verimliliği ile ilgili yasal düzenlemelerinin Avrupa Birliği'nin enerji verimliliği düzenlemeleri ile benzer seviyede olduğu sonucu aktarılmaktadır [188]. Yağcı ve Sözen ise, 2015-2017 dönemi verilerine göre 18 Avrupa Ülkesi ile karşılaştırıldığında Türkiye'nin verimlilik performansının ortalamasının altında kaldığını tespit ederek, var olan politikaların daha iyi benimsenmesi için halkın aydınlatılması gerektiğini paylaşmışlardır [189].

5627 Sayılı Enerji Verimliliği Kanunu ve bu kanuna bağlı olarak çıkartılan Binalarda Enerji Performansı yönetmeliğine göre, 1 Ocak 2011'tarihi itibari ile 50 m² üzeri inşaat alanına sahip tüm binalarda Enerji Kimlik Belgesi (EKB) çıkarılması zorunlu hale

gelmiştir. Enerji Kimlik Belgesi, asgari olarak binanın enerji ihtiyacı, enerji tüketim sınıflandırması, yalıtım özellikleri ve ısıtma ve/veya soğutma sistemlerinin verimi ile ilgili bilgilerini içeren bir belgedir [190].

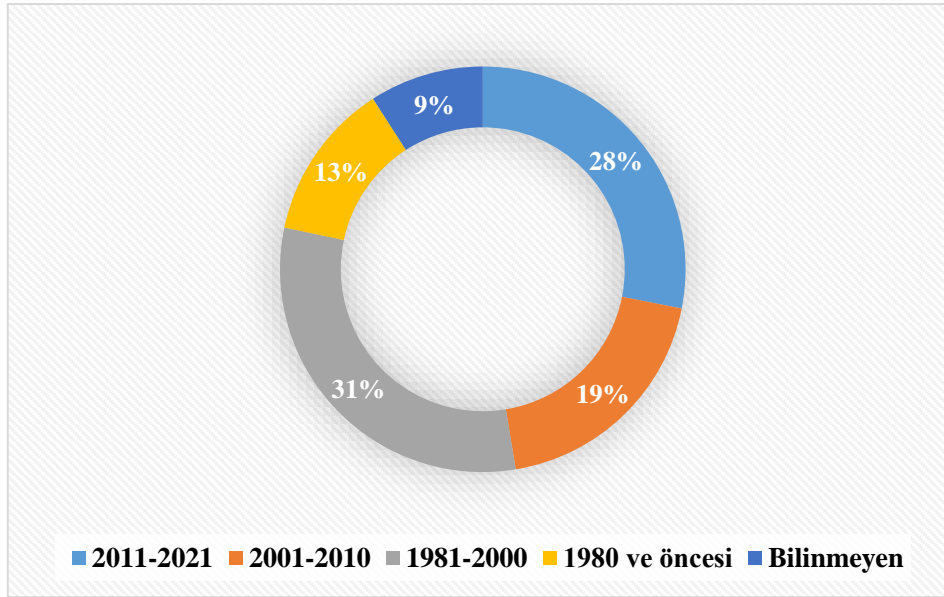
Binalarda Enerji Performansı Yönetmeliği ile getirilen önemli konulardan biri de ısı yalıtım projesinin gerekliliğidir. Yeni yapılacak binalara yapı kullanma izin belgesi alınabilmesi için içeriği mevzuata uygun olarak hazırlanmış ısı yalıtım projesi hazırlanması gerekmektedir. Aksi takdirde yapı ruhsatı alınamayacaktır. Ayrıca binalarda ısı yalıtımına standart getiren TSE 825 ve konutlarda kullanılan elektrik ev aletlerine yönelik A ve üzeri derecelendirme çalışması yürürlüğe sokulmuştur.

Toplam inşaat alanı en az 20.000 m² veya yıllık toplam enerji tüketimi 500 TEP ve üzeri olan ticari ve hizmet binaları ile toplam inşaat alanı en az 10.000 m² veya yıllık toplam enerji tüketimi 250 TEP ve üzeri olan kamu kesimi binalarının yönetimleri, bina ve tesislerinde enerji yöneticisi bulundurma, tüketimi 1000 TEP üzeri kurumlarda ise enerji yöneticisi birimi oluşturma zorunluluğu getirilmiştir [191].

Bu çalışmalara ek olarak, binaların enerji verimliliğini denetleyerek etüt ve danışmanlık hizmeti sunan Enerji Verimliliği Danışmanlığı (EVD) şirketleri ile kamu binaları için 15 yıla kadar vadeli performans sözleşmesi imzalanabilmesi gibi verimlilik artırıcı yenilikler yürürlüğe girmiştir [192]. Yürürlükteki en güncel plan olan On Birinci Kalkınma Planında 2019-2023 (OBKP), daha önceki planlara göre en büyük farkın enerji verimliliği ile ilgili politik bakışta yaşandığı tespit edilmiştir. Bu planla birlikte tespit edilen iyileştirme adımları sektörel bazda farklılık göstermeye başlamıştır [193].

9.4. Konut Veri ve İstatistikleri (Housing Data and Statistics)

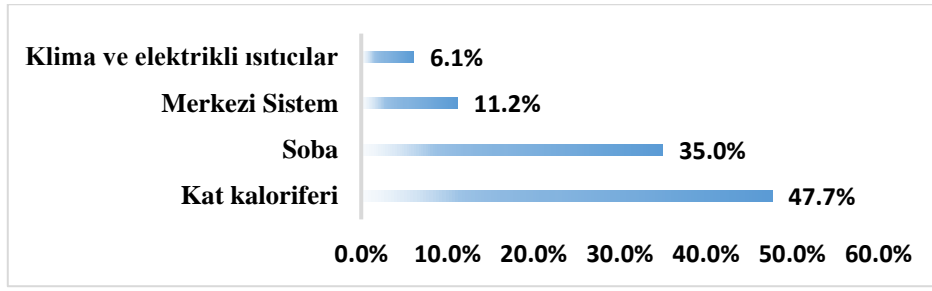
Türkiye 'nin nüfusu 2021 yılında 84 milyon 680 bin 273 kişi olurken, 2021 Eylül sonu itibarıyla toplam konut sayısı 40,2 milyon olarak açıklanmaktadır [194]. Konutların inşa edildiği yıllar incelendiğinde, %30,9'unun 1981-2000, %28,1'inin 2011-2021, %19,3'ünün 2001-2010 yılları arasında, %12,6'sının ise 1980 ve öncesine ait olduğu Şekil 20'de görülmektedir [195].



Şekil 20. 2021 itibarıyla konutların inşa edildiği zaman aralığı (%) (Time period in which houses were built as of 2021) [195]

Konutlarda tercih edilen ısıtma sistemlerine bakıldığında (Şekil 21), %47,7 ile kat kaloriferinin ilk sırada yer aldığı görülmektedir. Bunu sırasıyla %35 ile soba ve %11,2 ile merkezi kalorifer tertibatı izlemektedir. Isıtmada kullanılan yakıt türleri

incelendiğinde ise, ilk sırada %59,6 ile doğalgazın yer aldığı tespit edilmektedir. Doğalgazı sırasıyla %33,5 ile kömür, odun türü katı yakıt ve son olarak %6,2 ile elektrik takip etmektedir [195].



Şekil 21. 2021 itibariyle konutlarda tercih edilen ısıtma sistemleri (%) (Preferred heating systems in residences as of 2021) [195]

Ülkemizde kullanılan enerjinin yaklaşık %70'i ithal edilirken bu enerjinin yaklaşık %30'u konutlarda kullanılmaktadır. Konutların ülke genelindeki nihai elektrik tüketimine bakıldığı zaman ise, bu oranın %43'ü aştığı görülmektedir [196].

Konut sektörü, enerji tüketiminde sanayi sektöründen sonra ikinci sırada yer almaktadır. Ancak, ülkemizdeki binaların çoğunluğunun Binalarda Enerji Performansı yönetmeliğinden önce yapılmış olması sebebiyle (%62,8) güncel enerji verimliliği standartlarını karşılayamamaktadır. Bu nedenle yeterli önlem alınmamış eski binalarda enerji kayıplarının yüksek olduğu tahmin edilmektedir.

Türkiye'deki bina sayısının yaklaşık 8,5 milyon olduğu ve bunun da %86,8'nin konutlardan oluştuğu düşünüldüğünde, yapılacak verimlilik çalışmalarının kazandıracığı potansiyel tasarruf miktarının yıllık 7 milyar doları bulacağı hesaplanmaktadır [196]. Tasarruf edilebilecek bu bütçe ile çevrenin korunması adına geliştirilecek diğer projeler finanse edilebilir.

9.5. Isıtma (Heating)

Türkiye'deki hane halkının mesken ısıtmasında yaptığı tercihlerde belirleyici olan etkenleri ele alan sınırlı sayıda çalışma bulunmaktadır. Bu alanda yapılan araştırmalar incelendiğinde, bulunan çalışmalarının neredeyse tamamının Hanehalkı Bütçe Anketi'nin (HBS) verilerini kullandığı tespit edilmiştir [197–200]. İpek ve arkadaşları ise mesken ısıtma tercihlerini araştırdıkları çalışmalarında, 4 yıllık süre zarfında (2016, 2017, 2018, 2019), 5706 hanede 22803 gözlemci ile gerçekleştirilen Gelir ve Yaşam Koşulları Araştırması (ILC) sonuçlarından yararlanmıştı [201].

Ekonomik gelişim seviyelerine dayanan araştırmaların sonuçları incelendiğinde, enerji

basamağı hipotezine (Energy Ladder) uygun olarak hane halkının gelir düzeyi arttıkça temiz enerji kaynaklarına olan yönelim de artmaktadır. Mesken içinde sağlığa zararlı kirleticiler yaymayan enerji kaynaklarına temiz enerji kaynakları denmektedir. Temiz enerji kaynaklarına örnek olarak etanol, metanol, LPG, doğal gaz ve elektrik gösterilebilir [202].

Isıtma tercihlerinde etkili olan bir diğer faktörün de sosyo-kültürel yapı olduğu ortaya çıkmıştır. Çalışmalara göre eğitim seviyesi yükseldikçe hane halkının odun ve kömür kullanma ihtimali düşerken, doğal gaz ve elektriği tercih etme olasılığı artmaktadır. Bu durum eğitim seviyesi daha yüksek bireylerin çevre sorunları konusunda daha duyarlı olmasından kaynaklanmaktadır [201]. Öte yandan, müstakil evlerde yaşayan hane halkının ısınma için odun, kömür veya gübreyi tercih etme olasılığı daha yüksektir. Türkiye'nin kırsal kesimlerinde insanların büyük bir kısmının müstakil evlerde yaşaması nedeniyle bu durum dikkate değer bir faktördür.

Sonuç olarak Türkiye'deki eğitim ve gelir seviyelerinde yaşanacak artışın temiz enerji talebini önemli ölçüde artıracığı beklenmektedir [201]. Bu nedenle hanelerin faydalanabileceği yenilenebilir enerji kaynaklarının, hane bazlı kurulumlarını kolaylaştırıp teşvik edecek politikaların yürürlüğe girmesi faydalı olacaktır.

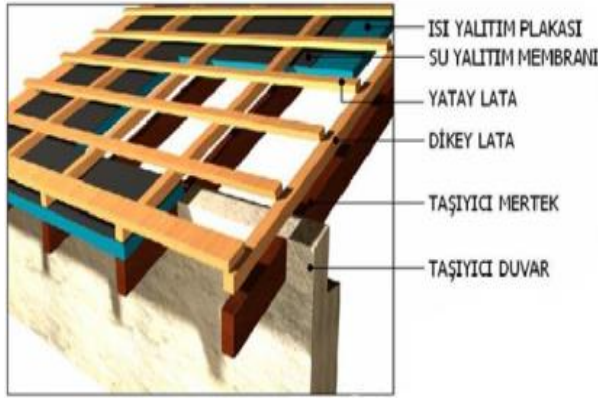
9.6. Yalıtım ve Isıl Konfor (Insulation & Thermal Comfort)

Binalarda iklimlendirme, ısı konforu sağlamak amacıyla yapılırken tüketilen enerjini %80'nini oluşturmaktadır [203]. Isıl konfor, kişinin bulunduğu ortamla ilgili bir sorun yaşamadan verimli şekilde çalışabileceği ısı parametrelerinin sağlanması olarak açıklanabilir [204].

Yapısı gereği öznel bir değerlendirme kriteri olup kişilerin his ve duygularına dayanan ısı konfor, aynı mekânda bulunan farklı kişiler tarafından değişik yorumlanabilmektedir [205]. Uluslararası normlara göre ısı konfora sahip iç mekân sıcaklıkları yaz aylarında 21-22 °C, kış aylarında ise 20-21 °C'dir [204]. Değişen oda sıcaklıklarının çalışma verimine olan etkisi Şekil 22'de verilmiştir [206].



Şekil 22. Sıcaklığın çalışma verimine etkisi (The effect of temperature on working efficiency) [206]



Şekil 23. Mertek arasına, mertek altına, mertek üzerine yalıtım (Insulation between, under and on the rafters) [207]

İç ortam sıcaklığı ile iç yüzey sıcaklığı farkının 2-3 °C 'den fazla olmadığı durumlar kullanıcılarda konfor hissiyatı oluşturmaktadır. Yeterli yalıtıma sahip olmayan binalarda ısı konfor sağlanamamaktadır [208]. Bu duruma örnek olarak yalıtımlı duvar iç yüzey sıcaklığı ile yalıtımsız duvar iç yüzey sıcaklığı arasındaki farkın yaz aylarında 17-18 °C seviyesine çıkması gösterilebilir [209]. Yalıtım eksikliği nedeniyle binalarda meydana gelen ısı kayıpları genel olarak dış duvar, pencere, çatı, bodrum döşemesi ve hava kaçağı olmak üzere 5 yerde incelenebilir [210, 211]. Çatı yalıtımının uygulama şeması Şekil 23'te görülebilmektedir. Türkiye'de farklı iklim koşulunda uygulanacak yalıtım miktarları TS 825 Standardında belirtilmektedir.

9.7. Pasif Ev (Passive House)

Türkiye ve benzer iklim şartlarına sahip Avrupa ülkelerindeki 2000 yılı ve sonrası inşa edilmiş yapılar incelendiğinde, Türkiye'deki yapıların ortalama %50 daha fazla enerji tükettiği ortaya çıkmıştır [212]. Aşıkoğlu ve arkadaşları çalışmalarında bu sorunun çözümüne katkı sunabilecek, pasif teknikler kullanarak binalardaki enerji veriminin artırılmasını incelemiştir.

Pasif Ev kavramı, temelde karasal iklime sahip bölgelerde yer alan yapıların ısıtma enerjisi ihtiyacının azaltılmasına yönelik olarak ortaya çıkmıştır [213, 214]. Bir yapının gerekli koşulları karşılayabilmesi için, genellikle daha planlama aşamasında enerji kayıplarını minimize edecek şekilde bulunduğu fiziki çevreyle uyumlu tasarlanması gerekmektedir [215]. Pasif Ev şartnamesinde özet olarak yıl boyunca 1 m² yaşam alanını ısıtmak için 1.5 litreden az petrol, 1.5 m³'ten az doğalgaz ve 15-20 kWh/m²'den az elektrik kullanımı hedeflenmektedir [216].

İzmir Karşıyaka'da bulunan 8 katlı, 36 daireli bir bina, Pasif Ev Enstitüsü tarafından hazırlanan EnerPHit sertifika programı üzerinden değerlendirilerek Pasif Ev standardını karşılayabilmesi için gerekli olan iyileştirmeler araştırılmıştır. Araştırmalarının sonucunda yapıda asgari bir iyileştirme yapılması durumunda [217]:

- Birincil enerji ihtiyacında %49 düşüş,
- Isıtma enerjisi ihtiyacında ise %63 tasarruf sağlanabileceği ortaya çıkmıştır.

9.8. Gri Suyun Yerinde Arıtılması (On-site Greywater Treatment)

Su kıtlığı ile mücadele kapsamında evsel atık suyun karakterizasyonlarına bağlı olarak ayrık (örneğin; gri su, siyah su gibi) halde toplanması, nüfus yoğunluğu yüksek şehirler için dikkate alınmaya başlanan yenilikçi çözümlerden biridir. Özellikle İstanbul gibi su talebinin giderek arttığı yerleşim bölgelerinde, küvet ve duşa kabinlerden, banyo lavabolarından, çamaşır yıkama ve kurutma ünitelerinden ve mutfak lavabolarından toplanan gri suyun arıtma tesislerine gitmeden yerinde arıtılarak yeniden kullanılması fikri araştırılmaya başlanmıştır [218].

Gri su diğer atık su çeşitlerine göre daha büyük hacimlerde üretilirken, kirlilik seviyesi siyah suya

göre daha düşüktür [219]. Buna karşın $10^4 - 10^6$ CFU/ml fekal koliform içerebilen gri suyun, özellikle yaz aylarında artan patojen miktarı da göz önüne alındığında çeşitli artıma proseslerine (fiziksel, kimyasal veya biyolojik) tabi tutulması zorunlu görülmektedir [220, 221]. Gelişmiş ülkelerde günlük olarak kişi başı 100-150 L seviyelerinde oluşan evsel atık suyun %60-70'lik kısmı gri sudan oluşmaktadır [222]. Başarılı bir şekilde toplanıp uygun teknolojilerle arıtılabilen gri sular, tuvaletlerde sifon suyu olarak kullanılabilir [218].

Gri suyun yeniden kullanımı gerekli altyapı, kuvet, duş, çamaşır makinesi ve diğer ilgili ünitelerin çıkışından toplanabilmesi için ayrı bir hattın inşasına ihtiyaç duyması nedeniyle binaların İlk Yatırım Maliyetlerini (İYM) arttırmaktadır. Köse İstanbul'da yaptığı araştırmada, 160 ve daha fazla daire içeren yüksek katlı yapıların yatırım maliyetine göre fizibil hale geleceğini tespit etmiştir [218].

9.9. Otopark Yönetmeliği (Parking Regulations)

25 Mart 2021 tarihinde yayımlanan 31434 sayılı Resmî Gazete'de belirtildiği üzere, 80 metrekareden küçük her 3 daire için en az 1, 80-120 metrekare arasındaki her 2 daire için en az 1, 120-180 metrekare arasındaki her daire için en az 1 ve 180 metrekare üzeri her daire için 2 otopark yeri ayrılması zorunlu tutulmuştur. Kapalı otoparklarda, sürücü ve yayaların güvenliğini sağlayabilmek için şartnamelerde belirtilen aydınlatma seviyelerinin karşılanması gerekmektedir. Binalarda tüketilen elektrik enerjisinin yaklaşık %20'sinin [223] aydınlatma için kullanıldığı göz önüne alındığında, kullanımı giderek artacak otoparklardaki aydınlatmanın verimliliği önem kazanmaktadır.

Kocaman'ın bu konu üzerine Bitlis Eren Üniversitesi'nde yer alan kapalı otoparklarda yaptığı araştırmada, aydınlatma sistemlerinde eski nesil floresanlar yerine LED ampullerin kullanılması durumunda ulaşılabilecek tasarruf miktarı ile yapılacak yatırımın kendini 1,83 yılda amorti edeceğini belirtmektedir [224].

9.10. Enerji Verimliliği: Örnek Çalışmalar (Energy Efficiency: Case Studies)

Akgül ve arkadaşları 2022 yılında tamamladıkları çalışmalarında, öncelikle 2007 yılında inşa edilen okul binasının enerji verimliliği etüdünü

gerçekleştirip sonrasında ise yürürlükteki yönetmelikleri göz önüne alarak tespit ettikleri eksiklikler üzerine çeşitli önerilerde bulunmuşlardır [30]. Yapılacak toplam 319.653 TL yatırım sonucunda:

- Yalıtım ve ortam ısısının takibi ile ısıtma talebinde %53 düşüş
- Floresanların LED'ler ile değiştirilmesi ile aydınlatma giderlerinde yıllık %56 azalış
- Yıllık CO₂ salınımlarında %53 düşüş ile 66,18 ton CO₂/yıl emisyon tasarrufu
- 334.379 kWh/yıl tasarruf ile yatırımın 6,1 yıl içinde geri ödeneceğini hesaplanmaktadır.

Bu örnekte de görüldüğü üzere, 2007 yönetmeliğinden önce inşa edilmiş okullarda yapılacak verimlilik çalışmaları ile yüksek miktarda enerji tasarrufu sağlanabileceği anlaşılmaktadır.

Coşkun ve Oktay çalışmalarında Balıkesir Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık binasının enerji taramasını yaparak, enerji verimliliği konusundaki potansiyel iyileştirme noktalarını incelemişlerdir [225]. Araştırmacılar analizlerine elektrik ve su tüketiminden sağlanacak kazançlar ile doğal aydınlatmanın getireceği verim artışı dâhil etmişlerdir. Bu çalışmanın sonuçlarına göre yapılacak dış yalıtım ile:

- Enerji harcanmasında %34 tasarruf,
- CO₂ Emisyonunda 89 ton azalış
- Doğalgaz tüketiminde ise 45.000 m³ düşüş ön görülmektedir.

Altınöz ve Mıhlıyanlar tarafından yapılan bir araştırmada, yalıtımlı ve yalıtımsız mevcut binalara aktif güneş enerjisi sistemlerinin entegre edilmesiyle yakalanacak tasarruf miktarı araştırılmıştır [226]. Aktif güneş enerjisi sistemlerinin eklenmesiyle:

- Yalıtımlı binaların enerji tüketimlerinde %17, CO₂ salınımlarında %32,
- Yalıtımsız binaların enerji tüketimlerinde %32, CO₂ salınımlarında %67 düşüş gözlemlenmiştir.

İki katlı bir yapının yalıtımlı ve yalıtımsız hallerinin karşılaştırıldığı Ülker'in yüksek lisans çalışmasında aktarıldığı üzere, ısı yalıtımlı yapının %78,4 daha az enerji tükettiği görülürken, CO₂ emisyonlarında da %70 düşüş saptanmıştır [227]. Binalarda ısı kaybına yol açan bölgeler sırasıyla [228]:

- %20-50 oran ile ısı köprülerinde,
- %15-25 oranında dolgu duvarlarda,
- %25 tavanda,
- %10-25 pencerelerde,
- %10 döşemeler şeklinde sıralanmaktadır.

Uçar ve Balo'nun Türkiye'nin çeşitli bölgelerinde yapılan yalıtım çalışmalarını incelediği araştırmalarında [229]:

- XPS ile yalıtılan binalardaki en uzun geri ödeme süresine sahip il 4,5 yıllı İskenderun olmaktadır. İlman iklime sahip bölgede ihtiyaç duyulan ısıtma miktarı düşük olduğundan, geri ödeme süresi uzamaktadır.

Güçül ve Köksal araştırmalarında Ankara'da yer alan 500 m² kullanım alanına sahip bir konutun ısıtma performansını inceleyerek, olası iyileştirme çalışmalarının neticesinde elde edilecek tasarruf miktarlarını paylaşmışlardır [230].

- Pencere değişimi ile 25 GJ,
- Dış duvar izolasyonu ile 4 GJ,
- Çatı izolasyonu ile 51 GJ enerji tasarrufu,
- Sıcak su temini için güneş kolektörü kurulmasıyla ise yıllık %68 iyileştirme eldesi.

Çomaklı ve Yüksel yaptıkları çalışmada, Atatürk Üniversitesi ısıtma merkezinin enerji ve ekserji miktarlarını analiz etmiştir. Analiz sonuçlarına göre: [231].

- Gerekli yalıtımın uygulanmasıyla yakıt tüketiminde %30 tasarruf öngörülmektedir.

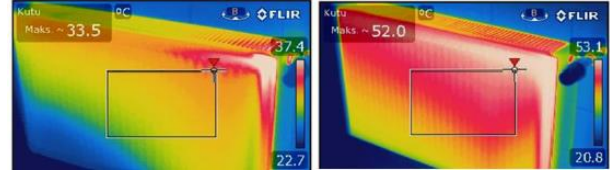
Kılıçlı'nın Ege Üniversitesi'nde yer alan Uluslararası Bilgisayar Enstitüsü'nün enerji verimliliğini artırmaya yönelik yaptığı çalışmalara göre gerekli iyileştirmelerin yapılması sonucunda [232]:

- Binaların yıllık enerji tüketiminde %21 tasarruf sağlanmaktadır.

Yürük ve arkadaşlarının, binalarda yer alan tesisatların düzenli temizlenmesinin ısıtma performansı üzerine olan etkisini araştırdıkları çalışmalarının neticesinde [233]:

- Radyatör sıcaklıklarında 5°C'lik artış görülürken,
- Isı transfer mekanizmasında %17,2'lik iyileşme,

- Yakıt tüketiminde ise %21,16'lık bir düşüş saptanmıştır.



Şekil 24. Mutfak radyatörünün termal kamera görüntüleri a)TRV'li b)TRV'siz (Thermal camera images of kitchen radiator a)With TRV b)Without TRV) [234]

Karaçam ve arkadaşlarının termostatik radyatör vanası (TRV) kullanımının etkileri hakkında yaptıkları deneysel çalışmalara göre, Şekil 24'te görülebileceği üzere TRV'nin yer aldığı radyatörün yüzeyinde daha homojen bir ısı dağılımı gözlemlenmektedir [234]. Termostat, oda sıcaklığı ayarlanan değere geldiği zaman otomatik olarak vana üzerindeki pimi iterek su akışını keser ve vanayı kapatır. TRV, oda sıcaklığı iki derece düşüncü tekrar devreye girerek vana üzerindeki pimi itmeyi bırakır ve peteğin tekrar ısınmasını sağlar.

Bu durumun neticesine göre:

- Yakıt tüketiminde %40 tasarruf beklenirken,
- CO₂ Miktarındaki düşüş yıllık 470 kg olmaktadır.
- Yatırımın geri ödeme süresi ise 1,67 yıl olarak hesaplanmaktadır.

10. SONUÇ VE ÖNERİLER (CONCLUSION AND RECOMMENDATIONS)

Düzenli ekonomik büyüme ile kişi başı enerji tüketimi arasında yüksek korelasyon bulunduğu pek çok araştırmada dile getirilmektedir [178–181, 235]. Sağlıklı ve sürdürülebilir bir kalkınma hamlesi için enerji tüketiminin kısıtlanması değil, tüketilen enerjinin daha verimli kullanılması gerektiği aktarılmaktadır [182]. Enerji verimliliği çalışmaları sonucunda belirlenen hedeflere ulaşılması halinde, kişi başı enerji tüketimi artarken enerji yoğunluğunun düşmekte olduğu gözlemlenecektir.

Enerji verimliliği projelerinin hayata geçirilebileceği öncelikli alanlardan birisi de enerji yoğun olan inşaat sektörüdür. Tüm yaşam döngüsü boyunca (inşa, işletme, yıkım) yoğun miktarda enerjinin tüketildiği konutlarda, yapılacak

yatırımlar ile hızlı ve yüksek verim artışlarının yakalanabildiği görülmektedir [196].

Enerji verimliliği çalışmalarında gerçeğe en yakın projeksiyon ancak verinin doğru kaynaktan belirli bir süreklilik içerisinde toplanmasıyla oluşturulabilmektedir. Alınacak kararların gündelik hayat koşulları ile uyum derecelerinin belirlenmesi için nicel verilere dayalı sonuçlar elde edebilmek çok önemlidir. Bu amaca yönelik yapılan bir çalışmanın neticesinde araştırmacıların önerileri şu şekildedir [116]:

- Ortak yaşam alanlarında anlık ölçüm yapacak sensörler (sıcaklık, nem ve CO₂) yerleştirmek
- Aşırı sıcak ya da soğuk gibi kritik ısı değişimlerinin düzenli olarak takip ve analizi
- Toplanan verilerin işlenerek makine öğrenmesi üzerinden enerji verimliliği önerilerinin eldesi
- HVAC sistemlerinin otomasyon üzerinden kontrol edilerek her yapı şartına cevap verebilir hale getirilmesi
- Kullanıcıları hem iç hava kalitesinin hem de sürdürülebilir enerji tüketiminin önemi konusunda bilinçlendirmek

HVAC sistemlerinin IoT ile entegre edilmesi, ortam sıcaklığı ve CO₂ konsantrasyonu gibi parametrelerinin sürekli gözlem altında tutulmasını sağlayarak, optimum konfor koşullarını korurken aynı zamanda gereksiz enerji tüketiminin de önüne geçmektedir [116].

Yürütülecek çalışmaların verimli bir şekilde ilerleyebilmesi için öncelikle durum tespitinin doğru yapılması, sonrasında da ulaşılabilir gerçekçi hedeflerin belirlenmesi gerekmektedir. Çalışmalar sırasında toplanacak verilerin sektör paydaşları ile açık bir şekilde paylaşılması, alanda çalışacak yeni kişi ve kuruluşların katılımını teşvik edecektir. Kullandığı enerjinin önemli bir kısmını ithal eden (%70) Türkiye'nin, enerji verimliliği konusunda enerji zengini ülkelere kıyasla daha fazla mesafe kat etmesi gerektiği aşikardır. En son Ulusal Enerji Planı'nda yinelenen enerji bağımsızlığı hedeflerine ulaşmak için, başta kamu olmak üzere tüm toplum kesimlerinin açıklanan politikaları benimseyerek üzerlerine düşen yükümlülüklerini yerine getirmesi gerekmektedir. Belirlenen hedeflere ulaşarak iklim değişikliğinin yol açtığı sorunların minimize etme gayesi, özel sektör ve kamunun koordineli bir şekilde çalışmasını zorunluluk haline getirmektedir.

Demirsoy ve arkadaşlarının 2015-2017 yılları arasında ülke genelinde il bazlı konut tipi binaların

enerji performanslarını inceledikleri çalışmalarında, enerji verimliliği çalışmalarının hız kazanıp uygulanabilirliğinin artabilmesi için çeşitli öneriler aktarılmıştır [236]. Bu öneriler şu şekilde sıralanabilir:

- Enerji Kimlik Belgesi'nde daha üst enerji sınıflarına çıkılmasına olanak sağlayan yenilenebilir enerji kaynaklarının konutlarda kullanımı teşvik edilmelidir.
- Halihazırda EKB yönetmeliğinde yeni binalar için minimum değer olarak kabul edilen C sınıfı, mevcut binalar için uygulanmaya başlanarak yeni binalarda bu değer B sınıfına yükseltilmelidir.
- Belirlenecek bir sınıfın üzerinde yer alan konutların inşası için teşvik ve belirli bir miktar hibe verilmeli, üretilecek konutların hem alım-satım aşamasında hem de oturma sırasında çeşitli vergi indirimleri sağlanmalıdır.
- Yapılan işlemler belirli aralıklarla alanında yetkin kişiler tarafından denetlenerek yönergelere uygunluğu kontrol edilmeli ve tespit edilen uygunsuzluklara idari para cezası öngören yasal düzenlemeler çıkarılmalıdır.

Bina cephelerinde yapılacak mantolama ve yalıtım çalışması ile ısıtma giderlerinde %12 ile %47 arasında tasarruf sağlanması mümkün gözükmektedir [237]. 15.000-50.000 € arasında tutacağı öngörülen yatırımın, elde edilecek tasarruf ile kendini beş ile dokuz yıl arasında geri ödeyeceği hesaplanmaktadır. Buna karşılık sadece termal yalıtımlı camların kullanılması ile kazanılacak iyileştirme oranı %10'nun altında kalırken, geri ödeme süresi on beş yılın üzerine çıkmaktadır. Bu sonuçlar literatürde yapılan diğer çalışmaların sonuçları ile benzerlik göstermektedir [238-241]. Çalışmaların tamamına bakıldığında, maksimum verimin elde edilebilmesi için dış cephe yalıtımının bir bütün olarak ele alınması gerektiği ortaya çıkmaktadır.

Yenilenebilir enerji kaynaklarının, üretim verim ve güvenirliliğini artıran enerji depolama sistemlerinden olan termal depolamanın kullanılmaya başlanmasıyla birlikte CO₂ emisyonlarında %21,42 düşüş görülürken [70], bu oran hidrojen bazlı depolamanın entegre edildiği hidrolik ve güneş enerji kurulumlarına sahip sistemde %50 oranını aşmaktadır [106]. Güncel elektrik fiyatları göz önüne alınarak yapılan projeksiyonlar göreyse, depolamalı fotovoltaik kurulumların herhangi bir ek sübvansiyon devreye

alınmaksızın 7 yıldan kısa sürede kendini geri ödeyeceği belirtilmektedir [71].

Düşük maliyetler (2.000 €'dan daha az) ile eski tip ampulleri yeni nesil LED ampuller ile yenileyerek aydınlatma kaynaklı elektrik tüketiminde %50-75 arasında bir tasarruf sağlanabilirken, edilecek tasarruf miktarı ile bu yatırımın geri ödeme süresi iki yıldan az olmaktadır [242].

Fuel oil kullanan verimsiz kazanların modern biyoyakıt kazanlarıyla değiştirilmesi nispeten daha yüksek bir yatırım gerektirirken (15.000-45.000 €), yeni kazanların sahip olduğu yüksek verimlilik sayesinde ısıtma giderleri %20 ile %30 arasında azaltılabilmektedir. Verimlilik artışının yanı sıra, biyoyakıt fiyatlarının fuel oile göre daha düşük olması ile yapılacak yatırımın geri dönüşü iki ile beş yıl arasında sağlanabilmektedir. Buna ek olarak biyoyakıt kullanan yeni nesil kazan ve şofbenlerin, fuel oil ile çalışan eski versiyonlarla karşılaştırıldığında CO₂ emisyonlarında %95 azalma potansiyeli bulunmaktadır [237]. Diğer yandan yerden ısıtmaya sahip ısı pompalı sistemin, aynı yapıda kullanılacak doğalgaz kazanlı sisteme göre işletme maliyetinde yıllık %36 tasarruf kazandırabileceği tespit edilmiştir [66].

Artan nüfusun tatlı su ihtiyacının karşılanabilmesi adına, deniz suyunun arıtılması gibi [137-141] hane halkı için ulaşılması güç yöntemlere alternatif olarak yağmur suyu hasadı ekolojik bir çözümdür. Bu yöntemle toplanacak yağmur suyunun [142], gerek duyulan zamanlarda evsel ihtiyaçlar için kullanılmasının %30-60 arasında tasarruf sağlayabileceği ön görülmektedir [144].

DWHR sistemleri sağladıkları elektrik tasarrufu ile elektrikli şofbenlerle birlikte kullanıldıkları zaman yapılacak yatırımın geri ödeme süresi 4 ile 9 yıl arasında değişmektedir. Elektrik fiyatlarının olası yükselişi ile bu sürenin daha da kısalacağı öngörülmektedir. Doğal gazla çalışan şofbenler söz konusu olduğunda ise geri ödeme süreleri 15 yılı aşmaktadır, bu durumda geri kazanım sistemleri ancak gaz fiyatlarında yaşanacak büyük yükselişlerden sonra avantajlı hale gelebilecektir [162].

Yaklaşık 8,5 milyon yapıda 40,2 milyon konutun yer aldığı Türkiye'de, toplumun geniş kesimlerini içerisine alacak bir yenileme hareketi ile yıllık 7 milyar doların (\$) [196] üzerinde bir tutarın boşa gitmesinin önüne geçilebilir. Sağlanacak tasarruf miktarı, en başta iklim ve nüfus değişikliklerine

bağlı olarak giderek artan su kıtlığı sorunu ile mücadele olmak üzere toplumun refah seviyesini artırıcı diğer yatırımlarda kullanılabilir.

KISALTMALAR (ABBREVIATIONS)

ACEEE	Amerika Enerji Verimli Ekonomi Konseyi
AI	Yapay zekâ
AMR	Otomatik sayaç okuma
ASHP	Hava kaynaklı ısı pompası
BIPV	Binaya entegre fotovoltaik sistem
BMS	Bina yönetim sistemleri
BS	Bataryalı depolama
CSS	Chirp yayılma spektrumu
DWHR	Atık sıcak sudan ısı geri kazanımı
EC	Avrupa Komisyonu
ECM	Enerji tasarrufu önlemleri
EE	Gömülü enerji
EGD	Avrupa Yeşil Mutabakatı
EGHG	Gömülü enerji sera gazı emisyonları
EPBD	Binaların Enerji Performansı Direktifi
EVD	Enerji verimliliği danışmanlığı
GSHP	Toprak kaynaklı ısı pompası
HBS	Hane halkı bütçe anketi
HVAC	Isıtma, havalandırma ve iklimlendirme
IEA	Uluslararası Enerji Ajansı
ILC	Gelir ve yaşam koşulları araştırması
İYM	İlk Yatırım Maliyeti
KFL	Kompakt flüoresan lambalar
LCA	Yaşam döngüsü analizi
LOHC	Sıvı organik hidrojen taşıyıcılar
LPWA	Düşük güçlü geniş alan ağı
LTRS	Uzun vadeli yenileme stratejisi
MMR	Manuel sayaç okuma
NSEB	Net sıfır emisyonlu bina
NZE	Net sıfır enerji
nZEB	Neredeyse sıfır enerjili binalar
NZEB	Sıfır enerjili binalar
OBKP	On Birinci Kalkınma Planı 2019-2023
OECD	Ekonomik Kalkınma ve İş birliği Örgütü
RES	Yenilenebilir enerji kaynakları
SESH2ES	Hidrojen bazlı enerji depolama sistemleri
TEP	Ton eşdeğer petrol
TES	Termal enerji depolama

TRV	Termostatik radyatör vanası
XPS	Ekstrüde polistiren
ZEB	Sfır emisyonlu binalar

ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazarı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

The author of this article declares that the materials and methods they use in their work do not require ethical committee approval and/or legal-specific permission.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

There is no conflict of interest in this study.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] WMO. (2022). 2021 one of the seven warmest years on record, WMO consolidated data shows. World Meteorological Organization. <https://public.wmo.int/en/media/press-release/2021-one-of-seven-warmest-years-record-wmo-consolidated-data-shows>
- [2] Mihiretu, A., Okoyo, E. N., & Lemma, T. (2021). Causes, indicators and impacts of climate change: understanding the public discourse in Goat based agro-pastoral livelihood zone, Ethiopia. *Heliyon*, 7(3). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e06529>
- [3] Jakučionytė-Skodienė, M., & Liobikienė, G. (2021). Climate change concern, personal responsibility and actions related to climate change mitigation in EU countries: Cross-cultural analysis. *Journal of Cleaner Production*, 281, 125189. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2020.125189>
- [4] UNFCCC. (2021). The Glasgow Climate Pact. <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/the-glasgow-climate-pact-key-outcomes-from-cop26>
- [5] Pokhrel, S. R., Hewage, K., Chhipi-Shrestha, G., Karunathilake, H., Li, E., & Sadiq, R. (2021). Carbon capturing for emissions reduction at building level: A market assessment from a building management perspective. *Journal of Cleaner Production*, 294, 126323. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2021.126323>
- [6] Hannah Ritchie, Max Roser, & Pablo Rosado. (2020). CO₂ and Greenhouse Gas Emissions. [OurWorldInData.org](https://www.ourworldindata.org).
- [7] Qian, D., Li, Y., Niu, F., & O'Neill, Z. (2019). Nationwide savings analysis of energy conservation measures in buildings. *Energy Conversion and Management*, 188, 1–18. <https://doi.org/10.1016/J.ENCONMAN.2019.03.035>
- [8] Nazeriye, M., Haeri, A., Haghghat, F., & Panchabikesan, K. (2021). Understanding the influence of building characteristics on enhancing energy efficiency in residential buildings: A data mining based study. *Journal of Building Engineering*, 43, 103069. <https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2021.103069>
- [9] Zhong, K., Chen, X., Meng, Q., Ran, M., Zhang, Z., Liu, X., & Feng, C. (2022). Application of the air-pipe rack heat exchanger heating system in residential buildings of Guangzhou. *Journal of Building Engineering*, 61, 105280. <https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2022.105280>
- [10] SFOE. (2021). Buildings. <https://www.bfe.admin.ch/bfe/en/home/effizienz/gebaeude.html>
- [11] SFOE. (2020). Schweizerische Gesamtenergiestatistik 2019. <https://www.bfe.admin.ch/bfe/de/home/versorgung/statistik-und-geodaten/energiestatistiken/gesamtenergiestatistik.html/>
- [12] Mata, Korpál, A. K., Cheng, S. H., Jiménez Navarro, J. P., Filippidou, F., Reyna, J., & Wang, R. (2020). A map of roadmaps for zero and low energy and carbon buildings worldwide. *Environmental Research Letters*, 15(11), 113003. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ABB69F>
- [13] IEA. (2022). Buildings 2021. <https://www.iea.org/reports/buildings>
- [14] Fenner, A. E., Kibert, C. J., Li, J., Razkenari, M. A., Hakim, H., Lu, X., ... Sam, M. (2020). Embodied, operation, and commuting emissions: A case study comparing the carbon hotspots of an educational building. *Journal of Cleaner Production*, 268, 122081. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2020.122081>
- [15] Skillington, K., Crawford, R. H., Warren-Myers, G., & Davidson, K. (2022). A review of existing policy for reducing embodied energy and greenhouse gas emissions of buildings. *Energy Policy*, 168, 112920. <https://doi.org/10.1016/J.ENPOL.2022.112920>
- [16] Lenzen, M., Geschke, A., Wiedmann, T., Lane, J., Anderson, N., Baynes, T., ... West, J.

- (2014). Compiling and using input–output frameworks through collaborative virtual laboratories. *Science of The Total Environment*, 485–486(1), 241–251. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2014.03.062>
- [17] Ramesh, T., Prakash, R., & Shukla, K. K. (2010). Life cycle energy analysis of buildings: An overview. *Energy and Buildings*, 42(10), 1592–1600. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2010.05.007>
- [18] Chastas, P., Theodosiou, T., & Bikas, D. (2016). Embodied energy in residential buildings-towards the nearly zero energy building: A literature review. *Building and Environment*, 105, 267–282. <https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2016.05.040>
- [19] European Commission. (2020). A Renovation Wave for Europe: Greening Our Buildings, Creating Jobs, Improving Lives-Copenhagen Centre on Energy Efficiency.
- [20] European Commission. (2020). Stepping up Europe’s 2030 climate ambition Investing in a climate-neutral future for the benefit of our people | Knowledge for policy.
- [21] European Commission. (2022). Long-term renovation strategies.
- [22] Ali Yildirim, M., Bartyzel, F., Vallati, A., Woźniak, M. K., & Ocloń, P. (2023). Efficient energy storage in residential buildings integrated with RESHeat system. *Applied Energy*, 335, 120752. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2023.120752>
- [23] European Commission. (2020). Energy efficiency in buildings.
- [24] Belařd, F. (2018). Exposure and risk to fuel poverty in France: Examining the extent of the fuel precariousness and its salient determinants. *Energy Policy*, 114, 189–200. <https://doi.org/10.1016/J.ENPOL.2017.12.005>
- [25] Pasichnyi, O., Wallin, J., Levihn, F., Shahrokni, H., & Kordas, O. (2019). Energy performance certificates — New opportunities for data-enabled urban energy policy instruments? *Energy Policy*, 127, 486–499. <https://doi.org/10.1016/J.ENPOL.2018.11.051>
- [26] Muller, C., & Yan, H. (2018). Household fuel use in developing countries: Review of theory and evidence. *Energy Economics*, 70, 429–439. <https://doi.org/10.1016/J.ENERCO.2018.01.024>
- [27] Curtis, J., McCoy, D., & Aravena Novielli, C. (2017). Determinants of residential heating system choice: an analysis of Irish households. *Papers*.<https://ideas.repec.org/p/esr/wpaper/wp576.html>
- [28] Kowsari, R., & Zerriffi, H. (2011). Three dimensional energy profile: A conceptual framework for assessing household energy use. *Energy Policy*, 39(12), 7505–7517. <https://doi.org/10.1016/J.ENPOL.2011.06.030>
- [29] Braun, F. G. (2010). Determinants of households’ space heating type: A discrete choice analysis for German households. *Energy Policy*, 38(10), 5493–5503. <https://doi.org/10.1016/J.ENPOL.2010.04.002>
- [30] Akgül, E., Kayabaşı, E., & Özdalyan, B. (2022). Investigation of Methods to Increase Energy Efficiency in Old Buildings: A Case Study on a School Building Constructed in 2007. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 10(4), 1631–1653. <https://doi.org/10.29130/DUBITED.924358>
- [31] European Commission. (2020). Proposal for a regulation of the European Parliament and of the Council: establishing the framework for achieving climate neutrality and amending Regulation (EU) 2018/1999. https://www.europarl.europa.eu/doceo/document/A-9-2020-0162_EN.html
- [32] European Commission. (2021). Energy performance of buildings directive. https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-efficient-buildings/energy-performance-buildings-directive_en
- [33] Costa, G., Sicilia, Á., Oregi, X., Pedrero, J., & Mabe, L. (2020). A catalogue of energy conservation measures (ECM) and a tool for their application in energy simulation models. *Journal of Building Engineering*, 29, 101102. <https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2019.101102>
- [34] Węglarz, A., & Narowski, P. (2011). The optimal thermal design of residential buildings using energy simulation and fuzzy sets theory. In *Proceedings of Building Simulation 2011:12th Conference of International Building Performance Simulation Association*. Sydney.
- [35] Kisilewicz, T., Fedorcak-Cisak, M., & Barkanyi, T. (2019). Active thermal insulation as an element limiting heat loss through external walls. *Energy and Buildings*, 205, 109541. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2019.109541>
- [36] Cholewa, T., Siuta-Olcha, A., & Anasiewicz, R. (2019). On the possibilities to increase energy efficiency of domestic hot water preparation systems in existing buildings – Long term field research. *Journal of Cleaner Production*, 217, 194–203. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2019.01.138>

- [37] Chwieduk, B., & Chwieduk, D. (2021). Analysis of operation and energy performance of a heat pump driven by a PV system for space heating of a single family house in polish conditions. *Renewable Energy*, 165, 117–126. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2020.11.026>
- [38] Fokaides, P. A., Panteli, C., & Panayidou, A. (2020). How Are the Smart Readiness Indicators Expected to Affect the Energy Performance of Buildings: First Evidence and Perspectives. *Sustainability* 2020, Vol. 12, Page 9496, 12(22), 9496. <https://doi.org/10.3390/SU12229496>
- [39] Balaras, C. A., Droutsas, K. G., Dascalaki, E. G., Kontoyiannidis, S., Moro, A., & Bazzan, E. (2019). Urban Sustainability Audits and Ratings of the Built Environment. *Energies* 2019, Vol. 12, Page 4243, 12(22), 4243. <https://doi.org/10.3390/EN12224243>
- [40] Oti, A. H., Kurul, E., Cheung, F., & Tah, J. H. M. (2016). A framework for the utilization of Building Management System data in building information models for building design and operation. *Automation in Construction*, 72, 195–210. <https://doi.org/10.1016/J.AUTCON.2016.08.043>
- [41] Sesana, M. M., & Salvalai, G. (2018). A review on Building Renovation Passport: Potentialities and barriers on current initiatives. *Energy and Buildings*, 173, 195–205. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2018.05.027>
- [42] Bernardi, E., Carlucci, S., Cornaro, C., & Bohne, R. A. (2017). An Analysis of the Most Adopted Rating Systems for Assessing the Environmental Impact of Buildings. *Sustainability* 2017, Vol. 9, Page 1226, 9(7), 1226. <https://doi.org/10.3390/SU9071226>
- [43] European Commission. (2022). Nearly zero-energy buildings. Energy efficiency. https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-efficient-buildings/nearly-zero-energy-buildings_en
- [44] Blasch, J., Filippini, M., & Kumar, N. (2019). Boundedly rational consumers, energy and investment literacy, and the display of information on household appliances. *Resource and Energy Economics*, 56, 39–58. <https://doi.org/10.1016/J.RESENEECO.2017.06.001>
- [45] Boogen, N., Daminato, C., Filippini, M., & Obrist, A. (2020). Can Information about Energy Costs Affect Consumers Choices? Evidence from a Field Experiment. *Economics Working Paper Series*, 20/334. <https://doi.org/10.3929/ETHZ-B-000413129>
- [46] Filippini, M., & Obrist, A. (2022). Are households living in green certified buildings consuming less energy? Evidence from Switzerland. *Energy Policy*, 161, 112724. <https://doi.org/10.1016/J.ENPOL.2021.112724>
- [47] Cozza, S., Chambers, J., & Patel, M. K. (2020). Measuring the thermal energy performance gap of labelled residential buildings in Switzerland. *Energy Policy*, 137, 111085. <https://doi.org/10.1016/J.ENPOL.2019.111085>
- [48] Seyedzadeh, S., Rahimian, F. P., Glesk, I., & Roper, M. (2018). Machine learning for estimation of building energy consumption and performance: a review. *Visualization in Engineering* 2018 6:1, 6(1), 1–20. <https://doi.org/10.1186/S40327-018-0064-7>
- [49] Buratti, C., Barbanera, M., & Palladino, D. (2014). An original tool for checking energy performance and certification of buildings by means of Artificial Neural Networks. *Applied Energy*, 120, 125–132. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2014.01.053>
- [50] Xue, Y., Temeljotov-Salaj, A., & Lindkvist, C. M. (2022). Renovating the retrofit process: People-centered business models and co-created partnerships for low-energy buildings in Norway. *Energy Research & Social Science*, 85, 102406. <https://doi.org/10.1016/J.ERSS.2021.102406>
- [51] Mejjaouli, S., & Alzahrani, M. (2020). Decision-making model for optimum energy retrofitting strategies in residential buildings. *Sustainable Production and Consumption*, 24, 211–218. <https://doi.org/10.1016/J.SPC.2020.07.008>
- [52] Alam, M., Zou, P. X. W., Stewart, R. A., Bertone, E., Sahin, O., Buntine, C., & Marshall, C. (2019). Government championed strategies to overcome the barriers to public building energy efficiency retrofit projects. *Sustainable Cities and Society*, 44, 56–69. <https://doi.org/10.1016/J.SCS.2018.09.022>
- [53] Weiss, J., Dunkelberg, E., & Vogelpohl, T. (2012). Improving policy instruments to better tap into homeowner refurbishment potential: Lessons learned from a case study in Germany. *Energy Policy*, 44, 406–415. <https://doi.org/10.1016/J.ENPOL.2012.02.006>
- [54] Caputo, P., & Pasetti, G. (2015). Overcoming the inertia of building energy retrofit at municipal level: The Italian challenge. *Sustainable Cities and Society*, 15,

- 120–134.
<https://doi.org/10.1016/J.SCS.2015.01.001>
- [55] Achtnicht, M., & Madlener, R. (2014). Factors influencing German house owners' preferences on energy retrofits. *Energy Policy*, 68, 254–263.
<https://doi.org/10.1016/J.ENPOL.2014.01.006>
- [56] Hou, J., Liu, Y., Wu, Y., Zhou, N., & Feng, W. (2016). Comparative study of commercial building energy-efficiency retrofit policies in four pilot cities in China. *Energy Policy*, 88, 204–215.
<https://doi.org/10.1016/J.ENPOL.2015.10.016>
- [57] Castleberry, B., Gliedt, T., & Greene, J. S. (2016). Assessing drivers and barriers of energy-saving measures in Oklahoma's public schools. *Energy Policy*, 88, 216–228.
<https://doi.org/10.1016/J.ENPOL.2015.10.010>
- [58] Simonsen, M., Aall, C., Jakob Walnum, H., & Sovacool, B. K. (2022). Effective policies for reducing household energy use: Insights from Norway. *Applied Energy*, 318, 119201.
<https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2022.119201>
- [59] Hille, J., Simonsen, M., & Aall, C. (2012). Trends and drivers for energy use in Norwegian households.
- [60] Statistics Norway. (2014). Any immigrants are financially vulnerable- Type of housing and housing standard for immigrants, by country background. <https://www.ssb.no/inntekt-og-forbruk/artikler-og-publikasjoner/mange-innvandre-re-okonomisk-sarbare>
- [61] Tabatabaei, S. A., & Treur, J. (2016). Comparative Analysis of the Efficiency of Air Source Heat Pumps in Different Climatic Areas of Iran. *Procedia Environmental Sciences*, 34, 547–558.
<https://doi.org/10.1016/J.PROENV.2016.04.048>
- [62] Gaur, A. S., Fitiwi, D. Z., & Curtis, J. (2021). Heat pumps and our low-carbon future: A comprehensive review. *Energy Research & Social Science*, 71, 101764.
<https://doi.org/10.1016/J.ERSS.2020.101764>
- [63] Yılmazoğlu, M. Z. (2010). Isı Enerjisi Depolama Yöntemleri ve Binalarda Uygulanması. *Politeknik Dergisi*, 13(1), 33–42.
<https://dergipark.org.tr/tr/pub/politeknik/issue/33052/367855>
- [64] Mouzeviris, G. A., & Papakostas, K. T. (2020). Comparative analysis of air-to-water and ground source heat pumps performances. <https://doi.org/10.1080/14786451.2020.1794864>.
- [65] Brenn, J., Soltic, P., & Bach, C. (2010). Comparison of natural gas driven heat pumps and electrically driven heat pumps with conventional systems for building heating purposes. *Energy and Buildings*, 42(6), 904–908.
<https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2009.12.012>
- [66] Yılmaz, F., Gürel, A. Ç., & Akdemir, Ç. (2023). Bir Villanın Isı Pompası ile Isıtılmasının Performans ve Çevresel İncelenmesi. *Mühendis ve Makina*, 64(710), 114–136.
<https://dergipark.org.tr/tr/pub/muhendismakina/issue/76644/1268691>
- [67] Temel, Ö. (2016). Türkiye'de Bölgelere Göre Isı Pompası Seçim Kriterleri. Eskişehir Osmangazi Üniversitesi.
<http://openaccess.ogu.edu.tr:8080/xmlui/handle/11684/1240>
- [68] Gaur, A. S., Fitiwi, D. Z., & Curtis, J. (2021). Heat pumps and our low-carbon future: A comprehensive review. *Energy Research & Social Science*, 71, 101764.
<https://doi.org/10.1016/J.ERSS.2020.101764>
- [69] Saini, L., Meena, C. S., Raj, B. P., Agarwal, N., & Kumar, A. (2021). Net Zero Energy Consumption building in India: An overview and initiative toward sustainable future. <https://doi.org/10.1080/15435075.2021.1948417>
- [70] Amini Toosi, H., Lavagna, M., Leonforte, F., Del Pero, C., & Aste, N. (2022). Building decarbonization: Assessing the potential of building-integrated photovoltaics and thermal energy storage systems. *Energy Reports*, 8, 574–581.
<https://doi.org/10.1016/J.EGYR.2022.10.322>
- [71] Zhao, G., Clarke, J., Searle, J., Lewis, R., & Baker, J. (2023). Economic analysis of integrating photovoltaics and battery energy storage system in an office building. *Energy and Buildings*, 284, 112885.
<https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2023.112885>
- [72] Liu, C., Xu, W., Li, A., Sun, D., & Huo, H. (2019). Analysis and optimization of load matching in photovoltaic systems for zero energy buildings in different climate zones of China. *Journal of Cleaner Production*, 238, 117914.
<https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2019.117914>
- [73] Nordin, N. D., & Abdul Rahman, H. (2016). A novel optimization method for designing stand alone photovoltaic system. *Renewable Energy*, 89, 706–715.
<https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2015.12.001>

- [74] Okoye, C. O., & Solyali, O. (2017). Optimal sizing of stand-alone photovoltaic systems in residential buildings. *Energy*, 126, 573–584. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2017.03.032>
- [75] Liu, J., Liu, Z., Wu, Y., Chen, X., Xiao, H., & Zhang, L. (2022). Impact of climate on photovoltaic battery energy storage system optimization. *Renewable Energy*, 191, 625–638. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2022.04.082>
- [76] Akter, M. N., Mahmud, M. A., & Oo, A. M. T. (2017). Comprehensive economic evaluations of a residential building with solar photovoltaic and battery energy storage systems: An Australian case study. *Energy and Buildings*, 138, 332–346. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2016.12.065>
- [77] Zou, B., Peng, J., Yin, R., Li, H., Li, S., Yan, J., & Yang, H. (2022). Capacity configuration of distributed photovoltaic and battery system for office buildings considering uncertainties. *Applied Energy*, 319, 119243. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2022.119243>
- [78] Zhang, J., Cho, H., Luck, R., & Mago, P. J. (2018). Integrated photovoltaic and battery energy storage (PV-BES) systems: An analysis of existing financial incentive policies in the US. *Applied Energy*, 212, 895–908. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2017.12.091>
- [79] Antunes Campos, R., Rafael do Nascimento, L., & Rüther, R. (2020). The complementary nature between wind and photovoltaic generation in Brazil and the role of energy storage in utility-scale hybrid power plants. *Energy Conversion and Management*, 221, 113160. <https://doi.org/10.1016/J.ENCONMAN.2020.113160>
- [80] Hoppmann, J., Volland, J., Schmidt, T. S., & Hoffmann, V. H. (2014). The economic viability of battery storage for residential solar photovoltaic systems – A review and a simulation model. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 39, 1101–1118. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2014.07.068>
- [81] Linssen, J., Stenzel, P., & Flear, J. (2017). Techno-economic analysis of photovoltaic battery systems and the influence of different consumer load profiles. *Applied Energy*, 185, 2019–2025. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2015.11.088>
- [82] Guarino, F., Cassarà, P., Longo, S., Cellura, M., & Ferro, E. (2015). Load match optimisation of a residential building case study: A cross-entropy based electricity storage sizing algorithm. *Applied Energy*, 154, 380–391. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2015.04.116>
- [83] Bayod-Rújula, Á. A., Haro-Larrode, M. E., & Martínez-Gracia, A. (2013). Sizing criteria of hybrid photovoltaic–wind systems with battery storage and self-consumption considering interaction with the grid. *Solar Energy*, 98(PC), 582–591. <https://doi.org/10.1016/J.SOLENER.2013.10.023>
- [84] Candanedo, J., Salom, J., Widén, J., & Athienitis, A. (2015). Load matching, grid interaction, and advanced control. Modeling, Design, and Optimization of Net-Zero Energy Buildings, 207–240. <https://doi.org/10.1002/9783433604625.CH06>
- [85] Niveditha, N., & Rajan Singaravel, M. M. (2022). Optimal sizing of hybrid PV–Wind–Battery storage system for Net Zero Energy Buildings to reduce grid burden. *Applied Energy*, 324, 119713. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2022.119713>
- [86] Rajan Singaravel, M. M., & Arul Daniel, S. (2013). Studies on battery storage requirement of PV fed wind-driven induction generators. *Energy Conversion and Management*, 67, 34–43. <https://doi.org/10.1016/J.ENCONMAN.2012.10.020>
- [87] Rehman, H. ur, Reda, F., Paiho, S., & Hasan, A. (2019). Towards positive energy communities at high latitudes. *Energy Conversion and Management*, 196, 175–195. <https://doi.org/10.1016/J.ENCONMAN.2019.06.005>
- [88] Ma, T., & Javed, M. S. (2019). Integrated sizing of hybrid PV-wind-battery system for remote island considering the saturation of each renewable energy resource. *Energy Conversion and Management*, 182, 178–190. <https://doi.org/10.1016/J.ENCONMAN.2018.12.059>
- [89] Celik, A. N. (2002). Optimisation and techno-economic analysis of autonomous photovoltaic–wind hybrid energy systems in comparison to single photovoltaic and wind systems. *Energy Conversion and Management*, 43(18), 2453–2468. [https://doi.org/10.1016/S0196-8904\(01\)00198-4](https://doi.org/10.1016/S0196-8904(01)00198-4)

- [90] De Gracia, A., & Cabeza, L. F. (2015). Phase change materials and thermal energy storage for buildings. *Energy and Buildings*, 103, 414–419. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2015.06.007>
- [91] Navarro, L., de Gracia, A., Colclough, S., Browne, M., McCormack, S. J., Griffiths, P., & Cabeza, L. F. (2016). Thermal energy storage in building integrated thermal systems: A review. Part 1. active storage systems. *Renewable Energy*, 88, 526–547. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2015.11.040>
- [92] Simó-Solsona, M., Palumbo, M., Bosch, M., & Fernandez, A. I. (2021). Why it's so hard? Exploring social barriers for the deployment of thermal energy storage in Spanish buildings. *Energy Research & Social Science*, 76, 102057. <https://doi.org/10.1016/J.ERSS.2021.102057>
- [93] Vérez, D., Borri, E., Zsembinszki, G., & Cabeza, L. F. (2023). Thermal energy storage co-benefits in building applications transferred from a renewable energy perspective. *Journal of Energy Storage*, 58, 106344. <https://doi.org/10.1016/J.EST.2022.106344>
- [94] Bedsworth, L. W., & Hanak, E. (2013). Climate policy at the local level: Insights from California. *Global Environmental Change*, 23(3), 664–677. <https://doi.org/10.1016/J.GLOENVCHA.2013.02.004>
- [95] Lee, D., Ooka, R., Matsuda, Y., Ikeda, S., & Choi, W. (2022). Experimental analysis of artificial intelligence-based model predictive control for thermal energy storage under different cooling load conditions. *Sustainable Cities and Society*, 79, 103700. <https://doi.org/10.1016/J.SCS.2022.103700>
- [96] Borri, E., Zsembinszki, G., & Cabeza, L. F. (2021). Recent developments of thermal energy storage applications in the built environment: A bibliometric analysis and systematic review. *Applied Thermal Engineering*, 189, 116666. <https://doi.org/10.1016/J.APPLTHERMALENG.2021.116666>
- [97] Palanisamy, D., & Ayalur, B. K. (2019). Development and testing of condensate assisted pre-cooling unit for improved indoor air quality in a computer laboratory. *Building and Environment*, 163, 106321. <https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2019.106321>
- [98] Wang, K., Nakao, S., Thimmaiah, D., & Hopke, P. K. (2019). Emissions from in-use residential wood pellet boilers and potential emissions savings using thermal storage. *Science of The Total Environment*, 676, 564–576. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2019.04.325>
- [99] Kenai, M. A., Libessart, L., Lassue, S., & Defer, D. (2021). Impact of green walls occultation on energy balance: Development of a TRNSYS model on a brick masonry house. *Journal of Building Engineering*, 44, 102634. <https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2021.102634>
- [100] de Gracia, A., Navarro, L., Coma, J., Serrano, S., Romani, J., Pérez, G., & Cabeza, L. F. (2018). Experimental set-up for testing active and passive systems for energy savings in buildings – Lessons learnt. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 1014–1026. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2017.09.109>
- [101] Randle-Boggis, R. J., White, P. C. L., Cruz, J., Parker, G., Montag, H., Scurlock, J. M. O., & Armstrong, A. (2020). Realising co-benefits for natural capital and ecosystem services from solar parks: A co-developed, evidence-based approach. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 125, 109775. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2020.109775>
- [102] Durga, S., Beckers, K. F., Taam, M., Horowitz, F., Cathles, L. M., & Tester, J. W. (2021). Techno-economic analysis of decarbonizing building heating in Upstate New York using seasonal borehole thermal energy storage. *Energy and Buildings*, 241, 110890. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2021.110890>
- [103] Amini Toosi, H., Lavagna, M., Leonforte, F., Del Pero, C., & Aste, N. (2022). A novel LCSA-Machine learning based optimization model for sustainable building design-A case study of energy storage systems. *Building and Environment*, 209, 108656. <https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2021.108656>
- [104] HEART. (2022). The holistic energy and architectural retrofit toolkit. <https://heartproject.eu/>
- [105] Wu, Y., & Zhong, L. (2023). An integrated energy analysis framework for evaluating the application of hydrogen-based energy storage systems in achieving net zero energy buildings and cities in Canada. *Energy Conversion and Management*, 286, 117066. <https://doi.org/10.1016/J.ENCONMAN.2023.117066>
- [106] Mehrjerdi, H., Iqbal, A., Rakhshani, E., & Torres, J. R. (2019). Daily-seasonal operation in net-zero energy building powered by hybrid renewable energies and hydrogen storage

- systems. *Energy Conversion and Management*, 201, 112156. <https://doi.org/10.1016/J.ENCONMAN.2019.112156>
- [107] Awad, H., & Gül, M. (2018). Load-match-driven design of solar PV systems at high latitudes in the Northern hemisphere and its impact on the grid. *Solar Energy*, 173, 377–397. <https://doi.org/10.1016/J.SOLENER.2018.07.010>
- [108] Maestre, V. M., Ortiz, A., & Ortiz, I. (2022). The role of hydrogen-based power systems in the energy transition of the residential sector. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 97(3), 561–574. <https://doi.org/10.1002/JCTB.6938>
- [109] Mehrjerdi, H. (2020). Peer-to-peer home energy management incorporating hydrogen storage system and solar generating units. *Renewable Energy*, 156, 183–192. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2020.04.090>
- [110] Reuß, M., Grube, T., Robinius, M., Preuster, P., Wasserscheid, P., & Stolten, D. (2017). Seasonal storage and alternative carriers: A flexible hydrogen supply chain model. *Applied Energy*, 200, 290–302. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2017.05.050>
- [111] Preuster, P., Papp, C., & Wasserscheid, P. (2017). Liquid organic hydrogen carriers (LOHCs): Toward a hydrogen-free hydrogen economy. *Accounts of Chemical Research*, 50(1), 74–85. https://doi.org/10.1021/ACS.ACCOUNTS.6B00474/ASSET/IMAGES/MEDIUM/AR-2016-00474U_0009.GIF
- [112] Knosala, K., Kotzur, L., Röben, F. T. C., Stenzel, P., Blum, L., Robinius, M., & Stolten, D. (2021). Hybrid Hydrogen Home Storage for Decentralized Energy Autonomy. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(42), 21748–21763. <https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2021.04.036>
- [113] Teichmann, D., Stark, K., Müller, K., Zöttl, G., Wasserscheid, P., & Arlt, W. (2012). Energy storage in residential and commercial buildings via Liquid Organic Hydrogen Carriers (LOHC). *Energy & Environmental Science*, 5(10), 9044–9054. <https://doi.org/10.1039/C2EE22070A>
- [114] Ashraf, Q. M., Yusoff, M. I. M., Azman, A. A., Nor, N. M., Fuzi, N. A. A., Saharedan, M. S., & Omar, N. A. (2015). Energy monitoring prototype for Internet of Things: Preliminary results. *IEEE World Forum on Internet of Things, WF-IoT 2015 - Proceedings*, 1–5. <https://doi.org/10.1109/WF-IOT.2015.7389157>
- [115] Dave, E. (2011). The Internet of Things How the Next Evolution of the Internet Is Changing Everything. https://www.cisco.com/c/dam/en_us/about/ac79/docs/innov/IoT_IBSG_0411FINAL.pdf
- [116] García-Monge, M., Zalba, B., Casas, R., Cano, E., Guillén-Lambea, S., López-Mesa, B., & Martínez, I. (2023). Is IoT monitoring key to improve building energy efficiency? Case study of a smart campus in Spain. *Energy and Buildings*, 285, 112882. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2023.112882>
- [117] Li, P., Parkinson, T., Schiavon, S., Froese, T. M., de Dear, R., Rysanek, A., & Staub-French, S. (2020). Improved long-term thermal comfort indices for continuous monitoring. *Energy and Buildings*, 224, 110270. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2020.110270>
- [118] Sovacool, B. K., Hook, A., Sareen, S., & Geels, F. W. (2021). Global sustainability, innovation and governance dynamics of national smart electricity meter transitions. *Global Environmental Change*, 68, 102272. <https://doi.org/10.1016/J.GLOENVCHA.2021.102272>
- [119] Ouedraogo, K. E., Ekim, P. O., & Demirok, E. (2023). Feasibility of low-cost energy management system using embedded optimization for PV and battery storage assisted residential buildings. *Energy*, 271, 126922. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2023.126922>
- [120] Putra, R. H. P., Wahyudin, D., & Sucita, T. (2018). Designing Energy and Power Monitoring System on Solar Power Plant Using Raspberry Pi. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 384(1), 012041. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/384/1/012041>
- [121] Batista, N. C., Melício, R., Matias, J. C. O., & Catalão, J. P. S. (2013). Photovoltaic and wind energy systems monitoring and building/home energy management using ZigBee devices within a smart grid. *Energy*, 49(1), 306–315. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2012.11.002>
- [122] Jayanth, S., Poorvi, M. B., & Sunil, M. P. (2017). Raspberry Pi based energy management system. *Proceedings of 2016 Online International Conference on Green Engineering and Technologies, IC-GET 2016*. <https://doi.org/10.1109/GET.2016.7916752>

- [123] Aydoğdu, E. (2019, May 6). Mevcut Ticari Binaların Aydınlatma Sistemlerinde Enerjiverimliliği Analizi İçin Örnek Bir Çalışma. İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul. <http://hdl.handle.net/11527/18230>
- [124] Kaynaklı, O., Unver, U., & Kilic, M. (2003). Evaluating thermal environments for sitting and standing posture. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 30(8), 1179–1188. [https://doi.org/10.1016/S0735-1933\(03\)00183-0](https://doi.org/10.1016/S0735-1933(03)00183-0)
- [125] Aykal, D., Baran, M., Erbaş, M., Hatice, & Gündüz, K. (2022). The Importance of Natural Lighting in the Design of Health Buildings: Sample of Şanlıurfa/Muradiye Family Health Center. *Journal of Current Research on Social Sciences (JoCRESS)*, 7(2), 95–105. <https://doi.org/10.26579/jocress-7.2.17>
- [126] Özkum, E. (2011). Doğal ve yapay aydınlatmanın insan psikolojisi üzerindeki etkileri. Marmara Üniversitesi, İstanbul. https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/tezDetay.jsp?id=mqaYoP_VnjHNgPxxk0w90Pg&no=hOd9HzNoIO3M-bGJmuZlbg
- [127] Erkin, E., & Onaygil, S. (2017). Konutlar İçin Yeni Nesil Aydınlatma Kontrol Sistemleri. In EMO - IX. Ulusal Aydınlatma Sempozyumu Bildirileri. İzmir: TMMOB Elektrik Mühendisleri Odası. Retrieved from https://www.emo.org.tr/etkinlikler/aysem/etkinlik_bildirileri_detay.php?etkinlikkod=271&bil kod=6813
- [128] CSA. (2021, May 11). The Connectivity Standards Alliance. Retrieved March 22, 2023, from <https://csa-iot.org/>
- [129] Demir, H., Çıracı, G., Kaya, R., & Ünver, Ü. (2020). Aydınlatmada Enerji Verimliliği: Yalova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Durum Değerlendirmesi. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 25(3), 1637–1652. <https://doi.org/10.17482/uumfd.795971>
- [130] Erlalitepe, İ., Aral, D., & Kazanasmaz, T. (2011). Eğitim Yapılarının Doğal Aydınlatma Performansı Açısından İncelenmesi. *MEGARON / Yıldız Teknik Üniversitesi, Mimarlık Fakültesi E-Dergisi*, 6(1), 39–51.
- [131] Erel, B. (2004). Gün Işığı ile Aydınlatma Alanında Geliştirilen Yeni Teknolojiler Hakkında Bir Araştırma. İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul. Retrieved from <http://hdl.handle.net/11527/8638>
- [132] Hazırlar, M. A. (2004). Halk kütüphanelerinde iç mimari. Hacettepe Üniversitesi, Ankara. Retrieved from <http://bby.hacettepe.edu.tr/yayinlar/119.pdf>
- [133] Carlucci, S., Causone, F., De Rosa, F., & Pagliano, L. (2015). A review of indices for assessing visual comfort with a view to their use in optimization processes to support building integrated design. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 47, 1016–1033. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2015.03.062>
- [134] Çetegen, D., Enarun, D., Yener, A., & Batman A. (2004). Günışığı yapay ışık entegrasyonu ışık rafı sisteminin incelenmesi. In 5. Ulusal Aydınlatma Kongresi (pp. 15–22). İstanbul. <https://docplayer.biz.tr/11452774-Gunisigi-yapay-istik-entegrasyonunu-saglayan-istik-rafi-sisteminin-incelenmesi-duygu-cetegen-dilek-enarun-alpin-koknel-yener-alp-batman.html>
- [135] UN-Water. (2023). UN World Water Development Report 2023. <https://www.unwater.org/publications/un-world-water-development-report-2023>
- [136] Qin, P., Chen, S., Tan-Soo, J. S., & Zhang, X. B. (2022). Urban household water usage in adaptation to climate change: Evidence from China. *Environmental Science & Policy*, 136, 486–496. <https://doi.org/10.1016/J.ENVSCI.2022.07.019>
- [137] Asano, T., & Levine, A. D. (1996). Wastewater reclamation, recycling and reuse: past, present, and future. *Water Science and Technology*, 33(10–11), 1–14. [https://doi.org/10.1016/0273-1223\(96\)00401-5](https://doi.org/10.1016/0273-1223(96)00401-5)
- [138] Sturm, M., Zimmermann, M., Schütz, K., Urban, W., & Hartung, H. (2009). Rainwater harvesting as an alternative water resource in rural sites in central northern Namibia. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 34(13–16), 776–785. <https://doi.org/10.1016/J.PCE.2009.07.004>
- [139] Hammes, G., Ghisi, E., & Padilha Thives, L. (2020). Water end-uses and rainwater harvesting: a case study in Brazil. <https://doi.org/10.1080/1573062X.2020.1748663>
- [140] Zhang, Y., Grant, A., Sharma, A., Chen, D., & Chen, L. (2010). Alternative water resources for rural residential development in Western Australia. *Water Resources Management*, 24(1), 25–36. <https://doi.org/10.1007/S11269-009-9435-0/METRICS>
- [141] Yalılı Kılıç, M., & Abuş, M. N. (2018). Bahçeli Bir Konut Örneğinde Yağmur Suyu Hasadı. *Uluslararası Tarım ve Yaban Hayatı Bilimleri Dergisi*, 4(2), 209–215. <https://doi.org/10.24180/IJAWS.426795>
- [142] Üstün, G. E., Can, T., & Küçük, G. (2020). Binalarda Yağmur Suyu Hasadı. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*,

- 25(3), 1593–1610.
<https://doi.org/10.17482/UUMFD.765561>
- [143] Beytullah Eren, A. A. S. L. A. I. D. (2016). Yağmur Suyu Hasadı: Sakarya Üniversitesi Esentepe Kampüsü Örneği. 4th International Symposium on Innovative Technologies in Engineering and Science (ISITES2016) 3-5 Nov 2016 Alanya/Antalya - Turkey.
- [144] Herrmann, T., & Schmida, U. (2000). Rainwater utilisation in Germany: efficiency, dimensioning, hydraulic and environmental aspects. *Urban Water*, 1(4), 307–316. [https://doi.org/10.1016/S1462-0758\(00\)00024-8](https://doi.org/10.1016/S1462-0758(00)00024-8)
- [145] Strangeways, I. (2006). Precipitation: Theory, measurement and distribution. *Precipitation: Theory, Measurement and Distribution*, 9780521851176, 1–290. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511535772>
- [146] Pradhan, R., & Sahoo, J. (2019). Smart Rainwater Management: New Technologies and Innovation. *Smart Urban Development*. <https://doi.org/10.5772/INTECHOPEN.86336>
- [147] Farah, E., & Shahrour, I. (2017). Smart water for leakage detection: Feedback about the use of automated meter reading technology. *2017 Sensors Networks Smart and Emerging Technologies, SENSET 2017*, 2017-January, 1–4. <https://doi.org/10.1109/SENSET.2017.8125061>
- [148] Depuru, S. S. S. R., Wang, L., & Devabhaktuni, V. (2011). Smart meters for power grid: Challenges, issues, advantages and status. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(6), 2736–2742. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2011.02.039>
- [149] Zorzi, M., Gluhak, A., Lange, S., & Bassi, A. (2010). From today's INTRANet of things to a future INTERNet of things: A wireless- and mobility-related view. *IEEE Wireless Communications*, 17(6), 44–51. <https://doi.org/10.1109/MWC.2010.5675777>
- [150] Benavente-Peces, C. (2019). On the Energy Efficiency in the Next Generation of Smart Buildings—Supporting Technologies and Techniques. *Energies* 2019, Vol. 12, Page 4399, 12(22), 4399. <https://doi.org/10.3390/EN12224399>
- [151] Sain, M., Kang, Y. J., & Lee, H. J. (2017). Survey on security in Internet of Things: State of the art and challenges. *International Conference on Advanced Communication Technology, ICACT*, 699–704. <https://doi.org/10.23919/ICACTION.2017.7890183>
- [152] Sanchez-Iborra, R., & Cano, M. D. (2016). State of the Art in LP-WAN Solutions for Industrial IoT Services. *Sensors* 2016, Vol. 16, Page 708, 16(5), 708. <https://doi.org/10.3390/S16050708>
- [153] Centenaro, M., Vangelista, L., Zanella, A., & Zorzi, M. (2016). Long-range communications in unlicensed bands: The rising stars in the IoT and smart city scenarios. *IEEE Wireless Communications*, 23(5), 60–67. <https://doi.org/10.1109/MWC.2016.7721743>
- [154] Andrić, I., Vrsalović, A., Perković, T., Aglič Čuvčić, M., & Šolić, P. (2022). IoT approach towards smart water usage. *Journal of Cleaner Production*, 367, 133065. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2022.133065>
- [155] LoRa Alliance. (2020). LoRaWAN Technical Committee.
- [156] Berni, A. J., & Gregg, W. D. (1973). On the utility of chirp modulation for digital signaling. *IEEE Transactions on Communications*, 21(6), 748–751. <https://doi.org/10.1109/TCOM.1973.1091721>
- [157] Kordana-Obuch, S., Starzec, M., & Słyś, D. (2021). Assessment of the Feasibility of Implementing Shower Heat Exchangers in Residential Buildings Based on Users' Energy Saving Preferences. *Energies* 2021, Vol. 14, Page 5547, 14(17), 5547. <https://doi.org/10.3390/EN14175547>
- [158] Stec, A., Kordana, S., & Słyś, D. (2017). Analysing the financial efficiency of use of water and energy saving systems in single-family homes. *Journal of Cleaner Production*, 151, 193–205. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2017.03.071>
- [159] Bartkowiak, S., Fisk, R., Funk, A., Hair, J., & Skerlos, S. J. (2010). Residential Drain Water Heat Recovery Systems: Modeling, Analysis, and Implementation. *Journal of Green Building*, 5(3), 85–94. <https://doi.org/10.3992/JGB.5.3.85>
- [160] Manouchehri, R., & Collins, M. R. (2018). An experimental analysis of the impact of unequal flow on falling film drain water heat recovery system performance. *Energy and Buildings*, 165, 150–159. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2018.01.018>
- [161] Manouchehri, R., & Collins, M. R. (2020). Modelling the Steady-State Performance of Coiled Falling-Film Drain Water Heat Recovery Systems Using Rated Data. *Resources* 2020, Vol. 9, Page 69, 9(6), 69. <https://doi.org/10.3390/RESOURCES9060069>
- [162] Piotrowska, B., & Słyś, D. (2023). Variant analysis of financial and energy efficiency of

- the heat recovery system and domestic hot water preparation for a single-family building: The case of Poland. *Journal of Building Engineering*, 65, 105769. <https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2022.105769>
- [163] Zargari, S. S. (2016). Binalarda Rüzgâr Bacası ve Enerji Verimliliği. *İstanbul Aydın Üniversitesi Dergisi*, 8(30), 85–101. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/iaud/issue/30078/324642>
- [164] Haseh, R. H., Khakzand, M., & Ojaghlo, M. (2018). Optimal Thermal Characteristics of the Courtyard in the Hot and Arid Climate of Isfahan. *Buildings* 2018, Vol. 8, Page 166, 8(12), 166. <https://doi.org/10.3390/BUILDINGS8120166>
- [165] Çetintaş, K. F., & Rezafar, A. (2022). Binalarda Pasif Soğutma Yöntemleri ve Geleneksel Mimarideki Uygulamalarının İncelenmesi. *KAPU Trakya Mimarlık ve Tasarım Dergisi*, 2(2), 37–56. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/kapu/issue/73706/1113196>
- [166] Melikoğlu, Y., & Bekleyen, A. (2021). Şanlıurfa'nın Geleneksel Rüzgâr Yakalayıcıları: Kaybolan Bir Geleneğin Günümüze Kadar Gelen Örnekleri. *El-Cezeri*, 8(1), 268–286. <https://doi.org/10.31202/ECJSE.835131>
- [167] Mandalaki, M., Zervas, K., Tsoutsos, T., & Vazakas, A. (2012). Assessment of fixed shading devices with integrated PV for efficient energy use. *Solar Energy*, 86(9), 2561–2575. <https://doi.org/10.1016/J.SOLENER.2012.05.026>
- [168] Alkhayyat, J. (2013). Design Strategy for Adaptive Kinetic Patterns: Creating a Generative Design for Dynamic Solar Shading Systems. University of Salford. https://www.academia.edu/6978438/Design_strategy_for_adaptive_kinetic_patterns_creating_a_generative_design_for_dynamic_solar_shading_system
- [169] Cilento Karen. (2012). Al Bahar Towers Responsive Facade / Aedas. *ArchDaily*. <https://www.archdaily.com/270592/al-bahar-towers-responsive-facade-aedas>
- [170] Bhamare, D. K., Rathod, M. K., & Banerjee, J. (2019). Passive cooling techniques for building and their applicability in different climatic zones—The state of art. *Energy and Buildings*, 198, 467–490. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2019.06.023>
- [171] EİGM. (2022). Türkiye Ulusal Enerji Planı. [172] EPDK. (2022). 2021 Yılı Elektrik Piyasası Gelişim Raporu. Ankara.
- [173] ETKB. (2023). Elektrik. T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. <https://enerji.gov.tr/bilgi-merkezi-enerji-elektrik>
- [174] TÜİK. (2022). Adrese Dayalı Nüfus Kayıt Sistemi Sonuçları 2021.
- [175] ETKB. (2022). 2021 Ulusal Enerji Denge Tablosu - Orijinal Birimler / Bin TEP. <https://enerji.gov.tr/eigm-raporlari>
- [176] IICEC. (2020). Turkey Energy Outlook 2020. <https://iicec.sabanciuniv.edu/tr/teo>
- [177] TÜİK. (2023). Sera Gazı Emisyon İstatistikleri, 1990-2021.
- [178] Huang, B. N., Hwang, M. J., & Yang, C. W. (2008). Causal relationship between energy consumption and GDP growth revisited: A dynamic panel data approach. *Ecological Economics*, 67(1), 41–54. <https://doi.org/10.1016/J.ECOLECON.2007.11.006>
- [179] Erdal, G., Erdal, H., & Esengün, K. (2008). The causality between energy consumption and economic growth in Turkey. *Energy Policy*, 36(10), 3838–3842. <https://doi.org/10.1016/J.ENPOL.2008.07.012>
- [180] Yurdakul, F. (2018). The Relationship between Energy Consumption per Capita and Growth Rate: The Case of Turkey. *Ekonomik Yaklaşım*, 29(107), 49. <https://doi.org/10.5455/EY.39112>
- [181] Aydın, K., Taşçı, H., Ağralıoğlu, S., & Sönmüş, A. (2021). Performance of Energy Efficiency in Turkey. *Euroasia Journal of Social Sciences & Humanities*, 8(19), 156–166. <https://doi.org/10.38064/EURSSH.203>
- [182] Bertoldi, Paolo., Rezessy, Silvia., & European Commission. Joint Research Centre. Institute for Environment and Sustainability. (2006). Tradable Certificates for Energy Savings (White Certificates) - Theory and Practice. Publications Office. <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC32865>
- [183] Naimoğlu, M., & Akal, M. (2021). Enerji Verimliliği Üzerine Arz ve Talep Yönlü Genel Bir Bakış. *Verimlilik Dergisi*, (3), 3–20. <https://doi.org/10.51551/VERIMLILIK.698615>
- [184] Alanlı, A. (2022). Türkiye'de Enerji Verimliliğine Yönelik Politikaların Değerlendirilmesi. *Şırnak Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 3(1), 1–18. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/sufbd/issue/73123/1062139>

- [185] Türkoğlu, S. P., & Kardoğan, P. S. Ö. (2018). The role and importance of energy efficiency for sustainable development of the countries. *Lecture Notes in Civil Engineering*, 7, 53–60. https://doi.org/10.1007/978-3-319-64349-6_5
- [186] IEA. (2022). *Global energy intensity, 1990 vs. 2019*.
- [187] Subramanian, S., Bastian, H., Hoffmeister, A., Jennings, B., Tolentino, C., Vaidyanathan, S., & Nadel, S. (2022). *2022 International Energy Efficiency Scorecard*. Washington. <https://www.aceee.org/research-report/i2201>
- [188] Koçaslan, G. (2014). Türkiye'nin Enerji Verimliliği Mevzuatı, Avrupa Birliği'ndeki Düzenlemeler ve Uluslararası-Ulusal Öneriler. *Cumhuriyet Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi*, 15(2), 117–133. <http://search/yayin/detay/175615>
- [189] Yağcı, B. E., & Sözen, A. (2023). Türkiye'nin Enerji Verimliliği Etkinlik Analizi. *Politeknik Dergisi*, 1–1. <https://doi.org/10.2339/POLITEKNIK.859790>
- [190] CSB. (2018). *Binalar İçin Isı Yalıtımı Bir Zorunluluk Mudur?* <https://yalova.csb.gov.tr/binalar-icin-isi-yalitimi-bir-zorunluluk-mudur-haber-226222>
- [191] ETKB. *Enerji Kaynaklarının ve Enerjinin Kullanımında Verimliliğin Artırılmasına Dair Yönetmelikte Değişiklik Yapılmasına Dair Yönetmelik*, Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı (2020).
- [192] TMMOB. (2022). *Türkiye'nin Enerji Görünümü 2022*.
- [193] SBB. (2019). *On Birinci Kalkınma Planı (2019-2023)*. Ankara.
- [194] TÜİK. (2022). *Nüfus ve Konut Sayımı, 2021*.
- [195] TÜİK. (2022). *Bina ve Konut Nitelikleri Araştırması, 2021*.
- [196] Aydın, Ö. (2019). Binalarda Enerji Verimliliği Kapsamında Yapılan Projelerin Değerlendirilmesi: Türkiye Örneği. *Mimarlık ve Yaşam*, 4(1), 55–68. <https://doi.org/10.26835/MY.511825>
- [197] Özcan, K. M., Gülay, E., & Üçdoğruk, Ş. (2013). Economic and demographic determinants of household energy use in Turkey. *Energy Policy*, 60, 550–557. <https://doi.org/10.1016/J.ENPOL.2013.05.046>
- [198] Emeç, H., Altay, A., Aslanpay, E., & Özdemir, M. O. (2015). Türkiye'de Enerji Yoksulluğu ve Enerji Tercihi Profili. *Finans Politik ve Ekonomik Yorumlar*, (608), 9–21. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/fpeyd/issue/4803/9/607516>
- [199] Çelik, A. K., & Oktay, E. (2019). Modelling households' fuel stacking behaviour for space heating in Turkey using ordered and unordered discrete choice approaches. *Energy and Buildings*, 204, 109466. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2019.109466>
- [200] Selçuk, İ. Ş., Gölçek, A. G., & Köktaş, A. M. (2019). Energy Poverty in Turkey. *Sosyoekonomi*, 27(42), 283–299. <https://doi.org/10.17233/SOSYOEKONOMI.2019.04.15>
- [201] İpek, Ö., & İpek, E. (2022). Determinants of energy demand for residential space heating in Turkey. *Renewable Energy*, 194, 1026–1033. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2022.05.158>
- [202] Ritchie, H., & Roser, M. (2022). *Indoor Air Pollution*. *Our World in Data*. <https://ourworldindata.org/indoor-air-pollution>
- [203] Etem Gürel, A. (2011). Farklı dış duvar yapıları için optimum ısı yalıtım kalınlığı tespitinin ekonomik analizi. *Sakarya University Journal of Science*, 15(1), 75–81. <https://doi.org/10.16984/SAUFBED.80287>
- [204] İşbilir, & Derya. (2009). Binalarda ısı yalıtımı uygulamaları ve sorunlarının araştırılması. <http://acikerisim.selcuk.edu.tr:8080/xmlui/handle/123456789/8213>
- [205] Kaynaklı, Ö., Ünver, Ü., Kılıç, M., & Yamankaradeniz, R. (2003). Sürekli Rejim Enerji Dengesi Modeline Göre Isıl Konfor Bölgeleri. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 9(1), 23–30. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/pajes/issue/2052/9/218665>
- [206] Seppänen, O., Fisk, W. J., Lei, Q. H., Org, E., & Seppänen, O. (2006). *Room Temperature and Productivity in Office Work*. <http://www.hut.fi>
- [207] Ünver, Ü., Adigüzel, E., Adigüzel, E., Çivi, S., & Roshanaei, K. (2020). Türkiye'deki İklim Bölgelerine Göre Binalarda Isı Yalıtım Uygulamaları. *İleri Mühendislik Çalışmaları ve Teknolojileri Dergisi*, 1(2), 171–187. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/imctd/issue/5937/2/805008>
- [208] Şenkal Sezer, F. (2005). Türkiye'de Isı Yalıtımının Gelişimi ve Konutlarda Uygulanan Dış Duvar Isı Yalıtım Sistemleri. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 10(2). <https://doi.org/10.17482/UJFE.63488>
- [209] Cengel, Y. A. (2002). *Heat Transfer: A Practical Approach*. McGraw-Hill. <https://www.abebooks.com/9780072458930/H>

- eat-Transfer-Practical-Approach-Cengel-0072458933/plp
- [210] Gürlek, G., Özbalta, N., Yıldız, A., & Erkek, M. (2008). Economical and environmental analysis of thermal insulation thickness in buildings. *Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi*, 28(2), 25–34. <http://search/yayin/detay/81511>
- [211] Kurekci, N. A. (2016). Determination of optimum insulation thickness for building walls by using heating and cooling degree-day values of all Turkey's provincial centers. *Energy and Buildings*, 118, 197–213. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2016.03.004>
- [212] OeEB. (2013). Energy Efficiency Potential Country Report: TURKEY. Allplan GmbH.
- [213] Causone, F., Pietrobon, M., Pagliano, L., & Erba, S. (2017). A high performance home in the Mediterranean climate: From the design principle to actual measurements. *Energy Procedia*, 140, 67–79. <https://doi.org/10.1016/J.EGYPRO.2017.11.124>
- [214] Hopfe, C., & McLeod, R. (2015). The Passivhaus Designer's Manual: A technical guide to low and zero energy buildings. The Passivhaus Designer's Manual. <https://doi.org/10.4324/9781315726434>
- [215] Schnieders, J., Eian, T. D., Filippi, M., Florez, J., Kaufmann, B., Pallantzas, S., ... Yeh, S. C. (2020). Design and realisation of the Passive House concept in different climate zones. *Energy Efficiency*, 13(8), 1561–1604. <https://doi.org/10.1007/S12053-019-09819-6>
- [216] Passivhaus Institut. (2023). The Passive House Institute - Who we are and what we do. https://passivehouse.com/01_passivehouseinstitute/01_passivehouseinstitute.htm
- [217] Aşıkoğlu, A., Altın, M., & Seval BAYRAM, N. (2021). Pasif Ev Sertifika Sisteminin Mevcut Binalarda Uygulanması: EnerPHit Sertifika Sistemi. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 21(5), 1146–1156. <https://doi.org/10.35414/AKUFEMUBID.978242>
- [218] Köse Mutlu, B. (2021). Çok Katlı Binalarda Gri Suyun Yerinde Arıtılması ile Yeniden Kullanılmasının Fizibilitesi: İstanbul'da Bir Kentsel Dönüşüm Projesi Örneği. *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 23(67), 81–91. <https://doi.org/10.21205/DEUFMD.2021236707>
- [219] Jefferson, B., Palmer, A., Jeffrey, P., Stuetz, R., & Judd, S. (2004). Grey water characterisation and its impact on the selection and operation of technologies for urban reuse. *Water Science and Technology*, 50(2), 157–164. <https://doi.org/10.2166/WST.2004.0113>
- [220] Ottoson, J., & Stenström, T. A. (2003). Faecal contamination of greywater and associated microbial risks. *Water research*, 37(3), 645–655. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(02\)00352-4](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(02)00352-4)
- [221] Winward, G. P., Avery, L. M., Frazer-Williams, R., Pidou, M., Jeffrey, P., Stephenson, T., & Jefferson, B. (2008). A study of the microbial quality of grey water and an evaluation of treatment technologies for reuse. *Ecological Engineering*, 32(2), 187–197. <https://doi.org/10.1016/J.ECOLENG.2007.11.001>
- [222] Jamrah, A., Al-Omari, A., Al-Qasem, L., & Ghani, N. A. (2011). Assessment of availability and characteristics of Greywater in Amman. *31(2)*, 210–220. <https://doi.org/10.1080/02508060.2006.9709671>
- [223] Onaygil, S. (2013). Aydınlatmada Enerji Verimliliği: LED Teknolojisi. *Elektrik Mühendisliği Dergisi*, 29–31. https://www.emo.org.tr/ekler/e314dc0affda638_ek.pdf?dergi=910
- [224] Kocaman, B. (2020). Kapalı Otopark Aydınlatmasında Floresan ve LED Lambanın Enerji Verimliliği Açısından Karşılaştırılması. *Iğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 10(3), 1640–1648. <https://doi.org/10.21597/JIST.670665>
- [225] Coşkun, C., & Oktay, Z. (2010). Enerji Tasarrufu Perspektifinde Bir Kampüs Binasının Enerji Taraması Çalışması. *TMMOB Makina Mühendisleri Odası Tesisat Mühendisliği Dergisi*. <https://www.mmo.org.tr/ocak-subat2010/makale/enerji-tasarrufu-perspektifinde-bir-kampus-binasinin-enerji-taramasi-calismasi>
- [226] Altınöz, M., & Mıhlayanlar, E. (2019). Aktif Güneş Sistemlerinin Bina Enerji Verimliliği Üzerindeki Katkısının İncelemesi. *Mimarlık ve Yaşam*, 4(2), 323–335. <https://doi.org/10.26835/MY.635052>
- [227] Ülker, S. (2009, February 20). Isı Yalıtım Malzemelerinin Özelliklerinin Uygulamaya Etkileri. <http://hdl.handle.net/11527/8195>
- [228] Gençoğlu Korkmaz, G., & Samancı, A. (2022). Konya Teknik Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesine Ait Binalar İçin Enerji Verimliliğini Artırmaya Yönelik Örnek Bir Çalışma. *Konya Journal of Engineering Sciences*, 10(2), 442–456. <https://doi.org/10.36306/KONJES.1089881>

- [229] Ucar, A., & Balo, F. (2009). Effect of fuel type on the optimum thickness of selected insulation materials for the four different climatic regions of Turkey. *Applied Energy*, 86(5), 730–736. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2008.09.015>
- [230] Güğül, G. N., & Köksal, M. A. (2019). Müstakil bir konutun enerji tüketiminin azaltılmasında kullanılan yöntemlerinin ekonomik değerlendirmesi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 34(1), 215–234. <https://doi.org/10.17341/GAZIMMFD.416483>
- [231] Çomaklı, K., & Yüksel, B. (2003). Optimum insulation thickness of external walls for energy saving. *Applied Thermal Engineering*, 23(4), 473–479. [https://doi.org/10.1016/S1359-4311\(02\)00209-0](https://doi.org/10.1016/S1359-4311(02)00209-0)
- [232] Kılıçlı, A. (2018). Ege Üniversitesi bünyesindeki mevcut bir binanın enerji-ekserji analizi ve iyileştirme önerileri. *Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*. https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/tezDetay.jsp?id=G01z7w-G16td9lw9ABjqng&no=_uJ54PQaowEb38CHYsdKNQ
- [233] Yürük, M., İbrahim Variyenli, H., Martin, K., Khanlari, A., & Aytaç, İ. (2022). Bireysel Isıtma Sistemlerinde Tesisat Temizliğinin Enerji Verimliliği Açısından Deneysel Olarak Değerlendirilmesi. *Politeknik Dergisi*, 25(3), 1375–1384. <https://doi.org/10.2339/POLITEKNIK.1025494>
- [234] Karaçam, T., İbrahim Variyenli, H., Martin, K., Khanlari, A., & Aytaç, İ. (2022). Termostatik Radyatör Vanası Kullanımının Binalarda Enerji Verimliliği Üzerindeki Etkisinin Deneysel Olarak Araştırılması. *Politeknik Dergisi*, 25(4), 1713–1721. <https://doi.org/10.2339/POLITEKNIK.1031156>
- [235] Koç, Ü. (2020). Sektörel Enerji Tüketimi ve Ekonomik Büyüme. *Üçüncü Sektör Sosyal Ekonomi*, 55(1), 508–521. <https://doi.org/10.15659/3.SEKTOR-SOSYAL-EKONOMI.20.03.1289>
- [236] Demirsoy, G., & Sözen, A. (2023). Binalarda Enerji Verimliliğinin Toplam Faktör Etkinliği. *Politeknik Dergisi*, 1–1. <https://doi.org/10.2339/POLITEKNIK.886923>
- [237] Omar, A. I., Khattab, N. M., & Abdel Aleem, S. H. E. (2022). Optimal strategy for transition into net-zero energy in educational buildings: A case study in El-Shorouk City, Egypt. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 49, 101701. <https://doi.org/10.1016/J.SETA.2021.101701>
- [238] Fiaschi, D., Bandinelli, R., & Conti, S. (2012). A case study for energy issues of public buildings and utilities in a small municipality: Investigation of possible improvements and integration with renewables. *Applied Energy*, 97, 101–114. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2012.03.008>
- [239] Erhorn, H., Mroz, T., Mørck, O., Schmidt, F., Schoff, L., & Thomsen, K. E. (2008). The Energy Concept Adviser—A tool to improve energy efficiency in educational buildings. *Energy and Buildings*, 40(4), 419–428. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2007.03.008>
- [240] Kaklauskas, A., Zavadskas, E. K., Raslanas, S., Ginevicius, R., Komka, A., & Malinauskas, P. (2006). Selection of low-e windows in retrofit of public buildings by applying multiple criteria method COPRAS: A Lithuanian case. *Energy and Buildings*, 38(5), 454–462. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2005.08.005>
- [241] Balaras, C. A., Gaglia, A. G., Georgopoulou, E., Mirasgedis, S., Sarafidis, Y., & Lalas, D. P. (2007). European residential buildings and empirical assessment of the Hellenic building stock, energy consumption, emissions and potential energy savings. *Building and Environment*, 42(3), 1298–1314. <https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2005.11.001>
- [242] Herrando, M., Chordá, R., Gómez, A., & Fueyo, N. (2023). The cost overrun of depopulation to improve energy efficiency in buildings: A case study in the Mediterranean Region. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 55, 102985. <https://doi.org/10.1016/J.SETA.2022.102985>

A Novel Approach to Detection of Alzheimer's Disease from Handwriting: Triple Ensemble Learning Model

Hakan ÖCAL^{1*} 

¹Bartın University, Faculty of Engineering Architecture and Design, Department of Computer Engineering, Bartın, Turkey

Article Info

Research article
Received: 05/10/2023
Revision: 12/02/2024
Accepted: 13/02/2024

Keywords

Neurodegenerative disease
Alzheimer's disease
prediction
Ensemble machine learning
model
Classification
Handwriting dataset

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 05/10/2023
Düzeltilme: 12/02/2024
Kabul: 13/02/2024

Anahtar Kelimeler

Nörodejeneratif hastalık
Alzheimer hastalığı tahmini
Topluluk makine öğrenimi
modeli
Sınıflandırma
El yazısı veri kümeleri

Graphical/Tabular Abstract (Grafik Özet)

To detect Alzheimer's disease from handwriting, Light Gradient Boosting Machine, Categorical Boosting, and Adaptive Boosting machine learning classification algorithms were combined with a Hard Voting Classifier and trained and tested on the publicly available Diagnosis Alzheimer's With haNdwriting dataset. / Alzheimer hastalığını el yazısından tespit etmek için Gradient Boosting Machine, Kategorik Boosting ve Adaptive Boosting makine öğrenimi sınıflandırma algoritmaları, Hard Voting Classifier ile birleştirildi ve halka açık Diagnosis Alzheimer's with haNdwriting veri kümesi üzerinde eğitildi.

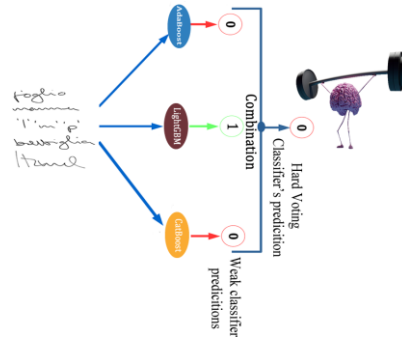


Figure A: Architectural structure of the ensemble learning model that detects Alzheimer's disease from handwriting / **Şekil A:** Alzheimer hastalığını el yazısından tespit eden topluluk öğrenme modelinin mimari yapısı

Highlights (Önemli noktalar)

- Information about Alzheimer's disease can be obtained based on the deterioration in the patient's writing skills. / Hastanın yazma becerisindeki bozulmaya göre Alzheimer hastalığı hakkında bilgi edinilebilir.
- In this study, Gradient Boosting Machine, Categorical Boosting, and Adaptive Boosting machine learning classification algorithms were combined with a Hard Voting Classifier and trained and tested on the publicly available Diagnosis Alzheimer's With haNdwriting dataset. / Bu çalışmada, Gradient Boosting Machine, Kategorik Boosting ve Adaptive Boosting makine öğrenimi sınıflandırma algoritmaları, Hard Voting Classifier ile birleştirilmiş ve halka açık Diagnosis Alzheimer's With haNdwriting veri kümesi üzerinde eğitilmiştir.

Aim (Amaç): The aim of this study is to detect Alzheimer's disease from handwriting quickly and with high sensitivity by combining machine learning-based classifiers. / Bu çalışmanın amacı makine öğrenmesi tabanlı sınıflandırıcıları birleştirerek Alzheimer hastalığını el yazısından hızlı ve yüksek hassasiyet ile tespit etmektir.

Originality (Özgünlük): Employed classification models were used together for the first time in this study. / Kullanılan sınıflandırma modelleri ilk kez bu çalışmada bir arada kullanılmıştır.

Results (Bulgular): As a result of the experimental studies, the proposed Ensemble methodology achieved 97.14% Acc, 95% Prec, 100% Recall, 90.25% Spec, and 97.44% F1-score (Dice) performance values. / Deneysel çalışmalar sonucunda önerilen Ensemble metodolojisi %97,14 Acc, %95 Prec, %100 Recall, %90,25 Spec ve %97,44 F1-score (Dice) performans değerlerine ulaştı.

Conclusion (Sonuç): As a result, the proposed methodology showed higher performance than other approaches and individual learning models in the literature. / Sonuç olarak, önerilen metodoloji literatürdeki diğer yaklaşımlar ve bireysel öğrenme modellerine göre daha yüksek performans göstermiştir.



A Novel Approach to Detection of Alzheimer's Disease from Handwriting: Triple Ensemble Learning Model

Hakan ÖCAL^{1*} ¹Bartın University, Faculty of Engineering Architecture and Design, Department of Computer Engineering, Bartın, Turkey

Article Info

Research article

Received: 05/10/2023

Revision: 12/02/2024

Accepted: 13/02/2024

Keywords

Neurodegenerative
diseaseAlzheimer's disease
predictionEnsemble machine
learning model

Classification

Handwriting dataset

Abstract

The irreversible degeneration of nerve cells in the body dramatically affects the motor skills and cognitive abilities used effectively in daily life. There is no known cure for neurodegenerative diseases such as Alzheimer's. However, in the early diagnosis of such diseases, the progression of the disease can be slowed down with specific rehabilitation techniques and medications. Therefore, early diagnosis of the disease is essential in slowing down the disease and improving patients' quality of life. Neurodegenerative diseases also affect patients' ability to use fine motor skills. Losing fine motor skills causes patients' writing skills to deteriorate gradually. Information about Alzheimer's disease can be obtained based on the deterioration in the patient's writing skills. However, manual detection of Alzheimer's disease (AD) from handwriting is a time-consuming and challenging task that varies from physician to physician. Machine learning-based classifiers are exceptionally popularly used with high-performance scores to solve the difficulty of manual detection of AD. In this study, Light Gradient Boosting Machine (LightGBM), Categorical Boosting (CatBoost), and Adaptive Boosting (AdaBoost) machine learning classification algorithms were combined with a Hard Voting Classifier and trained and tested on the publicly available DARWIN (Diagnosis Alzheimer's With haNdwriting) dataset. As a result of the experimental studies, the proposed Ensemble methodology achieved 97.14% Acc, 95% Prec, 100% Recall, 90.25% Spec, and 97.44% F1-score (Dice) performance values. Studies have shown that the proposed research is exceptionally robust.

Alzheimer Hastalığının El Yazısından Tespitinde Yeni Bir Yaklaşım: Üçlü Topluluk Öğrenme Modeli

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi

Başvuru: 05/10/2023

Düzeltilme: 12/02/2024

Kabul: 13/02/2024

Anahtar Kelimeler

Nörodejeneratif hastalık

Alzheimer hastalığı

tahmini

Topluluk makine öğrenimi

modeli

Sınıflandırma

El yazısı veri kümeleri

Öz

Vücuttaki sinir hücrelerinin geri dönüşü olmayan dejenerasyonu, günlük yaşamda etkin olarak kullanılan motor becerileri ve bilişsel yetenekleri dramatik biçimde etkiler. Alzheimer gibi nörodejeneratif hastalıkların bilinen bir tedavisi yoktur. Ancak bu tür hastalıkların erken teşhisinde spesifik rehabilitasyon teknikleri ve ilaçlarla hastalığın ilerlemesi yavaşlatılabilir. Bu nedenle hastalığın erken tanısı, hastalığın yavaşlatılması ve hastaların yaşam kalitesinin artırılması açısından önemlidir. Nörodejeneratif hastalıklar aynı zamanda hastaların ince motor becerilerini kullanma yeteneğini de etkiler. İnce motor becerilerin kaybı hastaların yazma becerilerinin giderek bozulmasına neden olur. Hastanın yazma becerisindeki bozulmaya göre Alzheimer hastalığı hakkında bilgi edinilebilir. Ancak Alzheimer hastalığının (AH) el yazısından manuel olarak tespiti, hekimden hekime değişen, zaman alıcı ve zorlu bir iştir. Makine öğrenimi tabanlı sınıflandırıcılar, AD'nin zor manuel tespitini çözmek için yüksek performanslı puanlarla son derece popüler bir şekilde kullanılır. Bu çalışmada, Light Gradient Boosting Machine (LightGBM), Kategorik Boosting (CatBoost) ve Adaptive Boosting (AdaBoost) makine öğrenimi sınıflandırma algoritmaları, Hard Voting Classifier ile birleştirildi ve halka açık Diagnosis Alzheimer's With haNdwriting (DARWIN) veri kümesi üzerinde eğitildi ve test edildi. Deneysel çalışmalar sonucunda önerilen Ensemble metodolojisi %97,14 Acc, %95 Prec, %100 Recall, %90,25 Spec ve %97,44 F1-score (Dice) performans değerlerine ulaştı. Çalışmalar, önerilen çalışmanın son derece sağlam olduğunu göstermiştir.

1. INTRODUCTION (GİRİŞ)

The human brain is an organ that fulfills vital

functions such as thinking, decision-making, and storage of experiences in their memory [1]. Procedures are performed through nerve cells in the

human brain. Neurodegenerative conditions in nerve cells are irreversible circumstances that gradually deteriorate the individual's quality of life. The leading neurodegenerative disease is AD, which causes the death of memory cells and gradual shrinkage of the brain [2].

In 2019, in the United States, AD caused the death of 121,499 people. In the year, COVID-19 ranks 10th among deadly diseases in the USA, while AD ranks 6th. Improving the quality of life of individuals will increase life expectancy, and the number of individuals with AD will gradually increase in the coming years. Increasing the number of individuals with AD will lead to insufficient magnetic resonance (MR) and other costly diagnostic techniques. The inadequacy of the AD diagnostic procedures used today due to financial opportunities leads scientists to research new and less expensive diagnostic methods. Scientists have explicitly focused on the fact that AD causes losses in the individual's fine motor skills. Therefore, they thought diagnosing the severity of AD by monitoring the deterioration in an individual's handwriting could be a noninvasive method that does not require external intervention for the patient [3,4].

Machine learning applications have become extremely popular in recent years due to their high performance in detecting diseases. Manual AD detection from handwriting is exceptionally time-consuming and challenging for physicians. This study focused on a high-performance machine learning model for diagnosing Alzheimer's disease using handwriting to solve the challenges of manual AD detection using patient handwriting. As mentioned in the methodology section of the article, experimental studies have also shown that if the models that make up an ensemble learning-based machine learning model are fine-tuned effectively, they will be compatible with each other, and a higher-performance machine learning model will be obtained.

To briefly summarize the contribution of this study to the literature:

- In this study, Gradient Boosting Machine (LightGBM), Categorical Boosting (CatBoost), and Adaptive Boosting (AdaBoost) powerful machine learning models, which have high-performance

results in the literature, were combined for the first time to detect AD from handwriting.

- Also, 10-fold cross-validation was performed when selecting machine learning models that make up the ensemble model.
- In addition, by fine-tuning, the individual performances of the models were brought closer together, enabling them to make more errors and achieve a higher performance score.

Additionally, to calculate the inter-case variance of handwriting tasks, the extracted features for each task were subjected to Principal Component Analysis (PCA) [9].

In the 2nd part of the study, summary information about the relevant studies will be given. In contrast, in the 3rd part, information about the data style and machine learning methods used will be provided. In Section 4, the analysis results of machine learning algorithms on the DARWIN dataset will be compared and discussed. In the 5th section, the last part of the study, the research results, and future studies will be shared.

In recent years, machine learning methods have been increasingly used to solve many problems [10-12]. Machine learning models have also achieved many successes in the field of healthcare. They have become popular in healthcare, especially as computer-aided systems in diagnosing neurodegenerative diseases (ND). The most important and necessary thing for machine learning models is the quality and size of the dataset. For the detection of Parkinson's disease (PD) from handwriting, there are robust public datasets such as the Parkinson's Disease Handwriting Database (PaHaW) and HandPD [13, 8].

There are various studies in the literature on the detection of PD disease from handwriting [[14-19]. However, the fact that the data sets obtained on a case-by-case basis are only for the detection of PD disease has caused insufficient studies on the detection of AD from handwriting. However, there are few datasets in the literature for detecting AD from handwriting. Therefore, the DARWIN handwriting dataset, consisting of 174 participants and based on 25 handwriting tasks, was created by Cilia et al. The resulting dataset was benchmarked

against nine different machine-learning models. These models were tested separately for 25 various tasks, and an Ensemble model called BFT was created, combining the results [20].

One of the limited studies in the literature on detecting Alzheimer's disease was conducted by Chai et al. In this study, 75 handwritten and quantitative electroencephalography (qEEG) data obtained from 30 healthy individuals and 40 individuals with mild cognitive impairment (MCI) were tested in the Support Vector Machine (SVM) machine learning algorithm with RBF kernels [21]. In another study, El-Yacoubi et al. used two-stage semi-supervised learning and word-based feature extraction methods to detect early-stage Alzheimer's disease (ES-AD) and early-stage Alzheimer's disease (ES-AD) in the Ironoff dataset consisting of 880 handwritings and 25 undiagnosed cases of AD obtained from Broca Hospital. They tried to determine MCI. In the Ironoff dataset, the number of cases over 60 is meager. Therefore, to make the study results more reliable, 25 patients with an average age of 72 without a diagnosis of AD were obtained from Broca Hospital [22]. Kahindo et al. tried to predict the classes of the subjects by using Hierarchical Clustering and K-means algorithms for feature selection on 144 subjects, including ES-AD, MCI, and HC individuals obtained from Broca Hospital. Additionally, the Normalized Mutual Information (NMI) metric and semi-global feature parametrization technique were used in this study [23]. For detecting PD from handwriting, Sarin et al. proposed a fuzzy classification method consisting of 3 stages for detecting Parkinson's disease from handwriting [24].

The proposed study, which can be seen from the literature, is considered one of the pioneer studies. The reason for this is the abundance of publicly available handwriting datasets for detecting PD disease and the inadequacy of AD datasets so far. The handwriting dataset for detecting high-incidence AD, introduced to the literature by Cilia et al., constitutes a cornerstone for studies to be carried out for less costly detection of AD.

2. MATERIALS AND METHODS (MATERİYAL VE METOD)

This section provides information about the dataset and machine learning methodologies used.

2.1. Preparing the dataset (Veri setinin ön hazırlığı)

The proposed study used the DARWIN dataset for comparative analysis of machine learning models. The dataset is the largest publicly available dataset used for detecting AD, with 25 different tasks and 174 participants. Of the participants in the dataset used, 89 were AD patients, and 85 were healthy individuals. For the training of the ensemble model, the DARWIN data set was randomly divided into 80% training and 20% test data using the model selection method of the Sckit-learn library. The most significant impact of the dataset used is that it eliminates the scarcity of data in MR images, which is another method used to diagnose AD. Handwritten data in the DARWIN dataset were performed according to the acquisition protocol proposed by Cilia et al. [20]. 25 tasks in the dataset are grouped into three categories.

- Graphic tasks (G) consist of the participant creating geometric shapes by connecting dots and labeling these shapes with basic writing skills.
- Copying tasks (C) consist of the participant's ability to repeat semantic symbols such as letters, words, and numbers.
- It consists of memory and dictation tasks (M) that question the differences in the writing process that have previously been memorized or associated objects in a picture and how the handwriting in working memory changes.

Standard clinical tests such as the Mini-Mental State Examination (MMSE), Preliminary Assessment Battery (FAB), and Montreal Cognitive Assessment (MoCA) were used to recruit participants who comprised the dataset. These tests used questionnaires covering many cognitive skills, including time and space orientation remembering skills. Gender, age, education, and job levels are equally distributed in the dataset. A total of 25 tasks in groups C, G, and M of the data set used in the proposed study are shown in Figure 1. It can be seen that the 25 features used consist of various writing and drawing tasks. As can be seen from the figure, 14 tasks for group C, 6 tasks for group G and 5 tasks for group M were determined in the data set.

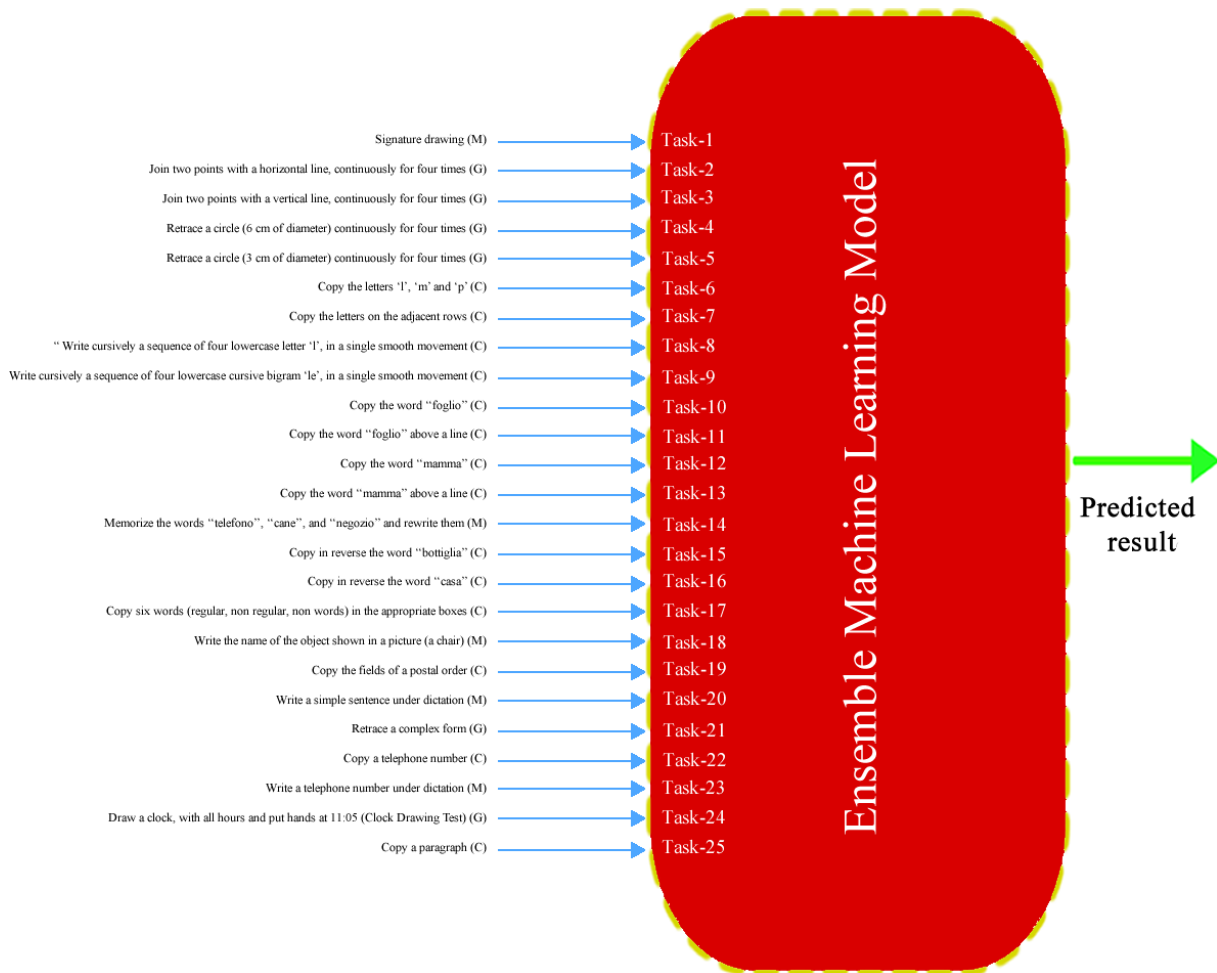


Figure 1. Block diagram of the operation of a 25-task classifier (25 görevli bir sınıflandırıcının çalışmasının blok diyagramı)

2.2. Employed machine learning methodologies
(Kullanılan makine öğrenimi metodolojileri)

The most commonly used machine learning-based classification models in the literature, Light Gradient Boosting Machine (LightGBM), Categorical Boosting (CatBoost), and Adaptive Boosting (AdaBoost), were combined to classify 25 different tasks in the data set used. As shown in Section 4, various ablation studies have been performed on recruited independent classification models. The models that form the ensemble model used to classify the data set achieved higher performance than other machine learning algorithms in solving different problems. Individual classification models were implemented in Python using the Scikit-Learn, CatBoost, and Lightgbm libraries. Table 1 shows the computational complexities of the selected classification models. LightGBM is a histogram-based classification model developed by Microsoft in 2017. LightGBM is an algorithm designed to deal with big data. The algorithm makes continuous data discrete by

dividing it into nodes. In this way, it dramatically reduces the data size and the number of features, significantly reducing training time and parameter usage. LightGBM has been found to be 20 times faster than other classification algorithms in studies (A Highly Efficient Gradient Boosting Decision Tree). Since the LightGBM model has a leaf-oriented learning strategy, it makes fewer errors and learns faster. However, the leaf-oriented learning strategy is more prone to overlearning when data is scarce. Therefore, overlearning can be prevented in low data by optimizing parameters such as learning rate, tree depth, and number of leaves. Figure 2 shows LightGBM’s classification strategy.

For data classification, LightGBM is Gradient-based One-Way Sampling (GOSS), which focuses on data samples, and Exclusive Feature Bundling (EFB), which deals with the number of variables.

GOSS is a method that preserves the accuracy of decision trees and cleans unwanted data from the data by looking at their gradients, thus reducing the number of data. GOSS ensures that the machine

learning algorithm focuses only on high-value features. EFB, on the other hand, combines sparse features using a leaf-wise growth strategy to reduce dimensionality. Accordingly, complexity is reduced, and training time is shortened.

Table 1. Abbreviations and time complexity (O notation) of the training phase of the classification models used. N represent the number of training samples. As for the other quantities involved, they are described as follows: (Kullanılan sınıflandırma modellerinin eğitim aşamasının kısaltmaları ve zaman karmaşıklığı (O notasyonu). N eğitim örneklerinin sayısını temsil eder. İlgili diğer miktarlara gelince, bunlar aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır:)

T: Number of weak learners;

f: weak learner in use;

TS: Target Statistics

Methodologies	Abbreviations	Time Complexity
Light Gradient Boosting Machine	LGBM	$0.5 * \#feature * \#bin$
Adaptive Boosting	AdaBoost	$T f$
Categorical Boosting	CatBoost	$N_{TS,t} \cdot n$

The AdaBoost (short for Adaptive Boosting) classification algorithm is a popular machine learning algorithm introduced by Yoav Freund and Robert Schapire in 1995. The AdaBoost machine learning model combines the outputs of weak classifiers to build a robust classification model. Weak classifiers try to minimize the misclassification rate of previous weak classifiers on the training data. For this, the AdaBoost algorithm re-weights the dataset before each weak classifier and feeds it to the weak classifier, as seen in Figure 3. Iteration and rounding of these weights continue according to the determined number of weak classifiers.

The values obtained from the weak classifier are fed to a non-linear Ensemble classifier. According to the training result obtained from the ensemble classifier, the error is reduced by increasing the weights of the incorrectly predicted training samples. The weight value of each weak classifier is increased or decreased according to its accuracy rate. The weight value of a weak classifier with a high accuracy rate is also high. The model's tendency to overfit is also relatively low. The AdaBoost algorithm can be pretty sensitive to noisy samples and outliers. However, it is quite successful in analyzing large and complex data.

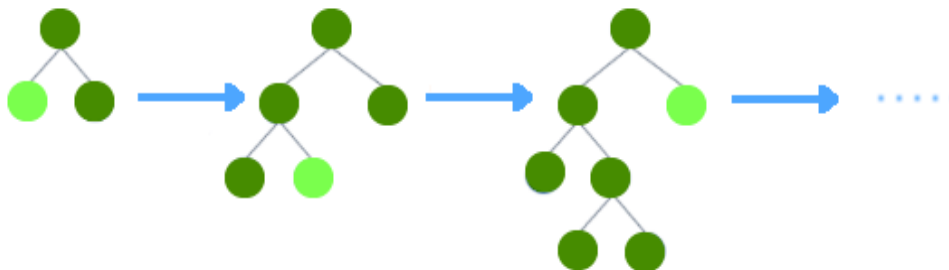


Figure 2. LightGBM Leaf-wise tree growth (LightGBM Yaprak şeklinde ağaç büyümesi)

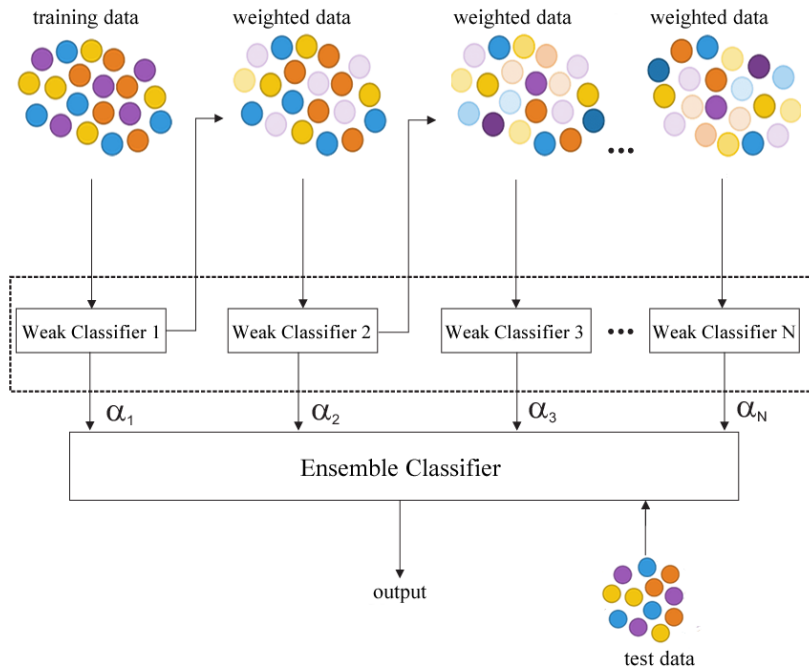


Figure 3. AdaBoost block diagram (AdaBoost blok diyagramı)

The CatBoost machine learning algorithm, seen in Figure 4, is effective in regression, classification, and multidimensional classification. The gradient gradient of these methods may differ depending on the objective function. Additionally, the Catboost algorithm has built-in a priori metrics to obtain the best testing performance before performing performance evaluation on the data set. The CatBoost algorithm reduces the error by creating several binary decision trees simultaneously. As its name suggests, it is an algorithm that performs highly on categorical data. In addition, the CatBoost

algorithm performs more in dealing with overfitting in small data sets due to its data pre-processing feature. Using the `one_hot_max_size` method, Catboost retrieves all features with many distinct values less than or equal to the feature parameter value given to the model. Thus, it obtains high-level features more quickly. Additionally, CatBoost is grouped by target statistics (TS), estimating each category's expected target value. In CatBoost, the data is constantly mixed throughout the training, and the average value is calculated for each category.

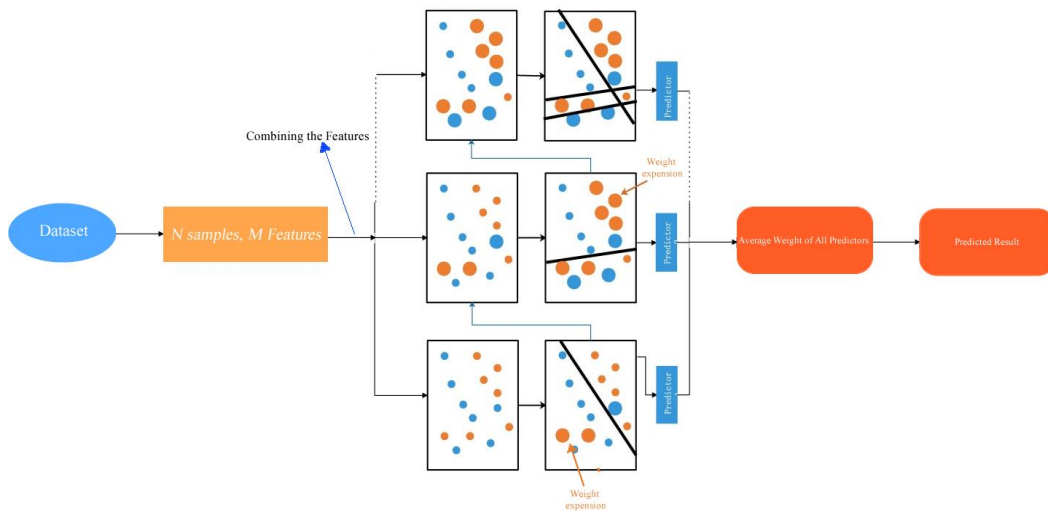


Figure 4. CatBoost block diagram (CatBoost blok diyagramı)

2.3. Proposed methodology (Önerilen metodoloji)

The proposed model is a binary classification model that distinguishes Alzheimer’s patients from healthy people. In the proposed methodology, AdaBoost, LightGBM, and CatBoost classification algorithms are combined with the help of a Hard Voting classifier. The proposed method is shown in Figure 5. A hard voting classifier is a machine learning model that predicts the outcome based on the highest probability of the selected class from the classifiers in a machine learning-based ensemble group of many models. The classification model based on the majority of the predictions coming from the classifiers is called hard voting classification. As can be seen in the experimental studies of the proposed model, the hard voting classifier model based on hard voting classification can achieve higher classification results than the classifiers in the community group.

In this model, where the models forming the ensemble are weak learners, much higher prediction scores can be obtained if there are sufficient weak learners (3 or more classifiers, according to our study).

In the hard voting classifier model, classifier models that are as independent from each other as possible should be selected in selecting the classifier that forms the model. Independent machine learning algorithms increase the error rate of classifiers and reduce overfitting.

In the hard voting classifier model, classifier models that are as independent from each other as possible should be selected in selecting the classifier that forms the model. Independent machine learning algorithms increase the error rate of classifiers and reduce overfitting.

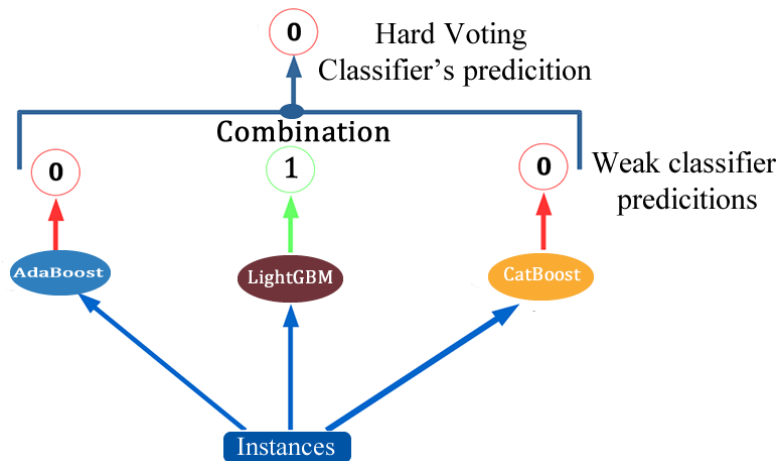


Figure 5. Block diagram of the proposed methodology (Önerilen metodolojinin blok diyagramı)

3. RESULTS (BULGULAR)

3.1. Performance metrics (Performans metrikleri)

The performance evaluation of the proposed ensemble classifier was carried out using Accuracy(Acc), Precision(Prec), Recall, Specificity(Spec), and F1-score(F1) metrics. Performance metrics provide insight into the quantitative limitations of an architecture. The mathematical models of the proposed performance metrics are shown in equations 1, 2, 3, 4, and 5. The True Positive (TP) value in the equations shows the test examples where the prediction result of the

model is positive, and the sample in the class is positive. True Negative (TN) is when the true value of the test sample is negative, and the predicted result is also negative. False Positive (FP) is when the actual test value is negative, and the predicted test sample result is positive. False Negative refers to situations where the ground truth is positive and the predicted result is negative.

$$Accuracy = \frac{TP + TN}{TP + FP + TN + FN} \quad (1)$$

$$Precision = \frac{TP}{TP + FP} \quad (2)$$

$$Recall = \frac{TP}{TP + FN} \quad (3)$$

$$Recall = \frac{TP}{TP + FN} \quad (4)$$

$$F1 - score = 2 \times \frac{Precision \times Recall}{Precision + Recall} \quad (5)$$

3.2. Ablation study (Ablasyon çalışmaları)

CatBoost, AdaBoost, and LightGBM machine learning models achieved higher performances than other machine learning models on the DARWIN dataset used in the 10-fold cross-validation tests. The success of these models in previous studies on data sets with many features is another point that encourages using these three models together in the study. In addition, when more than three classifiers was tried, the performance of the ensemble model decreased. Also, various ablation studies have been conducted to obtain the best classification results in the classification algorithms that form the proposed ensemble learning-based hard voting classifier model. In the LightGBM classifier model, hyperparameters other than the learning rate did not contribute to increasing sensitivity. When the learning rate was selected as 0.5, 91.43% Accuracy, 90% Precision, 94.74% Recall, and 92.31% F1-score values were obtained. When the number of estimators(n_estimators)=100 and learning rate 100 were selected in the optimization studies of the AdaBoost classification algorithm on the dataset, 94.29% Accuracy, 94.74% Precision, 94.74% Recall, and 94.74% F1-score performance results were obtained. A better performance value could not be obtained than the performance values obtained in the studies of increasing and decreasing the learning rate and n_estimators values. Hyperparameters other than n_estimators and learning rate did not have any effect on improving the performance of the AdaBoost classification algorithm. In the performance studies of the CatBoost classification algorithm on the dataset, 97.14% Accuracy, 100% Precision, 94.74% Recall, and 94.30% F1-score values were obtained when learning rate=0.5 and depth=5 were selected. However, the community classification result

obtained from the hard voting classification model was 94.29% Accuracy, 94.74% Precision, 94.74% Recall, and 94.74% F1-score. The high-performance result achieved by CatBoost prevented the ensemble model from making more errors and reduced its learning performance. When learning rate=0.6 and depth=6 were selected in the CatBoost classifier, CatBoost alone performance achieved 91.43% Accuracy, 86.36% Precision, 1.0% Recall and 92.68% F1-score values. However, the decrease in CatBoost’s performance enabled the ensemble model to achieve 97.14% Accuracy, 95% Precision, 100% Recall, and 97.44% F1-score values.

3.3. Comparative analysis of the proposed model with state-of-the-art approaches (Önerilen modelin en son teknoloji yaklaşımlarla karşılaştırmalı analizi)

A comparative analysis of the proposed ensemble model with single models and other studies in the literature is shown in Table 2. As can be seen in Table 2, the proposed methodology achieved superior success compared to other machine learning models on the DARWIN dataset. As a result of ablation studies, the ensemble model obtained as a result of fine adjustments of the LightGBM, AdaBoost, and CatBoost models achieved a performance score of 6 points higher in Acc, 0.5 points in Prec, and 2 points in Spec than the ensemble classification architecture consisting of 9 classifiers proposed by Cilia et al.

Hard voting outputs predictions based on a majority vote from the predictions of independent classifiers. For high performance in hard voting classifiers, predictive classification algorithms should be as independent and different from each other as possible. Therefore, it was adopted as the primary algorithm choice, and the classification algorithms used in this study were independent of each other. Suppose the individual performances of the models are brought closer to each other by fine-grain tuning. In that case, the error between the independent algorithms will increase, and the accuracy of training and testing will be higher.

If a good fit is achieved in the independent algorithms, the hard voting classification technique will achieve success superior to the individual success of the independent models. In addition, since the data set used in the proposed study requires a simpler model, hard voting achieved higher performance than soft voting. Adding more models to the ensemble also reduced learning,

resulting in unsuccessful test results. Different machine learning models, such as SVM, Random forest, and Decision Tree, have also been added to

the machine learning models in the proposed architecture. However, the ensemble learning model has achieved poor test performance.

Table 2. Performance analysis of the proposed ensemble model compared to other methodologies (Önerilen topluluk modelinin diğer metodolojilerle karşılaştırıldığında performans analizi)

Dataset	Classifier	Acc (%)	Prec (%)	Recall (%)	Spec (%)	F1 (%)
DARWIN	AdaBoost	94.29	94.74	94.74	89.64	94.74
	LightGBM	91.43	90	94.74	88.27	92.31
	CatBoost	91.43	86.36	1.0	81.45	92.68
	BFT [14]	91.43	94.44	-	88.24	-
	Ensemble(Proposed)	97.14	95	1.0	90.25	97.44

4. CONCLUSIONS (SONUÇLAR)

This study proposes an ensemble learning model combining powerful machine learning-based classification algorithms such as AdaBoost, CatBoost, and LightGBM to detect Alzheimer's disease from handwriting. The most important feature of this study is that it is a pioneering study in the literature for detecting AD from handwriting. The low number of cases in the data sets before the DARWIN data set did not allow the detection of AD from handwriting. The publicly available DARWIN dataset was used to train and test the proposed methodology. In ensemble learning, the Hard Voting Classifier classification algorithm was employed to produce a result based on the predictions from weak classifiers. Various ablation studies were carried out individually on weak classifier models to obtain the most robust and high-performance ensemble model. Experimental studies were scored comparatively with multiple performance metrics. As a result of the experimental studies, the proposed Ensemble methodology achieved 97.14% Acc, 95% Prec, 100% Recall, 90.25% Spec, and 97.44% F1-score (Dice) performance values. Studies have shown that the proposed work is exceptionally robust.

DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS (ETİK STANDARTLARIN BEYANI)

The author of this article declares that the materials and methods they use in their work do not require ethical committee approval and/or legal-specific permission.

Bu makalenin yazarı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

AUTHORS' CONTRIBUTIONS (YAZARLARIN KATKILARI)

Hakan ÖCAL: He conducted the experiments, analyzed the results and performed the writing process.

Deneyleri yapmış, sonuçlarını analiz etmiş ve makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

CONFLICT OF INTEREST (ÇIKAR ÇATIŞMASI)

There is no conflict of interest in this study.

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

REFERENCES (KAYNAKLAR)

- [1] Armstrong MJ, Litvan I, Lang AE, Bak TH, Bhatia KP, Borroni B, Boxer AL, Dickson DW, Grossman M, Hallett M, Josephs KA, Kertesz A, Lee SE, Miller BL, Reich SG, Riley DE, Tolosa E, Tröster AI, Vidailhet M, Weiner WJ. Criteria for the diagnosis of corticobasal degeneration. *Neurology*. 2013; 80 (5), 496–503.
- [2] Alberdi A, Weakley A, Schmitter-Edgecombe M, Cook DJ, Aztiria A, Basarab A, Barrenechea M. Smart home-based prediction of multidomain symptoms related to Alzheimer's disease, *IEEE J. Biomed. Health Inform*. 2018; 22:1720–31.
- [3] Precup RE, Teban TA, Albu A., Borlea AB, Zamfirache IA, Petriu EM. Evolving fuzzy models for prosthetic hand myoelectric-based control. *IEEE Trans. Instrum. Meas*. 2020; 69: 4625–4636.
- [4] Impedovo D, Pirlo G, Vessio G. Dynamic handwriting analysis for supporting earlier Parkinson's disease diagnosis. *Information*. 2018; 9(10), 247.
- [5] Myszczyńska MA, Ojamies PN, Lacoste AMB, Neil D, Saffari A, Mead R, Hautbergue GM, Holbrook JD, Ferraiuolo L. Applications of machine learning to

- diagnosis and treatment of neurodegenerative diseases. *Nat. Rev. Neurol.* 2020; 16: 440–456.
- [6] Albu A, Precup R, Teban T. Results and challenges of artificial neural networks used for decision making and control in medical applications. *Facta Univ. Ser.: Mech. Eng.* 2019; 17(3): 285-308.
- [7] Tanveer M, Richhariya B, Khan RU, Rashid AH, Khanna P, Prasad M, Lin CT. Machine learning techniques for the diagnosis of Alzheimer's disease: A review. *ACM Trans. Multimedia Comput. Commun. Appl.* 2020; 16(1): 1-35.
- [8] Pereira CR, Pereira DR, Weber SA, Hook C, de Albuquerque VHC, Papa J. A survey on computer-assisted Parkinson's disease diagnosis, *Artif. Intell. Med.* 2019; 95: 48–63.
- [9] Ghaderyan P, Abbasi A, Ebrahimi A, Time-varying singular value decomposition analysis of electrodermal activity: A novel method of cognitive load estimation, *Measurement*, 2018; 126: 102-109.
- [10] Jain N, Virmani D, Abraham A. Proficient 3-class classification model for confident overlap value-based fuzzified aquatic information extracted tsunami prediction. *Intell. Decis. Technol.* 2019; 13: 295–303.
- [11] Borlea ID, Precup RE, Borlea AB, Iercan D. A unified form of fuzzy C-means an K-means algorithms and its partitional implementation. *Knowl.-Based Syst.* 2021; 214: 106731.
- [12] Tonkal Ö, Polat H. Traffic Classification and Comparative Analysis with Machine Learning Algorithms in Software Defined Networks. *Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology.* 2021; 9(1): 71-83.
- [13] Drotár P, Mekyska J, Rektorová I, Masarová L, Smékal Z, Faundez-Zanuy M. Evaluation of handwriting kinematics and pressure for differential diagnosis of parkinson's disease. *Artif. Intell. Med.* 2016; 67: 39–46.
- [14] Loconsole C, Cascarano GD, Brunetti A, Trotta GF, Losavio G, Bevilacqua V, Di Sciascio E. A model-free technique based on computer vision and sEMG for classification in Parkinson's disease by using computer-assisted handwriting analysis. *Pattern Recognition Letters.* (2019); 121: 28-36.
- [15] Moetesum M, Siddiqi I, Vincent N, Cloppet F. Assessing visual attributes of handwriting for prediction of neurological disorders—A case study on Parkinson's disease. *Pattern Recognition Letters.* 2018; 121: 19-27.
- [16] Slavin MJ, Phillips JG, Bradshaw JL, Hall KA, Presnell I. Consistency of handwriting movements in dementia of the Alzheimer's type: a comparison with Huntington's and Parkinson's diseases. *J. Int. Neuropsychol.* 1999; 5(1): 20–25.
- [17] Teulings HL, Stelmach GE. Control of stroke size, peak acceleration, and stroke duration in Parkinsonian handwriting. *Hum. Mov. Sci.* 1991; 10 (2): 315–334.
- [18] Thomas M, Lenka A, Kumar Pal P. Handwriting Analysis in Parkinson's Disease: Current Status and Future Directions. *Movement Disorders Clinical Practice.* 2017; 4(6): 806-818.
- [19] Walton J, Handwriting changes due to aging and Parkinson's syndrome. *Forensic Sci. Int.* 1997; 88(3): 197-214.
- [20] Cilia ND, De Gregorio G, De Stefano C, Fontanella F, Marcelli A, Parziale A, Diagnosing Alzheimer's disease from on-line handwriting: A novel dataset and performance benchmarking. *Engineering Applications of Artificial Intelligence.* 2022; 111: 0952-1976.
- [21] Chai J, Wu R, Li A, Xue C, Qiang Y, Zhao J, Zhao Q, Yang Q. Classification of mild cognitive impairment based on handwriting dynamics and qEEG. *Comput Biol Med.* 2023; 152:106418.
- [22] El-Yacoubi MA, Garcia-Salicetti S, Kahindo C, Rigaud AS, Cristancho-Lacroix V. From aging to early-stage Alzheimer's: Uncovering handwriting multimodal behaviors by semi-supervised learning and sequential representation learning, *Pattern Recognition.* 2019; 86: 112-133.
- [23] Kahindo C, El-Yacoubi MA, Garcia-Salicetti S, Cristancho-Lacroix V, Kerhervé H, Rigaud AS. Semi-global Parameterization of Online Handwriting Features for Characterizing Early-Stage Alzheimer and Mild Cognitive Impairment. *IRBM.* 2018; 39(6): 421-429.
- [24] Sarin K, Bardamova M, Svetlakov M, Koryshev N, Ostapenko R, Hodashinskaya A, Hodashinsky I. A three-stage fuzzy classifier method for Parkinson's disease diagnosis using dynamic handwriting analysis. *Decision Analytics Journal.* 2023; 8: 100274.

EyeMo: A Solution for Individuals with Disabilities to Use a Computer Through Eye Movements

Hakan YILMAZ^{1*}, Mehmet ÖZDEM²

¹ Karabük University, Engineering Faculty, Medical Engineering Department, Karabük, Türkiye

² Türk Telekom, Ankara, Türkiye

Article Info

Research article
Received: 13/12/2023
Revision: 02/01/2024
Accepted: 03/01/2024

Keywords

Pupil detection
Eye tracking
Disabilities individual
Image processing

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 13/12/2023
Düzeltilme: 02/01/2024
Kabul: 03/01/2024

Anahtar Kelimeler

Göz bebeği tespiti
Göz takibi
Engelli birey
Görüntü işleme

Graphical/Tabular Abstract (Grafik Özet)

This study focuses on developing a computer control application using eye movements to assist individuals with neuromuscular diseases and spinal cord injuries. The application, utilizing a lightweight eyeglass frame and mini-USB camera, accurately detects the user's pupil. The user interface enables tasks like web browsing and video watching. / Bu çalışma, nöromusküler hastalıkları ve omurilik yaralanması olan bireylere yardımcı olmak için göz hareketlerini kullanan bir bilgisayar kontrol uygulamasının geliştirilmesine odaklanmaktadır. Hafif bir gözlük çerçevesi ve mini-USB kamera kullanan uygulama, kullanıcının gözbebeğini doğru bir şekilde algılar. Kullanıcı arayüzü web'de gezinme ve video izleme gibi görevleri mümkün kılar.

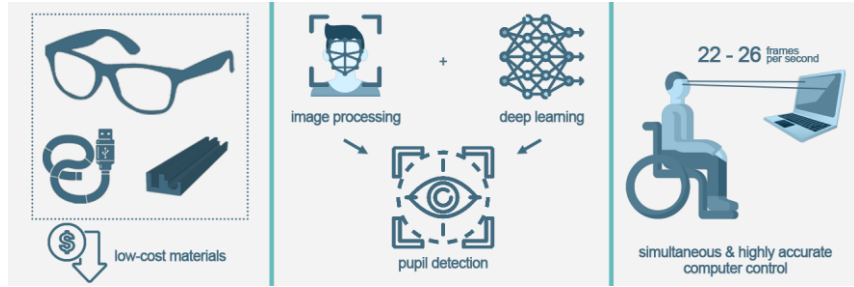


Figure A: EyeMo: A Solution for Individuals with Disabilities to Use a Computer Through Eye Movements / **Şekil A:** EyeMo: Dezavantajlı Bireylerin Göz Hareketleriyle Bilgisayar Kullanması İçin Bir Çözüm

Highlights (Önemli noktalar)

- An application has been developed for disadvantaged individuals to use computers with their pupils. / Dezavantajlı bireylerin göz bebekleriyle bilgisayar kullanmaları için uygulama geliştirilmiştir.
- The developed application stands out with its low cost and the technology it uses. / Geliştirilen uygulama düşük maliyeti ve kullandığı teknoloji ile öne çıkmaktadır.
- Traditional image processing methods and deep learning techniques were used together. 22-26 frames of image can be processed per second. / Geleneksel görüntü işleme yöntemleri ve derin öğrenme teknikleri birlikte kullanılmıştır. Saniyede 22-26 kare görüntü işlenebilmektedir. /

Aim (Amaç): This study aimed to develop a computer control application that uses eye movements to help individuals with neuromuscular diseases and spinal cord injuries navigate and interact with computers. / Bu çalışma, nöromusküler hastalıkları ve omurilik yaralanması olan bireylerin bilgisayarlarda gezinmesine ve bilgisayarlara etkileşime girmesine yardımcı olmak için göz hareketlerini kullanan bir bilgisayar kontrol uygulaması geliştirmeyi amaçlamıştır.

Originality (Özgünlük): A high-accuracy and low-cost solution was produced by using traditional methods and deep learning techniques together. / Geleneksel yöntemler ve derin öğrenme teknikleri birlikte kullanılarak yüksek doğruluklu ve düşük maliyetli bir çözüm üretilmiştir.

Results (Bulgular): The application offers functionalities like left-click, right-click, double-click, and scrolling, enabling users with motor function challenges to perform tasks from internet browsing to video watching. 22-26 images per second can be processed simultaneously. / Uygulama, sol tıklama, sağ tıklama, çift tıklama ve kaydırma gibi işlevler sunarak, motor fonksiyon zorlukları yaşayan kullanıcıların internette gezinmekten video izlemeye kadar görevleri gerçekleştirmesine olanak tanımaktadır. Saniyede 22-26 kare görüntü eş zamanlı olarak işlenebilmektedir.

Conclusion (Sonuç): With this study, a low-cost and high-accuracy application that performs simultaneous pupil detection has been developed. / Bu çalışma ile eş zamanlı göz bebeği tespiti yapan, düşük maliyetli ve yüksek doğruluklu bir uygulama geliştirilmiştir.



EyeMo: A Solution for Individuals with Disabilities to Use a Computer Through Eye Movements

Hakan YILMAZ^{1*}, Mehmet ÖZDEM²

¹ Karabuk University, Engineering Faculty, Medical Engineering Department, Karabuk, Türkiye

² Türk Telekom, Ankara, Türkiye

Article Info

Research article
Received: 13/12/2023
Revision: 02/01/2024
Accepted: 03/01/2024

Keywords

Pupil detection
Eye tracking
Disabilities individual
Image processing

Abstract

The maintenance of an upright posture and the execution of desired movements by individuals necessitate the seamless and harmonious functioning of the muscular and skeletal systems. Neuromuscular diseases, spinal cord injuries, and related conditions can adversely impact individuals' motor functions, leading to a loss of muscle strength and, in severe cases, paralysis. Such health challenges may result in social isolation and detachment from one's social life. This study is focused on the development of a computer control application utilizing eye movements to aid users in navigating and interacting with computers. The system utilizes a lightweight eyeglass frame and a mini-USB camera to accurately capture images of the user's pupil. Pupil detection is achieved through a combination of traditional image processing and deep learning techniques, ensuring high accuracy under diverse conditions. The user interface incorporates functionalities such as left-click, right-click, double-click, and scrolling, empowering users to perform tasks ranging from internet browsing to video watching. After the development of the application, a request for research permission was submitted to the local institution to allow volunteers to test the application, adhering to ethical standards. Following the approval of ethical clearance, the application was made available for use by volunteers, and feedback was systematically collected. Upcoming versions of the application have the potential for integration with smart home systems. Additionally, the developed application can be used in games and for educational purposes.

EyeMo: Dezavantajlı Bireylerin Göz Hareketleriyle Bilgisayar Kullanması İçin Bir Çözüm

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 13/12/2023
Düzeltilme: 02/01/2024
Kabul: 03/01/2024

Anahtar Kelimeler

Göz bebeği tespiti
Göz takibi
Engelli birey
Görüntü işleme

Öz

Bireylerin dik duruşu sürdürmesi ve istenilen hareketleri yapabilmesi kas ve iskelet sistemlerinin kusursuz ve uyumlu çalışmasını gerektirmektedir. Nöromusküler hastalıklar, omurilik yaralanmaları ve benzer durumlar bireylerin motor fonksiyonlarını olumsuz yönde etkileyerek kas gücü kaybına ve ciddi vakalarda felce yol açabilir. Bu tür sağlık sorunları kişinin sosyal izolasyonuna ve sosyal hayatından kopmasına neden olabilir. Bu çalışma, kullanıcıların bilgisayarda gezinmesine ve bilgisayarla etkileşime girmesine yardımcı olmak için göz hareketlerinden yararlanan bir bilgisayar kontrol uygulamasının geliştirilmesine odaklanmaktadır. Geliştirilen yazılım, kullanıcının gözbebeğinin görüntülerini doğru bir şekilde yakalamak için hafif bir gözlük çerçevesi ve bir mini USB kamera kullanır. Gözbebeği tespiti, geleneksel görüntü işleme ve derin öğrenme tekniklerinin bir kombinasyonu yoluyla gerçekleştirilir ve çeşitli koşullar altında yüksek doğruluk sağlanır. Kullanıcı arayüzü, sol tıklama, sağ tıklama, çift tıklama ve kaydırma gibi işlevleri barındırarak kullanıcıların internette gezinmekten video izlemeye kadar çeşitli görevleri gerçekleştirmesine olanak tanır. Uygulamanın geliştirilmesinin ardından, gönüllülerin uygulamayı etik standartlara bağlı kalarak test etmeleri için yerel etik kuruldan araştırma etik kurulu alınmıştır. Etik onayın alınmasının ardından uygulama gönüllülerin kullanımına sunulmuş ve sistematik olarak geri bildirimler toplanmıştır. Uygulamanın gelecek versiyonları akıllı ev sistemleriyle entegrasyon potansiyeline sahiptir. Ayrıca geliştirilen uygulama oyunlarda ve eğitim amaçlı da kullanılabilir.

1. INTRODUCTION (GİRİŞ)

Individuals' movements are realized through the coordinated and collaborative functioning of many neuron groups. The control of these movements is generally provided by the central nervous system, which actively involves the brain and spinal cord. In particular, motor neuron groups are responsible for generating the signals required for the execution of movements and for completing the movement of the skeletal and muscular system according to the generated signal [1]. When motor neurons are unable to perform their function due to external factors such as diseases or trauma, movement restrictions may occur. Progressive loss of strength is a clinically prominent feature of motor neuron diseases. This loss forms the basis for a significant portion of the challenges faced by patients, and it is a major contributor to healthcare costs associated with this group of diseases. Functions such as eating, breathing, speaking, walking, and fine motor movements are all dramatically affected by changes in muscle strength [2], [3]. Neuromuscular diseases constitute a group of disorders that arise due to problems related to the structure or function of muscles. These diseases lead to the inability of muscles to perform their normal function, a decrease in muscle strength, and sometimes loss of muscle tissue. These diseases can be of genetic origin or may develop later in life [4], [5]. The spinal cord can lose its function due to pressure resulting from diseases or trauma. As a consequence, the damaged areas become unable to perform their communication function, leading to the loss of connection between the brain and organs below the damaged regions. This results in the occurrence of spinal cord paralysis [6]. Examples of such disorders include Amyotrophic Lateral Sclerosis (ALS/MND), Charcot Marie Tooth (CMT), Duchenne Muscular Dystrophy (DMD), various myopathies, muscular dystrophies, and tetraplegia due to spinal cord injury. According to the Annual Health Statistics of the Turkish Ministry of Health, 3.28% of deaths in our country are attributed to diseases of the nervous system and sensory organs. In Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD) countries, deaths due to diseases of the nervous system and sensory organs account for 5% of total deaths [7]. The prevalence of ALS in our country is reported to be between 3.7-7.3 per 100,000, while the prevalence of DMD is reported to be between 15.9-19.5 per 100,000 [8], [9]. The global prevalence of motor neuron diseases is reported to be 3.37 per 100,000, while in our country, it is reported as 3.6 [10]. Most of these diseases lack a known effective treatment. Patients may experience difficulties in

using their limbs, and respiratory and speech difficulties are also observed. This situation gradually weakens patients' interactions with their surroundings. These processes can be challenging for both patients and caregivers [11]. In the advanced stages of diseases, patients become dependent on the bed and caregivers, moving only their heads, and in the final stages, only their eye muscles. At this stage, patients rely on communication tools using their heads and eyes with physicians, caregivers, and families. Patients interact with their surroundings by using their heads and eyes [12]. Therefore, there is a need for alternative tools that patients can use to communicate with their heads and/or eyes.

It is a well-known fact that computers have been used as a means of communication for many years [13]. Especially with the existence of social media platforms, their impact on communication continues to grow. Individuals suffering from the aforementioned diseases use computers both to communicate with their environment and to spend time. However, for individuals who cannot use their hands and eventually only use their eyes, using a computer becomes quite challenging [14]. Various studies have been conducted to overcome this challenge, and one prominent area is the field of Augmentative and Alternative Communication (AAC). Eye-tracking systems are at the forefront of these studies, where infrared cameras are commonly used. In eye-tracking systems, infrared cameras are generally utilized. When the infrared rays are absorbed by the pupil, the pupil becomes darker, while other areas remain lighter in color. This creates a contrast between the pupil and other areas, making the pupil easily distinguishable. When an infrared sensor is not used, standard cameras are employed. With a set of defined rules and the identified pupil, the use of a computer mouse or keyboard can be facilitated [12], [15]–[21]. Additionally, there are studies that enable computer usage by tracking the movement of an individual's head [22]–[26].

Image processing plays a significant role in many aspects of modern technology. In fields such as medicine, security, automation, autonomous vehicles, and many more, image processing is utilized for tasks such as digital image analysis, object recognition, face recognition, object tracking, and similar functions. These tasks require the ability to mimic the complexity and speed of the human eye and mind. Deep learning provides the ability to learn from large datasets using artificial neural networks. In image processing, a deep learning model known as Convolutional Neural

Networks (CNNs) has become highly effective, especially for working with large and complex visual data. Research is also being conducted on the detection of the pupil using deep learning, and results show much higher accuracy compared to standard image processing methods [27]–[29].

During the examination of the literature on eye tracking systems, it is seen that for high sensitivity in eye tracking systems, the cameras that will detect the pupil must be positioned to detect the eye clearly. This is often achieved by using eyeglass frames or headbands. Particularly, the prices of infrared sensor cameras are higher than standard cameras. However, cameras modified to become infrared sensors tend to be heavier than usual, causing discomfort and earaches when worn on the head or glasses for extended periods. This study aims to develop software that allows individuals with disabilities to control the computer using their pupils. For this purpose, a standard lightweight mini-camera, eyeglass frame, and a glasses-camera holder were used to capture images of the pupil. The developed application was announced to relevant non-governmental organizations, and with their support, it was tested by users, and feedback was collected.

2. MATERIALS AND METHODS (MATERİYAL VE METOD)

2.1. Eyeglass Frame, Camera, And Holder (Gözlük Çerçevesi, Kamera ve Tutucu)

In order to detect users' pupils accurately, the camera needs to be positioned as close to the eye as possible. To achieve this, a standard eyeglass frame that does not interfere with the user's vision and is readily available in the market has been selected. The chosen frame weighs 14 grams. For the camera, a readily available USB camera with a diameter of 3.9 mm was preferred. The cable of the camera is 120 cm long, and its weight is 48 grams. The cable is surrounded by a rigid wire, allowing it to bend as desired. Due to its small diameter, it does not obstruct the user's field of vision. To stably integrate the camera and eyeglass frame and allow easy detachment when needed, an eyeglass-camera holder has been designed. It has been 3D printed and made ready for use. The camera can be positioned on the right or left side as desired. If the user has their own glasses, the frame can be modified accordingly and reprinted. The holder is 6 cm long and weighs 2 grams. When the eyeglass frame, camera, and holder are assembled, images can be captured through the application. The total weight of the created module (including the camera cable)

is 64 grams. The assembled module is depicted in Figure 1.



Figure 1. Eyeglass frame, camera, and holder (Gözlük çerçevesi, kamera ve tutucu)

2.2. Programming Environment (Programlama Ortamı)

The application is intended to run independently of the operating system. Therefore, Python 3.10 programming language has been preferred. PyCharm 2022 has been used as the programming environment. The application has been developed on a computer with an AMD Ryzen 7 processor and 16 GB of memory.

2.3. Collection Of User Feedback (Kullanıcılardan Geri Dönüşlerin Toplanması)

Before starting the development of the application, discussions were held with non-governmental organizations to introduce the purpose of the application and learn about their expectations. In this context, after developing the application, further discussions were conducted with non-governmental organizations to identify random voluntary individuals. Ethical approval was obtained from the Karabük University Social and Human Sciences Scientific Research and

Publication Ethics Board. After providing the necessary information to the volunteers, they were asked to use the developed application for a period and provide their opinions. Open-ended questions were asked to these individuals using interview methods. The interviews were conducted via phone calls.

3. DEVELOPED APPLICATION AND RESULTS (GELİŞTİRİLEN UYGULAMA VE SONUÇLARI)

3.1. Image Capture And Pupil Detection

(Görüntünün Alınması ve Göz Bebeğinin Tespit Edilmesi)

The camera used for simultaneous image transfer is a USB-connected plug-and-play camera. Therefore, it can directly operate on current operating systems without the need for any software installation. While the application is in use, the camera captures images at a resolution of 1280X720 and in the range of 22-26 frames per second (FPS). Precisely locating the image of the pupil in the captured frame is crucial for the accurate detection of the pupil. To achieve this, guidelines have been drawn on the window where the image is displayed in the application. By centering the pupil with these guidelines, continuous and highly accurate detection of the pupil is ensured (Figure 2a).

Additionally, aligning the user's forehead with the computer screen enhances the application's performance (Figure 2b). with the "line" formed from one side of the keyseat.

During the pupil detection process, traditional image processing methods were initially attempted; however, they exhibited low performance under different lighting conditions, varying pupil colors, and skin tones. Subsequently, deep learning-based methods were explored. The weights of the deep learning model used by Vera-Olmos et al. [28], based on the Google Inception deep learning network [30], were utilized. It was observed that the pupil was detected almost losslessly using this approach. In their study, Vera-Olmos et al. reported a 96% success rate in detecting the pupil with the developed model [28]. The weights and the deep learning network for this study were configured to process images from the camera simultaneously. As a result, as seen in Figure 2, the pupil can be detected with high accuracy in images captured by the camera. The pupil detection process is performed simultaneously without delay for each frame in the range of 22-26 frames per second obtained from the camera. Thus, 38-45 milliseconds are required to detect the pupil and perform the mouse function.

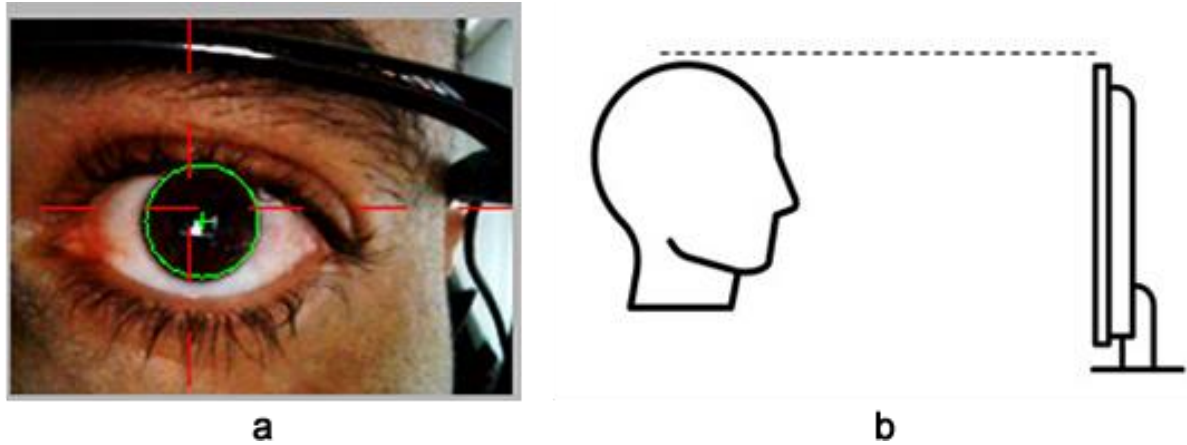


Figure 2. Alignment of guide lines and the pupil (a), alignment of the head with the screen (b) (Kılavuz çizgileri ve göz bebeğinin hizalanması (a), başın ekran ile hizalanması (b))

3.2. Calibration (Kalibrasyon Yapılması)

Calibration is essential for the application to recognize the dimensions of the used screen. Therefore, calibration needs to be performed each time the application is restarted. When calibration is initiated, the calibration icon appears at a total of 9 points, starting from the middle of the page and clockwise from the bottom left corner, at three-

second intervals and sequentially. The calibration points and where these points appear are provided in Figure 3. To perform an accurate calibration, the user needs to keep their head steady and track the calibration points with their pupil. After calibration is completed, the cursor will become responsive to the movements of the pupil, allowing control through eye movements.

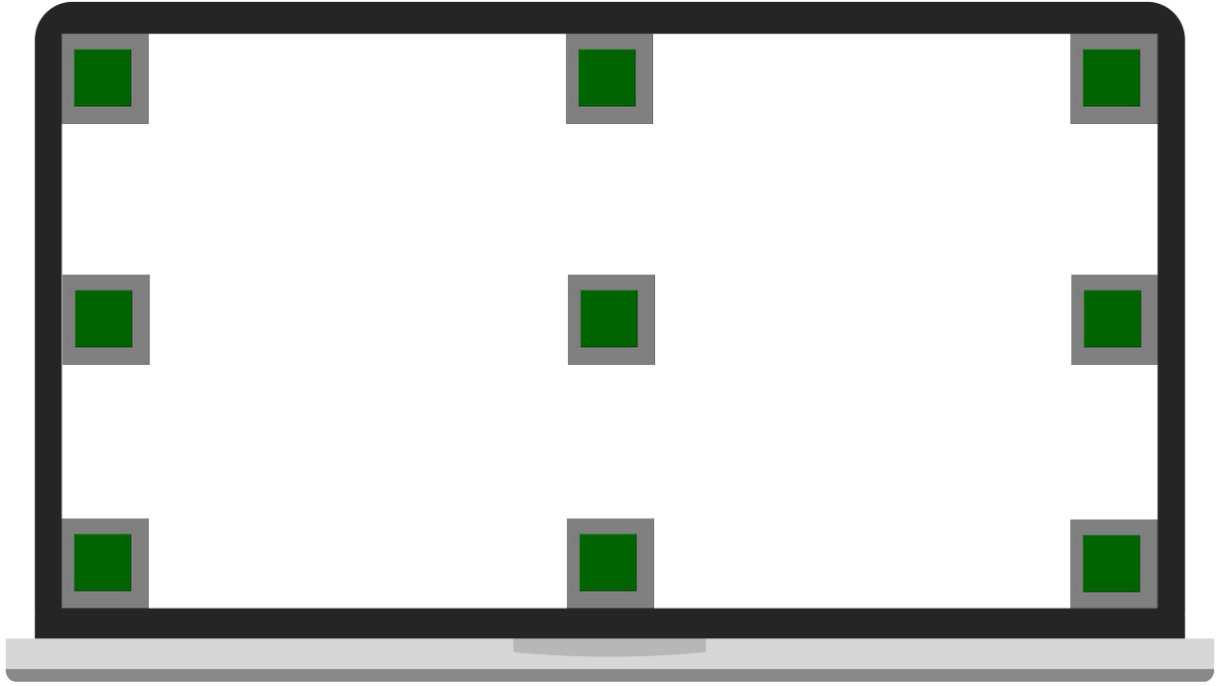


Figure 3. Calibration points and their display locations (Kalibrasyon için görünen noktalar ve görünme yerleri)

3.3. Using The Application (Uygulamanın Kullanılması)

After calibration, when the application starts capturing images from the camera, each selected function becomes active when waiting for the same duration as the waiting time set for all buttons on the interface (default waiting time is 2 seconds). When the waiting time is completed, the application plays a clicking sound, indicating that the function has been activated.

3.3.1. Application Interface (Uygulama Arayüzü)

The application has a window that does not take up much space on the screen and stays on top of all other windows continuously. Through this window, the functions of the application can be modified, and it is possible to monitor whether the pupil is detected or not (Figure 4). Details of the application interface are as follows:

1. File Menu: This menu includes the sub-menus for Settings and Exit.
2. Calibration Menu: Calibration must be performed each time the application is started to achieve high accuracy. Calibration can be initiated from this menu.
3. Connection Menu: Used to start the image stream from the selected camera.

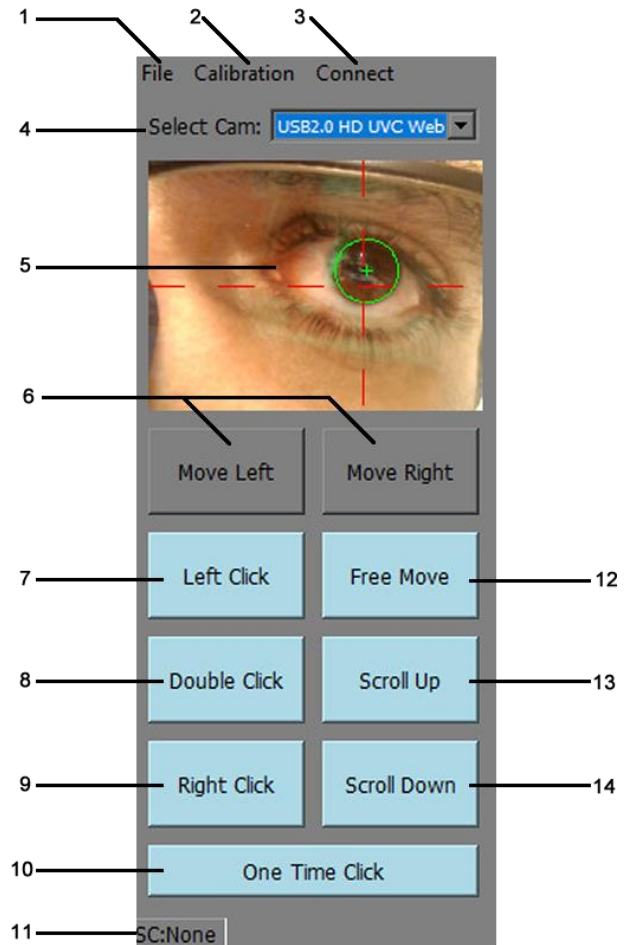


Figure 4. Application interface (Uygulama arayüzü)

4. Camera Selector: Plug-and-play cameras connected to your computer are listed here. You need to select the appropriate camera and start it from the "Connection" menu.

5. Image Area: Visible when image capture begins.

6. Left Edge, Right Edge: When the application is first opened, it appears in the middle of the screen. While using the application, you can position the application window to the left or right side of the screen. The selected side is highlighted in orange.

7. Left Click: Used to activate the left-click function of the mouse. When active, the button color turns green. To deactivate, move the mouse cursor over it and wait for the specified waiting time.

8. Double Click: Used to activate the double-click function of the mouse. When active, the button color turns green. To deactivate, move the mouse cursor over it and wait for the specified waiting time.

9. Right Click: Used to activate the right-click function of the mouse. When active, the button color turns green. To deactivate, move the mouse cursor over it and wait for the specified duration.

10. Single Click, Continuous Click: Can be selected to continue until the used mouse functions are canceled or to work once. If the button color is blue, the selected function works once. If you want the selected mouse function to work continuously, move over the button and wait for the specified duration. The button color turns green when continuous click mode is activated.

11. Calibration Information: Indicates the calibration status. When calibration is not performed, it shows "SC:N." When calibration is successfully done, it shows "SC:OK."

12. Free Move: Allows moving the mouse icon without any mouse click function. When active, the button color turns green. To deactivate, move the mouse cursor over it and wait for the specified duration.

13. Scroll Up: Scrolls up by the distance specified in the settings menu of a webpage or similar locations. When active, the button color turns green. To deactivate, move the mouse cursor over it and wait for the specified duration.

14. Scroll Down: Scrolls down by the distance specified in the settings menu of a webpage or similar locations. When active, the button color

turns green. To deactivate, move the mouse cursor over it and wait for the specified duration.

3.3.2. Settings Menu (Ayarlar Menüsü)

Under this menu, default values for the application can be modified. The visual representation of the Settings window (Figure 5) and details of its functions are provided below.

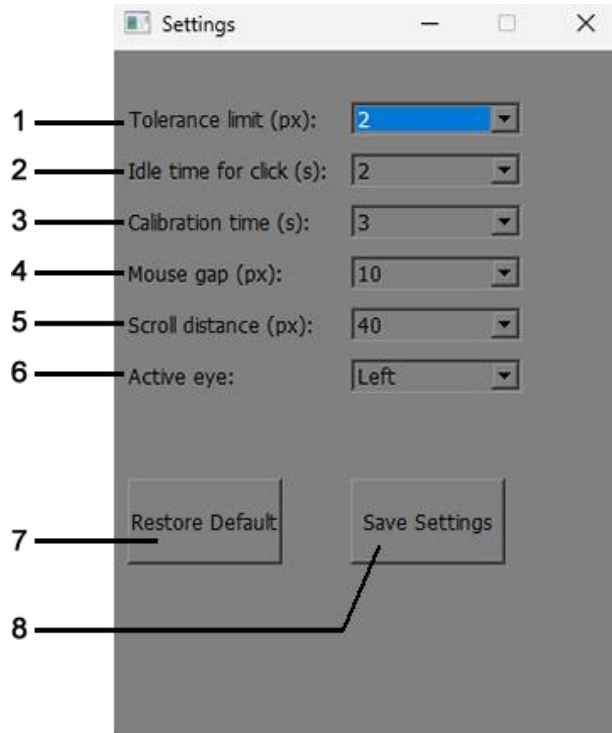


Figure 5. View of settings window (Ayarlar penceresinin görünümü)

1. Tolerance Limit: This setting is used to adjust the off-screen distance required to move the cursor left, right, up, and down. It ensures the cursor remains stationary while reading text or watching a video, and can be increased or decreased based on screen size.

2. Wait Time: When any cursor function is selected, this setting determines how long it takes for the function to be triggered. The function is activated when the cursor remains idle on any button for the duration specified here.

3. Calibration Time: Indicates how long the calibration points will be displayed on the screen.

4. Cursor Gap: Adjusts the distance the cursor moves left, right, up, and down with each gaze. Depending on the screen scaling used, this value can be decreased or increased. As this value decreases, the cursor moves more slowly, but its sensitivity increases.

5. Scroll Amount: Determines the amount of upward and downward scrolling achieved using the mouse. Increasing this value results in more significant scrolling.
6. Active Eye: Used to specify the eye within the camera's view.
7. Reset: Used to revert to default settings.
8. Save: Used to save the modified settings.

3.3.3. Using The Application (Uygulamanın Kullanılması)

After launching the application, the camera needs to be activated for the detection of the pupil. Subsequently, aligning the camera and the pupil prepares the application for use. At this stage, calibration is required to detect the boundaries of the screen used by the application and adjust them according to the pupil. Once calibration is completed, the cursor follows the pupil, enabling movement in left, right, up, and down directions. Depending on the selected function within the application, it allows left-click, right-click, double-click, scrolling down, and scrolling up. To deactivate the chosen function, the user needs to hover the cursor over the active function on the application or wait over the "free move" button. This way, the user can navigate through websites, type using a virtual keyboard, watch favorite videos, and engage with social media.

3.4. User Feedback (Kullanıcı Geridönüşleri)

Relevant non-governmental organizations were contacted and asked to select volunteers to try the application. Initially, five individuals were contacted, informed about the application, and provided with the voluntary consent form before handing over the application. Users were asked to use the application, share their opinions, and respond to open-ended questions. In response to the question "What are your thoughts on the benefits of this application?" the majority of users stated that it is particularly beneficial for individuals with disabilities, especially those who cannot move below the neck. When asked "What tasks can you accomplish using this application that you couldn't do on the computer before?" users responded with "I can browse the internet and watch videos." Regarding the question "What aspects of this application, if any, need improvement?" users generally mentioned that the frame of the glasses they were using tilted towards the direction where the camera was attached after a while. This caused the calibration to be disrupted, requiring

recalibration. Users found this aspect not user-friendly. Another drawback mentioned was the need to look outside the screen in left, right, up, and down directions to move the cursor, leading to eye strain after a while. In response to the question "Would you consider using this application in the future?" users expressed that they would use it if the mentioned drawbacks were addressed. In their overall thoughts on the application, users conveyed that the application is necessary and beneficial but acknowledged that there are areas that need improvement.

4. CONCLUSIONS (SONUÇLAR)

In this study, an application was developed to enable individuals with disabilities to use a computer through eye movements. The developed application successfully detects the user's pupil, allowing simultaneous use of the pupil and the cursor. The application was tested by volunteer individuals and generally found to be successful.

Unlike many eye-tracking devices that are attached to the screen or table, the camera in this study is used with glasses frames and remains fixed on the head. This design contributes to a higher success rate in detecting the pupil when the direction and orientation of the head change.

Many eye-tracking systems on the market use infrared sensors, leading to increased costs. In this study, a standard camera operating in natural daylight was used, resulting in a lower system cost.

Traditional image processing methods can exhibit low success rates in pupil detection due to factors such as lighting conditions and eyeglass lenses. The use of deep learning-supported pupil detection in this study contributes to a high success rate.

In future studies, using built-in cameras above the screen with artificial intelligence support could prevent calibration disruption issues experienced by users compared to glasses-mounted cameras.

The application developed can find utility not only for individuals with disabilities but also in gaming, educational technologies, and the defense industry. Shortcuts assigned to the application can provide easier access to functions frequently used by individuals. Integration with smart home systems can enhance the comfort of individuals with disabilities, especially those living alone.

ACKNOWLEDGMENTS (TEŞEKKÜR)

No funding was received for this study.

DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS (ETİK STANDARTLARIN BEYANI)

Ethical approval was obtained from the Karabük University Social and Human Sciences Scientific Research and Publication Ethics Board to collect volunteer feedback in this study.

Bu çalışmadaki gönüllü geri dönüşlerinin toplanması için Karabük Üniversitesi Sosyal ve Beşeri Bilimler Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Kurulu'ndan etik onay alınmıştır.

AUTHORS' CONTRIBUTIONS (YAZARLARIN KATKILARI)

Hakan YILMAZ: He carried out the literature review, development of the application and writing of the article.

Literatür taramasını, uygulamanın geliştirilmesini ve makalenin üretimini gerçekleştirmiştir.

Mehmet ÖZDEM: He carried out the literature review, and writing of the article.

Literatür taramasını, makalenin üretimini gerçekleştirmiştir.

CONFLICT OF INTEREST (ÇIKAR ÇATIŞMASI)

There is no conflict of interest in this study.

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

REFERENCES (KAYNAKLAR)

[1] P. S. G. Stein, Ed., *Neurons, networks, and motor behavior*, 1. paperback ed. in Computational neuroscience. Cambridge, Mass. London: MIT Press, 1999.

[2] J. M. Shefner, 'Strength Testing in Motor Neuron Diseases', *Neurotherapeutics*, vol. 14, no. 1, pp. 154–160, Jan. 2017, doi: 10.1007/s13311-016-0472-0.

[3] T. M. McMillan, M. P. Barnes, and C. D. Ward, *Handbook of Neurological Rehabilitation*, 2nd ed. Hove: Taylor and Francis, 2014.

[4] J. C. Van Den Bergen *et al.*, 'Dystrophin levels and clinical severity in Becker muscular dystrophy patients', *Journal of Neurology, Neurosurgery & Psychiatry*, vol. 85, no. 7, pp. 747–753, Jul. 2014, doi: 10.1136/jnnp-2013-306350.

[5] E. Tiryaki and H. A. Horak, 'ALS and Other Motor Neuron Diseases', *CONTINUUM: Lifelong Learning in Neurology*, vol. 20, pp. 1185–1207, Oct. 2014, doi: 10.1212/01.CON.0000455886.14298.a4.

[6] K. Nas, L. Yazmalar, V. Şah, A. Aydın, and K. Öneş, 'Rehabilitation of spinal cord injuries', *World J Orthop*, vol. 6, no. 1, pp. 8–16, Jan. 2015, doi: 10.5312/wjo.v6.i1.8.

[7] B. Bora Başara, İ. Soyutun Çağlar, A. Aygün, T. A. Özdemir, and B. Kulali, Eds., *T.C. Sağlık Bakanlığı Sağlık İstatistikleri Yıllığı*. Türkiye Cumhuriyeti Sağlık Bakanlığı Sağlık Bilgi Sistemleri Genel Müdürlüğü, 2023.

[8] E. A. Arslan and A. Cansu, 'Distrofinopati Hastalarının Demografik, Klinik ve Genetik Özellikleri: Tek Merkez Üçüncü Basamak Deneyimi', *Acibadem Univ Sağlık Bilim Derg*, no. 2, Art. no. 2, Jun. 2020.

[9] M. Tütüncü, 'Motor Nöron Hastalıklarında Epidemiyoloji', *Türkiye Klinikleri J Neurol-Special Topics*, vol. 16, no. 1, pp. 9–14, 2023.

[10] J. Park, J.-E. Kim, and T.-J. Song, 'The Global Burden of Motor Neuron Disease: An Analysis of the 2019 Global Burden of Disease Study', *Front. Neurol.*, vol. 13, p. 864339, Apr. 2022, doi: 10.3389/fneur.2022.864339.

[11] C.-S. Hwang, H.-H. Weng, L.-F. Wang, C.-H. Tsai, and H.-T. Chang, 'An Eye-Tracking Assistive Device Improves the Quality of Life for ALS Patients and Reduces the Caregivers' Burden', *Journal of Motor Behavior*, vol. 46, no. 4, pp. 233–238, Jul. 2014, doi: 10.1080/00222895.2014.891970.

[12] H. Yılmaz, P. H. Aydın, and M. Turan, 'Gözlü Bilgisayar Kullanımı İçin Prototip Geliştirilmesi', *Computer Science*, Sep. 2021, doi: 10.53070/bbd.989215.

[13] J. C. Licklider and R. W. Taylor, 'The computer as a communication device', *Science and technology*, vol. 76, no. 2, pp. 1–3, 1968.

[14] A. Kaya and F. Özcan, 'Communication with the patients of Amyotrophic Lateral Sclerosis and current technology', *tjtfp*, vol. 8, no. 2, pp. 43–48, Jun. 2017, doi: 10.15511/tjtfp.17.00243.

[15] D. R. Beukelman, S. Fager, L. Ball, and A. Dietz, 'AAC for adults with acquired neurological conditions: A review', *Augmentative and Alternative Communication*, vol. 23, no. 3, pp. 230–242, Jan. 2007, doi: 10.1080/07434610701553668.

[16] R. Spataro, M. Ciriaco, C. Manno, and V. L. Bella, 'The eye-tracking computer device for

- communication in amyotrophic lateral sclerosis’, *Acta Neurologica Scandinavica*, vol. 130, no. 1, pp. 40–45, 2014, doi: <https://doi.org/10.1111/ane.12214>.
- [17] D. Beukelman, S. Fager, and A. Nordness, ‘Communication Support for People with ALS’, *Neurology Research International*, vol. 2011, pp. 1–6, 2011, doi: 10.1155/2011/714693.
- [18] P. Majaranta *et al.*, *Gaze Interaction and Applications of Eye Tracking: Advances in Assistive Technologies*. IGI Global, 2012. doi: 10.4018/978-1-61350-098-9.
- [19] N. A. Atasoy, A. C. Avusog, and F. Atasoy, ‘Real-time motorized electrical hospital bed control with eye-gaze tracking’, p. 12.
- [20] A. Murata, ‘Eye-gaze input versus mouse: Cursor control as a function of age’, *International Journal of Human-Computer Interaction*, vol. 21, no. 1, pp. 1–14, Sep. 2006, doi: 10.1080/10447310609526168.
- [21] H. Drewes, ‘Eye Gaze Tracking for Human Computer Interaction’, Ludwig-Maximilians-Universität München, 2010. doi: 10.5282/EDOC.11591.
- [22] O. Tuisku, V. Surakka, V. Rantanen, T. Vanhala, and J. Lekkala, ‘Text Entry by Gazing and Smiling’, *Advances in Human-Computer Interaction*, vol. 2013, pp. 1–13, 2013, doi: 10.1155/2013/218084.
- [23] C. Sanchez, V. Costa, R. Garcia-Carmona, E. Urendes, J. Tejedor, and R. Raya, ‘Evaluation of Child–Computer Interaction Using Fitts’ Law: A Comparison between a Standard Computer Mouse and a Head Mouse’, *Sensors*, vol. 21, no. 11, p. 3826, May 2021, doi: 10.3390/s21113826.
- [24] C. A. M. Pereira, R. B. Neto, A. C. Reynaldo, M. C. De Miranda Luzo, and R. P. Oliveira, ‘Development and Evaluation of a Head-Controlled Human-Computer Interface with Mouse-Like Functions for Physically Disabled Users’, *Clinics*, vol. 64, no. 10, pp. 975–981, Oct. 2009, doi: 10.1590/S1807-59322009001000007.
- [25] R. H. Abiyev and M. Arslan, ‘Head mouse control system for people with disabilities’, *Expert Systems*, vol. 37, no. 1, p. e12398, Feb. 2020, doi: 10.1111/exsy.12398.
- [26] Y. Fu and T. S. Huang, ‘hMouse: Head Tracking Driven Virtual Computer Mouse’, in *2007 IEEE Workshop on Applications of Computer Vision (WACV ’07)*, Austin, TX: IEEE, Feb. 2007, pp. 30–30. doi: 10.1109/WACV.2007.29.
- [27] S. Eivazi, T. Santini, A. Keshavarzi, T. Kübler, and A. Mazzei, ‘Improving real-time CNN-based pupil detection through domain-specific data augmentation’, in *Proceedings of the 11th ACM Symposium on Eye Tracking Research & Applications*, Denver Colorado: ACM, Jun. 2019, pp. 1–6. doi: 10.1145/3314111.3319914.
- [28] F. J. Vera-Olmos, E. Pardo, H. Melero, and N. Malpica, ‘DeepEye: Deep convolutional network for pupil detection in real environments’, *ICA*, vol. 26, no. 1, pp. 85–95, Dec. 2018, doi: 10.3233/ICA-180584.
- [29] W. Fuhl, T. Santini, G. Kasneci, and E. Kasneci, ‘PupilNet: Convolutional Neural Networks for Robust Pupil Detection’, 2016, doi: 10.48550/ARXIV.1601.04902.
- [30] C. Szegedy, V. Vanhoucke, S. Ioffe, J. Shlens, and Z. Wojna, ‘Rethinking the Inception Architecture for Computer Vision’, 2015, doi: 10.48550/ARXIV.1512.00567.



Investigation of Dosimetric Properties of Table Sugar Irradiated With Gamma Rays Using EPR Technique

Gül Bayramiye ÖZMEN¹ , Eren ŞAHİNER²

¹Gazi University, Non-Ionizing Radiation Protection Application and Research Center (GİRKUM) 06500, Yenimahalle/ Ankara, Türkiye

²Ankara University, Earth Sciences Application and Research Centre (YEBİM) 06830 Gölbaşı/ Ankara, Türkiye

Article Info

Research article
Received: 01/12/2023
Revision: 30/01/2024
Accepted: 30/01/2024

Keywords

Food Irradiation
Dosimeter
Fading
EN 13708
EPR
Z Score

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 01/12/2023
Düzeltilme: 30/01/2024
Kabul: 30/01/2024

Anahtar Kelimeler

Gıda İşinlama
Dozimetre
Sönümleme
EN 13708
EPR
Z Score

Graphical/Tabular Abstract (Grafik Özet)

Gama ışınları ile ışınlanan sofru şekerinin artan doza karşı artan EPR sinyal şiddeti şeklinde verilmektedir. (The increasing EPR signal intensity of table sugar irradiated with gamma rays against increasing dose is given in the figure.)

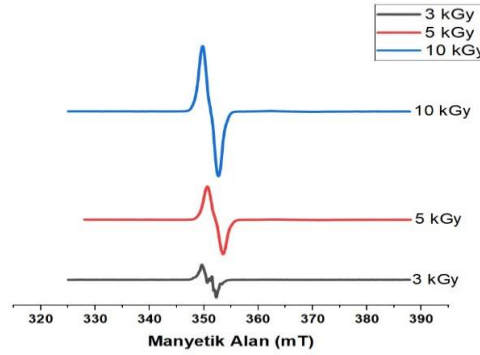


Figure A: EPR spectra of 3 kGy, 5 kGy and 10 kGy irradiated sugar samples /

Şekil A: 3 kGy, 5 kGy ve 10 kGy ışınlanmış şeker örneklerinin EPR spektrumları

Highlights (Önemli noktalar)

- Sofra şekerinin doz cevap davranışı EPR tekniği ile incelenmiştir. / The dose response behavior of table sugar was examined with the EPR technique.
- Sofra şekerinin 14 aya kadar EPR sinyallerinin sönüm davranışı Z skoru ile değerlendirilmiştir. / The fading behavior of EPR signals of table sugar up to 14 months was evaluated with Z score.
- TS EN 13708 standardı kapsamındaki kuru meyvelerin EPR spektrumları ile sofru şekerinin EPR spektrumu karşılaştırılmıştır. / The EPR spectra of dried fruits within the scope of TS EN 13708 standard were compared with the EPR spectrum of table sugar.

Aim (Amaç): The aim of this study is to investigate the usability of table sugar as a dosimeter using the EPR technique. / Bu çalışmanın amacı sofru şekerinin dozimetre olarak kullanılabilirliğinin EPR tekniği ile araştırılmasıdır.

Originality (Özgünlük): The fading behavior of EPR signals of table sugar was evaluated with the Z score. Additionally, dried fruits in the TS EN 13708 standard were compared with table sugar. It has been suggested that both table sugar and dried fruit sugars can be used as dosimeters. / Sofra şekerine ait EPR sinyallerinin sönüm davranışı Z skoru ile değerlendirilmiştir. Ayrıca TS EN 13708 standardındaki kuru meyvelerle sofru şekeri karşılaştırılmıştır. Hem sofru şekerinin hem de kuru meyve şekerlerinin dozimetre olarak kullanılabilceği önerilmiştir.

Results (Bulgular): It was observed that the EPR signals of table sugar had almost no fading for 14 months and the EPR spectrum of table sugar overlapped with the dried mango studied in TS EN 13708 standard. / 14 ay boyunca sofru şekerinin EPR sinyallerinin neredeyse hiç sönüme uğramadığı ve sofru şekerinin EPR spektrumunun TS EN 13708 standardında çalışılan kuru mango ile örtüştüğü gözlenmiştir.

Conclusion (Sonuç): It is suggested that table sugar can be used as a dosimeter in radiation accidents and irradiated food detection. / Sofra şekerinin radyasyon kazalarında ve ışınlanmış gıda tespitinde dozimetre olarak kullanılabilceği önerilmektedir.



Gama Işınları İle Işınlanmış Sofra Şekerinin Dozimetrik Özelliklerinin EPR Tekniği İle İncelenmesi

Gül Bayramiye ÖZMEN¹ , Eren ŞAHİNER²

¹Gazi University, Non-Ionizing Radiation Protection Application and Research Center (GİRKUM) 06500, Yenimahalle/ Ankara, Türkiye

²Ankara University, Earth Sciences Application and Research Centre (YEBİM) 06830 Gölbaşı/ Ankara, Türkiye

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 01/12/2023
Düzeltilme: 30/01/2024
Kabul: 30/01/2024

Anahtar Kelimeler

Gıda Işınlama
Dozimetre
Sönümlenme
EN 13708
EPR
Z Score

Öz

Gerçekleştirdiğimiz bu çalışmada gama ışınları ile 3 kGy, 5 kGy, 10 kGy olarak ışınlanan sofr şekerine ait EPR sinyallerinin artan dozla orantılı olarak arttığı gözlenmiştir. Sofra şekerinin EPR spektrumlarında tepe-tepe yükseklikleri dikkate alınarak (I_{pp}) sinyallerdeki sönümlenmeleri araştırılmıştır. Yüksek dozdaki gama ışınları (Co-60) ile ışınlanan şeker örneklerinde ışınlanmadan sonra başlangıç, 267 gün, 364 gün ve 402 gün sonra EPR ölçümleri gerçekleştirilerek radikallerin kararlılığı izlenmiştir. Sönümlenmenin belirlenmesi için istatistiksel bir test olan Z skoru ile uygunluk değerlendirmesi yapılmıştır. Şekere ait EPR sinyallerinde 14 ay boyunca neredeyse hiçbir kaybın olmadığı gözlenmiştir.

Ayrıca sofr şekerini; “TS EN 13708 Gıda maddeleri - Kristal şeker içeren gıda maddelerinin ışınlanıp ışınlanmadığının ESR spektroskopisi ile belirlenmesi” standardı içeriğinde kullanılan kuru incir, kuru mango, kuru papaya ve kuru üzüm meyvelerine ait EPR spektrumlarıyla karşılaştırılmıştır. 3 kGy ışınlanmış şekerin EPR spektrumu sadece 3 kGy ışınlanmış kuru mango ile benzerdir. Bu benzerlik sayesinde içerisindeki şekere bağlı olarak meyvelerin de dozimetre olarak kullanılabilceği önerilmiştir.

Investigation of Dosimetric Properties of Table Sugar Irradiated With Gamma Rays Using EPR Technique

Article Info

Research article
Received: 01/12/2023
Revision: 30/01/2024
Accepted: 30/01/2024

Keywords

Food Irradiation
Dosimeter
Fading
EN 13708
EPR
Z Score

Abstract

In this study, it was observed that the EPR signals of table sugar irradiated with gamma rays at 3 kGy, 5 kGy, 10 kGy increased in proportion to the increasing dose. The fading in the signals was investigated by taking into account the peak-to-peak heights (I_{pp}) in the EPR spectra of table sugar. The stability of radicals was monitored by performing EPR measurements at the beginning, 267 days, 364 days and 402 days after irradiation in sugar samples irradiated with high doses of gamma rays (Co-60). Suitability evaluation was made with Z score, which is a statistical test to determine fading. It was observed that there was almost no loss in the EPR signals of sugar for 14 months.

Also table sugar; TS EN 13708 Foodstuffs - It was compared with the EPR spectra of dried figs, dried mango, dried papaya and raisin fruits used in the standard for determining whether foodstuffs containing crystal sugars are irradiated by ESR spectroscopy. The EPR spectrum of 3 kGy irradiated sugar is similar to that of dried mango only 3 kGy irradiated. Thanks to this similarity, it has been suggested that fruits can also be used as dosimeters, depending on the sugar they contain.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Tıbbi görüntülemeye radyoterapi uygulamalarına ve gıda sterilizasyonuna kadar birçok alanda kullanılan iyonlaştırıcı radyasyonun kullanım alanları her geçen gün artmaktadır. Dolayısıyla radyasyon maruziyetlerini takip altında tutmak son derece önemlidir. Bu amaçla maruz kalınan doz değerleri doku eşdeğeri dozimetrelerle Termolüminesans (TL) ve Elektron Paramanyetik Rezonans (EPR) gibi tekniklerle ölçülebilmektedir.

İyonlaştırıcı radyasyon; malzemedeki kimyasal bileşiklerle etkileştiğinde kristal kafes kusurları, serbest radikaller ve paramanyetik metal iyonları şeklinde eşleşmemiş elektron popülasyonu oluşturabilir [1, 2]. EPR spektroskopisi iyonlaştırıcı radyasyonun etkilerini araştırmak için yaygın olarak kullanılmaktadır.

Örneğin alanin ve benzeri EPR dozimetreleri gibi dozimetreler gıdaların ışınlanması sırasında ve sağlıkla ilgili sterilizasyon aşamalarında yüksek doz (1Gy-100 kGy'e kadar hassas oldukları için) maruziyetlerinin belirlenmesinde ve araştırılmasında kullanılmaktadır [3, 4]. Ancak bu tür yapay malzemeler yüksek maliyetli olup her an erişilebilir değildir. Kontrolümüz dışında gerçekleşen radyasyon kazalarında ise çevremizde bulunan her türlü malzemenin dozimetre olarak kullanılması araştırma konusu olmuştur. Radyasyon kazalarında oluşan maruziyetin biyodozimetrelerle de tespit edilmeye çalışıldığı pek çok çalışma mevcuttur [5]. Yapılan araştırmalar, gıdaların raf ömrünün uzaması için gerçekleştirilen ışınlamaların proteinler, karbonhidratlar ve yağlar gibi makrobesinlerin 10 kGy'e kadar kararlılıklarını etkilemediğini göstermiştir [6].

Gıda ışınlanması sırasında 10 kGy'e kadar yüksek dozlarda ışınlamalar yapılmakta olup farklı gıdaların ışınlanmalarıyla ilgili ülkelerin belirlediği standartlar bulunmaktadır ve gıdaların ışınlanıp ışınlanmadığının belirlenmesi ileri uzmanlık gerektiren konulardandır. Bu yüzden ne kadar doza maruz kalındığı bilgisinin kontrollü bir şekilde tespit edilmesi gerekmektedir. Şeker içeren gıdalar için "TS EN 13708 Gıda maddeleri - Kristal şeker içeren gıda maddelerinin ışınlanıp ışınlanmadığının ESR spektroskopisi ile belirlenmesi standardı"; selüloz içeren gıdalarda ise "TS EN 1787 Gıda Maddeleri - ESR spektroskopisi ile selüloz içeren ışınlanmış gıda maddelerinin tespiti standardı"; kemik içeren etli gıdalar için "TS EN 1786 Gıda maddeleri -Işınlanmış, kemik ihtiva eden gıdaların tespiti - ESR spektroskopi metodu standardı"; gıdanın içerisinde değil de üzerine bulaşmış tozlardan elde edilen silikat mineralinin elde

edilmesiyle de "TS EN 1788:2007 Gıda maddeleri - Silikat minerallerinin ayrılabilirliği gıdalarda ışınlanmanın belirlenmesi - termolüminesans yöntemi standardı" uygulanmaktadır [7]. Eğer sinyaller sönüme uğramamışsa ışınlanmış ve ışınlanmamış şeker örnekleri EPR ile tespit edilebilmektedir. Sinyaller sönüme uğramışsa termolüminesans tekniği ile bu tespit gerçekleştirilmektedir. Böylelikle, ticari olarak yanıltıcı beyanda bulunan sahte iş ve işlemlerin önlenmesi mümkün olmaktadır.

Literatürde özellikle kaza dozimetrisi araştırmalarında günlük ulaşılabilir malzemelerin dozimetre olarak kullanılabilirliği üzerine çalışmalar yapılmaktadır. Örneğin; diş, tırnak, kemik gibi biyodozimetreler [5, 8] ve şeker, yumurta kabukları [9] gibi çevremizdeki malzemelerin EPR tekniği ile dozimetrik özellikleri olduğu gösterilmiştir. Farklı örnekler de verilebilecek bu malzemeler içerisinde hemen her yerde yaygın bulunan sofr şekerinin ışınlamadan sonra EPR ölçümlerinde sinyallerinin arttığı görülmüştür [10].

Bulunması kolay, efektif atom numarası 6,92 [11] ile doku eşdeğerine oldukça yakın olan sakkaroz ya da (glikoz + fruktoz = sakkaroz +H₂O) sükroz olarak da bilinen sofr şekerini, şeker pancarı ve şeker kamışından elde edilir [12, 13]. Bu çalışma kapsamında kullanılan şekerin dozimetrik özelliklerden fading (sönümlenme) özelliği istatistiksel olarak Z skoru kullanılarak değerlendirilmiştir.

Sönümlenme (fading) doz bilgisinin uzun süre boyunca kaybolmaması adına kritik bir dozimetrik özellik olup dikkatlice araştırılmalıdır. Benzer çalışmalarda sofr şekerinin EPR sinyallerinde birkaç yıla kadar sönüm olmadığı belirtilmektedir [14, 15].

İstatistiksel analizde Z skorunun kullanılması verilerin analiz edilmesinde önemli bir rol oynar. Verilerin standartlaştırılmasını ve bir ölçümün bir dağılımın ortalamasıyla nasıl karşılaştırıldığı belirlenmesine yardımcı olur. Z skoru hesaplanarak, bir veri kümesi içindeki bir veri noktasının göreceli konumunu değerlendirilerek ortalamadan sapması anlaşılabilir. [16]. Bu nedenlerle şekerin EPR sinyallerindeki sönümün araştırılmasında Z skoru kullanılmıştır.

Yapılan bu çalışmada sofr şekerinin EPR sinyalleri incelenerek;

- Farklı dozlarda EPR sinyalleri ve doz cevap davranışı kararlılığı ve şiddeti

- EPR sinyallerindeki sönüm davranışının 14 aya kadar incelenmesi ve Z skoru ile istatistiksel araştırılması
- TS EN 13708 standardı kapsamında kuru incir, kuru mango, kuru papaya ve kuru üzüm meyvelerine ait EPR spektrumlarıyla karşılaştırmalı değerlendirme

çalışmaları yapılmıştır.

2. MATERYAL VE METOD (MATERIALS AND METHODS)

Çalışmada kullanılan sofr şekerinin radyasyon ile etkisini araştırmak için Türkiye Enerji, Nükleer ve Maden Araştırma Kurumu, Nükleer Enerji Araştırma Enstitüsü, Gama Işınlama Tesisi'nde 3, 5 ve 10 kGy dozlarda radyasyona tabi tutulmuştur. Işınlanmış şekerin içinde oluşan radikallerin ölçümleri Ankara Üniversitesi Nükleer Bilimler Enstitüsü EPR Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir. EPR ölçümleri X-band mikrodalga frekans aralığı 9,2-9,9 GHz olan Bruker EMX plus 10/12 EPR cihazında yapılmıştır.

Elde edilen sinyal şiddetlerinin I_{pp} değerlerinin istatistiki olarak anlamlı olması için Z skoru hesaplama yöntemi kullanılmıştır.

Z -skorlarının sonuçlarının değerlendirilmesi 3 koşulla gerçekleştirilir.

- $|Z| \leq 2,0$ analiz sonucu uygundur;
- $2,0 < |Z| < 3,0$ analiz sonucu kabul edilebilir fakat problemin irdelenmesi tavsiye edilir şüphelidir (Dikkat edilmesi gerekmektedir.);

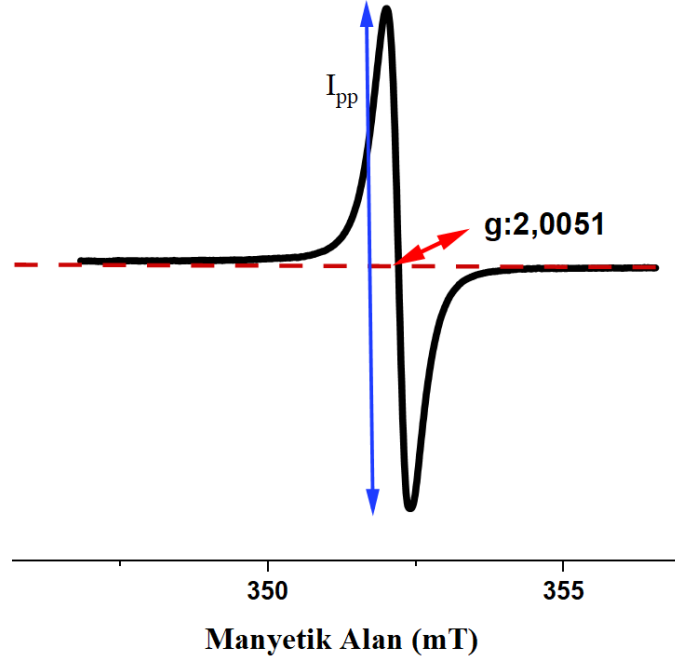
- $|Z| \geq 3,0$ analiz sonucu kabul edilemez (Nedenleri araştırılmalıdır.)

3. BULGULAR (RESULTS)

Gerçekleştirilen deneylerin sonuçlarının doğru olabilmesi için kalibrasyon ve ara doğrulama işlemleri ile cihazın doğru çalışıp çalışmadığı kontrol edilmelidir. EPR Spektrometresinin kalibrasyon işlemi için Strong Pitch ER-213-SPS Potasyum Klorür (KCl) referans örneği kullanılmıştır. Örneğe ait EPR spektrumu Şekil 1'de verilmiştir. Kullanılan referans malzemenin g değeri 2,0028'dir. Denklem 1 kullanılarak spektroskopik yarılma çarpanı (g) deneysel olarak hesaplanmıştır.

$$g = \frac{h\nu}{\mu_B B} \quad (1)$$

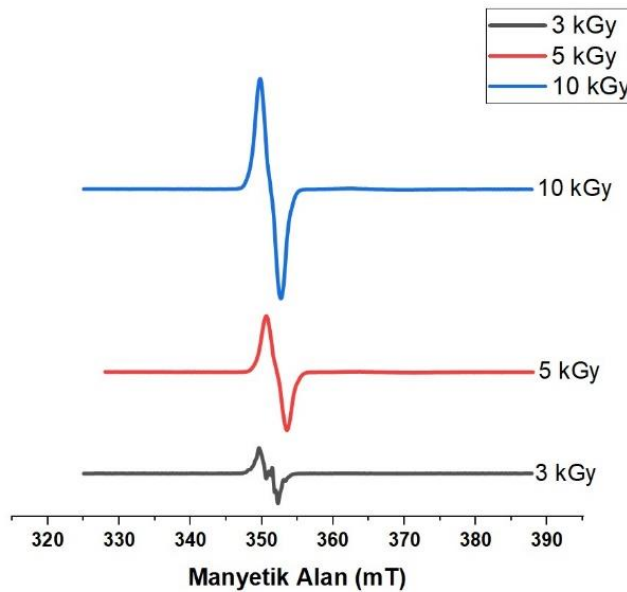
Potasyum Klorür numunesine ait bulmuş olduğumuz $g=2,0051$ değeri beklediğimiz $g=2,0028$ (referans) değeri (EMX User's Manual 1998) ile arasında % 0,115'lik bir hata olduğu görülmüştür. Bu hata oranının numune içerisindeki safsızlıklardan kaynaklandığı düşünülmektedir. Farklı referanslarla (DPPH gibi) kalibrasyon çalışmaları tekrarlanabilir. Bu çalışma için doz hesabı yapılmayacak olup sadece numunelerin sinyal şiddetlerinin zamanla değişimi inceleneceği için bu farklılığın sonuçları etkilemeyeceği düşünülmüş, hata oranı kabul sınırları içinde değerlendirilmiş ve ölçümlere devam edilmiştir.



Şekil 1. Potasyum Klorür referans malzemesinin EPR spektrumu (EPR spectrum of Potassium Chloride reference material)

Dozimetrik özelliklerden olan doz cevabı Şekil 2’de artan doza karşı artan EPR sinyal şiddeti olarak görülmektedir. Tüm spektrumların sinyal şiddetleri hesaplanması sırasında minimum ve maksimum noktaların mutlak toplamı (I_{pp} değerleri) dikkate alınmıştır. Sofra şekeri (sükroz) birden fazla radikal

türü içerdiğinden karmaşık yapıdadır [17]. 3 kGy doz değeri için elde edilen spektrumda 5 kGy ve 10 kGy için elde edilen spektrumlardakinden farklı oluşan sinyalin nedeni; artan doz değerleri sonucunda oluşan bazı sinyallerin doyuma (saturasyona) gitmesi söz konusuken bazı sinyallerin artış göstermesidir.



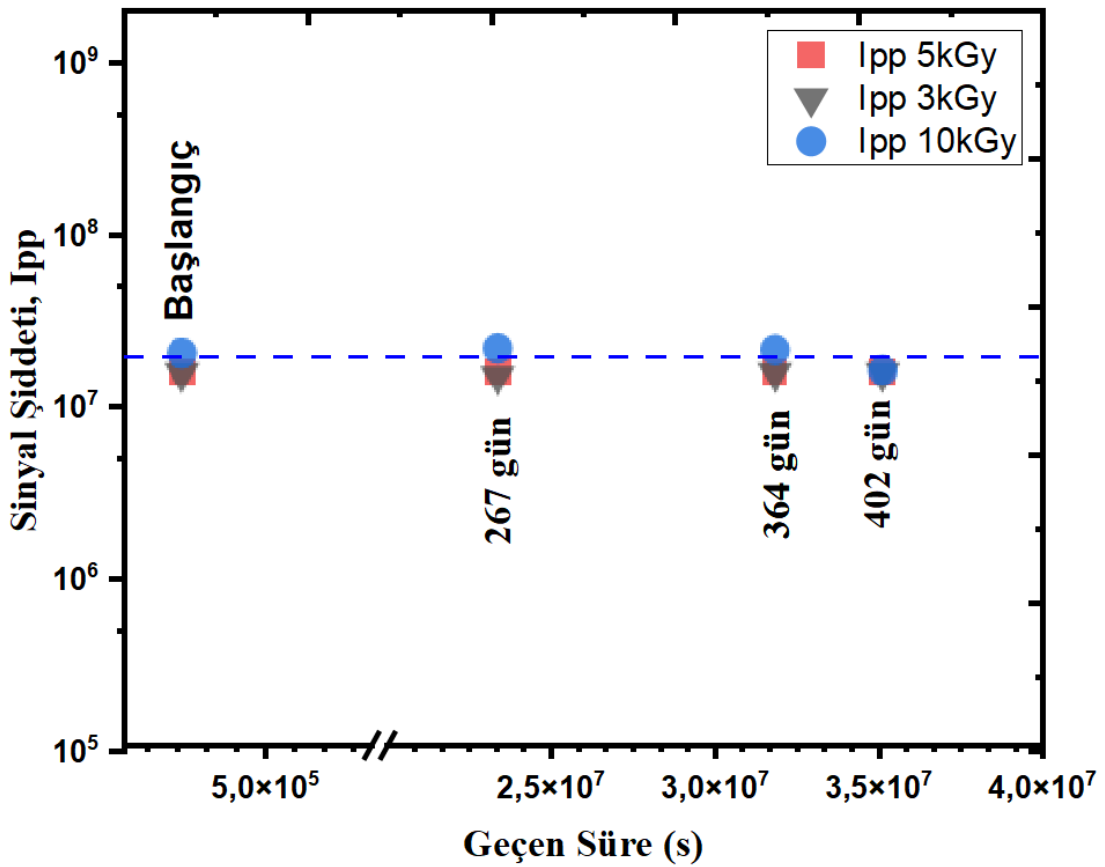
Şekil 2. 3 kGy, 5 kGy ve 10 kGy ışınlanmış şeker örneklerinin EPR spektrumları (EPR spectra of 3 kGy, 5 kGy and 10 kGy irradiated sugar samples)

Işınlanmış örneklerin içerisinde oluşan radikallerin yapılarında, sayılarında veya türlerinde gerçekleşebilecek olası değişimleri takip edebilmek amacıyla 3 kGy, 5 kGy, 10 kGy ışınlanmış 100 mg kütleli şeker örneklerinin yaklaşık 14 ay boyunca farklı aralıklarda EPR spektrumları incelemiş ve ölçüm sonuçları Çizelge 2’de verilmiştir. Işınlandığı tarih referans alınarak (25.06.2020) ölçüm gününe kadar geçen süre (29.06.2020, 23.03.2021, 28.06.2021, 05.08.2021) saniyeye çevrilerek Şekil 3’te gösterilmiştir.

bir azalma meydana geleceğinden ölçüm için en az 72 saat beklenmesinin daha kararlı bir sinyal gözlenmesini sağlayacağı önerilmiştir [18]. Bu nedenle ölçümler ışınlamadan en az 72 saat sonra gerçekleştirilmiştir. Nakajima tarafından yapılan çalışma ile de atmosferik sıcaklık değişse bile, doğal ortamda birkaç yıl içinde radikallerin sayısının pek değişmediği belirtilmiştir [14]. Kararlı sinyallerin birbirleriyle anlamlı olduğunu göstermek amacıyla, ölçülen değerler istatistiki bir test olan Z-skoru ile değerlendirilmiştir.

Yordanov tarafından gerçekleştirilen çalışmada ışınlamadan sonraki ilk 72 saatte sinyallerde hızlı

Bu çalışmada Z-skorumları hem ortalama hem de standart sapma değerlerine göre hesaplanmaktadır.



Şekil 3. Işınlanmış şekerin I_{pp} sönüm grafiği (I_{pp} extinction graph of irradiated sugar)

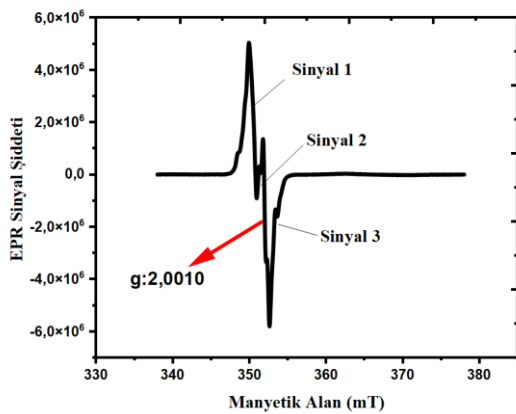
Çizelge 2. Işınlanmış şekerin I_{pp} sönüm değerlerine ait Z skorlar (Z scores of I_{pp} extinction values of irradiated sugar)

Geçen Süre	Z Skoru (3 kGy)	Z Skoru (5 kGy)	Z Skoru (10 kGy)	Z Skor Sonucu
Başlangıç	-1,49176	1,44271	0,71838	UYGUN
267 gün sonra	0,63134	-0,20962	-1,46309	UYGUN
364 gün sonra	0,48448	-0,85570	0,55400	UYGUN
402 gün sonra	0,37593	-0,37738	0,19071	UYGUN

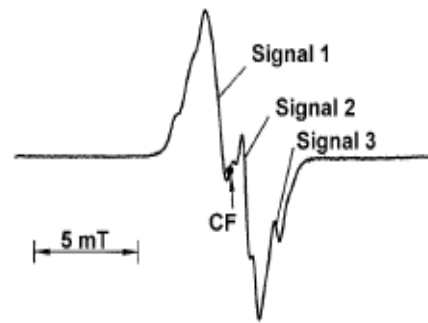
Çizelge 3. TS EN 13708 (2001) standartında önerilen ile bu çalışmada kullanılan spektrometre değerlerinin karşılaştırılması (Comparison of the spectrometer values used in this study with those recommended in the TS EN 13708 (2001) standard)

TS EN 13708'de (2004) önerilen değerler	Parametre	Çalışmada kullanılan değerler
5 mW	Mikrodalga Gücü (P)	2 mW
50 kHz veya 100 kHz	Frekans modülasyonu	100 kHz
0,15 mT - 0,4 mT,	Genlik modülasyonu	0,4mT
Ortam sıcaklığı	Sıcaklık	Ortam Sıcaklığı

a)



b)



Şekil 4. (a) 3 kGy Işınlanmış şeker örneğine ait EPR Spektrumu (EPR Spectrum of 3 kGy irradiated sugar sample)

(b) 3 kGy Işınlanmış kuru mangoya ait tipik EPR spektrumu (Typical EPR spectrum of 3 kGy irradiated dried mango) [19]

Şekil 4 kapsamında 2 grafik karşılaştırılmaktadır. a)'da gösterilen sinyal kapsamında 3 kGy ışınlanmış şekerin spektrumu ve $g=2,0010$ değeri bu çalışma kapsamında elde edilmiştir. b)'de gösterilen grafik ise TS EN 13708 Standardında kuru mangoya ait olarak verilen grafikdir. Standartta kuru mango için g değeri= 2,0035 olarak verilmiştir. Yani iki grafik birbirine benzemektedir fakat g değerleri farklı bulunmaktadır. Örnek farklılıklarından kaynaklı olarak içerdikleri farklı radikal türleri nedeniyle bu farklılık normaldir. Çizelge 3'te TS EN 13708 (2001) standartında verilen ve çalışma kapsamında kullanılan parametreler verilmiştir. Yine de kabaca değerlendirecek a)'da verilen sofr şekerine ait sinyal sayısı ve şekli Şekil 4 b)'de verilen kuru mango ile örtüşmektedir. Sofra şekeri yani sükröz; fruktoz ve glikozun birleşimidir. İçerikleri nedeniyle bu benzerlik normaldir. TS EN 13708 standardı amacı gereği sadece şeker içerikli ışınlanmış gıdaların tespitine yöneliktir ve kurutulmuş meyvelere uygulanan radyasyon sonuçları değerlendirilmektedir. Standartın içerisinde kuru incir, kuru mango, kuru papaya ve kuru üzüm çalışmaları yapılmıştır. Bu çalışmada ise şekerin dozimetrik özelliği incelenmiştir. Sonuç olarak meyvelerin içerisindeki şekerin de ayrıştırılarak bir kaza dozimetresi gibi kullanılması muhtemeldir.

Şekil 2'de şekerin doza karşı sinyal artışı gösterilmiştir. Şekil 3'te sırasıyla 3 kGy, 5 kGy, 10 kGy ışınlanmış şekerin yaklaşık 14 ay boyunca uğradığı sönümler gözlenmiştir. Çizelge 2'de elde edilen I_{pp} verileri Z-skorumları ile incelenmiş ve $Z < 2$ olduğu için istatistiksel olarak anlamlı bulunmuştur. Sinyallerde gerçek anlamda bir kayıp gözlenmemesi şekerin dozimetrik olarak kullanılabilceğini göstermektedir.

TS EN 13708 (2001) standardına göre Şekil 4 b)'de kuru mangoya ait EPR spektrumu ile Şekil 4 a)'daki şekerin ait EPR spektrumları 3 kGy gama radyasyonu ile ışınlanmış spektrumlarıdır. Mango içeriğindeki kristal şekerin ışınlanıp ışınlanmadığı üzerine gerçekleştirilen deneysel çalışmalar ile çalışma kapsamında şekerin dozimetrik özellikleri için gerçekleştirilen çalışmalar benzer EPR spektrumlarını işaret etmektedir. Bu benzerlik Şekil 4'te açıkça görülmektedir.

4. SONUÇ (CONCLUSIONS)

Bir malzemenin dozimetre olarak kullanılabilmesi için ışınlama sonrası oluşan belirgin sinyal artışı, doz-cevap ilişkisinin doğrusallığı, minimum saptama sınırı ve ışınlama sonrası sinyal kararlılığı gibi birçok parametre araştırılmalıdır.

Bu çalışma kapsamında sofr şekerinin dozimetrik özelliklerinden doz-cevap ve ışınlama sonrası sinyallerinin kararlılığı incelenmiştir. EPR sinyallerinde doz sonrası artış gözlenmesi ve çalışma süresince sinyallerinde nerdeyse hiç sönüm gözlenmemesi gibi özellikler şekeri iyi bir dozimetre adayı yapmaktadır.

Şekerin dozimetrik çalışmaları çoğunlukla radyoterapi amaçlı düşük dozlarla ilgili dozimetrik çalışmalardır. 1-20 Gy aralığında şekerin lineer doz cevabı olduğu belirtilmiştir [20, 21]. 10 kGy'den daha yüksek dozlar için gerçekleştirilen çalışmalarda 20-80 kGy doz aralığında kendi kendine kalibre edilen sükröz örneği hazırlanarak lineer doz cevabı gözlenmiştir [22]. Daha detaylı doz cevap çalışmaları ile hem ara değerler için hem de L- ve Q-bantları gibi diğer mikrodalga frekanslarıyla da şekerin dozimetrik çalışmaları geliştirilebilir. Ayrıca ileri çalışma olarak şekerin içinde oluşan radikallerin kinetik çalışması, sıcaklık çalışması farklı dozimetrik özelliklerinin de araştırılması önerilmektedir.

EPR yöntemi tarihlendirme çalışmalarında da kullanılmaktadır. Yapılan bu çalışma kapsamında elde edilen sonuçlara göre; özellikle arkeolojik veya jeolojik araştırmalar sırasında olası şeker buluntularının aldıkları kümülatif radyasyon dozunu değerlendirerek yaşlarının belirlenmesi için EPR sinyallerinin sönüm süresi kısa olabilmektedir. Farklı karakterizasyon teknikleri (SEM, TEM, AFM, XRD) ile kullanılan şekerin kristal ve bağ yapısı incelenerek değerlendirilmeli ve tarihlendirme çalışmalarında kullanılıp kullanılmayacağı araştırılması önerilmektedir.

Sonuç olarak;

- Şekerin doku eşdeğerine yakın olması ve her yerde ulaşılabilir olması nedeniyle gerçekleşebilecek bir radyasyon kazasında maruziyetin belirlenebilmesi için kaza dozimetresi olarak kullanılabilceği,
- Yüksek gama dozlarında (3 kGy, 5 kGy, 10 kGy) sinyallerinin kararlı olması nedeniyle alanin dozimetreler gibi gıda

ışınlanması tespitinde 10 kGy'e kadar olan ışınlamalar için dozimetre olarak kullanılabilirliği;

- TS EN 13708 standardı kapsamında meyvelerin içerisinde bulunan şekerin ışınlanmanın tespiti için kullanıldığı görülmüştür. Şekerle benzer EPR sinyallerinin ortaya çıkması ile meyvelerin de içeriğinde bulunan şeker nedeniyle birer kaza dozimetresi olarak EPR dozimetre adayı olduğu ve ileri uygulamalarda kullanılabilir olduğu düşünülmektedir. Bu nedenle şekerli gıdaların ışınlanarak EPR spektrumlarının incelenmesi ve dozimetrik özelliklerinin araştırılması; önerilmektedir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

Gama ışınları ile ışınlanmış şeker örneklerini temin eden sayın Doç. Dr. Ülkü Rabia YÜCE SEMİZ'e (TENMAK) çok teşekkür ederiz. Yapıcı eleştirilerinden dolayı GİRKUM Merkez Müdürü Prof. Dr. Haluk KORALAY'a teşekkürlerimizi sunarız.

ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

The author of this article declares that the materials and methods they use in their work do not require ethical committee approval and/or legal-specific permission.

Bu makalenin yazarı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

Bu makale Yüksek Lisans tez çalışmasından üretilmiştir. Yazarların katkısı ortaktır.

This article was produced from the Master's thesis. The authors' contribution is shared.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

There is no conflict of interest in this study.

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Ikeya, M., New applications of electron spin resonance: dating, dosimetry and microscopy. 1993: World Scientific.
- [2] Bougai, A., et al., Use of electron paramagnetic resonance dosimetry with tooth enamel for retrospective dose assessment. 2002.

- [3] Kuntz, F. and A. Strasser, The specifics of dosimetry for food irradiation applications. Radiation Physics and Chemistry, 2016. 129: p. 46-49.
- [4] Mosse, D., ESR/alanine dosimetry applied to radiation processing. International Journal of Radiation Applications and Instrumentation. Part C. Radiation Physics and Chemistry, 1988. 31(4-6): p. 413-417.
- [5] Fattibene, P. and F. Callens, EPR dosimetry with tooth enamel: A review. Applied Radiation and Isotopes, 2010. 68(11): p. 2033-2116.
- [6] Dionisio, A.P., R.T. Gomes, and M. Oetterer, Ionizing radiation effects on food vitamins: A review. Brazilian Archives of Biology and Technology, 2009. 52: p. 1267-1278.
- [7] Dr. Birol Engin, D.C.A., Dr. Ülkü Rabia Yüce, Talat Aydın, Semra Tepe Çam, Hayrunnisa Demirtaş, Dr. C. Tuğrul Zeyrek Elektron Spin Rezonans (ESR) ve Termoluminesans (TL) Teknikleri İle Gıdaların Gama Işınları İle Işınlanıp Işınlanmadıklarının Tespit Edilmesi. 2011.
- [8] Swartz, H.M. and A.B. Flood, EPR biodosimetry: challenges and opportunities. Radiation Protection Dosimetry, 2023. 199(14): p. 1441-1449.
- [9] Wieser, A., et al., Limits of retrospective accident dosimetry by EPR and TL with natural materials. Radiation measurements, 1994. 23(2-3): p. 509-514.
- [10] Mikou, M., et al., Analysis by EPR of the dosimetric properties of table sugar irradiated by X-rays, gamma rays and neutrons. Physica Medica, 2013. 29: p. e22.
- [11] El-Ahdal, M., Effect of gamma radiation dose on sugar. 2007.
- [12] Da Costa, Z., W. Pontuschka, and L. Campos, A comparative study based on dosimetric properties of different sugars. Applied radiation and isotopes, 2005. 62(2): p. 331-336.
- [13] Özmen, G.B., Dozimetri çalışmalarında EPR tekniğinin kullanılması ve sofr şekerinin dozimetrik özelliklerinin incelenmesi in Nükleer Bilimler Enstitüsü / Medikal Fizik Ana Bilim Dalı / Sağlık Fiziği Bilim Dalı. 2022, Ankara Üniversitesi p. 65.
- [14] Nakajima, T., Possibility of retrospective dosimetry for persons accidentally exposed to ionizing radiation using electron spin resonance of sugar and mother-of-pearl. The British journal of radiology, 1989. 62(734): p. 148-153.
- [15] Fattibene, P., T.L. Duckworth, and M.F. Desrosiers, Critical evaluation of the sugar-

- EPR dosimetry system. *Applied Radiation and Isotopes*, 1996. 47(11): p. 1375-1379.
- [16] Choi, T.M., S.W. Wallace, and Y. Wang, Big data analytics in operations management. *Production and Operations Management*, 2018. 27(10): p. 1868-1883.
- [17] Georgieva, E.R., et al., High-field/ high-frequency EPR study on stable free radicals formed in sucrose by gamma-irradiation. *Free Radical Research*, 2006. 40(6): p. 553-563.
- [18] Yordanov, N., V. Gancheva, and E. Georgieva, EPR and UV spectroscopic study of table sugar as a high-dose dosimeter. *Radiation Physics and Chemistry*, 2002. 65(3): p. 269-276.
- [19] 13708, E., Foodstuffs—detection of irradiated food containing crystalline sugar by ESR spectroscopy. 2001, European Committee of Standardization (CEN) Brussels.
- [20] Mikou, M., et al., Performance characteristics of the EPR dosimetry system with table sugar in radiotherapy applications. *Applied Radiation and Isotopes*, 2015. 99: p. 1-4.
- [21] El Baydaoui, R., et al., Analysis of dosimetric properties in the field of radiotherapy of glucose irradiated by megavoltage X photons, electrons and analyzed by EPR spectroscopy. *Perspectives in Science*, 2019. 12: p. 100396.
- [22] Karakirova, Y. and N. Yordanov, About nonlinear response of SS/EPR dosimetry in high dose region (20–80 kGy). *Radiation Physics and Chemistry*, 2019. 159: p. 12-16.

Investigation of Metal-Metal Composite Producibility Using Liquid Spherical and Lamellar Graphite Cast Iron by Casting Method

Mustafa ARAT^{1*}  Hasan HASIRCI^{2*} 

¹Gazi University, Institute of Sciences, Department of Metallurgy and Materials Engineering, Ankara, Turkey

²Gazi University, Technology Faculty, Department of Metallurgy and Materials Engineering, Ankara, Turkey

Article Info

Research article
Received: 11/01/2024
Revision: 11/02/2024
Accepted: 01/03/2024

Keywords

Spheroidal Graphite
Cast Iron
Lamellar Graphite Cast
Iron
Single Guide
Double Guides
Liquid-liquid Mixture
Composite Material

Makale Bilgisi

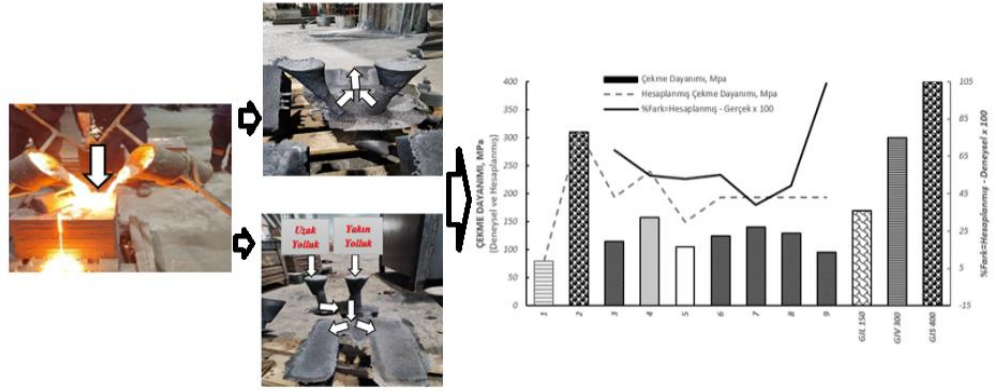
Araştırma makalesi
Başvuru: 11/01/2024
Düzeltilme: 11/02/2024
Kabul: 01/03/2024

Anahtar Kelimeler

Küresel Grafitli Dökme
Demir
Lamel Grafitli Dökme
Demir
Tek Yolluk
Çift Yolluk
Sıvı-Sıvı Karışım
Kompozit Malzeme

Grafik Özet (Graphical/Tabular Abstract)

Bu çalışmada; Her ikisi de sıvı halde olan Küresel Grafitli Dökme Demir (KGDD) ve Lamel Grafitli Dökme Demir (LGDD) kullanılarak her ikisinin de kendi yapılarını koruyarak metal-metal kompozit üretiminin yapılabilirliği araştırılmıştır. / In this study, the feasibility of metal-metal composite production by using Spherical Graphite Cast Iron and Lamellar Graphite Cast Iron, both of which are in liquid form, while preserving their structures, has been investigated.



Şekil A: Farklı yolluk tasarımları kullanılarak metal-metal kompozit üretilebilirliği ve mekanik özelliklerinin incelenmesi / **Figure A:** Investigation of metal-metal composite producibility and mechanical properties by using different guide designs.

Highlights (Önemli noktalar)

- Farklı Yolluk Tasarımları ile Döküm Denemeleri / Casting Trials with Different Guide Designs
- Metal-Metal Kompozit Üretilebilirliği / Metal-Metal Composite Producibility
- Yapısal ve Mekanik Özellikler / Structural and Mechanical Properties

Aim (Amaç): Bu çalışmada sıvı haldeki iki farklı malzemeden (KGDD ve LGDD) her ikisinin de kendi yapılarını koruyarak metal-metal kompozit üretiminin yapılabilirliği araştırılmıştır. / In this study, the feasibility of metal-metal composite production from two different liquid materials (Spherical and Lamellar) by preserving their own structures has been investigated.

Originality (Özgünlük): Nano ve/veya mikro boyutta her bir tanenin farklı malzemeden oluşacak şekilde metal-metal kompoziti oluşturan malzemelerin her ikisinin de sıvı halde olduğu kompozit üretimi ilk kez yapılmış olup, bu çalışmanın özgün tarafıdır. / The production of composites in which both materials forming a metal-metal composite are in liquid form, so that each grain is composed of different materials in nano and/or micro dimensions, has been carried out for the first time, and this is the original side of this study.

Results (Bulgular): Sıvı haldeki iki farklı metal malzemeyle bir üretim yapılarak yeni bir metod ile metal-metal kompozit üretiminin mümkün olabileceği gözlenmiştir. / It has been observed that metal-metal composite production may be possible with a new method by making a production with two different metal materials in liquid form.

Conclusion (Sonuç): Uygun kalıp ve yolluk tasarımları ile sıvı haldeki iki farklı metalik malzemeden metal-metal kompozit üretiminin mümkün olduğu, malzeme alan veya taneleri arasında arayüzünde herhangi bir süreksizlik veya birleşmeme sorunu oluşmadığı tespit edilmiştir. / It has been determined that metal-metal composite production is possible from two different metallic materials in liquid state with suitable mold and guide designs, and there are no discontinuities or decombustion problems at the interface between the material area or grains.



Döküm Yöntemi ile Sıvı Haldeki Küresel ve Lamel Grafitli Dökme Ddemir Kullanarak Metal-Metal Kompozit Üretilebilirliğinin İncelenmesi

Mustafa ARAT^{1*} Hasan HASIRCI^{2*} ¹Gazi University, Institute of Sciences, Department of Metallurgy and Materials Engineering, Ankara, Turkey²Gazi University, Technology Faculty, Department of Metallurgy and Materials Engineering, Ankara, Turkey

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 11/01/2024
Düzeltilme: 11/02/2024
Kabul: 01/03/2024

Anahtar Kelimeler

Küresel Grafitli Dökme
Demir
Lamel Grafitli Dökme
Demir
Tek Yolluk
Çift Yolluk
Sıvı-Sıvı Karışım
Kompozit Malzeme

Öz

Bu çalışmada; sıvı haldeki iki farklı malzemeden her ikisinin de kendi yapılarını koruyarak metal-metal kompozit üretiminin yapılabilirliği araştırılmıştır. Çalışmada her ikisi de sıvı halde olan Küresel Grafitli Dökme Demir (KGDD) ve Lamel Grafitli Dökme Demir (LGDD) kullanılarak kum kalıba döküm yöntemiyle üretimler yapılmıştır. Çalışma kapsamında sıvı metallerin dolumu farklı döküm parametreleri kullanılarak gerçekleştirilmiş ve numuneler üretilmiştir. Bu farklı döküm parametreleri sıvı metallerin kalıba tek, çift ve uzak-yakın yolluk uygulamalarıdır. Metal mikroskobu ile mikro yapısal özellikler ve çekme deneyleri ile mekanik özellikler açısından değerlendirilerek kendi aralarında karşılaştırılmıştır. İyi bir sıvı-sıvı karışımında malzeme kalitesinin ve döküm parametrelerinin büyük bir rol oynadığı, bu durumun doğrudan ortaya çıkan kompozitin yapısal ve mekanik özelliklerini etkilediği gözlenmiştir. Bu nedenle sıvı metal soğumasının etkisi düşünülerek uzak bağlantılı yolluk tasarımları yapılarak üretilen kompozitin mikro yapısal ve mekanik özelliklere etkileri incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar kullanılan KGDD ve LGDD'in ara türü olan VGDD (Vermiküler Grafitli Dökme Demir) malzeme ile karşılaştırılmıştır. Sonuçlar incelendiğinde, kullanılan malzemelerden özellikle LGDD'in KGDD üzerinde kimyasal etkisi nedeniyle küre yapısının önemli oranda bozulmasına, bu nedenle baskın yapının lamel grafitli olmasına neden olduğu tespit edilmiştir. Bu durumu sıcaklığın teşvik etmesi nedeniyle LGDD'in uzak yolluk bağlantısı ile biraz soğutulmasının bu kimyasal etkisinin bir miktar azalması sonucunda küresel şekilli grafitlerin arttığı tespit edilmiştir. Soğutma nedeniyle özellikle çekme dayanımında %24 iyileşme sağlanmıştır. Ayrıca, KGDD hacim oranının yüksek olması da küresel grafit oranını %9 yükselttiğinden dolayı çekme dayanımını %15 artırmıştır.

Investigation of Metal-Metal Composite Producibility Using Liquid Spherical and Lamellar Graphite Cast Iron by Casting Method

Article Info

Research article
Received: 11/01/2024
Revision: 11/02/2024
Accepted: 01/03/2024

Keywords

Spheroidal Graphite Cast
Iron
Lamellar Graphite Cast
Iron
Single Guide
Double Guides
Liquid-liquid Mixture
Composite Material

Abstract

In this study, the feasibility of metal-metal composite production from two different materials in liquid state by preserving their structures has been investigated. The productions were carried out by sand mold casting method using Spheroidal Graphite Cast Iron and Lamellar Graphite Cast Iron, both of which are in liquid form. Filling of liquid metals was carried out using different casting parameters and samples were produced. These different casting parameters are single, double and far-near guides applications of liquid metals into the mold. They were evaluated and compared among themselves in terms of microstructural properties with metal microscopy and mechanical properties with tensile tests. It has been observed that material quality and casting parameters play a major role in a good liquid-liquid mixture, which directly affects the structural and mechanical properties of the resulting composite. For this reason, considering the effect of liquid metal cooling, the effects of the micro-structural and mechanical properties of the composite produced by making far-linked guide designs were studied. The obtained results were compared with the material used, vermicular graphite cast iron, which is an intermediate type of Spheroidal and Lamellar Graphite Cast Iron. When the results were examined, it was determined that the materials used caused significant deterioration of the spheroidal structure, especially due to the chemical effect of lamellar graphite cast iron on spheroidal graphite cast iron, and therefore the dominant structure was lamellar graphite. It has been found that spheroidal-shaped graphites increase as a result of a slight decrease in this chemical effect of slightly cooling the lamellar graphite cast iron with a far guide connection due to the promotion of this condition by temperature. Due to cooling, a 24% improvement was achieved, especially in tensile strength. In addition, the high volume ratio of spheroidal graphite cast iron increased the tensile strength by 15%, as it increased the spheroidal graphite ratio by 9%.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Yaşamış olduğumuz modern çağa ait olan ürünler (otomobil, tren vb.) metal döküm sektörü olmadan var olamayacağından ötürü; metal döküm sektörü inşaattan madencilığe, havacılıktan otomobile binlerce sektör için, 1 gramdan hafif veya 300 tondan ağır olabilecek geniş çerçevede parça üretmektedir. Ev ve iş aletlerinden armatürlere; uzay araçlarından oyuncaklara, türbinlerden tanklara; mobilyalardan aydınlatma araç-gereçlerine; her türlü kara, hava ve deniz ulaşım araçlarından ağır sanayi iş makinelerine kadar, hayatımızın içinde yer alan milyonlarca üründe döküm parçası görmek mümkündür [1]. Özellikle Lamel Grafitli Dökme Demir (LGDD) ve Küresel Grafitli Dökme Demir (KGDD) malzemeler işlenebilirlik, sertlik, titreşim sönümleme, korozyon ve aşınma direnci gibi iyi mekanik özellikler göstermelerinin yanı sıra, ekonomik ve kolay üretilebilir olmalarından dolayı çok yaygın olarak kullanılan mühendislik malzeme grupları arasında yer almaktadırlar [2]. Dökme demirin üretimindeki ilk gelişme; aşılama işleminde başarıya ulaşarak LGDD'lerin üretilmesi olmuştur. Daha sonra seryum ve magnezyum ilavesi işlemlerinin uygulanması ile lamel grafitli dökme demire göre mukavemeti daha iyi olan KGDD'lerin üretimi gerçekleştirilmiştir [2]. Küresel grafitli ve lamel grafitli dökme demirlerin grafit yapısı bakımından ara türü olan Vermiküler Grafitli Dökme Demirler (VGDD) ise mekanik ve termal özellikler bakımından her iki dökme demirin ara bir formudur [3]. Bu nedenle lamel grafitli dökme demirden daha üstün mukavemet özelliklerine sahip ve onun kadar da titreşim sönümleme özelliği iyi olan vermiküler grafitli dökme demir malzemeler ön plana çıkmaktadır [4]. Vermiküler grafitli dökme demir üretim teknolojisi günümüzde tüm dünyada hızlı bir şekilde yaygınlaşmaktadır. Lamel ve küresel grafitli dökme demirler arasında özelliklere sahip olan bu vermiküler grafitli dökme demir çeşidi, sahip olduğu yüksek mukavemet ile motor bloğu, motor kafası veya yüksek hızlı tren disk üretiminde istenen özellikleri tamamen sağlayabilmesi nedeniyle tercih edilen malzemelerin başında gelmektedir [5]. Vermiküler grafitli dökme demir üretimi zor ve maliyetli bir süreç olmasından dolayı, alternatif üretim yöntemleri üzerine çalışmalar son zamanlarda artmaktadır. Bu çalışmada, LGDD ve KGDD malzemeler sıvı karıştırma tekniği ile metal-metal kompozit üretimi amaçlanmıştır. En az iki metalin bir araya getirildiği ve kompozit üretiminde de kullanılan birçok metot bulunmaktadır. Bunlardan bazıları; toz metalürjisi, katmanlı üretim, yapıştırma, döküm ve karma yöntemlerdir. Döküm yöntemi ile metal şekillendirmenin birçok avantajı

vardır. Bu avantajlardan yararlanılarak kompozit üretmek, yani malzemenin istenilen özelliklere sahip olması bakımından faydalar sağlamaktadır. Özellikle sıvı halde metalik malzeme üretimindeki avantajlardan bazıları; kolay şekillendirme, ara yüzey uyumluluğu, yapı ve özellik kontrolünün yapılabilmesi olarak sıralanabilir. Buna ilave olarak iki farklı sıvı metalin bir araya gelerek oluşturacağı kompozit üretiminde farklı sıvı metal malzemelerin çok daha iyi ara yüzey bağı oluşturması söz konusudur.

Sıvı-sıvı metodunda uygun şekilde bir karıştırma sağlandığında daha homojen karışıma sahip kompozit üretmek çok daha rahat olacaktır. Malzemelerin fiziksel ve kimyasal uyumları ilave avantajlar sağlayacaktır. Bunlara ilave olarak sıvıların birbirleri içinde çok daha kolay karışabildikleri göz önüne alındığında bu işlemin çok daha avantajlı olacağı açıktır. Bu kompozit malzemelerin üretiminde birçok üretim yolu olmasına rağmen, bu çalışmada yukarıdaki avantajları nedeniyle döküm yönteminin kullanılmasının en doğru üretim yolu olacağı düşünülmüştür. Birbirlerine hem fiziksel hem de kimyasal bakımdan çok uyumlu olan Küresel Grafitli Dökme Demir (KGDD) ve Lamel Grafitli Dökme Demir (LGDD) malzemelerin kullanımı ile bir metal-metal kompozit üretimi planlanmıştır. Üretilen bu kompozit malzemelerin mikro boyutlu bir karışıma sahip olması hedeflenmiş ve bu amaçlarla sıvı metallerin kalıp içerisine farklı yolluk tasarımları ile gönderilmesi sağlanmıştır.

Metal-metal kompozit terimi, ilk olarak, 1900 yılında, Nb ve Al alaşımlarından oluşan çift fazlı bir yapıda sıcak ekstrüzyon ve soğuk haddeleme tekstürünün incelendiği bir çalışmada kullanılmıştır [6]. İki metalin birlikteliğini içeren belirgin bir ara yüzeye sahip her malzeme için metal-metal kompozit veya bi-metal kompozit terimi kullanılmaktadır. 2000'li yıllara kadar, bir asra yayılan birkaç istisna haricinde [7-9,10], bi-metal kompozitler üzerine neredeyse hiç çalışılmamıştır. 2001 yılına gelindiğinde, Al/Cu bi-metal kompozitinde intermetalik alaşımların büyüme hızlarının incelendiği bir çalışma [11], alanında büyük yankı uyandırmış ve bi-metal kompozitler üzerine yapılan araştırmalar ivme kazanmıştır [12,13]. E. Çalıkoğlu ve arkadaşları (2011), kademeli döküm yöntemiyle bi-metal malzeme üretimi, mikroyapı değişimleri ve mekanik özelliklerini araştırmışlardır. Bir potada düşük alaşımlı sıvı çelik malzemeyi, başka bir potada beyaz dökme demir malzemeyi aynı kalıba farklı yolluklardan döküm işlemi gerçekleştirmişlerdir. Kademeli döküm işlemi sırasında ara yüzeyde

değişik flakslar kullanmışlardır. Çalışma sonucunda, kademeli döküm tekniğiyle bi-metal parça malzeme üretiminin gerçekleştirilebileceğini, yüksek kromlu dökme demirin döküm durumu mikro yapısı primer östenit ve ötektik karbürler içerdiğini, mikro yapı incelemelerinde, iki farklı malzemenin birleşme ara yüzeyde kullanılan flaks tozlarının uygun olduğu tespit etmişlerdir. Ayrıca, üretimi yapılan bi-metal çekiç malzemenin sertlik değerlerinin, ısıl işlem görmüş ve sektörde serviste kullanılmış bi-metal çekiç malzemeden düşük olduğu tespit etmişlerdir [14]. Baron ve arkadaşları (1997), sinterlenmiş metal preformlar kullanarak sıkıştırılmalı döküm yöntemiyle, 409 ve 1080 kalite olmak üzere iki farklı takviye tipi ile 380 Al matrisli kompozit üretmiş ve döküm koşullarının kompozit özellikleri üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Her iki takviye tipinde de döküm düşük sıcaklıkta (675°C) gerçekleştiğinde, kompozit daha üstün özellikler göstermiştir. Alaşımız çelik takviyesi kompozitin çekme dayanımını 182 MPa'ya düşürürken, paslanmaz çelik takviyesi 409 MPa'ya yükseltmiştir (380 alaşımının tam yoğun ve tavlanmış haldeki çekme dayanımı 248 MPa'dır [15]. Ozaki ve Kutsuna (2009), karbon çeliği ve Al' nin bir araya getirildiği çalışmalarında, mekanik özelliklerde azalma meydana gelmemesi için, ara yüzeyde oluşan intermetalik faz kalınlığının en az 10 µm olması gerektiğini iddia etmişlerdir [16]. Shoufan ve arkadaşları (2014), mineral işleme endüstrisinde kullanılan kırıcı çekiçler için hem çekiç kafasında yüksek aşınma direnci hem de çekiç sapında yüksek darbe tokluğu taleplerini karşılayan malzeme geliştirme çalışması yapmışlardır. Çünkü halen Hadfield (Manganez-Mangalloy) çeliğinden yapılan kırıcı çekiçler tipik olarak 40 saatten daha kısa olan düşük hizmet ömrüne sahiptir. Sorunu çözmek için, sıvı halde katmanlı kompozit döküm yöntemini kullanılarak, yüksek kromlu dökme demir (YKBDD) ve düşük alaşımlı çelikten (DAÇ) yapılmış bir tür bi-metal kırıcı çekiç başarıyla geliştirmişlerdir. Mikro yapı ve kompozit ara yüzey bağlantısı, optik mikroskop, SEM, EDX ve XRD kullanılarak analiz edildiğinde, ısıl işleminden sonra kompozit çekiçlerin mükemmel özellikler gösterdiği belirlenmiştir.

YKBDD'nin sertliği en az 63 HRC ve α_k değeri 3.5 J.cm⁻²'den büyük, DAÇ'ın sertliği 35 HRC'den fazla ve α_k değeri 80 J.cm⁻²'den yüksektir. Her iki malzemedeki farklı elementlerin difüzyonu ara yüzeyde gerçekleşerek bir geçiş bölgesi oluşturmaktadır. Sonuçlar, sıvı-sıvı bi-metal kompozit çekiçlerin hizmet ömürlerinin Hadfield çelik çekiçlerinden 3,75 kat daha uzun olduğunu göstermektedir [17].

Bu bilgilerden hareketle; çalışmada nano ve/veya mikro boyutta her bir tanenin farklı malzemeden oluşacak şekilde metal-metal kompoziti oluşturan malzemelerin her ikisinin de sıvı halde olduğu kompozit üretimi ilk kez yapılmıştır. Bu kompozitin yapısal ve özellikler bakımından sıvı ile katının karışımıyla yapılan kompozitlere göre daha homojen ön görülmektedir. Bu konuda hiçbir çalışma bulunmamaktadır. Bu nedenlerden dolayı bu çalışma yapılmıştır.

2. MATERYAL VE METOD (MATERIALS AND METHOD)

Bu çalışmada; kimyasal analizleri Tablo 1 ve 2'de verilen, aynı anda farklı indüksiyon ocaklarında ergitilmiş, her ikisi de sıvı halde olan Lamel Grafitli Dökme Demir (LGDD) ve Küresel Grafitli Dökme Demir (KGDD) malzemeler aynı anda kalıba doldurularak kompozit malzemeler üretilmiştir. LGDD ve KGDD malzemeleri için döküm sıcaklıkları sırasıyla 1330 °C ve 1425 °C olarak uygulanmıştır. Döküm öncesi KGDD malzeme üretim işlemleri (FeSiMg ile küreselleştirme) ayrıca yapılmıştır. Her iki malzemeye de %3 oranında FeSi ile aşılama işlemi uygulanmıştır. Döküm işlemleri yaş kum kalıplar kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 1). Sıvı-sıvı kompozit malzeme üretimi farklı yolluk sistemi kullanılan kalıplar kullanılmıştır (Şekil 2). Döküm ile Y-bloklar üretilmiş ve bloklardan numuneler alınarak gerekli incelemeler yapılmıştır. Çalışma kapsamında 9 farklı kalıp tasarımı denemesi yapılmış olup, Tablo 3'te işlem özetleri verilmiştir. Dökümden sonra oluşan Y-blok ve yolluk sistemlerinden örnekler Şekil 2 ve 3'te verilmiştir.

Tablo 1. Lamel grafitli dökme demir (LGDD) (GG15) kimyasal analizi (Chemical analysis of lamellar graphite cast iron)

Element ağırlıkça (%)	C	Si	Mg	Mn	P	S	Cr	Ti	Ni	Cu	Fe
	3.2	2.1	0.0046	0.889	0.08	0.18	0.042	0.028	0.012	0.025	Kalan

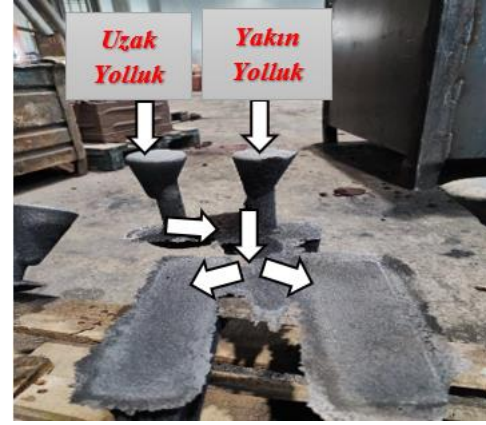
Tablo 2. Küresel grafitli dökme demir (KGDD) (GGG40) kimyasal analizi (Chemical analysis of spheroidal graphite cast iron)

Element ağırlıkça (%)	C	Si	Mg	Mn	P	S	Cr	Ti	Ni	Cu	Fe
	3.2	2.5	0.035	0.218	0.04	0.11	0.021	0.018	0.02	0.02	Kalan

**Şekil 1.** LGDD ve KGDD'in tek yolluktan döküm işlemi (Single guide casting process of lamellar and spherical graphite cast iron)

Döküm yolu ile üretilen metal-metal kompozit malzemelerin mikro yapıları metal optik mikroskop kullanılarak incelenmiştir. Bu incelemelerde, iki metalin karışım oranı, dağılımları, homojenlikleri, karışımdaki her bir metalin tane boyutları, ara yüzeyler vb. görüntü analiz programları desteği de kullanılarak analiz edilmiştir. Öncelikle üretilen Y-Bloklardan (Şekil 4) yapısal analizler için uygun boyutlarda numuneler kesilmiştir. Döküm parçalarının her birinden abrasif kesme ile numuneler alınarak sıcak kalıplama işleminin

ardından zımpara-parlatma işlemleri yapılarak Leica DMI 5000M marka ters (inverted) optik mikroskopla incelenmiştir. Üretilen Y-bloklardan TS E8'e göre numuneler hazırlanarak Instron 3369 marka test cihazında en az 4 tekrar yapılarak çekme testleri yapılmış olup çekme, akma ve uzama değerleri tespit edilmiştir. Elde edilen veriler LGDD ve KGDD malzemelerin orijinal değerleri ile karışım oranları (Eş.1) baz alınarak teorik olarak hesaplanmış ve elde edilen verilerle karşılaştırılmıştır.

**Şekil 2.** Çift yolluk kullanılarak farklı oranlarda döküm işleminden sonraki oluşan yolluk sistemi (The guide system formed after casting at different rates using double guides)**Şekil 3.** Biri uzak diğeri ise parçaya daha yakın olan çift yolluk kullanılarak farklı oranlarda döküm işleminden sonraki oluşan yolluk sistemi (The guide system formed after the casting process at different rates using double guides, one far away and the other closer to the part)

Tablo 3. Döküm deneme işlem parametreleri (Casting trials process parameters)

Deney No	Kalıp Özelliği	Dökülen Malzeme Oranı
1	Tek kalıpta sadece LGDD	% 100
2	Tek kalıpta sadece KGDD	% 100
3	Tek yolluk kullanılarak aynı anda döküm	%50 LGDD+%50KGDD
4	Çift yolluk kullanılarak aynı anda döküm	%30 LGDD+%70 KGDD
5	Çift yolluk kullanılarak aynı anda döküm	%70 LGDD+%30 KGDD
6	Çift yolluk kullanılarak aynı anda döküm	%50 LGDD+%50 KGDD
7	Çift yolluk (uzak bağlantılı LGDD olacak şekilde) aynı anda döküm	%50 LGDD+%50 KGDD
8	Çift yolluk (uzak bağlantılı KGDD olacak şekilde aynı anda döküm	%50 LGDD+%50 KGDD
9	Çift yolluk (her iki malzemede uzak bağlantılı olacak şekilde aynı anda döküm	%50 LGDD+%50 KGDD

**Şekil 4.** Döküm yoluyla üretilen Y-Blokler (Y-Blocks produced by casting)

$$\text{Teorik özellik} = (\text{LGDD/KGDD malzeme test değeri}) * (\% \text{ karışım oranı}) \quad (\text{Eş.1})$$

3. BULGULAR (RESULTS)

Bi-metal ile sıvı-sıvı kompozit üretimi, üretilen malzemelerin mikroyapısal ve mekanik özelliklerdeki değişim bakımından ayrı başlıklar halinde hem kendi aralarında, hem de KGDD, LGDD ve bu malzemelerin standartlarda ki özellikleri ile karşılaştırılarak değerlendirilmiştir.

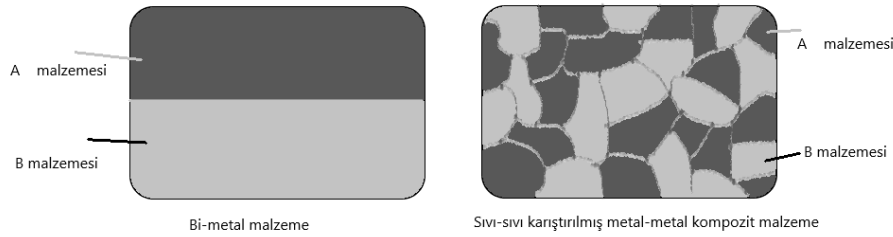
3.1. Bi-Metal Malzeme ile Sıvı-Sıvı Kompozitin Farklılığı (Difference between bi-metal material and liquid-liquid composite)

Literatür incelemelerine bakıldığında, iki sıvı metalin karıştırıldığı metal-metal kompozit malzeme üretiminin bulunmadığı görülmüştür. Ancak, birisi katı diğeri ise sıvı olan metal-metal kompozitler üretilmektedir. Bu kompozitler genellikle sıvı içerisine katı haldeki parçacık takviyesi, tabakalı ve parça/kütle takviyenin sıvı bir metal ile ön karışım ya da kalıp içerisindeki ön şeklin üzerinin sıvı ile kaplaması şeklinde üretilmektedir. Sıvı haldeki 2 farklı malzeme ile üretilen yeni malzeme türü bi-metal olarak bilinmektedir (Şekil 5). Bir bütün parçanın yarısı

ve/veya kısmen metal malzemeden, diğeri kısmi ise farklı metal malzemeden üretildiğinde yeni ürüne bi-metal denilmektedir. Bu konuda yapılan çalışmalar 2 farklı özelliklerdeki malzemeyi bir parçanın farklı noktalarında kullanarak üretilen ürünün fonksiyonelliğini makro düzeyde değiştirmektedir. Çalikoğlu ve arkadaşları (2011) kademeli döküm yöntemiyle bi-metal malzeme üretilebilirliği üzerine çalışmalar yaparak bi-metal üretilebilirliğini ortaya koymuşlardır. Sıvı çelik ile sıvı beyaz dökme demiri aynı kalıba kademeli olarak döküm gerçekleştirerek katı-sıvı bi-metal üretmişlerdir. Ayrıca, döküm yolu ile bi-metal üretiminin yapıldığı bazı çalışmalarda bir zikzak ara yüzeyi oluşturularak, kompozit üretimi gerçekleştirilmiştir [14]. Zailiang ve arkadaşları (2018) çalışmalarında Zn ara katmanına sahip köpük döküm sıvı-sıvı karışım yöntemi ile Mg/Al bi-metal üretmek için yeni bir yöntem önermişler ve Mg/Al bi-metalinin ara yüz mikro yapıları ve mekanik özelliklerini araştırmışlardır. Zn ara katmanının eklenmesi yalnızca farklı sıvı metallerin doğrudan karışmasını engellemekle kalmamış, aynı zamanda Mg-Al intermetaliklerinin oluşumunu da

sınırlamıştır [19]. Ying ve arkadaşları (2017) çalışmalarında sıvı alüminyum alaşımı ve katı bakır ile bakır kaplamalı alüminyumun sürekli döküm yöntemiyle üretimi için katı-sıvı yöntemini kullanmışlardır. Sonuçlar, ergimiş alüminyumun döküm sıcaklığının, Cu'nun katı Cu'dan Al alaşımı eriyiğine element difüzyonu ve Al ile Cu arasındaki reaksiyonların yanı sıra Al-Cu ara yüzeyinin morfolojisi üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir [20]. Yuan ve arkadaşları (2016) elektrotsuz bir kaplama ile Cu malzeme üzerine Ni-P kaplaması uygulamışlar ve katı-sıvı katmanlı döküm ile Al-Cu bi-metal üretmişlerdir. Çalışmada Ni-P ara katmanı, intermetaliklerin oluşumunu etkili bir şekilde azaltan bir difüzyon bariyeri ve koruyucu film işlevi gördüğünü gözlemişlerdir [21]. Bu çalışmalarda görüleceği üzere ayrı iki malzeme ile bunların ara yüzey kalitesi ve bağlanma kuvveti, ara yüzey işlemi, döküm sıcaklığı gibi konular ele alınmaktadır.

Oysa sıvı-sıvı karıştırma tekniğinde 2 farklı sıvı metal döküm sırasında neredeyse tamamen karışmadan/alaşım olmadan taneler halinde varlıklarını sürdürerek yeni malzemeyi oluşturmaktadır (Şekil 5). Diğer bir ifadeyle üretilen yeni malzemenin her tarafında homojen bir yapıda taneler halinde her iki malzeme de varlığını sürdürmektedir. Bu malzemelerin varlıklarını sürdürüyor olmaları özelliklere de homojen bir davranış katmaktadır. Bi-metal de ise ürünün 2 farklı kısmı olup, her iki kısmında da farklı davranış ve özellikler bulunmaktadır (Şekil 5). Ayrıca bu yeni malzemede ara yüzey problemi ya da ara yüzey oluşumu söz konusu değildir. Bu yeni malzeme ise taneler halinde homojen karışım olması sebebiyle kompozit olarak nitelendirilmiştir. Çünkü kompozitlerde ürünün hemen her noktasında homojen özellik ve davranış beklenir.



Şekil 5. Bi-metal ile sıvı-sıvı karıştırılmış metal-metal kompozit malzemelerin yapısal farklılıklarının şematik gösterimi (Schematic representation of the structural differences of bi-metal and liquid-liquid mixed metal-metal composite materials)

3.2. Mikroyapısal Değerlendirme (Microstructural Evaluation)

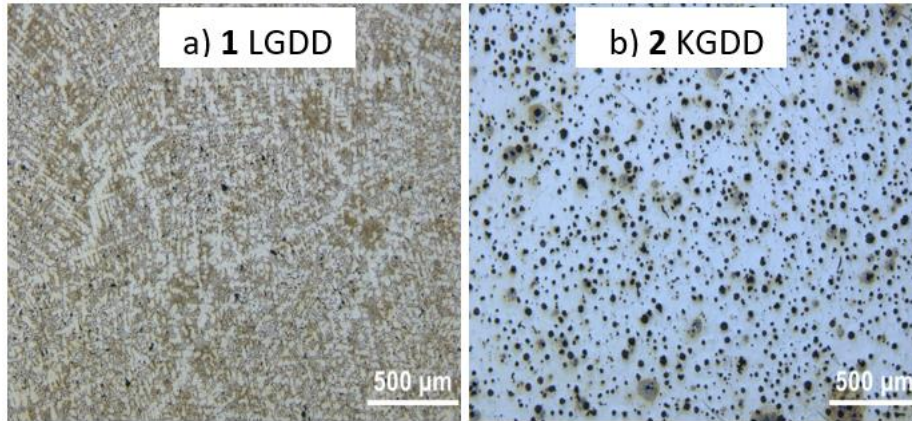
Sıvı halde 2 metalik malzemenin kullanılması sonucunda metal-metal kompozit üretiminin araştırıldığı bu çalışmada LGDD ve KGDD malzemeleri kullanılmıştır. Üretilen numunelere ait görüntüler Şekil 6-13'de verilmiştir. Şekil 6.a ve b'de verilen LGDD (numune 1) ve KGDD'e (numune 2) ait yapılar tipik döküm sonucu oluşan yapılarıdır. LGDD'de lamel ve KGDD'de ise küre şeklindeki grafit şekilleri mevcuttur. Her iki malzemenin de matris yapıları % 95-98 oranında ferritiktir.

Diğer şekillerde (Şekil 7-13) ise farklı oranlarda LGDD ve KGDD kullanılarak metal-metal kompozit üretilmiş numunelere ait mikroyapı görüntüleri verilmiştir. Tek yolluktan eşit oranda akış ile yapılan döküm sonucunda (numune 3, Şekil 7) hem KGDD hem de LGDD malzemelere ait tanelerin oluştuğu, katılma sırasında LGDD ile temas eden kısımlarda küresel grafitlerin bozularak lamel grafit şekline döndüğü tespit edilmiştir.

LGDD malzemenin içerisinde varolan küreselleşmeyi olumsuz yönde etkileyen alaşım elementleri (özellikle P, S, Ti ve Cr) sıvı haldeki KGDD malzeme ile karışma nedeniyle yüksek oranda sıvı taneler arasındaki karışım bölgeler ve hatta KGDD malzemeye ait sıvı damlasının (akan sıvı içerisindeki bir sıvı hücre) içlerine kadar difüzyon ve/veya karışma nedeniyle küresel şekilli grafit oluşumunu olumsuz yönde etkilemiştir. Diğer yandan LGDD'de aynı zamanda Mg yok denecek kadar azdır. Bu nedenle karışan % 50/50 karışımdaki iki sıvı içerisindeki Mg oranı % 0.055'e kadar düşmektedir. Bu durumda yetersiz Mg nedeniyle küresel grafit oluşumu çok az olmaktadır. Buna ilave olarak KGDD malzeme içerisindeki Mg miktarı da en alt limitlerde kalmıştır. Bundan dolayı küresel grafitlerin oluşması zorlaşmış, kararsız denge nedeniyle oluşan grafitler tekrar bozularak LGDD'de oluşan grafit yapılarından (A-E tip) daha farklı lameller şeklinde bir oluşum söz konusu olmuştur. KGDD malzemede küresel grafit oluşumunun kinetiğini artırmak amaçlı olarak daha fazla Si içeriği olmaktadır. Bu durum bozulan grafit

yapılarının olduğu bölgelerde grafit hacim oranının da % 18-20'ye kadar artmasına neden olmuştur. Oysa Gri Dökme Demir'lerde matris yapı içerisinde ortalama % 9-11 oranında grafit hacmi sınır değer olarak kabul edilir. Bu durum grafit hacminde % 90-100 kadar artış anlamına gelmektedir. Grafit hacminin (özellikle lamel grafit) artması özellikle çekme ve akma dayanımı ile uzama ve darbe özelliklerinde çok büyük düşüşe neden olmaktadır. Bu nedenle üretimde kullanılan dökme demir kaliteleri büyük önem taşımaktadır. Döküm işlemleri ticari firmalarda yapıldığında kalite kontrolünün sağlanması biraz mümkün olamamaktadır. Bu nedenle deneme yapılan döküm kalitelerinde de bir miktar sorun bulunmakta, bu nedenle kompozit üretiminde elde edilecek mikro yapısal başarı da etkilenmiştir. Kompozit olarak üretilen numunelerin tamamında aynı LGDD ve KGDD malzemeleri kullanıldığından sonuçların biraz standart dışında olması kaçınılmaz olmuştur. Ancak bu durum tüm numunelerde olduğundan dolayı benzer eğilimli sonuçlar elde edildiğinden, kendi içlerinde tutarlı bir değerlendirme yapmak mümkün olmaktadır. Çalışmadaki en kritik denemelerden birisi aynı yolluktan dökümde (Şekil 7) elde edilecek yapısal unsurların kalitesidir.

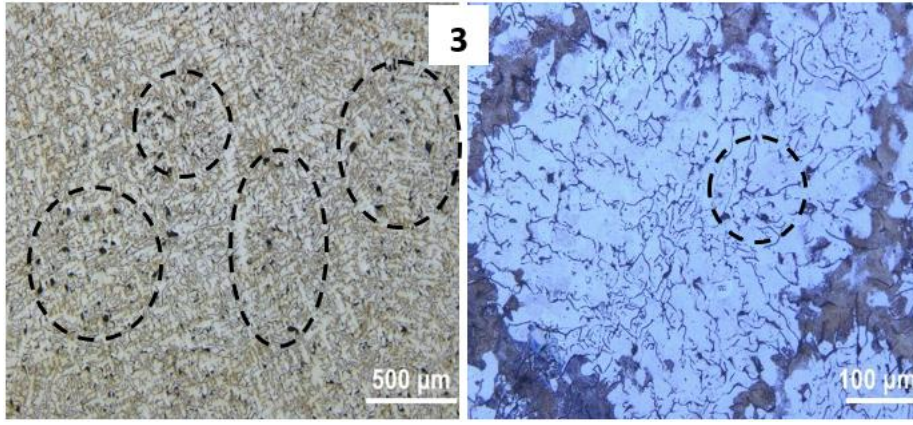
Çünkü aynı yolluktan iki farklı sıvı malzeme dolmaya başladığında, ilk andan kalıbın dolduğu son ana kadar karışmaya devam etmektedir. Deneylede kullanılan kalıpların doluş süresi yaklaşık 10-15 sn arasında değişmektedir. Bu süre boyunca birbirlerine fiziksel etkileri ve kimyasal ilgileri olan sıvı haldeki iki metal malzeme, yolluk sistemi boyunca (havşa, dikey yolluk, cürüflük ve memeler) ve döküm parçasının kendi kalıp boşluğunda ilerlerken dinamik akış nedeniyle sürekli fiziksel olarak karışmaktadır. Bundan dolayı karışım (ve hatta yer yer/kısmen alaşım denilebilir) olma ihtimali yüksektir. Ayrıca bu iki metalin birbirlerini kimyasal olarak etkileme (özellikle S, P ve Mg içerikleri yönünden) ihtimalleri de nedeniyle KGDD malzemenin bozulma/sönme ihtimali artmaktadır. Elde edilen yapıya bakıldığında bu durum açıkça görülmektedir. Lamel ve küresel GDD malzeme hacim oranına bağlı olarak, malzemelerin 50/50 % oranında ve dolunun tek yolluktan yapılarak yapının değişiminin incelendiği dökümde (Şekil 7) hem KGDD hem de LGDD alanlarının varlığı açıkça görülmektedir (Şekil 7.a). Bu durum sıvı halde iki farklı malzemeden metal-metal kompozit üretilebileceğinin en büyük kanıtlarındandır.



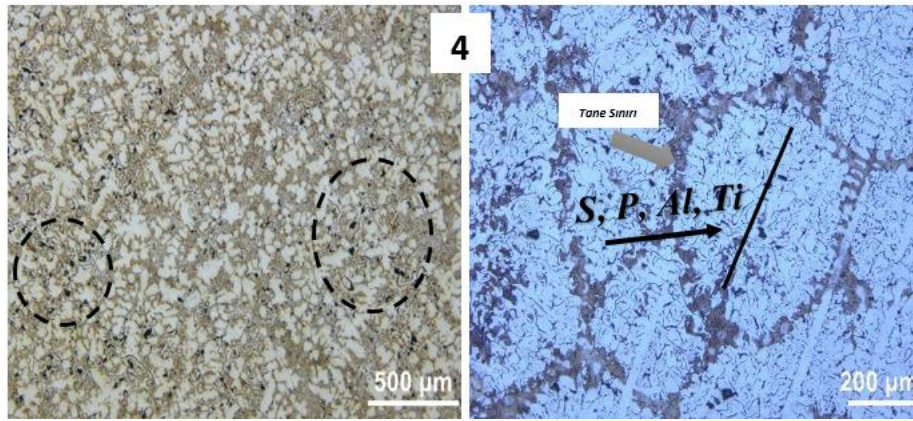
Şekil 6. a) LGDD ve b) KGDD malzeme mikro yapıları (a) Lamellar and b) Spherical material microstructures)

Ancak özellikle KGDD sayılabilecek alanlar detaylı olarak incelendiğinde (Şekil 7.b); lamel grafit oluşumlarının KGDD tanesi içerisinde hatta merkezinde dahi var olduğu görülmüştür. Bu çalışmada özellikle birbirlerini etkileme potansiyeli yüksek iki malzeme seçilmiştir. Bu çalışmadan elde edilecek sonuçlar sıvı haldeki farklı malzemeler kullanılarak metal-metal kompozit üretilirliğinin başarısını açıkça gösterecektir. Bu durum daha önce de bahsedildiği gibi, LGDD'in KGDD üzerindeki kimyasal etkisi neticesinde meydana gelmektedir. Bu nedenle KGDD malzemesi çekirdeğine kadar küresel grafit oluşumu etkilenmekte ve lamele dönüşüm meydana gelmektedir. Tek yolluktan döküm yapılırken sıvı

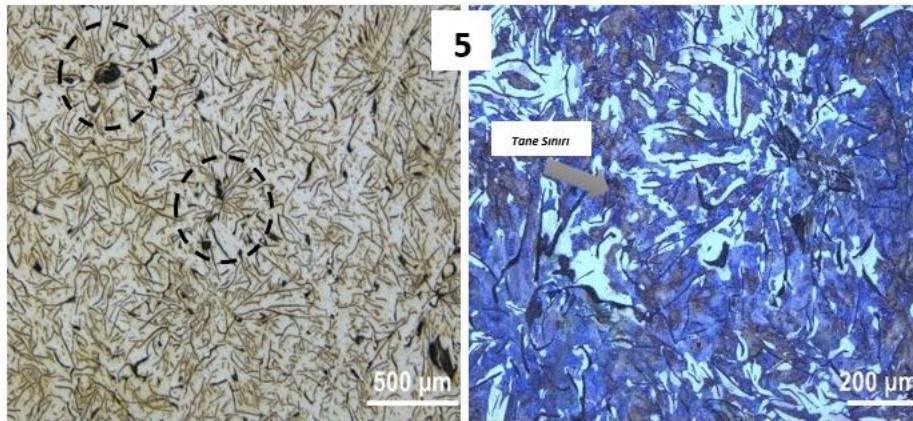
metaller kalıba havşa kısmından girişten kalıbın son noktasına kadar etkileşmeye devam etmektedir. Bu nedenle karışım/alaşım oluşma ve/veya birbirlerini fiziksel ve kimyasal olarak etkileme olasılıkları artmaktadır. Bu durum, ya KGDD malzemesinin daha fazla katılma oranı (%70-80), farklı yolluktan doldurma ve LGDD malzemenin döküm sıcaklığının düşürülmesi ile engellenebilir düşüncesi oluşmuştur. Bu amaçlarla; KGDD ve LGDD malzemelerin farklı (30/70 ve 70/30) ve eşit (50/50) katılma oranları ile farklı yolluktan döküm yapılarak denemeler gerçekleştirilmiştir (Şekil 8-10).



Şekil 7. 50/50 oranlarında LGDD ve KGDD malzeme kullanılan kompozitin mikro yapısı (Tek yolluk kullanılarak aynı anda döküm) (Microstructure of the composite using lamellar and spherical material in 50/50 ratios (Casting at the same time using a single guide))



Şekil 8. 30/70 oranlarında LGDD ve KGDD malzeme kullanılan kompozitin mikro yapısı (Çift yolluk kullanılarak aynı anda döküm) (Microstructure of the composite using 30/70 proportions of lamellar and spherical materials (Casting at the same time using a double guide))



Şekil 9. 70/30 oranlarında LGDD ve KGDD malzeme kullanılan kompozitin mikro yapısı (Çift yolluk kullanılarak aynı anda döküm) (Microstructure of the composite using 70/30 ratios of lamellar and spherical materials (Casting at the same time using a double guide))

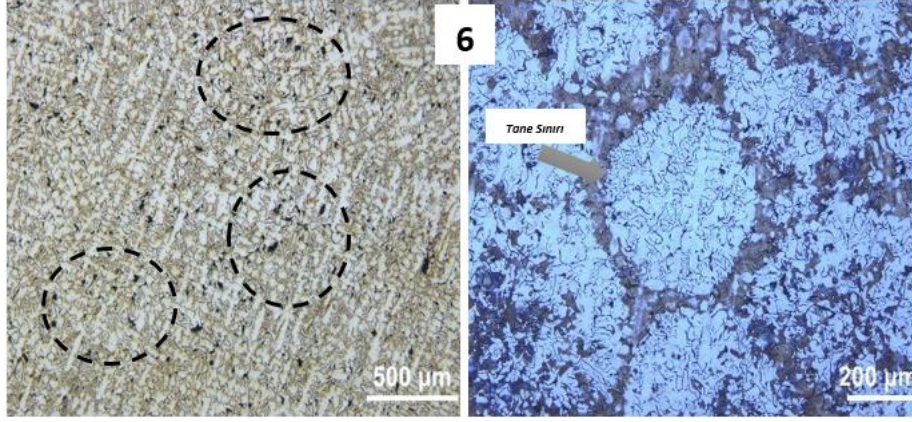
Bu denemeler neticesinde bir miktar KGDD alanları/taneleri ile daha çok baskın LGDD yapı bir malzeme üretimi gerçekleştirilebildiği tespit edilmiştir. KGDD malzemenin daha fazla olduğu kompozitte (numune 4, Şekil 8) KGDD tanesi/alanlarının daha belirgin olduğu, bu kısımlarda lamel grafitlerin çok daha az oldukları

tespit edilmiştir. Oluşan lamel grafitleri B ve C tipi ağırlıklı olduğu görülmüştür. Özellikle LGDD'in miktarı arttıkça (numune 5, Şekil 9) lamel grafitli alanların çok baskın olduğu, aynı zamanda A tipi lamel grafit oluşumunun söz konusu olduğu görülmüştür. Eşit oranda malzeme kullanılarak ancak farklı iki yolluktan malzeme dökümü

neticesinde elde edilen yapılar (numune 6, Şekil 10) incelendiğinde; tek yolluktan döküme (Şekil 6) göre daha bariz KGDD alanların/tanelerinin oluştuğu, ancak halen LGDD'in baskın etkisi tespit edilmiştir. Bu 4-6 numuneler arasında en iyi denilebilecek

olanı KGDD malzemesinin yapısal unsurlarını en fazla içeren 4 nolu malzeme olmaktadır.

Bu durum mekanik ve fiziksel özelliklere de yansiyacaktır.

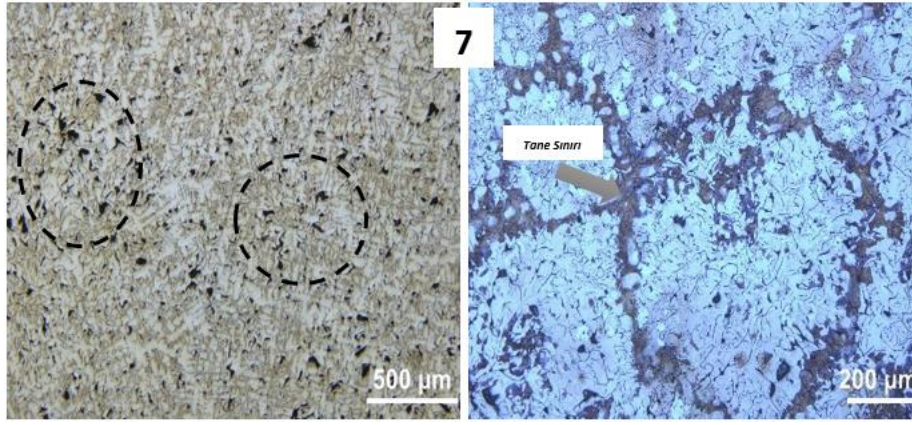


Şekil 10. 50/50 oranlarında LGDD ve KGDD malzeme kullanılan kompozitin mikro yapısı (Çift yolluk kullanılarak aynı anda döküm) (Microstructure of the composite using lamellar and spherical materials in 50/50 ratios (Casting at the same time using a double guide))

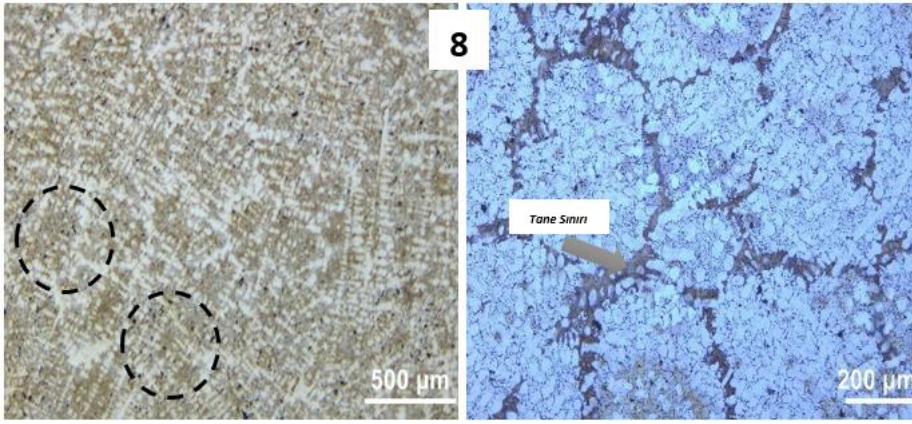
Çift yolluk kullanılarak yapılan dökümdeki sonuçlardan hareketle sıvı metallerin ya birisi yada her ikisinin de soğutulmasının fayda sağlayabileceği düşünülerek; bir malzemenin (LGDD veya KGDD) yolluğu uzak (sırasıyla numune 7 ve 8, Şekil 11 ve 12) yada her iki malzemenin döküldükleri yollukları döküm parçadan uzaklaştırılarak (numune 9, Şekil 13) denemeler yapılmıştır. Bu denemelerdeki eşit oranda malzeme kullanılması, ancak asıl amaç malzemelerden uzak olanın veya her ikisinin de soğumasının birlikte etkisinin belirlenmesidir. Elde edilen sonuçlar birlikte değerlendirildiğinde; uzak yolluk uygulaması neticesinde bir miktar sıvı metali soğutmanın iki malzemenin birbirlerine etkilerini sınırlandırma bakımından etkisi görülmüştür. Özellikle LGDD malzemenin uzak yolluktan dökülmesi neticesinde (Şekil 11) çok bariz olarak KGDD malzemenin tane/alanlarının belirginleştiği tespit edilmiştir. Soğuma neticesinde LGDD malzemenin KGDD üzerindeki kimyasal etkisi biraz daha azalmıştır. Çünkü iki malzemenin birbirlerine karışması baskın olanın/kimyasal ilgisi/etkisi olanın diğerini etkileme gücü artmaktadır. Bu çalışmadaki tam başarı hedefi; her iki malzemenin de ayrı ayrı taneler/alanlar halinde

üretimini ve üretilen yeni malzemede özelliklerinin yer almasıdır. 7 nolu numune (Şekil 11) yapısal özellikler bakımından bu amaca en uygun malzeme olarak görülmektedir. Çünkü KGDD malzeme kendi yapısal karakteristiklerini daha fazla sürdürmektedir. Bu durum mekanik özelliklere de olumlu yönde yansiyacaktır.

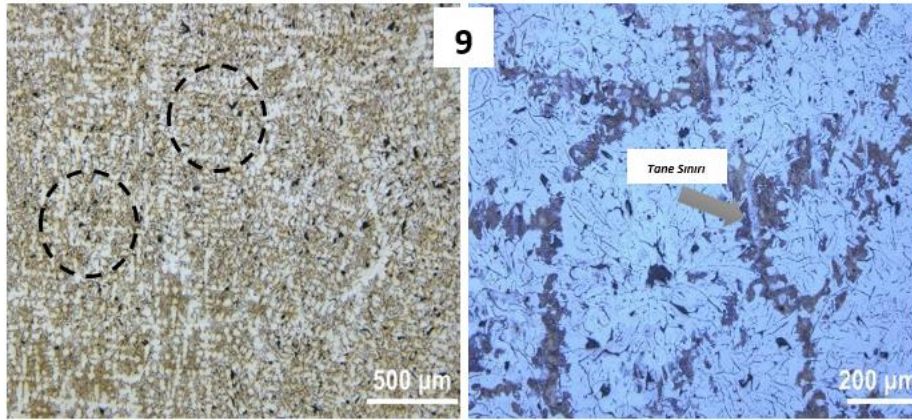
Tüm numuneler birlikte değerlendirildiğinde; her iki malzemenin de taneleri/alanları arasında bir geçiş/bağlanma/birleşme sorunu bulunmamakta olup, tamamen sürekli halde ve kusursuz ara yüzeyler meydana gelmektedir. Bu bakımdan kullanılan yöntem herhangi bir ek önlem ve/veya etken kullanılmadan yapılabilmekte olup, sıvı+kıta metal kompozit üretimine göre büyük bir avantaja sahiptir. Her iki malzemenin de yapılarının kompozit malzemenin yapısında olmasına rağmen, LGDD'in daha baskın olarak var olduğu tespit edilmiştir. Bu nedenle yapılacak çalışmalarda LGDD'i pasifize edecek, KGDD malzemeyi daha baskın hale getirecek yolluk sistemi tasarımları, döküm sıcaklığı ve döküm hacim oranları konusunda çalışmalar yapmak gerekmektedir.



Şekil 11. 50/50 oranlarında LGDD ve KGDD malzeme kullanılan kompozitin mikro yapısı (Çift yolluk kullanılarak aynı anda döküm /LGDD uzak yolluktan) (The microstructure of the composite using lamellar and spherical material in 50/50 ratios (Casting at the same time using double guide / from lamellar remote guide))



Şekil 12. 50/50 oranlarında LGDD ve KGDD malzeme kullanılan kompozitin mikro yapısı (Çift yolluk kullanılarak aynı anda döküm /KGDD uzak yolluktan) (The Microstructure of the composite using lamellar and spherical material in 50/50 ratios (Casting at the same time using a double guide / from spherical from remote guide))



Şekil 13. 50/50 oranlarında LGDD ve KGDD malzeme kullanılan kompozitin mikro yapısı (Çift yolluk kullanılarak aynı anda döküm /Her iki malzeme de uzak yolluktan) (The microstructure of the composite using lamellar and spherical materials in 50/50 ratios (Casting at the same time using double guide / Both materials are far from the guides))

3.3. Mekanik Özelliklerin Değerlendirilmesi (Evaluation of Mechanical Properties)

Her ikisi de sıvı halde olan iki metal bileşenden meydana gelen metal-metal kompozit malzemeler

çekme testine tabi tutulmuş ve elde edilen sonuçlar Tablo 4 ve Şekil 14-15'te verilmiştir. Üretilen numunelerde mekanik özelliklerin yapısal özelliklerden etkilenmemesi ve kıyaslamaların doğru yapılabilmesi amacıyla ferritik matrisli

malzemeler seçilerek üretilmiştir. Özellikle kompozit numunelerden elde edilen sonuçlar değerlendirilirken; bu çalışmada döküm için kullanılan KGDD ve LGDD malzemelerden elde edilen özelliklerinin yanında, aynı zamanda ferritik yapıli standart KGDD ve LGDD ile ara form olan VGDD malzemeler de verilmiştir. LGDD ve KGDD malzemenen oluşan bu kompozit malzemelerin özellikle VGDD malzeme kıyaslanabileceği düşüncesiyle bu yol tercih

edilmiştir. Çünkü VGDD malzeme diğer iki tür dökme demir özelliklerine sahip bir malzemedir.

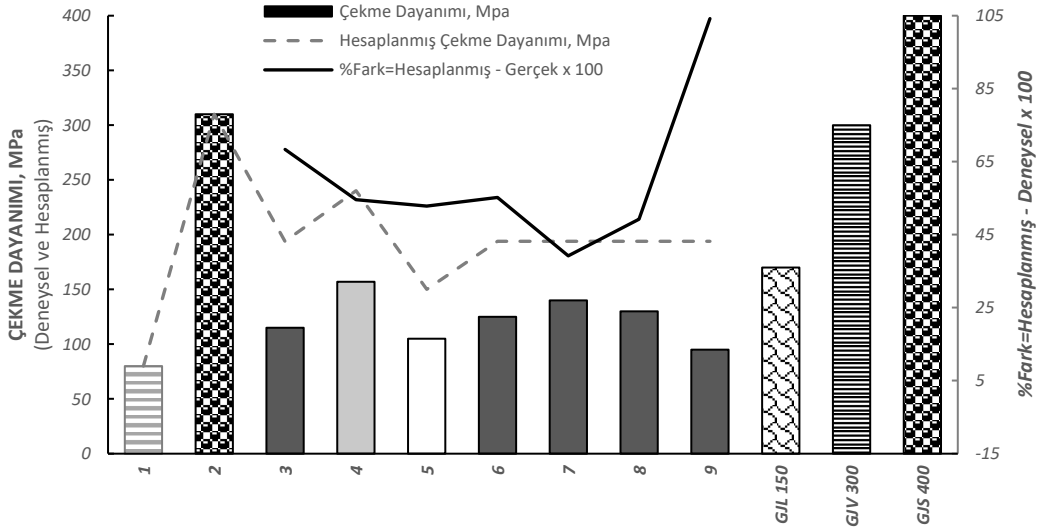
Ayrıca Eş.1’de verildiği gibi kompoziti oluşturan malzemelerin karışım oranlarına göre hesaplanmış çekme dayanımı özellik değeri de verilerek karşılaştırmalar yapılmıştır.

Tablo 4. Üretilen numunelere ait çekme test sonuçları (Tensile test results of the samples produced)

Numune No	Çekme Dayanımı, (MPa)	Uzama, (%)
1 (LGDD)	70-85	0.5
2 (KGDD)	300-320	5
3 (Tek yolluk 50-50 LGDD/KGDD)	110-120 (hesaplanmış 194)	2.8
4 (Çift yolluk 30-70 LGDD/KGDD)	150-164 (hesaplanmış 240)	3.2
5 (Çift yolluk 70-30 LGDD/KGDD)	100-110 (hesaplanmış 150)	1
6 (Çift yolluk 50-50 LGDD/KGDD)	120-130 (hesaplanmış 194)	1.8
7 (Çift yolluk uzak LGDD- 50-50 LGDD/KGDD)	135-150 (hesaplanmış 194)	2.1
8 (Çift yolluk uzak KGDD- 50-50 LGDD/KGDD)	120-140 (hesaplanmış 194)	1.7
9 (Çift yolluk ikisi de uzak 50-50 LGDD-KGDD)	90-100 (hesaplanmış 194)	1

Sonuçlar incelendiğinde; bu çalışma için döküm yapılan hem KGDD hem de LGDD malzemelerin standart (GGG 40 ve GG 15) malzemelerden daha kötü çekme özelliklerine sahip oldukları görülmüştür. Karşılaştırma amaçlı verilen tüm standart malzemeler (GJL 150, GJV 300 ve GJS 400) karşılaştırmada doğruluk ve kolaylık olması için ferritik matrisli olarak seçilmiştir. Çünkü dökülen malzemelerin her ikisi de ferritiktir. Standartlardaki malzemelerle karşılaştırıldığında (numune 1 ve 2); LGDD %112,5 ve KGDD ise %35,5 daha düşük çekme dayanımına ve her ikisinde de yaklaşık %50 daha düşük uzama değerine sahip oldukları görülmektedir. Özellikle dökülen KGDD malzemenin dayanımının %3,3'lük sapma ile standart VGDD ile çok yakın olduğu tespit edilmiştir.

Bu durum ana bileşen malzeme kalitesinin de büyük oranda standart malzemenen düşük olduğunu göstermekte, değerlendirme yaparken buna göre yapılması doğru olacaktır. Buna ilave olarak çekme numuneleri KGDD malzeme standardına (ASTM E8) göre hazırlanmış olup, buna karşın malzeme yapısı ise ağırlıklı olarak LGDD olduğundan ASTM A48'ya uygun test numunesi ile çekme özelliklerinin analiz edilmesi uygun olacaktır. Bu yeni tür bir malzeme olduğundan dolayı analizlerde kullanılacak prosedürlerin de tespiti önemli bir değerlendirme çalışması olacaktır. Buradan hareketle bu tür kompozit malzeme üretildiğinde ana malzeme unsurunun dikkate alınarak test ve analizlerin seçilmesi sonuçların daha doğru olması bakımından uygun olacaktır.

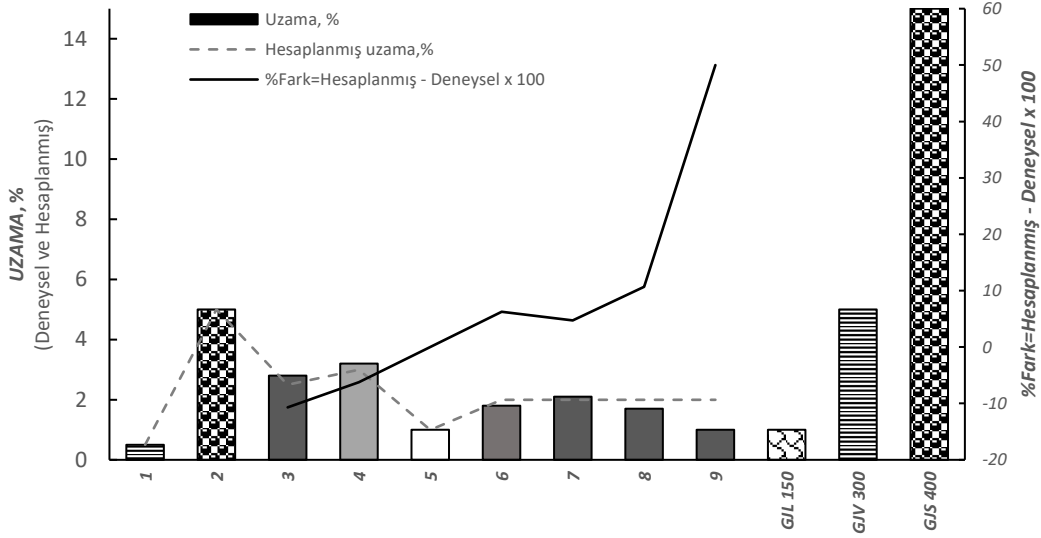


Şekil 14. Üretilen numunelerden elde edilen çekme dayanımı verileri ile standartlardaki malzemelerin karşılaştırılması (Comparison of tensile strength data obtained from produced samples and materials in standards)

Ayrıca basit sayısal analiz (Eş.1) kullanılarak karışım oranlarına göre teorik dayanım ve süneklikler hesaplanarak karşılaştırma amaçlı olarak verilmiştir. Tek yolluk ile üretilen (numune 3) kompozit malzeme döküm sırasında büyük oranda iki sıvının karıştığı, dahası büyük oranda alaşım haline geldiği malzemedir. Bu nedenle oluşan kompozit malzemede KGDD malzemeye ait alan/tane miktarı az olması dayanımda %63 oranında düşüşe neden olmuş, diğer yandan da LGDD'den %35 daha yüksek çekme dayanımı elde edilmiştir. 4 ve 5 nolu numuneler çift yolluk ile döküm yapılmış farklı oranlarda LGDD ve KGDD malzeme oranlarına sahiptir. Bu nedenle de 3 nolu numune (50/50 oranlı) ile aralarında farklı sonuçlar elde edilmiştir. LGDD'in fazla olduğu 5 nolu numune %9,5 daha düşük dayanım gösterirken, KGDD'in fazla olduğu 4 nolu numune ise %33 daha fazla dayanıma sahiptir. Bu durum malzeme özelliklerinin sonuçlara açıkça yansıdığını, kompozit malzemeden beklenildiği gibi ilgili malzemelere ait alan/tanelerin oluştuğu ve malzeme oranına göre değişerek özellikleri belirlediğini göstermektedir.

6-9 nolu numunelerin tamamı çift yolluk kullanılarak dökülmüş, ancak uzak-yakın yolluk etkisiyle soğumanın kontrol edilmeye çalışıldığı deneme malzemeleridir. 9 nolu numune hariç diğer numunelerde çift yolluk kullanılarak geç karışma yapılan bütün (4 ve 5 nolu numuneler de dahil) numunelerde dayanım artış göstermiştir. Çünkü geç karışma özellikle LGDD ile KGDD malzemelerinin alaşım ve/veya karışım oluşturma ihtimali veya düzeyini azaltarak olabildiğince ayrı

alan/bölge/taneler şeklinde kompozit malzeme üretimine imkân sağlamaktadır. Bu nedenle de sonuçlar ortalama %10-25 oranında daha olumludur. En düşük değerli 9 nolu numune dışında tüm numunelerde kompozit çekme dayanımları daha yüksek olmuştur. Bu numune 1 nolu LGDD ile karşılaştırıldığına %18 oranında daha iyi olmasına rağmen, diğerlerinden daha düşük değere sahip olmuştur. Uzak yolluk uygulamasının LGDD'de bir sorun oluşturmazken (7 nolu numune), KGDD malzemede (8 ve 9 nolu numune) küresel grafit oluşumuna olumsuz etkisi nedeniyle dayanım özelliğini de düşürmüştür. Üretilen numunelerden elde edilen uzama verilerine bakıldığında (Şekil 15) dayanımda olduğu gibi KGDD miktarının artması ve çift yolluk kullanılarak geç karışma yapılması sonucunda uzama %14 artarken ve KGDD malzemede uzak yolluk uygulaması yapıldığında ise %20 düşüş gözlenmiştir. Elde edilen uzama verileri dökülen metal kalitesi ile ilişkili olarak değişim göstermekte olup, standart KGDD ve LGDD malzemelerden %25-40 oranında daha düşük uzamaya sahip malzemelerin döküm işlemlerinde kullanılmış olması nedeniyle %20-30 daha düşük değerler elde edilmiştir. Dökülen KGDD'in uzama değeri standart VGDD ile eşittir. Bu sonuçlar, genel olarak dökme demirlerin uzama özelliklerinin düşük olması ve buna ilave olarak deneysel üretim koşullarına bağlı olarak daha da azaldığını göstermiştir.



Şekil 15. Üretilen numunelerden elde edilen uzama verileri ile standartlardaki malzemelerin karşılaştırılması (Comparison of strain data obtained from the produced samples with the materials in the standards)

Bu çalışmanın asıl amacı üretilen kompozitin her iki bileşenden de daha yüksek değerlerde özelliklere sahip olması olmayıp, öncelikli olarak kompoziti oluşturan her iki bileşenin de kendi tane/alanlarında varlıklarını/yapılarını koruyup koruyamadıklarının tespit edilmesidir. Bundan dolayı; hem yapısal (makro ve mikro yapı) hem de mekanik özellikler bakımından sıvı haldeki iki metal malzeme yolluk sisteminde karıştırıldığında her iki bileşenin kendi tane ya da alanlarında varlıklarını sürdürerek, üretilen kompozite ancak kendi değerleri oranında katkı sağlayarak yeni bir kompozit malzeme üretimi yapılabileceği tespit edilmiştir. Ayrıca bu şekilde sıvı haldeki iki farklı metal malzemeyle bir üretim yapılarak yeni bir metot ile metal-metal kompozit üretiminin de mümkün olabileceği belirlenmiştir. Kullanılan malzeme kalitesinin sonuçları ve elde edilen başarıyı doğrudan etkilediği gerçeği tespit edilmiş olup, bu nedenle kullanılan KGDD ve LGDD malzeme kalitelerinin artırılması gerekmektedir. İlave olarak, kullanılan malzemelerin birbirlerine kimyasal ilgileri veya etkilerinin yüksek olması neticesinde sonuçların beklendiğinden daha düşük olabileceğini de görülmüştür.

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada sıvı haldeki iki farklı malzemedan (KGDD ve LGDD) her ikisinin de kendi yapılarını koruyarak metal-metal kompozit üretiminin yapılabirliği araştırılmış ve önemli bulgular aşağıda özetlenmiştir:

- Sıvı haldeki iki farklı metalik malzeme ile metal-metal kompozit üretiminin mümkün olduğu,
- Sıvı+katı üretim yöntemlerinde olduğu gibi malzeme alan/taneleri arasında/ara yüzeyinde herhangi bir süreksizlik/birleşmeme/kaynaşmama sorunu oluşmadığı,
- Bu şekilde üretim yapılırken kompoziti oluşturan metallerin tek yollukta erken karışmanın yerine, ayrı ayrı girişlerden girerek birbirleriyle olabildiğince geç karışmaları gerektiği,
- Kullanılan metal malzemelerin kalitesinin, üretilen kompozitin kalitesini doğrudan etkilediği, girdi malzeme kalitesi kötüleştiğçe kompozit özelliklerinin de azaldığı,
- Özellikle LGDD sıcaklığının olabildiğince düşük olması gerektiği,
- Homojen bir karışım oluşturmak için çift girişe sahip karışma haznesi olan bir yolluk sisteminin kullanılması gerektiği,
- Kompozitin başarısı için tercih edilen malzemelerin kimyasal olarak ilgilerine göre malzeme seçiminin uygun yapılması gerektiği,
- Yüksek dayanım ve süneklik istenildiğinde %80/20 gibi daha yüksek KGDD/LGDD oranlarının tercih edilmesi gerektiği,

- Kompozitin çekme dayanımında KGDD miktarının artmasına bağlı olarak %24 ve LGDD soğutularak kontrol edilmesiyle de %15 artış sağlanabildiği,
- Küresel grafit oranının KGDD miktarının artmasına bağlı olarak %9 ve LGDD soğutularak kontrol edilmesiyle de %5 artış sağlanabildiği,
- Hedef özellikler özelinde (termal, mekanik, korozyon, aşınma vb.) malzeme çiftlerinin seçilmesi gerektiği,
- Uygulanacak test, yöntem ve işlemlerinin her iki malzeme için ayrı ayrı olması durumunda farklı testleri yaparak sonuca ulaşmak gerektiği,
- Sonuçlardaki başarı artırımı için akışkanlar dinamiği ve mekaniği konularında teorik ve pratik çalışmalar yapılması gerektiği sonuçlarına varılmıştır.

ETİK STANDARTLARIN BEYANI

(DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS ETİK STANDARTLARIN BEYANI)

Bu makalenin yazarı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

The author of this article declares that the materials and methods they use in their work do not require ethical committee approval and/or legal-specific permission.

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

Mustafa ARAT: Deneyleri yapmış, sonuçlarını analiz etmiş ve makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir. Bu çalışma Mustafa ARAT' ın doktora tezi ile ilişkilidir.

He conducted the experiments, analyzed the results and performed the writing process. This study is related to Mustafa ARAT's Ph.D. Thesis.

Hasan HASIRCI: Deneyleri yapmış, sonuçlarını analiz etmiş ve makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir. Hasan HASIRCI, yukarıda bahsi geçen doktora tez çalışmasının danışmanıdır.

He conducted the experiments, analyzed the results and performed the writing process. Hasan HASIRCI is the advisor of the Ph.D. thesis mentioned above.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

There is no conflict of interest in this study.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] <https://www.tudoksad.org.tr/genel-bakis-ve-onemi.html>, Döküm Sektörü Genel Bakış ve Önemi, Tarih: 20:31, 17 Ocak 2022.
- [2] Çelik, Ö., Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Aşınma Davranışları, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2001.
- [3] Hasırcı, H., & Karatay, B. (2018) Üretim Koşullarının Vermiküler Grafitli Dökme Demirin Mikro ve Makro Yapısal Özelliklerine Etkileri, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji, 6 (4), 887-897.
- [4] Değirmenci, S., Şirin, B., Metan, İ. (2006). Ülkemizde ve Dünyada Döküm Sektöründe Genel Bir Bakış, Yeni Teknolojiler – CGI Teknolojisinin Dökümhanelerde Yönetimi ve Geleceği, 3. Ankiros Uluslararası Döküm Kongresi. İstanbul.
- [5] Guesser, W., Duran, P., & Krause, W. (2004). Compacted Graphite Iron for Diesel Engine Blocks.
- [6] Kanetake, N., (1900). "Hot-Extruded and Cold-Rolled Textures of the Matrix Aluminum in Deformation Processed Two-Phase Nb/Al Metal-Metal Composites", Texture, Stress, and Microstructure, 35: 273–282.
- [7] Tikhonov, G. F. ve Sivov, A. V., (1969). "Densification of Bi-metal Composites During Pressing", Soviet Powder Metallurgy and Metal Ceramics, 8: 875–877.
- [8] Greenfield, I. G. ve Purohit, A., (1980). "The Effect of Discrete and Diffused Surface Layers on the Mechanical Properties of Crystals", Materials Science and Engineering, 46: 89–101.
- [9] Zhang, C. ve Lai, Z., (1990). "Interfacial Energy and Strength of Ag-Cu Bi-metal Composite", Rare Metals (China), 9: 292–295.
- [10] Ephstein, L. E., (1992). "Strength of Bi-metal Composite Under Conditions of Variable Temperatures", Strength of Materials, 23: 1230–1235.
- [11] Abbasi, M., Karimi Taheri, A. ve Salehi, M. T., (2001). "Growth Rate of Intermetallic Compounds in Al/Cu Bi-metal Produced by Cold Roll Welding Process", Journal of Alloys and Compounds, 319: 233–241.
- [12] Güler, K. A., Kısasöz, A. ve Karaaslan, A., (2014). "Investigation of Al/Steel Bi-metal Composite Fabrication by Vacuum-Assisted

- Solid Mould Investment Casting", *Acta Physica Polonica A*, 126: 1327–1330.
- [13] Karaaslan, A., Kısasöz, A., Atapek, S. H. ve Güler, K. A., (2016). "Dry Sliding Wear Behavior of Cast A7075 and A7075/SAF 2205 Composite Material", *High Temperature Materials and Processes*, 35: 487–492.
- [14] Calıkoglu, E., Cetin, (2011). "Examination of the Production and Service Properties of Bi-metal Material", 6th International Advanced Technologies Symposium (IATS'11), 16-18 May 2011, Elazığ, Turkey, 235–238.
- [15] Baron, R., Wert, J., Gerard, D. ve Wawner, F., (1997). "The Processing and Characterization of Sintered Metal-Reinforced Aluminium Matrix Composites", *Journal of materials science*, 32: 6435–6445.
- [16] Ozaki, H. ve Kutsuna, M., (2009). "Laser-Roll Welding of a Dissimilar Metal Joint of Low Carbon Steel to Aluminium Alloy Using 2 kW Fibre Laser", *Welding International*, 23: 345–352.
- [17] Shoufan R., Haitao Z., Yongchang Z., Junfa W., Jia Y., Chunhong Li "Study on liquid-liquid bi-metal composite casting hammers" *China Foundry Research&Development Vol:11 No:5, 2014, China, 412-417.*
- [18] <https://nasiluretilir.wordpress.com/2010/01/13/dokumde-kalip-turleri/> Erişim Tarihi: 12.10.2023.
- [19] Jiang, Z., Fan, Z., Jiang, W., Li, G., Wu, Y., Guan, F., & Jiang, H. (2018). Interfacial microstructures and mechanical properties of Mg/Al bi-metal produced by a novel liquid-liquid compound casting process. *Journal of Materials Processing Technology*, 261, 149–158.
- [20] Fu, Y., Zhang, Yb., Jie, Jc. (2017). Interfacial phase formation of Al-Cu bi-metal by solid-liquid casting method. *China Foundry* 14, 194–198.
- [21] HU, Y., CHEN, Y. qing, LI, L., HU, H. dong, & ZHU, Z. ang. (2016). Microstructure and properties of Al/Cu bi-metal in liquid–solid compound casting process. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 26(6), 1555–1563.

Automatic Detection of Epileptic Seizures from EEG Signals using Artificial Intelligence Methods

Ali ÖTER^{1*} 

¹Kahramanmaraş Sütçü İmam University, Vocational School of Technical Sciences Department of Electronics and Automation, Kahramanmaraş, Türkiye

Article Info

Research article
Received: 08/01/2024
Revision: 05/02/2024
Accepted: 16/02/2024

Keywords

Epilepsy
EEG
Machine learning
Epileptic seizure
ANN

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 08/01/2024
Düzeltilme: 05/02/2024
Kabul: 16/02/2024

Anahtar Kelimeler

Epilepsi
EEG
Makine öğrenimi
Epilepsi nöbeti
YSA

Graphical/Tabular Abstract (Grafik Özet)

In this study, epileptic seizures were determined from EEG signals using Python programming and three different machine-learning methods from artificial intelligence techniques. ANN has been determined as the most successful method. / Bu çalışmada Python programlama ile yapay zeka tekniklerinden üç farklı Makine öğrenmesi yöntemi kullanılarak EEG sinyallerinden epileptik nöbetler belirlenmiştir. En başarılı yöntem olarak YSA tespit edilmiştir.

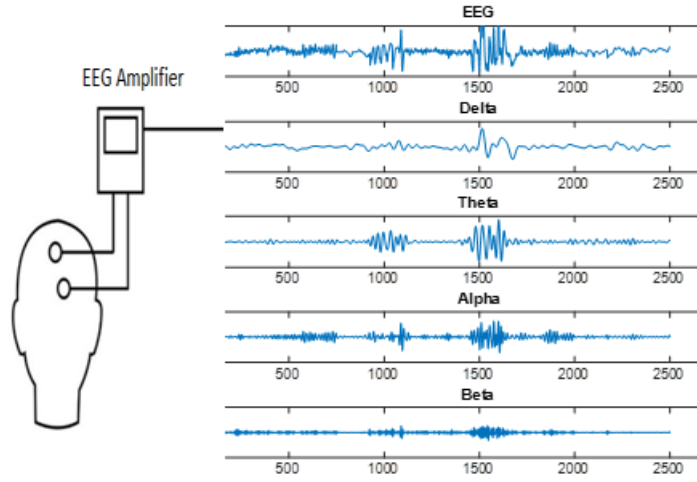


Figure A: Detection of epileptic seizures from EEG signals /Şekil A: EEG sinyallerinden epileptik nöbetlerin tespiti

Highlights (Önemli noktalar)

- Energy and normalization processes of EEG signals were performed./ EEG sinyallerinin enerjileri ve normalizasyon işlemleri gerçekleştirildi.
- Epileptic seizures were detected from EEG data with three different machine-learning methods. / Üç farklı Makine öğrenme yöntemi ile EEG verilerinden epileptik nöbetler tespit edildi.
- It was determined that ANN was the most effective method for automatically detecting epileptic seizures. / Epileptik nöbetlerin otomatik olarak tespit edilmesinde en etkili yöntemin YSA olduğu belirlendi.

Aim (Amaç): This study aims to use different machine-learning algorithms to diagnose epileptic seizures. / Bu çalışma epileptik nöbetleri teşhis etmek için farklı makine öğrenme algoritmalarını kullanmayı amaçlamaktadır.

Originality (Özgünlük): Detection of epileptic seizures using different ML methods. / Farklı ML yöntemleri kullanılarak epileptik nöbet tespit edilmesi.

Results (Bulgular): An accuracy rate of almost 97% was found for the ANN classifier's performance in identifying epileptic seizures by the extraction of features from the EEG data. / EEG verilerinin özellikleri çıkarılarak YSA sınıflandırıcısının, epileptik nöbetleri tanımda başarı oranı yaklaşık %97 doğruluk oranı ile tespit edilmiştir.

Conclusion (Sonuç): Epileptic seizures were automatically detected using ML methods by calculating the average, normalization and energy values of EEG signals. In the performance analysis, it was observed that the results obtained by normalizing the signals and calculating the energy values were more successful. / EEG sinyallerinin ortalama, normalizasyon ve enerji değerleri hesaplanarak ML yöntemleri ile otomatik olarak epileptik nöbet tespitleri gerçekleştirildi. Yapılan performans analizlerinde sinyallere normalleştirme yöntemi ve enerji değerleri hesaplanarak elde edilen sonuçların daha başarılı olduğu gözlemlenmiştir.



Automatic Detection of Epileptic Seizures from EEG Signals using Artificial Intelligence Methods

Ali ÖTER^{1*}

¹Kahramanmaraş Sütçü İmam University, Vocational School of Technical Sciences Department of Electronics and Automation, Kahramanmaraş, Türkiye

Article Info

Research article
Received: 08/01/2024
Revision: 05/02/2024
Accepted: 16/02/2024

Keywords

Epilepsy
EEG
Machine learning
Epileptic seizure
ANN

Abstract

Epilepsy is a neurological disorder in which involuntary contractions, sensory abnormalities, and changes occur as a result of abrupt and uncontrolled discharges in the neurons in the brain, which disrupt the systems regulated by the brain. The detection of abnormal electrical impulses from cells across different regions of the brain enables the identification of epilepsy. The accurate interpretation of these electrical impulses is critical in the illness diagnosis. This study aims to use different machine-learning algorithms to diagnose epileptic seizures. The frequency components of EEG data were extracted using parametric approaches. This approach to feature extraction was utilized in training machine learning classification algorithms, encompassing Artificial Neural Network (ANN), Gradient Boosting (GB), and Random Forest (RF). The ANN classifier was shown to have the most significant test performance in this investigation, with roughly 97% accuracy and a 91% F1 score in recognizing epileptic episodes. The Gradient Boosting classifier, on the other hand, performed similarly to the ANN, with 96% accuracy and a 93% F1 score.

Yapay Zeka Yöntemleri kullanılarak EEG Sinyallerinden Epileptik Nöbetlerin Otomatik Tespiti

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 08/01/2024
Düzeltilme: 05/02/2024
Kabul: 16/02/2024

Anahtar Kelimeler

Epilepsi
EEG
Makine öğrenimi
Epileptik nöbeti
YSA

Öz

Epilepsi, beyindeki nöronlarda ani ve kontrolsüz boşalmalar sonucunda beyin düzenlediği sistemleri bozan istemsiz kasılmalar, duyu anormallikleri ve değişikliklerinin ortaya çıktığı nörolojik bir hastalıktır. Beynin farklı bölgelerindeki hücrelerden gelen anormal elektriksel uyarıların tespiti, epilepsinin tanımlanmasını sağlar. Bu elektriksel uyarıların doğru yorumlanması hastalık teşhisinde kritik öneme sahiptir. Bu çalışma, epileptik nöbetleri teşhis etmek için farklı makine öğrenme algoritmalarını kullanmayı amaçlamaktadır. EEG verilerinin frekans bileşenleri parametrik yaklaşımlar kullanılarak çıkarılmıştır. Bu özellik çıkarma yaklaşımı, Yapay Sinir Ağı (YSA), Gradient Boosting(GB) ve Rastgele Orman (RF) dahil olmak üzere makine öğrenimi sınıflandırma algoritmaları eğitildi. YSA sınıflandırıcısının, epileptik nöbetleri tanımda kabaca %97 doğruluk ve %91 F1 skoru ile bu çalışmada en önemli test performansına sahip olduğu gösterildi. Gradient Boosting sınıflandırıcısı ise %96 doğruluk ve %93 F1 skoru ile YSA'ya benzer performans göstermiştir.

1. INTRODUCTION (GİRİŞ)

Electroencephalogram (EEG) signals are a method by which brain activity is measured and recorded. The interpretation of these signals is critical for learning about brain function. EEG signals aid in understanding the brain's physiological and functional features and activities [1]. Expert doctors usually examine interpretations of EEG signals. However, Artificial Intelligence (AI) algorithms

can also help interpret EEG signals. Many methods have been developed using different AI methods to analyze EEG signals. These methods primarily study the frequency, amplitude, phase, and wave patterns, which are the essential characteristics of EEG signals. By examining these qualities using AI, it is possible to uncover the circumstances under which the signals occur and their relevance to specific brain activity. EEG data may be analyzed

rapidly and precisely, providing more comprehensive and complete insights into brain function. Recently, interest in EEG-based signal processing and analysis has risen, and various techniques for processing EEG data have been developed. Furthermore, EEG signal databases may be created, and learning can be accomplished using these data utilizing AI algorithms. AI algorithm, for example, can evaluate a patient's EEG data to aid clinicians in detecting certain disorders or monitoring the success of a medication.

As of the 21st century, information technology is widely used in many industries, including the healthcare sector, such as the war industry, space technologies, and industrial automation technologies. While the use and effectiveness of information systems in healthcare delivery continue to increase, AI methods continue to be widely used in developing medical devices and diagnosing diseases [2]. These methods include Decision Trees (DT), Random Forest (RF), Support Vector Machines (SVM), Logistic Regression (LR), K-Nearest Neighbours- (KNN), Gradient Boosting (GB), Artificial Neural Networks (YSA), Deep Learning (DL), Fuzzy Logic, and Genetic algorithms. Early illness detection improves treatment outcomes. Machine learning approaches give valuable and successful outcomes in the early detection phase in this direction.

Epilepsy is a severe brain disease that is endemic to neurological disorders worldwide. Epilepsy is a chronic, non-communicable brain disease that affects approximately 50 million people worldwide. It is one of the earliest known diseases in human history, recorded in written records dating back to approximately 4000 BC [3]. It is a severe health problem that involves abnormal neurological electrical discharge of the brain and is seen in the patient as changes in consciousness, unwanted contractions, and sensory changes. Epilepsy is one of the most common brain diseases, representing the most frequent positive signs and symptoms of brain disorder during seizures [1]. The leading causes of this disease can include traumatic causes, infections, brain abscesses, brain tumors, malnutrition, pyridoxine deficiency, and calcium metabolism disorders. EEG is used to assess neurophysiological problems in the diagnosis of Epilepsy illness. EEG is critical in correctly classifying different types of epilepsy [4].

Many recent studies have been published using ML methods with EEG signals. The relevant studies are as follows: In the study by Iasemidis, a continuous and long-term adaptable procedure was identified to

analyze EEG records only when the first seizure occurred [5]. EEG signals are processed using AR analysis methods and applied to the ANN [6]. For the diagnosis of epileptic seizures in EEG recordings, classification experiments using ANN employing wavelet transform are carried out [7]. The diagnosis of epilepsy was provided in the works of Yücel and Özgüler by using the modeling of complicated measurements of EEG signals with varying resolutions [8]. The applicability of time-frequency analysis for classifying epileptic episodes in EEG data segments is proved, and several approaches are evaluated [9]. In 2010, researchers examined a machine-learning technique to generate particular classifiers for patients who detected the onset of acute seizures using EEG data. In the studies, epileptic seizures in EEG signals were predicted by focusing on aggregate features from a series of proposed wavelet analysis features such as cross-correlation, non-linear interdependence, difference of Lyapunov exponents, and phase locking using modern machine learning techniques [10]. They also examined the prediction of epileptic seizures using online EEG data analysis [11]. An epileptic seizure prediction system has been developed based on cloud-based deep learning of big EEG data [12]. A deep convolutional neural network was used on EEG signals to eliminate the need to subject the data to any preprocessing or size reduction algorithms for epileptic seizure detection [13]. The characteristics derived from multi-channel EEG data using various approaches were projected onto multi-spectral picture series based on electrode location [14]. Karakaya et al. performed an embedded system design of ANN to detect epilepsy in EEG signals [15]. Daoud et al. suggested a new prediction approach for patient-specific epilepsy based on deep learning and applied it to long-term EEG recordings in their study [16]. Savadkoohi et al. used a machine-learning technique to identify epileptic seizures by analyzing psychological states and electrical activity features in different brain areas [17]. Wang et al. used an RF model in conjunction with grid search optimization to detect epileptic EEG.

The suggested method performed well in the study, with an accuracy rate of 96% [18]. Chen et al. suggested a novel and valuable classifier for epilepsy diagnosis based on SVMs. To validate the proposed classifier's efficacy, its performance on the publicly accessible Bern-Barcelona and CHB-MIT EEG databases yielded classification accuracy of 93% and 94%, respectively [19]. Extensive experimental findings that outperform current technology demonstrate their high potential in real-world applications. Another study employed

patient-independent predictors of epilepsy using different learning algorithms capable of learning a global function utilizing data from more than one person with EEG signals [20]. According to Sethy et al., the performance of ML-based classifiers is assessed categorically and overall by gender in 2021. The study revealed that KNN was the best classifier for males, women, and all individuals [21]. In another study, frequency-based features were extracted from EEG signals, and it was proposed that classifiers based on collective learning be used [22]. In the study by Caglayan et al., EEG signals from epileptic patients were utilized as time series data encompassing 500 distinct person information, and the categorized data set was segmented using the k-fold cross-validation approach [23]. Manzouri et al. used time and frequency domain characteristics to evaluate the performance of two machine learning methods. They calculated the performance of their suggested algorithms in their study, with an average accuracy of 86% for RF and 84% for SVM [24].

Automatic epileptic seizure detection may be achieved using a variety of techniques. The most popular techniques, though, include ANN. By utilizing machine learning techniques and algorithms, this study aims to aid in identifying epileptic seizures. It has been done to diagnose epileptic seizures from EEG data using classifiers for ANN, GB, and RF algorithms. Classification success rates are shown using several assessment criteria. This article is structured as follows for the remaining portions. The rest of this article is divided into the following sections: The second section describes how to obtain and process the EEG signal, the methodologies employed, and the assessment standards. The third section of the study contains the suggested method, the fourth section contains the results and findings of the suggested approach, and the fifth section contains the discussion.

2. MATERIALS AND METHODS (MATERYAL VE METOD)

2.1. Materials (Materyal)

The datasets used to assess the effectiveness of the suggested models are crucial for data scientists and academics. The benefit of publicly accessible datasets is that they act as a standard against which outcomes may be evaluated and contrasted. The "Children's Hospital Boston, Massachusetts Institute of Technology," "Epilepsy Centre, University of California," "The Freiburg," "Bern-Barcelona" and "Bonn University" datasets are frequently used datasets for the identification of epileptic seizures. The data set from Bonn University was used in this study.

2.2.1. Data acquisition (Veri toplama)

The EEG signal recordings utilized for the study were obtained from the "Kaggle" website's open-access database (web address: <https://www.kaggle.com/harunshimanto/machine-learning-algorithms-for-epileptic-seizures/>). The dataset displays the signals of both healthy and epileptic patients in various age ranges. 500 participants' EEG signals were split into 23 sections for each participant in the data set, and marks were placed on each segment. In this study, 2,300 EEG signals demonstrating epileptic seizures and 9,200 EEG signals demonstrating normal circumstances were combined to generate 11,500 data. The EEG signals, the data path of the real-time processing system to the computer, the signal processor, and the personal computer, and how to record an EEG signal from a person are symbolically shown in Figure 1.

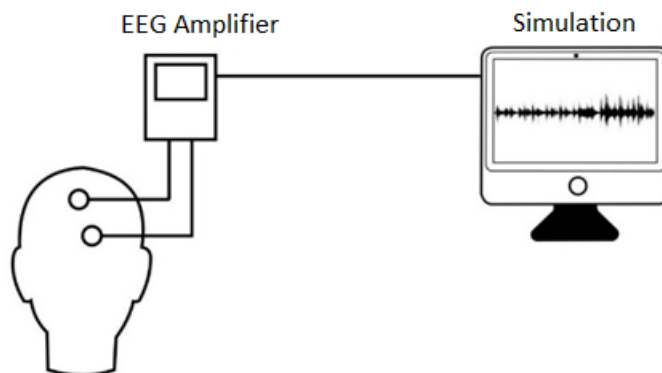


Figure 1. Recording of EEG signals (EEG sinyallerinin kaydedilmesi)

2.1.3. Data processing (Veri işleme)

Preprocessing the data gathered throughout the research allows the network to learn faster and more precisely. It may remove noise or unnecessary data, especially in big datasets.

When working with large datasets, it is crucial to choose a suitable model. More extensive and deeper models usually provide higher accuracy but require

more extended training and higher computational power. As a result, ML algorithms are a very effective method for processing big data. However, data size, training time, scalability, data preprocessing, and model selection should be considered. Table 1 below shows the distribution of the EEG signal and frequency bands and information about the behavior of the human brain.

Table 1. Frequency bands of EEG signals (EEG sinyallerinin frekans bandları)

Bands	Frequency (Hz)	Meaning
Delta	< 4	Deep sleep
Theta	4-7	When adults are emotionally stressed, especially in frustration
Alpha	8-15	Loose, Calm, Awake, but eyes closed
Beta (Low)	12.5-16	Relaxed but concentrated
Beta (Mid)	16.5-20	Thinking and listening
Beta (High)	20.5-28	Excitement and anxiety
Gamma	25-100	When awareness, happiness, stress, and meditation are increased

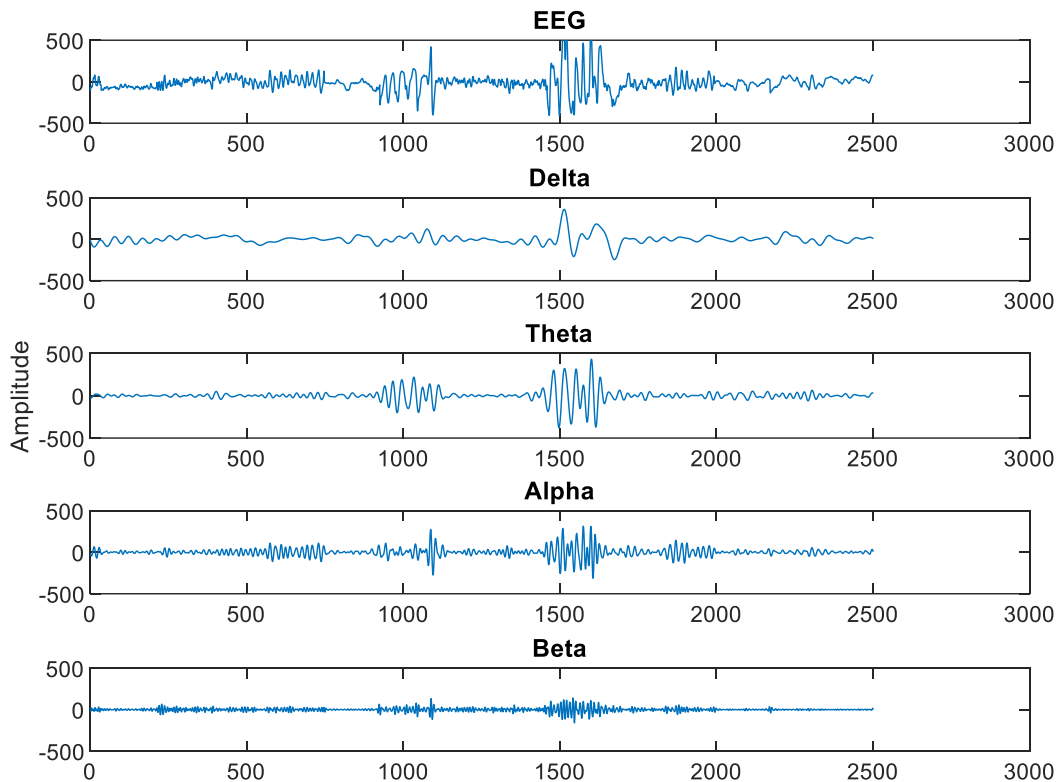


Figure 2. Different frequencies bands of EEG Signal (EEG sinyalinin farklı frekans bandları)

The amplitude of EEG waves varies significantly across frequency bands. Figure 2 shows a person's 23-second EEG signal and the amplitude change in

the lower frequency regions. While the Delta frequency band has the lowest intensity frequency

distribution, the Beta frequency band has the most significant intensity frequency distribution.

The change in an average EEG signal is shown in Figure 3, and the changes seen during an epileptic seizure are shown in Figure 4. In general, epileptic seizures appear suddenly, with spikes in the EEG signals, persist for a few seconds, and disappear.

2.1.4. Normalization (Normalizasyon)

Normalization is the process of rearranging numerical values in a data collection by a standard scale without disrupting the disparities in the value range. The primary goal of the normalization process is to minimize data quantity and provide more straightforward, more understandable findings that can be evaluated quickly [25, 26].

Several methods for normalizing data in the literature include decimal scaling, z-score, sigmoid, and minimum-maximum (Min-Max) [27]. In the study, Min-Max data normalization was applied. Values for artificial neural networks must be normalized or transformed to values between 0 and 1. Numbers are normalized so that the highest consumption value is 1 and the lowest is 0. The normalized formula appears as follows:

$$X_{norm} = \frac{x - X_{min}}{X_{max} - X_{min}} \quad (1)$$

X_{norm} is the normalized value, x is the actual consumption number, X_{min} is the lowest of the normalized values, and X_{max} is the greatest.

All values in the EEG data set were normalized using Equation 1 and utilized in the suggested approach.

2.1.5. Signal energy (Sinyal Enerjisi)

The physical quantities are directly connected to the energy change of a continuous time $x(t)$ signal. The spectral energy density of a signal or time series explains how the energy of the signal or time series is distributed with frequency. As a result, the energy of the signal in the discrete-time plane is determined by the following equation.

$$W_i = X_i^2 \quad (2)$$

The goal of adopting this feature extraction approach is to apply it to machine learning inputs like Gradient Boosting, Random Forest, and classification algorithms like ANN.

2.2. Methods (Yöntemler)

Traditional ML algorithms based on various AI approaches and ANN algorithms are commonly employed in EEG signal categorization investigations. This section provides some background on the ANN, RF, and GB techniques employed in the study.

2.2.1. Artificial neural network (Yapay sinir ağları)

ANN is a modeling tool that has recently received a lot of research interest. ANN in complicated data classification is widely utilized in applications such as chaotic time series estimates, image recognition, classification, system modeling, and function approximation [27-29]. It is one of the backpropagation network ANN models established initially by Werbos and afterward by Parker, Rummelhart, and McClelland [30]. The activation function employed in ANN structures must be carefully chosen to ensure the modeling's success. An important aspect to consider when selecting an activation function is that its derivative is simple to compute. The number of hidden layers and neurons in the hidden layer in an ANN network might vary depending on the issue to be solved by the network. The hidden and output layers both conduct the weighted sum operation. In recent years, the most often employed activation functions have been the sigmoid, hyperbolic tangent, and ReLU functions [4, 6]. The increased number of neurons in the hidden layer increases computational complexity and lengthens calculation time, allowing ANN to be utilized to solve more complicated problems. The output layer is the layer that produces network outputs by processing the information applied to the input layer from the intermediate levels. These outputs are provided to the outside world as network output information.

2.2.2. Random forest (Rastgele Orman)

It is an ML approach that uses multiple decision tree algorithms to handle classification and regression problems. It operates like a forest of many individual trees, training each tree independently and aggregating the findings to achieve the best accurate estimate. These qualities may differ amongst trees. This technique excels at high-dimensional datasets and noisy data. Furthermore, because this approach uses several trees rather than a single tree, it may be utilized to find relevant characteristics in a dataset and enhance

classification accuracy. As a result, it is well suited for usage in massive datasets and real-time applications [31, 32].

2.2.3. Gradient boosting (Gradyan artırma)

It is a machine-learning algorithm that is used to solve categorization classification. One of the tree-based learning approaches, this algorithm successively combines a sequence of weak estimators to reduce residual errors compared to past estimations of the anticipated target variable. It is generally used to create robust tree connections. It begins with a tree model and then guarantees that the following tree model is appropriately created depending on the prior tree model's mistakes. The procedure is repeated, with factors such as the number of trees and feature selection being optimized. It is a highly successful classification technique that may be used for massive and complicated datasets. However, this algorithm may perform poorly if the dataset is minimal or has little correlation between data [33].

2.3. Evaluation criteria (Değerlendirme kriterleri)

Simple diagnostic tools are required to detect studies. Each data point, including standard and epileptic seizures, was additionally indicated in the utilized dataset. Because it presents the findings graphically, ROC analysis is commonly used to assess system performance [34, 35]. This approach determines classifier performance from 0 to 1. The system determines if the signal reflects any epileptic seizures based on the rate of epileptic seizures. When the ratio exceeds 0.50, the decision is positive. When the ratio is less than 0.50, the decision is adverse. The following are some abbreviations.

- TP (True Positive): Epilepsy is present, and the classifier identified the condition as epileptic.
- TN (True Negative): No epilepsy recognized by the classifier as such.
- FP (False Positive): No epilepsy exists, but the classifier detects an epileptic episode.
- FN (False Negative): The classifier indicated an epileptic condition but found no epilepsy.

In an ideal classification system, FP and FN would be zero. The operation of the classifier is interpreted

by using performance criteria such as Accuracy, Sensitivity, Recall, Precision, and F1 Score. The performance criteria used in the study are formulated and explained below.

$$Accuracy = \frac{TP+TN}{TP+TN+FP+FN} \quad (3)$$

$$Sensitivity = \frac{TP}{TP+FN} \quad (4)$$

$$Recall = \frac{TP}{TP+FP} \quad (5)$$

$$F1\ Score = \frac{2*Hassasiyet*Duyarlılık}{Hassasiyet + Duyarlılık} \quad (6)$$

3. EXPERIMENTAL STUDY (DENEYSEL ÇALIŞMA)

Within the study, 11.500 data from a data set of 2.300 epileptic seizures EEG signals and 9.200 normal state EEG signals were employed. A multilayer feed-forward ANN model is employed in this investigation. In the constructed model, the sigmoid function is employed as the activation function in the input and hidden layers and the relu function in the output layer. In classification investigations, using the sigmoid activation function to split the dataset into two groups is a valuable choice. All records in the data set were used to calculate ANN output values. The dataset was divided into 70% training and 30% testing for the first application and 80% training and 20% testing for the second. The training and test set data were randomly chosen based on the class distribution. The data were normalized using Equation 1 from Section 2, and their energies were determined using Equation 2. 80% training and 20% test set splitting were repeated. The assessment criteria provided are in Section 2. The findings in Tables 2 and 3 were achieved.

The success rates of classifiers created using models in which raw EEG data is utilized as input by normalizing the EEG data and computing the energies have grown dramatically. The ANN was analyzed using the "optimizer," Adam optimization technique, and the Mean Squared Error (MSE) loss model, using the "Relu" activation function in the first two layers and the sigmoid activation function in the final layer. Furthermore, Tables 2 and 3 compare the performance of six algorithms in terms of "Accuracy," "Sensitivity," "Recall," and "F1 Score" based on the test rate employed.

Table 2. The classification performance for ANN with 70% Train and 30% (%70 Eğitim ve %30 ile YSA için sınıflandırma performansı)

Models	Accuracy	Sensitivity	Recall	F1 Score
ANN11 (EEG)	80.12	0.44	50.00	0.87
ANN12 (Normalized EEG)	92.20	65.90	93.47	77.30
ANN13 (Normalized + Energy + EEG)	93.77	81.79	85.96	83.82

Table 3. The classification performance for ANN with 80% Train and 20% (%80 Eğitim ve %20 ile YSA için sınıflandırma performansı)

Models	Accuracy	Sensitivity	Recall	F1 Score
ANN21 (EEG)	80.61	6.36	60.42	11.51
ANN22 (Normalized EEG)	92.83	67.40	94.74	78.76
ANN23 (Normalized + Energy + EEG)	96.56	87.40	93.07	90.15

Evaluations of the success and mistake rates are crucial for assessing how well-implemented classifier algorithms are working. The MSE function, sometimes referred to as the mean of the square of the metrics errors, is one of the

representations of mistakes that are frequently employed. Figure 5 shows the change in the MSE ratio of the suggested strategy employing this function after 2000 iterations.

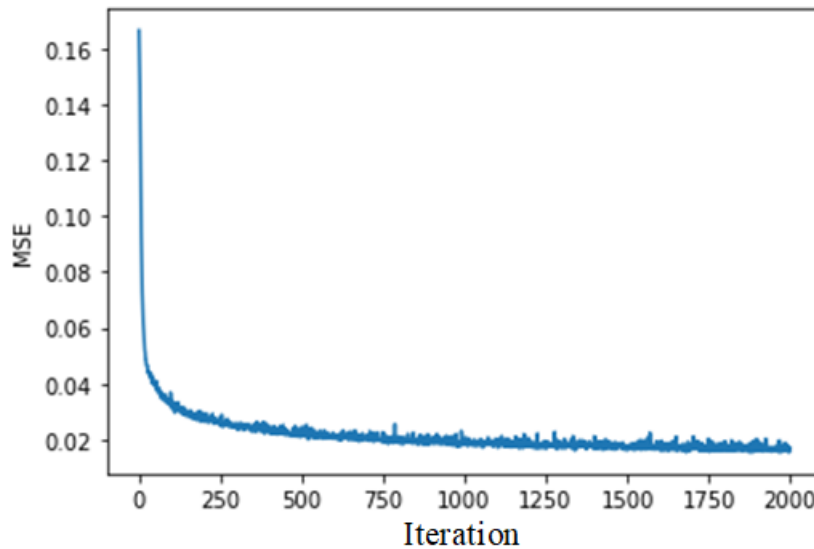


Figure 5. MSE curve of the ANN23 classifier (ANN23 sınıflandırıcının MSE eğrisi)

The classifier's average accuracy, sensitivity, recall, and F1 score values were determined and shown in Table 4. As a result, the ANN23 technique had the highest performance, with a 91% F1 score and around 97% accuracy. The second-most effective algorithm in the classifier is GB, one of the ML methods.

Three separate characteristics were employed in the study's ANN algorithm to identify epilepsy. Findings from ANN were used to compare the classifier performances of ML techniques like gradient boosting and multiple decision trees.

Table 4. Comparison of Classifier Performances (Sınıflandırıcı Performanslarının Karşılaştırılması)

Model	Accuracy	Sensitivity	Recall	F1 Score
Gradient Boosting	95.60	90.00	96.00	93.00
Random Forest	95.00	83.00	95.00	88.00
ANN	96.56	88.62	92.47	90.50

4. RESULTS (BULGULAR)

EEG datasets from the past and present have been used to apply various models and approaches. Which method to be used varies depending on the data's format. The study used ANN, Gradient Boosting, Random Forest, and AI algorithms to assess EEG data. They calculated the EEG data's average, normalization, and energies, allowing for three independent performance analyses of each program. The EEG signal normalization method was followed by applying features based on computed signal energies for the classifiers to achieve optimal performance.

The ANN algorithm is predicted to be used and required, as the success rate is 96.56 to detect epileptic seizures using three different attributes. The success rate in the second application was higher than in the first. However, the Gradient Boosting algorithm was the second recommended model, with a success rate of 95.60%. According to many studies on the same data set, the suggested ANN algorithm was a few points more successful. When the proposed ANN method is considered slightly more successful than current studies, it appears suitable for detecting Epileptic seizures.

REFERENCES (KAYNAKLAR)

- [1] J. Engel, T. A. Pedley, and J. Aicardi, *Epilepsy: a comprehensive textbook*. Lippincott Williams & Wilkins, 2008.
- [2] S. Reddy, S. Allan, S. Coghlan, and P. Cooper, "A governance model for the application of AI in health care," *Journal of the American Medical Informatics Association*, vol. 27, no. 3, pp. 491-497, 2020.
- [3] WHO, "World Health Organization: Epilepsy" World Health Organization., vol. <https://www.who.int/news-room/facts-sheets/detail/epilepsy>, 2023.
- [4] B. Karlık and Ş. B. Hayta, "Comparison machine learning algorithms for recognition of epileptic seizures in EEG," *Proceedings IWBBIO*, vol. 2014, pp. 1-12, 2014.

5. DISCUSSION (TARTIŞMA)

Although YSA and machine learning algorithms are popular in prediction and modeling today, deep learning approaches yield better results with more data. In future studies, the use of deep learning algorithms such as Convolution Neural Networks (CNN), Recurrent Neural Networks (RNN), Limited Boltzman ANN Machines (RBM), and Deep Belief Networks (DBN) may be suggested to generate more outstanding data from the epileptic seizure attack. However, in forming deep learning models called black boxes, the reliability of the decisions made by the algorithms is questioned. Decisions made by models can be analyzed using algorithms such as LIME, SHAP, LSTM, and SVM.

DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS (ETİK STANDARTLARIN BEYANI)

The author of this paper declares that the materials and methods they use in their work do not require ethical committee approval or legal-specific permission.

CONFLICT OF INTEREST (ÇIKAR ÇATIŞMASI)

The authors declare that they have no competing interests.

- [5] L. D. Iasemidis, "Epileptic seizure prediction and control," *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, vol. 50, no. 5, pp. 549-558, 2003.
- [6] A. Subasi, M. K. Kiyimik, A. Alkan, and E. Koklukaya, "Neural network classification of EEG signals by using AR with MLE preprocessing for epileptic seizure detection," *Mathematical and computational applications*, vol. 10, no. 1, pp. 57-70, 2005.
- [7] Ercelebi and Subasi, "Classification of EEG for epilepsy diagnosis in wavelet domain using artificial neural network and multi-linear regression," *2006 IEEE 14th Signal Processing and Communications Applications*, pp. 1-4, 2006.
- [8] Z. Yucel and A. B. Ozguler, "Detection of epilepsy seizures and epileptic indicators in EEG signals," in *2008 IEEE 16th Signal*

- Processing, Communication and Applications Conference, 2008: IEEE, pp. 1-4.
- [9] A. T. Tzallas, M. G. Tsipouras, and D. I. Fotiadis, "Epileptic seizure detection in EEGs using time–frequency analysis," *IEEE Transactions on information technology in biomedicine*, vol. 13, no. 5, pp. 703-710, 2009.
- [10] P. W. Mirowski, Y. LeCun, D. Madhavan, and R. Kuzniecky, "Comparing SVM and convolutional networks for epileptic seizure prediction from intracranial EEG," in 2008 IEEE workshop on machine learning for signal processing, 2008: IEEE, pp. 244-249.
- [11] L. Chisci et al., "Real-time epileptic seizure prediction using AR models and support vector machines," *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, vol. 57, no. 5, pp. 1124-1132, 2010.
- [12] M.-P. Hosseini, H. Soltanian-Zadeh, K. Elisevich, and D. Pompili, "Cloud-based deep learning of big EEG data for epileptic seizure prediction," in 2016 IEEE Global Conference on signal and information processing (GlobalSIP), 2016: IEEE, pp. 1151-1155.
- [13] M. H. Cilasun and H. Yalçın, "A deep learning approach to EEG based epilepsy seizure determination," in 2016 24th Signal Processing and Communication Application Conference (SIU), 2016: IEEE, pp. 1573-1576.
- [14] A. R. Özcan and S. Ertürk, "Epileptic seizure prediction with recurrent convolutional neural networks," in 2017 25th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU), 2017: Ieee, pp. 1-4.
- [15] B. KARAKAYA, K. Turgay, and A. GULTEN, "FPGA-based ANN design for detecting epileptic seizure in EEG signal," *Balkan Journal of Electrical and Computer Engineering*, vol. 6, no. 2, pp. 83-87, 2018.
- [16] H. Daoud and M. A. Bayoumi, "Efficient epileptic seizure prediction based on deep learning," *IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems*, vol. 13, no. 5, pp. 804-813, 2019.
- [17] M. Savadkoobi, T. Oladunni, and L. Thompson, "A machine learning approach to epileptic seizure prediction using Electroencephalogram (EEG) Signal," *Biocybernetics and Biomedical Engineering*, vol. 40, no. 3, pp. 1328-1341, 2020.
- [18] X. Wang, G. Gong, N. Li, and S. Qiu, "Detection analysis of epileptic EEG using a novel random forest model combined with grid search optimization," *Frontiers in human neuroscience*, vol. 13, p. 52, 2019.
- [19] Z. Chen, G. Lu, Z. Xie, and W. Shang, "A unified framework and method for EEG-based early epileptic seizure detection and epilepsy diagnosis," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 20080-20092, 2020.
- [20] T. Dissanayake, T. Fernando, S. Denman, S. Sridharan, and C. Fookes, "Deep learning for patient-independent epileptic seizure prediction using scalp EEG signals," *IEEE Sensors Journal*, vol. 21, no. 7, pp. 9377-9388, 2021.
- [21] P. K. Sethy, M. Panigrahi, K. Vijayakumar, and S. K. Behera, "Machine learning based classification of EEG signal for detection of child epileptic seizure without snipping," *International Journal of Speech Technology*, pp. 1-12, 2021.
- [22] N. M. POUR and Y. ÖZBEK, "Epileptic Seizure Detection based on EEG Signal using Boosting Classifiers," *Erzincan University Journal of Science and Technology*, vol. 14, no. 1, pp. 159-167, 2021.
- [23] B. ÇAĞLIYAN and K. Utku, "Epilepsi EEG Verilerinin Makine Öğrenmesi Teknikleriyle Sınıflandırılması," *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, no. 23, pp. 163-172, 2021.
- [24] F. Manzouri, S. Heller, M. Dümpelmann, P. Woias, and A. Schulze-Bonhage, "A comparison of machine learning classifiers for energy-efficient implementation of seizure detection," *Frontiers in systems neuroscience*, vol. 12, p. 43, 2018.
- [25] T. Jayalakshmi and A. Santhakumaran, "Statistical normalization and backpropagation for classification," *International Journal of Computer Theory and Engineering*, vol. 3, no. 1, pp. 1793-8201, 2011.
- [26] P. Werbos, "Beyond regression: New tools for prediction and analysis in the behavior science," Ph.D. thesis, Harvard University, 1974.
- [27] D. E. Rumelhart, J. L. McClelland, and C. PDP Research Group, *Parallel distributed processing: Explorations in the microstructure of cognition, Vol. 1: Foundations*. MIT Press, 1986.
- [28] A. Öter, O. Aydoğan, and D. Tuncel, "Automatic sleep stage classification using Artificial Neural Networks with Wavelet Transform," *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, vol. 8, no. 1, pp. 59-68, 2019.
- [29] C. D. Lewis, "Industrial and business forecasting methods: A practical guide to exponential smoothing and curve fitting," (No Title), 1982.
- [30] S. F. Witt and C. A. Witt, *Modeling and forecasting demand in tourism*. Academic Press Ltd., 1992.

- [31] S. R. Dhole, A. Kashyap, A. N. Dangwal, and R. Mohan, "A novel helmet design and implementation for drowsiness and fall detection of workers on-site using EEG and Random-Forest Classifier," *Procedia Computer Science*, vol. 151, pp. 947-952, 2019.
- [32] R. B. Messaoud and M. Chavez, "Random Forest classifier for EEG-based seizure prediction," *arXiv preprint arXiv:2106.04510*, 2021.
- [33] J. Son, I. Jung, K. Park, and B. Han, "Tracking-by-segmentation with online gradient boosting decision tree," in *Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision*, 2015, pp. 3056-3064.
- [34] O. E. Karpov et al., "Evaluation of Unsupervised Anomaly Detection Techniques in Labelling Epileptic Seizures on Human EEG," *Applied Sciences*, vol. 13, no. 9, p. 5655, 2023.
- [35] Z. Mohammadpoory, M. Nasrolahzadeh, and S. A. Amiri, "Classification of healthy and epileptic seizure EEG signals based on different visibility graph algorithms and EEG time series," *Multimedia Tools and Applications*, pp. 1-22, 2023.

TBF1180 ÇELİĞİN FİBER LAZER UYGULAMALARI

Onur YÜCE¹ , Mehtap HİDİROĞLU² , İsmail ERDOĞAN¹ , Nizamettin KAHRAMAN¹ 

¹Karabük Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İmalat Mühendisliği Bölümü, Karabük.

²Coşkunöz Kalıp Makina Sanayi ve Ticaret Anonim Şirketi, Bursa.

Article Info

Research article
Received: 03/11/2023
Revision: 16/11/2023
Accepted: 20/11/2023

Keywords

Automotive Industry
Fiber laser Welding
TBF1180
Mechanical Properties

Makale Bilgisi

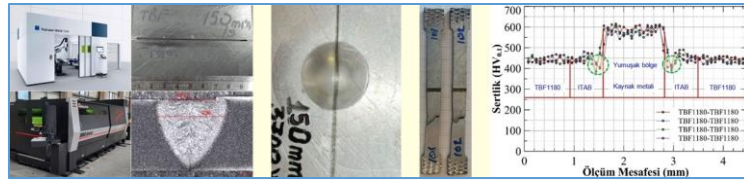
Araştırma makalesi
Başvuru: 03/11/2023
Düzeltilme: 16/11/2023
Kabul: 20/11/2023

Anahtar Kelimeler

Otomotiv Endüstrisi
Fiber Lazer Kaynağı
TBF1180
Mekanik Özellikler

Grafik Özet (Graphical/Tabular Abstract)

Bu çalışmada TBF1180 çeliğine robotik fiber lazer kaynak kullanılarak birleştirmeler sağlanmıştır. Oluşturulan numunelerin mekanik ve mikroskopik özelliklerini tespit için analizler yapılmıştır. / In this study, joints were made using robotic fiber laser welding on TBF11800 steel. Analyzes were carried out to determine the mechanical and microscopic properties of the welded samples.



Şekil/ Figure A: Yapılan çalışmalar ve bazı sonuçlar / Studies conducted and some results.

Önemli Noktalar (Highlights)

- 4 kW robotik fiber lazer kaynağı / 4 kW robotic fiber laser welding
- Gözle muayene, mikroyapı incelemeleri, sertlik testi, çekme testi, Erichsen çökertme testi / Visual inspection, microstructure study, hardness test, tensile test, Erichsen collapse test
- Otomotiv endüstrisinde ileri mukavemet çeliği olarak kullanılan TBF1180 / TBF1180 used as advanced strength steel in the automotive industry.

Amaç (Aim): İleri mukavemet özelliklerine sahip TBF1180 çeliğinin otomotiv endüstrisinde alın alına birleştirilebilirliğini iyileştirmek. Bu bağlamda TBF1180 çeliğinin robotik fiber lazer birleştirmelerinde parametre çalışmaları yapılmıştır. Pilot çalışmalar ardından oluşturulan kaynak parametrelerinin seri imalat sahalarına entegrasyonu hedeflenmektedir. / To improve the butt joinability of TBF1180 steel, which has advanced strength properties in the automotive industry. For this purpose, parameter studies were carried out on joining TBF1180 steel with robotic fiber laser. It is aimed to integrate the welding parameters created after pilot studies into mass production areas.

Özgünlük (Originality): Piyasadan temin edilen deney malzemeleri Coşkunöz AR-GE merkezinde robotik fiber lazer kaynağı kullanılarak birleştirilmiştir. Karakterizasyon işlemleri için numune kesimleri piyasada gerçekleştirilmiştir. Uygulanan testlerden çekme testi Karabük Üniversitesi bünyesinde gerçekleştirilmiştir. Mikroyapı incelemeleri, sertlik testleri, Erichsen testleri piyasada gerçekleştirilmiştir. / Experimental materials obtained from the market were assembled using robotic fiber laser welding at the Coşkunöz R&D center. Sample laser cuts for characterization were carried out commercially. Among the tests applied, the tensile test was carried out at Karabük University. Microstructure examinations, hardness tests, and Erichsen tests have been carried out in the market.

Bulgular (Results): Farklı kaynak parametresinin oluşturduğu numunelere uygulanan testler sonucunda yapılan analizlerde ortaya çıkan verilerin otomotiv endüstrisinde istenilen birleştirme koşullarını sağlayacağı öngörülmektedir. / It is prediction that the data obtained from the analyzes made as a result of the tests applied to the samples formed by different welding parameters will provide the desired joining conditions in the automotive industry.

Sonuç (Conclusion): Mikroyapı çalışmaları numunelerde martensitik ve bazen de bey nitik yapı olduğunu göstermiştir. Çekme testi sonuçları incelendiğinde numunelerin birleştirme öncesinde gösterilen çekme sonuçlarına göre daha yüksek değerlere ulaştığı görülmüştür. Erichsen çökme testinde yırtılma olmadığı görüldü. Sertlik grafikleri incelendiğinde kaynak metalinin sertliğinin ana malzeme ve ITAB'a göre daha yüksek olduğu görülmüştür. / Microstructural studies showed martensitic and sometimes bainitic structure in the samples. When the tensile test results were examined, it was observed that the samples reached higher values than the tensile results shown before joining. It was observed that there was no tearing in the Erichsen collapse test. When the hardness graphs were examined, it was seen that the hardness of the weld metal was higher than the main material and HAZ.



Fiber Laser Application of TBF1180 Steel

Onur YÜCE¹ , Mehtap HIDIROĞLU² , İsmail ERDOĞAN¹ , Nizamettin KAHRAMAN²

¹Karabük Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İmalat Mühendisliği Bölümü, Karabük.

²Coşkunöz Kalıp Makina Sanayi ve Ticaret Anonim Şirketi, Bursa.

Article Info

Research article
Received: 03/11/2023
Revision: 16/11/2023
Accepted: 20/11/2023

Keywords

Electro Discharge
Machining
Ti-6Al-4V Alloy
Keyseat
Measurement Accuracy

Abstract

In this study, the weldability of TBF1180 materials, which are widely used in the automotive industry and have advanced strength properties, was investigated at different welding parameters. Robotic fiber laser welding method, which is widely used in the industry, was preferred in welding processes. Tensile and Erichsen cupping test were applied to determine the mechanical properties of the samples. In addition, hardness tests and microstructure examinations were carried out on the weld zones of the samples. Microstructural examinations showed that the weld metal was predominantly martensitic in structure. In hardness tests, it has been determined that the hardness of the weld metal at many joints is generally higher than other regions and that there is a soft region in the tempered zones of the heat affected zone (HAZ). As a result of the tensile tests, it was seen that the fractures occurred from the base material with lower strength. It was observed that no tearing occurred in the Erichsen cupping test.

TBF1180 Çeliğin Fiber Lazer Uygulamaları

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 03/11/2023
Düzeltilme: 16/11/2023
Kabul: 20/11/2023

Anahtar Kelimeler

Elektro Deşarj
İşleme
Ti-6Al-4V Alaşım
Kama Yuvası
Ölçüm Doğruluğu

Öz

Bu çalışmada otomotiv endüstrisinde yaygın olarak kullanılan ve ileri mukavemet özelliklerine sahip TBF1180 malzemelerinin farklı kaynak parametrelerinde kaynaklanabilirliği araştırılmıştır. Kaynak işlemlerinde endüstride yaygın olarak kullanılan robotik fiber lazer kaynak yöntemi tercih edilmiştir. Numunelerin mekanik özelliklerini belirlemek için çekme ve Erichsen çökertme testleri uygulanmıştır. Ayrıca numunelerin kaynak bölgelerinin sertlik testleri ve mikroyapı incelemeleri gerçekleştirilmiştir. Mikroyapı incelemelerinde kaynak metalinin ağırlıklı olarak martenzitik yapıda olduğu görülmüştür. Sertlik testlerinde birçok birleştirme noktasında kaynak metalinin sertliğinin genel olarak diğer bölgelere göre daha yüksek olduğu ve ısıdan etkilenen bölgenin (ITAB) temperlenmiş bölgelerinde yumuşak bir bölgenin olduğu tespit edilmiştir. Çekme testleri sonucunda kopmaların mukavemeti daha düşük olan ana malzemeden meydana geldiği görülmüştür. Erichsen çökertme testinde yırtılma gerçekleşmediği görülmüştür.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

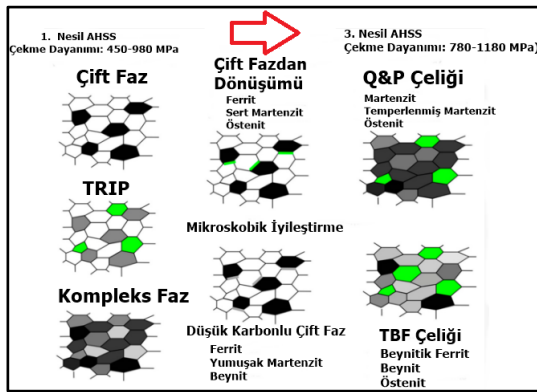
Yüksek dayanımlı düşük alaşımlı (HSLA) çelikler, otomobillerin yük taşıyan kısımlarında, süspansiyon sistemlerinde, destek parçalarında, çapraz elemanlarda, boyuna kırımlar ve şasi bileşenleri gibi parçaların üretilmesinde etkin rol oynamaktadır [1]. Günümüzde otomobil gövdesi, traversler, şasi ve güvenlik parçaları gibi yapısal bileşenlerin yapımında gelişmiş yüksek mukavemetli çeliğe (AHSS) olan talep hızla artmaktadır. Son yıllarda yapılan çalışmalar genellikle mikro bileşen olarak ostenit içeren çok fazlı mikro yapıya sahip AHSS kalitelere odaklanmaktadır. Çok fazlı çeliklere olan bu ilginin nedeni, mukavemetlerinin/uzamalarının daha

yüksek olması, daha kolay şekillendirilebilmesi ve enerji soğurma özelliklerinin daha yüksek olmasıdır [2]. Bu çeliklerden bir tanesi de son zamanlarda adından çokça söz ettiren ve 3. nesil olarak adlandırılan TBF çelikleridir. Bu çelikler tam östenitleme ve soğuk haddelemeden sonra östemperlemeyi içeren iki aşamalı ısıl işlemlerle üretilir. Yüksek mukavemetli bu çelikler (AHSS) sınıfında yer alan dönüşüm etkili plastisite (TRIP) katkılı beynitik ferrit çelikleridir. TBF çeliği ilk defa Japon üretici Kobe Steel tarafından tanıtılmıştır. TBF (TRIP Aided Bainitic Ferrite) çelikleri hem yüksek mukavemet hem de yüksek süneklik kombinasyonunu bir arada bulundurmasıyla oldukça dikkat çekicidir. TBF çelikleri, kalıntı östenit içeren beynitik ve/veya temperlenmiş

martenzitik ana yapıya sahiptir. İçerdiği kararlı kalıntı östenit, bu çelik sınıfının anahtar bileşenidir. Bu çeliklerin yüksek mukavemetini ince taneli beynitik veya temperlenmiş martenzitik yapı sağlarken, yüksek uzama oranları TRIP etkisini ortaya çıkaran kalıntı östenitik inklüzyonlar sayesinde [2,3].

İlk olarak Kobe Steel tarafından geliştirilen bu çelikleri 2012 yılında Renault-Nissan grubu gelecekteki araçlarında bu çeliği kullanmaya karar vermiştir. 2013 yılında piyasaya sürülen Infiniti Q50 modelinin "A" ve "B" sütunu takviyeleri ve yan tavan rayı TBF 1180 çeliğinden üretilmiştir. Üretilen bu parçalar gövde ağırlığının %4'lük kısmını oluşturmaktadır. 2015 yılında ise Nissan Murano tanıtılmış ve bu araçta da bazı parçalar TBF 1180 kullanılarak üretilmiştir. Eylül 2014 yılında ArcelorMittal firması Fortiform çelik ailesini piyasaya sunmuştur. Şu anda FortiForm 1050 piyasadan temin edilebilir durumda olmakla beraber Arcelor Mittal 980 ve 1180 MPa versiyonlarını geliştirme çalışmaları devam etmektedirler [4].

Şekil 1'de 1. nesil çift fazlı çeliklerin TBF çeliklerine dönüşümü verilmektedir. 1. nesil çeliklerde 980 MPa çekme dayanımı en yüksek olarak görülmektedir. 3. nesil AHSS çelikleri beynitik ferritin iç yapıda TRIP malzemelere etkisi ile malzemenin mukavemetini arttırmaktadır. Çekme dayanımı 1180-1200 MPa'a kadar yükseltmektedir [5].



Şekil 1. TBF çeliğinin dönüşümü (Transformation of TBF steel) [5].

Otomotiv sanayiinde kullanılan TBF1180 çelikleri genellikle 1-3 mm gibi ince et kalınlığına sahip malzemelerdir. Bu nedenle bu malzemeler genellikle bindirme biçiminde ve nokta direnç kaynak yöntemi ile birleştirilmektedirler. Yapılan literatür araştırmalarında 22MnB5 [6-8] ve TBF malzemelerin nokta direnç kaynak yöntemi ile birleştirildiği bazı çalışmalar mevcuttur [9,10]. Otomotiv sanayiinde kullanılan kaynak

yöntemlerinin mutlaka otomasyon sistemine dahil olması gerektiği bilinmektedir. Bir başka ifade ile bu sektörde manuel olarak yapılacak kaynak yok denecek kadar azdır. Bu nedenle sektörde bindirme biçiminde olmayıp zorunlu alın kaynak uygulamalarına ihtiyaç duyulmaktadır. Endüstride bu tür malzemelerin kaynağında en çok TIG, MIG-MAG, plazma, elektron ışın ve lazer ışın kaynak yöntemleri kullanılmaktadır. TIG kaynak yönteminin otomasyona dahil edilme süreci güç olduğundan çok fazla tercih edilmezken, MIG-MAG ve plazma kaynağı otomotiv saclarından kalınlığı yüksek olan malzemelerin birleştirilmesinde tercih edilmektedir. Elektron ışın kaynağı ise genellikle vakumlu bir ortamda gerçekleştirildiği için bu tür otomasyona elverişli değildir. Dolayısıyla lazer kaynağı yüksek kaynak hızları, çok iyi bir biçimde otomatikleştirilebilir olması ve kaynak operasyonu esnasında izleme olanağı ile sürecin kontrol edilebilirliği sayesinde modern endüstride en çok tercih edilen birleştirme yöntemlerinden biri haline getirmiştir. Lazer ışını ile kaynak, yüksek kaynak ilerleme hızının yanında, çarpılma ve distorsiyonun azlığı, derin nüfuziyet ve yüksek olmayan toplam ısı girdisi özellikleri sebebiyle diğer geleneksel kaynak yöntemlerine göre daha üstün olup, başta otomotiv endüstrisi olmak üzere endüstrinin birçok alanında tercih edilmektedir [11].

1960'lı yıllarda ortaya çıkan bu teknoloji 1980'ler ve 1990'lar boyunca düşük güç seviyelerinde optik yükseltici olarak kullanılmıştır [12]. Son yıllarda ülkemizde ve dünyada geniş kullanım alanına sahip olan bu proses her yıl daha güncel teknolojilerle ortaya çıkmaktadır. Fiber lazer kaynak ve kesim tezgahı üretici firmalar satış adetlerini arttırmak için sürekli bu prosesi geliştirmektedir. CO₂ lazer kaynağı, ilk kullanıma başladığı dönemlerde Nd:YAG kaynağı ile mukayeseye tutulup rakip olarak lanse edilirken, fiber lazer kaynağı bugün Nd:YAG kaynağının çok ötesinde bir kullanım alanına ve verime sahiptir.

Bu çalışmada otomotiv endüstrisinde TBF1180 çeliklerinin kullanımını ve sürekliliğini arttırmak, çelikleri en iyi özelliklerle birleştirmek için en uygun kaynak parametrelerini belirlemek ve belirlenen bütün veriler ile birlikte TBF1180 çeliklerini fiber lazer kaynağı ile en uygun şekilde birleştirmek hedeflenmiştir. Birleştirme sonrası çeliklerde gerçekleşecek olan mekanik ve iç yapısal değişimleri kaynak metali, ITAB, ana malzeme olmak üzere gözle muayene, mikroyapı çalışmaları sertlik testleri, çekme testleri ve Erichsen çökertme testleri uygulayarak analiz etmek amaçlanmaktadır.

2. MALZEME VE METOD (MATERIALS AND METHODS)

2.1. Malzeme (Material)

TBF çelikler günümüz otomotiv endüstrisinde yakın tarihte kullanım alanı artmaya başlayan bir çelik olup fiber lazer kaynağı ile birleştirilmesi sonucunda otomotiv endüstrisinde daha geniş bir kullanım alanına sahip olacağı ön görülmektedir. Çalışmaya konu olan TBF1180 malzemenin kimyasal bileşimi ve mekanik özellikleri Tablo 1’de verilmiştir. Bu çalışmada kullanılan materyal 1,5 mm et kalınlığında TBF1180 çeliği olup birleştirme metodu olarak 4 kW gücünde robotik fiber lazer kaynağı kullanılmıştır. Uygulanan birleştirme prosesinin ardından çıkarılan numunelere gözle muayene uygulanmıştır. Mikroyapı özelliklerini ve oluşan fazları analiz etmek için mikroyapı çalışmaları yapılmış olup plastik deformasyona karşı göstereceği direnci hesaplamak için sertlik testleri, statik yükler altında gösterdiği davranışları belirlemek için çekme testleri, kaynaklı birleştirmenin şekil almaya yatkınlığını belirlemek için ise Erichsen çökertme testleri uygulanmıştır.

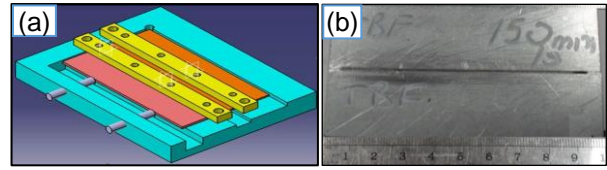
Tablo 1. TBF malzemenin kimyasal bileşim (ağırlıkça %) ve bazı mekanik özellikleri (Chemical composition (wt %) and some mechanical properties of TBF material).

C	Si	Mn	P	S	Al	Kalan
0,23	0,2	2,9	0,040	0,010	0,020	Fe
Çekme Dayanımı (MPa)				Uzama (%)		
1222				18		

2.2. Kaynaklı Birleştirmeye Hazırlık (Preparation for Welded Joining)

Muhtelif boyutlarda temin edilen malzemeler 100x60 mm boyutlarında soğuk kesme prosesi uygulanarak kesilmiştir. Kesilen malzemelerin kenarlarına zımparalama işlemi uygulanıp kesim ardından oluşan çapaklar temizlenmiştir. Kesilen numuneleri birleştirmek için numune ölçülerine uygun birleştirme fikstürü oluşturulmuştur. Birleştirilecek numune kalınlıklarının az olması ve uygulama esnasında ilave metal kullanılmayacak olması nedeni ile numunelerin hiçbirine kaynak ağzı açılmamıştır. Numuneleri sabitlemek için kullanılan fikstürün referanslama işlemi hassas ölçü aletleri ile gerçekleştirilmiştir. Bu şekilde birleştirme fikstürünün robotik kaynak makinesi ile 0 ve 90 derece bağlantısı doğru olarak sağlanmıştır. Sac malzemeler fikstüre bağlanmadan önce deney malzemelerinin bağlanacağı kanalların çapakları alınmıştır. Şekil 2’de birleştirmelerin gerçekleştiği

fikstürün 3D resmi ve birleştirilen numunenin görüntüsü verilmektedir.



Şekil 2. a) kaynak işlemlerinde kullanılan fikstür ve b) kaynak sonrası örnek numune görseli (a) fixture used in welding operations and b) sample image after welding)

2.3. Kaynak Uygulamaları (Welding Applications)

Bu çalışmada sacların birleştirmesinde tamamen robotik “Trumpf Trudisk 4001” 4 kW gücünde fiber lazer kaynak makinesi kullanılmıştır. Koruyucu gaz kullanılmadan fiber lazer uygulamaları gerçekleştirilmiştir. Öncelikle literatür bilgileri ışığında dar bir aralıkta birleştirilecek olan sac metaller için en iyi birleştirme parametrelerini oluşturmak hedeflenmiştir. Bu bağlamda hurda malzemeler kullanılarak en uygun kaynak parametre havuzu oluşturulmuştur. TBF malzemelerin birleştirilmesi için yeterli sayıda çalışma bulunmadığından bu malzemelerin birleştirilmesinde parametrik çalışma yapılmıştır. Tablo 2’de oluşturulan en uygun kaynak parametreleri bulunmaktadır. Aseton ile temizlenmiş numuneler kaynak fikstürüne yerleştirilmiştir. Kaynak yapılacak alanın kinematik bilgilerinin kaynak makinesine girilmesinin ardından numuneler birleştirilmiştir.

Tablo 2. Uygulanan kaynak parametreleri (Applied welding parameters)

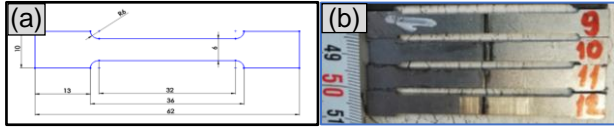
Kalınlık (mm)	Güç (W)	Kaynak Hızı (mm/sn)	Isı Girdisi (kJ/mm)
1,5	3700	100	0,37
1,5	3700	130	0,28
1,5	3700	150	0,24
1,5	3700	170	0,21

2.4. Karakterizasyon Çalışmaları (Characterization Studies)

Fiber lazer kaynağı ile birleştirilen numunelerin kesimi için 3 kW fiber lazer kesim makinesi kullanılmıştır. Numunelerin kesiminde lazer kaynak makinesinde kesme gazı olarak azot kullanılmıştır. Bütün numunelerin kesimi başarılı bir şekilde gerçekleştirilmiş olup herhangi bir çapak veya başka bir sorun görülmemektedir.

3 kW gücünde Amada Ensis model fiber lazer ile kesilen numunelerde makinenin WACS özelliği de kullanılarak diğer kesim parametrelerinin etkisi ile tamamıyla çapaksız bir kesim gerçekleştirilmiştir. WACS özelliği kesimden önce numunelere soğutma suyu uygulayan bir kesim yöntemidir. Şekil 3'de uygulanacak testler için kesilen numunelerin ölçüleri (a: çekme test numune ölçüleri ve b: kesilen numune görüntüleri) ve görüntüleri verilmiştir.

Birleştirme her bir kaynak hızında 2 adet olmak üzere toplamda 8 adet olarak gerçekleştirilmiştir. Birleştirilen numunelere uygulanacak olan gözle muayene, mikroyapı incelemeleri, sertlik testi, çekme ve Erichsen çökertme testi için karakterizasyon işlemleri uygulanmıştır. Gözle muayene işlemleri TS EN 13018 (Tahribatsız muayene-Gözle muayene-Genel kurallar) standardına göre yapılmıştır.



Şekil 3. Çekme test numune ölçüleri ve görüntüleri
(Tensile test sample dimensions and images).

Mikroyapı çalışmaları için 15x8 mm ölçülerinde fiber lazer kesim yöntemi ile numuneler çıkartılmıştır. Çıkartılan bu numunelere sıcak bakelite alma işlemi uygulanmıştır. Bakelite alınan numuneler standart zımparalama yöntemleri ile zımparalandıktan sonra %3 nitrik asit %97 etil alkol ile 10 saniye süre ile dağlanmışlardır. Bu işlemlerin ardından mikroyapı çalışmaları Nikon MA200 ters tip optik mikroskopta yapılmıştır. Optik mikroskop çalışmaları esnasında kaynak bölgesinin tamamında (kaynak metali, ITAB ve ilave olarak ana malzemenin bir kısmı) ve her bir bölgedeki farklılıkların kolaylıkla gözlemlenebilmesi için farklı büyütmelerde çalışmalar yapılmıştır. Malzemelerin sertliğinin ölçülmesi Qness QATM Q10A+ sertlik ölçüm yazılımı ile Vickers sertlik ölçme yöntemiyle gerçekleştirilmiştir. Ölçümler 75 µm sabit aralıklarda, 100 g (HV_{0,1}) yük altında kaynak metali, ITAB ve ana malzemeyi kapsayacak şekilde yapılmıştır.

Fiber lazer ışın kaynağı ile birleştirilen numunelerin statik yükler altında göstereceği davranışları analiz

etmek için kaynaklı numunelere çekme testi uygulanmıştır. Bir kaynak numunesinden iki adet çekme numunesi çıkartılmıştır. Ayrıca kaynaklı numuneleri kıyaslayabilmek için ana malzemelere de çekme testi uygulanmıştır. Bu şekilde deney numunelerimize birleştirme işleminin çekme mukavemeti konusunda nasıl bir etki ettiğini doğrudan analiz etmek mümkün olmuştur. Çekme işlemleri TS EN ISO 4136-2022 (Metalik malzemelerin kaynakları üzerinde tahribatlı deneyler- Enine çekme deneyi) standardına uygun olarak 50kN kapasiteye sahip SHIMADZU marka çekme test cihazında 2 mm/dk çekme hızı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Pozisyon olarak tam ortasından kaynak dikişi geçen numunelere Erichsen çökertme testinin uygulanma amacı, kaynak ile malzemelerin plastik deformasyona karşı göstereceği direnci görebilmektir. Erichsen çökertme testi TS EN ISO 20482 (Metalik malzemeler- Sac ve şeritler-Erichsen çökertme deneyi-2014) standardına göre 20 mm bilye çapı kullanılarak 10 mm/sn hız ile gerçekleştirilmiştir.

3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

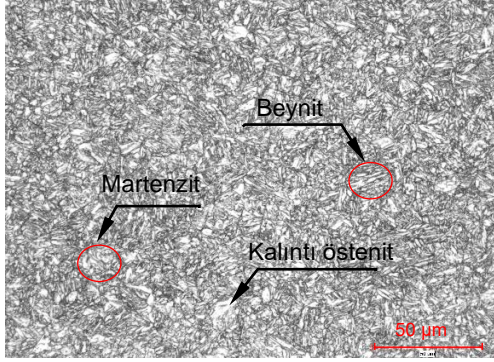
3.1. Gözle Muayene (Visual Inspection)

TS EN 13018 standardına göre 8 adet numunenin hem kep hem de kök taraflarına yapılan gözle muayene incelemelerinde, hiçbir kaynaklı birleştirmede gözle görülebilir nüfuziyet eksikliği, aşırı sarkma, yenme olukları, yüzeye açık gözenek ve çatlak vb. kaynak hatasına rastlanmamıştır. Kaynaklı numunelerde olası kaynak hatalarının oluşmamasının en büyük sebebinin kaynak işlemlerinin otomatik olarak yapılmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

3.2. Makro/mikroyapı Çalışmaları

(Macro/microstructure Studies).

Kaynaklı malzemelerin kaynak bölgelerindeki makro/mikroyapı çalışmaları sonucunda elde edilecek görüntüleri değerlendirmek için öncelikle TBF1180 ana malzemeden mikroyapı görüntüleri alınmıştır (Şekil 4). Bir başka ifade ile birleştirme işlemleri sonrasında ortaya çıkan mikroyapıları kıyaslama yapmak için ana malzeme mikroyapısına ihtiyaç duyulmuştur.



Şekil 4. TBF1180 ana malzeme mikroyapısı
(Microstructure of TBF1180 base material).

Ana malzemesinin yapısı incelendiğinde beynitik ve martenzitik bir mikroyapı gözlemlenmektedir. Yoğun martenzit adaları bazı noktalarda sıklıkla olup çelik bünyesinde beynitik yapı ile eşit dağılmışlardır ve lameller arası kalıntı östenit filmlerine ve yer yer beynitik ferrite rastlanılmaktadır.

Stadler ve arkadaşları [13] 1200 MPa çekme dayanımına sahip TBF çelik ana malzemenin çok fazlı bir mikroyapıdan oluştuğunu; bu yapıların beynitik matris içerisinde östenit adacıkları ile bir miktar martenzitik yapıya sahip olduğunu, Başer [10] ise TBF 1180 ana malzemenin kalıntı östenit içeren beynitik ve martenzitik mikroyapıda olduğunu belirtmiştir.

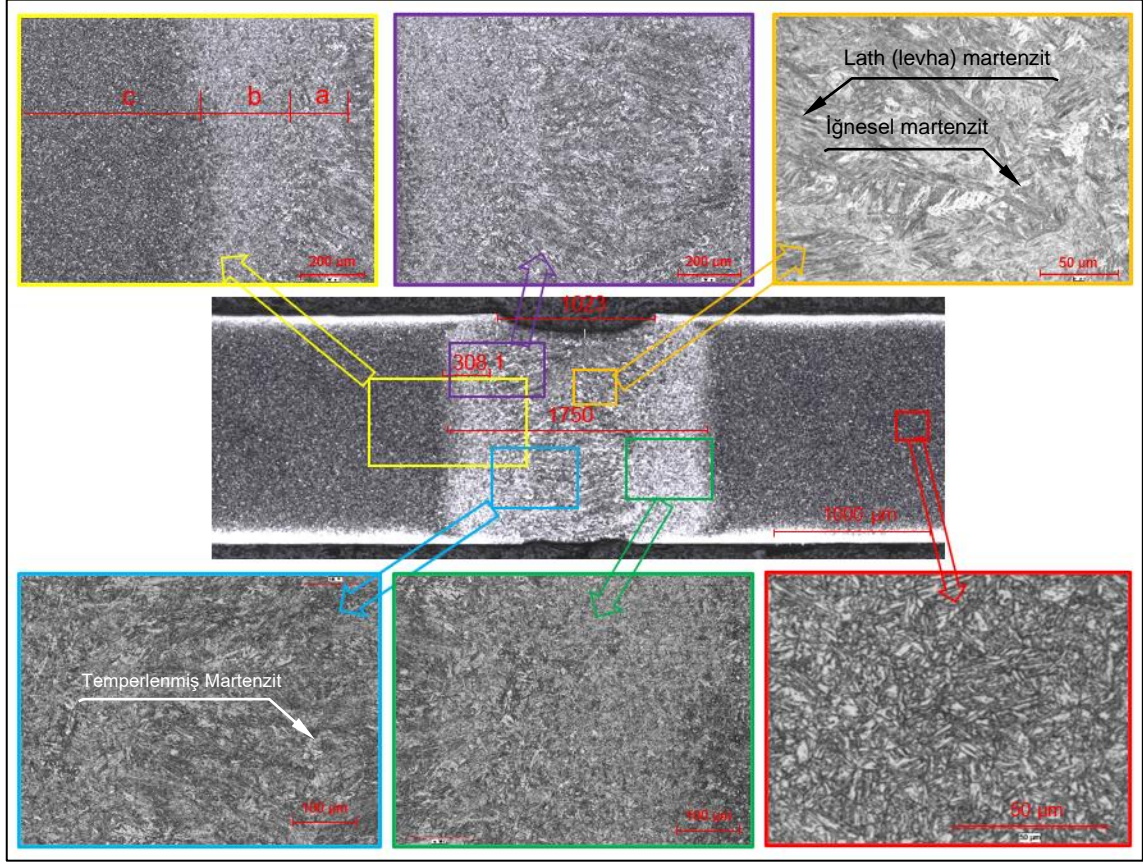
4 farklı kaynak hızı ile yapılan birleştirmelere ait mikroyapı görüntüleri Şekil 5-8 aralığında verilmiştir. Ergitmeli kaynak yöntemleri ile birleştirilen bütün çeliklerde mikroyapı incelendiğinde ana malzeme mikroyapısına göre daha karmaşık bir görüntü söz konusu olmaktadır. Bunun sebebi birleştirme esnasında malzemeye giren ısı, malzemede farklı görünüme sahip bölgeler oluşturmasıdır.

Şekil 5’de 100 mm/sn hız ile yapılan kaynak esnasında verilen ısı girdisinin en yüksek olduğu bir gerçektir. Bu nedenle bu kaynak hızında elde edilen birleştirmede kaynak metali şekli daha çok U formu alırken diğer hızlarda yapılan birleştirmelerde daha çok klasik V kaynak formuna benzemektedir. Kaynaklı numunelerin kaynak kep genişlikleri ölçüldüğünde kaynak hızına göre sırasıyla 1013 µm, 987 µm, 921 µm ve 853 µm kaynak metali genişlikleri elde edilmiştir. Benzer şekilde kaynak bölgesi (kaynak metali+ITAB) genişlikleri ölçüldüğünde ise yine sırasıyla 1750 µm, 1441 µm, 1236 µm ve 1211 µm genişlikler elde edilmiştir. Bunun sebebi kaynak esnasında parçaya verilen ısı girdisinin 0.21 kJ/mm’den 0.37 kJ/mm’ye çıkmasıyla alakalıdır. Bir başka ifade ile kaynak

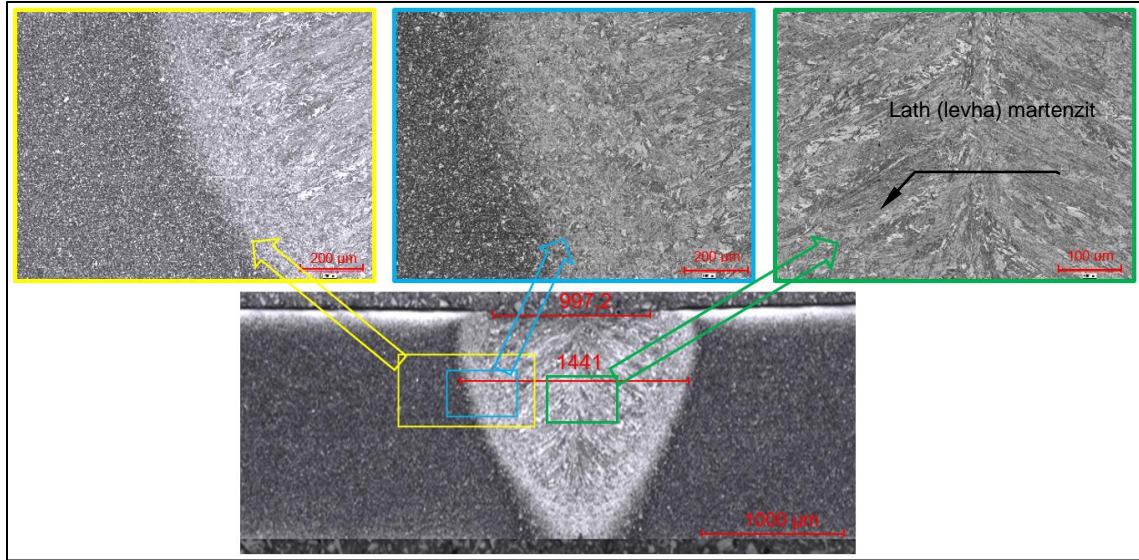
esnasında parçalara verilen ısı girdisi arttıkça hem kaynak metali genişliği hem de ITAB genişlikleri artmaktadır. Kaynaklı birleştirmelere ait mikroyapılar incelendiğinde kaynak metali yapısının kabalaşmış lamellerden oluştuğu ve yapının martenzit-beynitik olduğu görülmektedir. Kaynaktan önce ağırlıklı beynitik olan TBF 1180 ana malzeme, kaynak esnasındaki ergime-katılma ile birlikte, kaynak sonrasında hızla soğumakta dolayısıyla kaynak metali mikroyapısında martenzit miktarı artarken beynitik miktarı azalmaktadır.

Şekil 8’de verilen kaynaklı malzemelerin ITAB’ları incelendiğinde kaynak metaline bitişik olan (a) iri taneli bölge, bu bölgenin bitişikindeki (b) ince taneli bölge ve ana malzemeye yakın (c) kaynak ısısından dolayı temperlenen bölgedir. Kaynak esnasında birinci bölgede A3 sıcaklığının üzerine çıkılmakta ve tamamen östenit dönüşümü gerçekleşmektedir. Dolayısıyla kaynak sonrası soğuma hızına bağlı olarak içyapı genel itibarıyla beynitik ve martenzitik olmuştur. Buradaki sıcaklık oldukça yüksek (yaklaşık 1200 °C) olduğundan tane irileşmesi kaçınılmaz olmaktadır. A3 sıcaklığına bitişik olan ince taneli bölge, bir miktar yüksek sıcaklığa (yaklaşık 900 °C) maruz kalmakta dolayısıyla östenitleme gerçekleşmekte ancak burada sıcaklık önemli ölçüde tane büyümesi için yeterli olamamakta dolayısıyla ince taneli bir yapı oluşmaktadır. Sıcaklığın A1 ile A3 arasında olduğu bölgelerde ise içyapıda beynitik ve martenzitik fazların yanısıra ferrit fazı da ortaya çıkmaktadır. Yeniden kristalleşmenin etkisi ile bu bölgede de taneler oldukça ince yapıdadır. ITAB’ın ana malzemeye bitişik kısmının sıcaklığı A1 sıcaklığının altındadır dolayısıyla bu bölge sadece temperlenmiş olmaktadır.

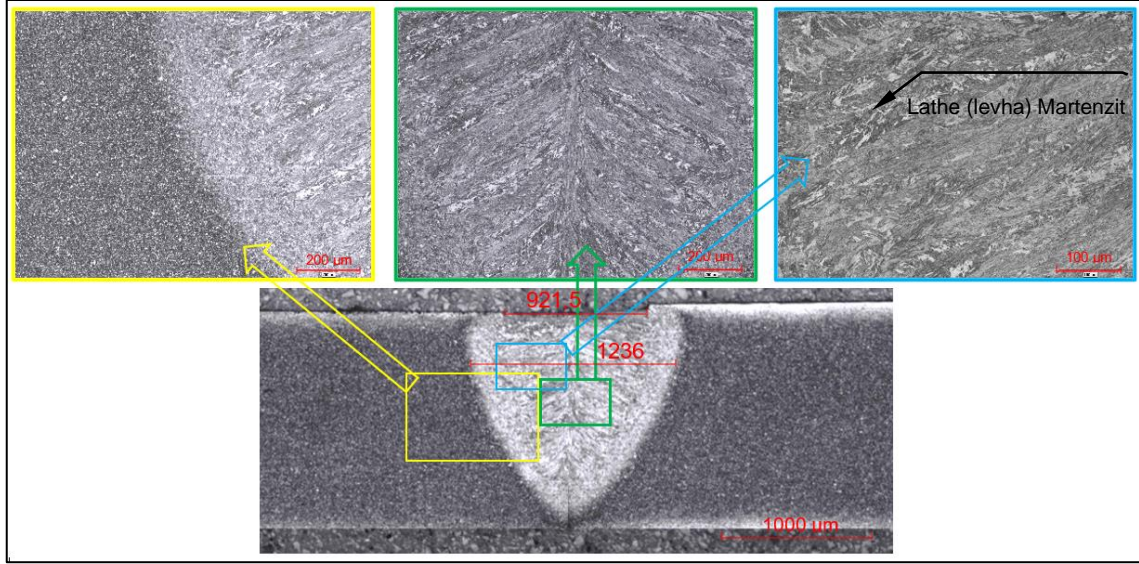
Aydın ve arkadaşları [9] DP600 ve TBF malzemeleri nokta direnç kaynağı ile birleştirmiş ve ITAB’ın üç bölgeden meydana geldiğini, bu bölgelerin yüksek sıcaklıktan dolayı oluşan kaba taneli bölge, sıcaklığın A3 ile A1 arasında olduğu ince taneli bölge ve sıcaklığın A1’in altında olduğu temperlenmiş bölge olduğunu rapor etmişlerdir. Stadler ve diğerleri [14] çalışmalarında TBF1200 çeliğini nokta direnç kaynağı ile birleştirmiş ve kaynak sonra TBF çeliğinin kaynak bölgesi özelliklerini incelemişlerdir. ITAB’a yakın kısımda yeniden kristalleşen östenit tanelerini gözlemlemişlerdir. Salminen ve diğerleri [15] ultra yüksek dayanımlı 960 QC çeliğini fiber lazer yöntemi ile birleştirmişler ve kaynak esnasında parametre değiştirerek ısı girdisinin etkilerini incelemişlerdir. Çalışmaları sonucunda gereğinden yavaş yapılan kaynağın yüksek ısı girdisine sebep olduğunu, düşük hızlarda daha geniş kaynak metali ve ITAB olduğunu rapor etmişlerdir.



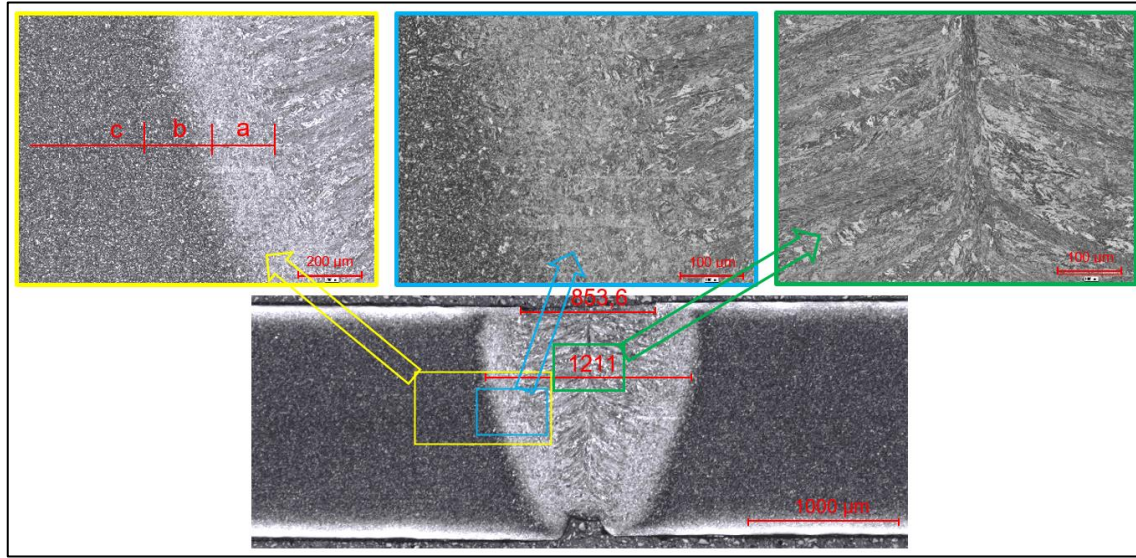
Şekil 5. 100 mm/sn hızla yapılan birleştirme (Welded sample joined with 100 mm/sec welding speed).



Şekil 6. 130 mm/sn hızla yapılan birleştirme (Welded sample joined with 130 mm/sec welding speed).



Şekil 7. 150 mm/sn hızla yapılan birleştirme (Welded sample joined with 150 mm/sec welding speed).



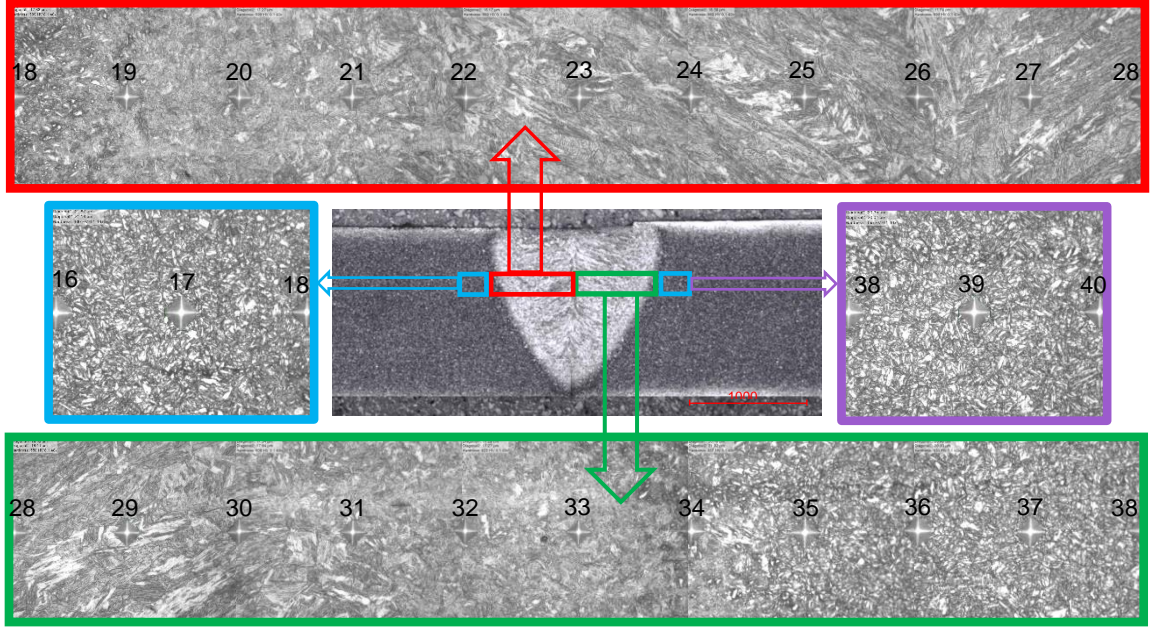
Şekil 8. 170 mm/sn hızla yapılan birleştirme (Welded sample joined with 170 mm/sec welding speed).

3.3. Sertlik Testi (Hardness test)

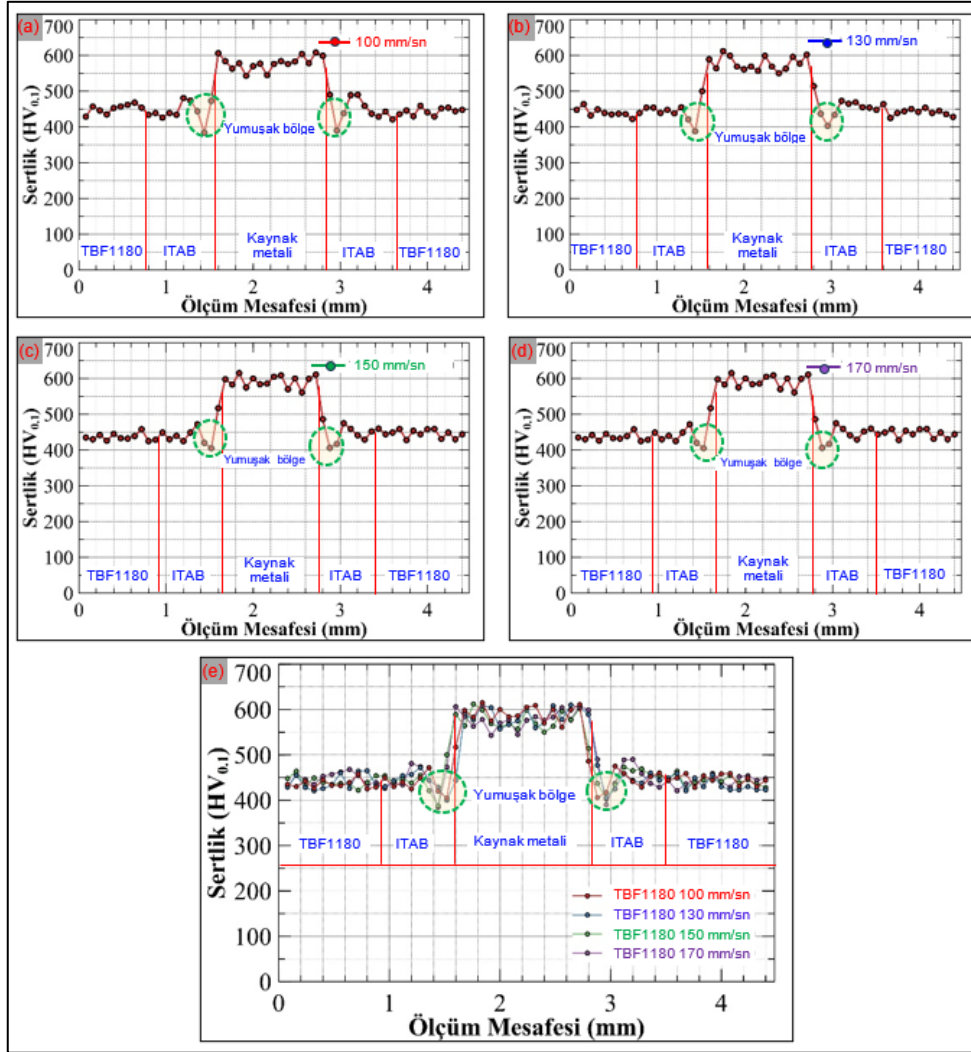
TBF1180 çeliklerinden oluşan deney numunelerinin plastik deformasyona karşı direncini öğrenmek amacıyla bu malzemelere ve bu malzemelerden oluşan kaynaklı birleştirmelere sertlik testi uygulanmıştır. Yapılan birleştirme sonucu oluşan her kaynaklı numunenin ana malzemesi, ITAB'ı ve kaynak metalleri incelenmiştir.

Sertlik ölçümleri tüm numunelerin kaynak bölgelerinden 75 µm aralıklarla ve her bir numuneden 55 adet olacak şekilde otomatik olarak

gerçekleştirilmiştir. Şekil 9'da her iki tarafın ana malzemesi hariç kaynak bölgesinden (ITAB ve kaynak metali) yapılan sertlik ölçüm bölgeleri ve 25 adet sertlik izleri örnek olarak verilmiştir. Şekil 10'da ise sertlik ölçüm sonucu elde edilen verilerden oluşturulmuş grafikler verilmiştir. İncelemeler sonucunda elde edilen sertlik verilerinde ana malzemede en düşük sertlik değeri 421 HV, en yüksek sertlik değeri 468 HV, ITAB'da en düşük sertlik 384 HV, en yüksek 606 HV, kaynak metalinde ise en düşük sertlik 543 HV, en yüksek sertlik 615 HV olarak ölçülmüştür.



Şekil 9. 150 mm/sn hızla birleştirilen numunenin seri sertlik ölçüm izleri ve makro görünümü (Serial hardness measurement traces and macro view of the sample joined at a speed of 150 mm/sec).



Şekil 10. Sertlik sonuçları a) 100 mm/sn, b) 130 mm/sn, c) 150 mm/sn, d) 170 mm/sn ve e) birleşik grafik (Hardness results a) 100 mm/sec, b) 130 mm/sec, c) 150 mm/sec, d) 170 mm/sec and e) combined graph)

Şekil 10 incelendiğinde birleştirmelerin en sert bölümleri kaynak metalleri olduğu görülmektedir. Burada dikkat çeken en önemli değişim kaynak metalinden (ergime sınırından) ana malzemeye doğru ani sertlik düşüştür. Ayrıca ergime sınırına bitişik olan bu bölge (yeşil daire içine alınan kısım) kaynaklı bağlantıların en düşük sertliğe sahip kısmını oluşturmaktadır. Bu kısımdan ana malzemeye doğru gidildikçe sertlik bir miktar yükselmekte ve devamında ana malzemenin az üzerinde bir sertlik bölgesi görülmektedir. Bu sertliğin en düşük olduğu bölge birçok araştırmada [6,10,13] yumuşak bölge (soft zone) olarak bilinmektedir. Bu bölge ITAB'da mevcut martenzit gibi sert fazların belirli bir sıcaklık aralığında temperlenmesinden kaynaklanmaktadır.

Dört farklı kaynak hızında birleştirilmiş kaynaklı numunelerin ana malzemeler ile kaynak bölgelerinden (kaynak metal ve ITAB) ölçülen sertlik değerlerinden elde edilen grafiklerin birbirlerine son derece benzer oldukları görülmektedir. Burada kaynak esnasında kullanılan kaynak hızı hariç sabit parametrelerin sıkı bir şekilde kontrol edilmesi, kaynak esnasında doğru fikstürleme ve otomatik kaynağın yanı sıra sertlik ölçümlerinin manuel olarak değil otomatik sertlik ölçme cihazı ile yapılması, grafiklerin benzer ve hatalardan arındırılmış olmasının bir göstergesi olarak değerlendirilebilir. Grafiklerde incelendiğinde oluşan bu yumuşak bölgeleri analiz etmek daha kolaydır. En yüksek sertlik değerlerinin kaynak metallere (en düşük 543 HV, en yüksek 615 HV) elde edildiği görülmektedir. Ayrıca kaynak metal sertliklerinin artan kaynak hızı ile (dolayısıyla düşük ısı girdisi) attığı, ancak bu artışın dikkate değer bir artış olmadığı tespit edilmiştir. Bir başka ifade ile en düşük ısı girdisi ile en yüksek ısı girdisi arasında birleştirilen kaynaklı numunelerde sertlik farkı %1-3 arasında değişmektedir. Kaynaklı malzemelerin kaynak metallere en yüksek sertlik değerlerinin ölçülmüş olmasının sebebi kaynak sonrası kaynak metallere elde edilen mikroyapı ile ilgilidir. Mikroyapı çalışmalarında kaynak metalinin ağırlıklı olarak martenzitik olduğu bu nedenle sertliğinin yüksek olması normal bir durumdur. Ayrıca artan ısı girdisine bağlı olarak martenzit oranının azalması beynitik yapının artması sertliğin bir miktar düşmesine neden olmaktadır.

Dört farklı kaynak ilerleme hızında birleştirilmiş kaynaklı numunelerin ITAB'ları incelendiğinde, kaynak ergime sınırından ITAB'a doğru gidildikçe sertliğin neredeyse doğrusal sayılabilecek şekilde azaldığı görülebilir. ITAB'da sertlik değerleri en yüksek yaklaşık 600 HV iken en düşük yaklaşık 400

HV ölçülmüştür. Ana malzeme sertliğinin ortalama yaklaşık 435 HV olduğu düşünüldüğünde ITAB sertliğinin ana malzemeden hem yüksek hem de düşük bölgelerinin olduğu görülmüştür. ITAB'dan ölçülen değerler kıyaslandığında ITAB'da olan farklı mikroyapılara bağlı olarak en düşük sertlik ile en yüksek sertlik değerleri arasında yaklaşık %65 fark olduğu tespit edilmiştir. Kaynak metal sınırı olan ergime sınırına bitişik bölgede en yüksek ITAB sertliği elde edilirken ana malzemeye en yakın bölgede ise ana malzemeden yaklaşık %10 düşük sertlik değerleri bulunmuştur. En yüksek ITAB sertliğinin ölçüldüğü bölge iri taneli bölge, en düşük sertliğin ölçüldüğü bölge ise ana malzemeye bitişik temperlenmiş yumuşak bölge (soft zone) olarak belirlenmiştir. Bir başka ifade ile kritik üstü bölgede en yüksek sertlik elde edilirken interkritik bölgede orta sertlik, kritik altı bölgede ise en düşük sertlik değerleri elde edilmiştir.

Başer [10] TBF1180 çelikleri nokta direnç kaynak yöntemi ile farklı ısı girdilerinde birleştirmiş ve kaynak bölgesindeki en yüksek sertlik değerinin kaynak metalinde 532 ile 559 HV arasında ölçüldüğünü belirtmiştir. Kaynak metal bir başka açıdan değerlendirildiğinde artan kaynak hızına bağlı olarak ısı girdisi azalmış, dolayısıyla kaynak metal genişlikleri küçülmüş bulunmaktadır. Bu ölçüm sonuçlarından elde edilen kaynak metal genişlikleri makro/mikroyapı çalışmalarındaki ölçüm değerleri ile örtüşmektedir.

Stadler ve diğerleri [14] TBF1200 malzemeleri nokta direnç kaynak yöntemi ile birleştirmişler ve kaynak bölgesinde sertlik haritalandırması yapmışlardır. Çalışmaları sonucunda 400 HV sertliğe sahip ana malzeme sertliğinin ergime-katılma sonucunda kaynak metalinde 500 HV'nin üzerine çıktığını, kritik üstü ITAB'da bu değer 550 HV, interkritik bölgede ise ana malzemeye benzer sertlik sonucu gösterdiğini belirtmişlerdir. Ayrıca çalışmalarında ana malzemenin temperlenmesiyle kritik altı ITAB'da sertliğin 370 HV'ye düştüğünü rapor etmişlerdir.

Benzer şekilde Aydın ve diğerleri [9] TBF1180 malzemeyi nokta direnç kaynağı ile birleştirmiş ve ITAB'dan ana malzemeye geçiş olduğu çok dar bir bölgede sertlik değerlerinin önemli ölçüde ana malzemenin altına indiğini rapor etmiştir. Bu sertlik kayıplarının ITAB ve ana malzeme sertliklerine nazaran sırasıyla kabaca %40 ve %15 civarında olduğunu ve bu önemli sertlik düşüşünün tane büyüklüğünden değil temel malzeme iç yapısındaki sert fazların (martenzit ve beynit) kaynak ısıl

çevriminde önemli ölçüde temperlemesiyle ortadan kalkması neticesinde olduğunu belirtmiştir.

Altay [16], yapmış olduğu çalışmada otomotiv endüstrisinde kullanılan ileri mukavemet özelliklerine sahip DP1200 çeliğinin üzerinde lazer kaynak parametrelerinin etkilerini incelemiştir. Kaynaklı numunelere uyguladıkları sertlik testleri sonucunda bütün numunelerde kaynak metalinin sertliğinin martenzitik yapısı nedeniyle ana metalden ve ITAB'dan yüksek olduğunu gözlemlemişlerdir.

Tunçel [17] lazer kaynağı ile birleştirilmiş farklı türdeki ultra yüksek mukavemetli çeliklerin

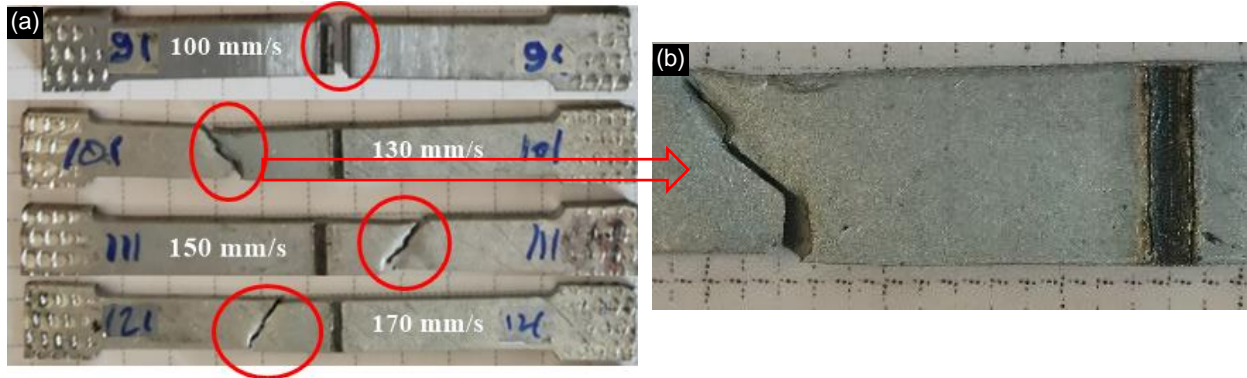
3.4. Çekme Testi (Tensile Test)

Çekme testi, bir deney numunesinin kopana kadar tek eksen doğrultusunda çekme kuvvetine maruz bırakılarak gerçekleştirildiği bir testtir. Bu testin amacı numunenin MPa birimi cinsinden ne kadar kuvvete dayandığını ne kadar % uzama gerçekleştireceğini öğrenmektir. Bu amaç doğrultusunda ana malzeme ve birleştirme uygulamasından sonra kaynak metalinin dahil olduğu bölümden çıkarılan çekme numunelerine bu test uygulanmıştır. Çekme testi ana malzeme ve her bir kaynak parametresinden 2 adet olmak toplamda 10 adet numuneye uygulanmıştır.

TBF1180 birleştirmelere uygulanan çekme testlerinin ardından numunelerde olan kopma

mekanik ve mikroyapı ilişkilerini incelemiştir. Yapılan incelemeler sonucunda ITAB sertliği öncelikle artış, sonrasında ise ciddi bir düşüş eğilimindedir. Mikro sertliğin arttığı ITAB'da martenzitin incelmeye ile kaynak bölgesinden daha yüksek değerlerde mikro sertlik değerleri elde edilmiştir. Lazer kaynak sırasında tamamen östenitlenen yapı yeniden kristalize olmuştur. Mikro sertlik değerlerinde ciddi azalmanın görüldüğü ITAB'da ise temperlenmiş martenzit yapısından kaynaklı değerlerde düşüş yaşanmakta ve ana malzeme sertlik değerlerinin de altına inmektedir. Bu bölge yumuşak bölge (soft zone) olarak adlandırılmaktadır.

noktaları Şekil 11'de verilmiştir. 100 mm/s hızla yapılan birleştirme dışında bütün numuneler ana malzemenin, 100 mm/s hızla yapılan birleştirme ise kaynak metalinden koptuğu görülmektedir. Ayrıca Şekil 11'de verilen kırılma görüntüsünden kopmanın gevrek türde olduğu ve çekme test esnasında malzemede boyun vermenin sınırlı olduğu görülmektedir. Burada malzeme kalınlıklarının aynı olması, kaynak mukavemetlerinin ana malzemeler ile aynı veya çok az miktarda yüksek olduğu sonucunu meydana getirmektedir. Bir başka ifade ile benzer malzemelerin birleştirilmesinde uygun yöntem ve parametre seçildiğinde kaynak metalinden kopma beklenmemektedir.



Şekil 11. Çekme testi sonrası kopma bölgeleri (Rupture zones after tensile testing).

100 mm/s hızla birleştirme yapılan numunede; seçilen kaynak hızının bu kalınlıkta olan TBF1180 çelikleri için uygun olmadığı görülmektedir. Burada düşük kaynak hızının tetiklediği yüksek ısı girdisi kaynak metalinin çökmesine dolayısıyla kaynak kesit kalınlığının azalmasına sebep olmuş, sonuçta kopma bu numunede kaynak metalinde gerçekleşmiştir. Tablo 3'de çeliklere uygulanan 8 çekme testine ait bütün ölçümler, (% uzamalar, kaynak verimleri, kopma noktaları), Şekil 12'de ise

çekme testi sonuçları grafik olarak verilmiştir. Şekil 12'de verilen grafikler aynı grafikler olup sadece aralarındaki farkın kolay anlaşılması için ötelenmiş (a) ve bindirme (b) biçiminde verilmiştir.

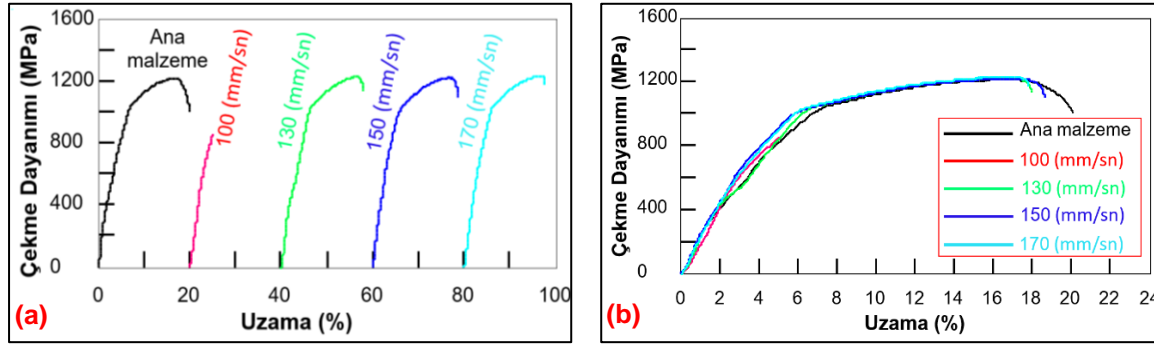
Tablo 3'de verilen çekme test sonuçları incelendiğinde gerek çekme dayanımlarının gerekse % uzama değerlerinin birbirlerine yakın değerlerde ölçülmesi bu tür kaynaklı konstrüksiyonların elde edilmesinde tekrarlanabilirlik açısından son derece

önemlidir. Burada tekrarlanabilirliğin yüksek olmasının sebebi kaynak işlemlerinde direkt insan faktörünün olmaması, ön parametrik çalışmaların yapılması ve malzemeye uygun yöntemin seçilmiş

olmasıdır. Kaynak yönteminde ilave metal kullanılmamasının da bu yüksek değerlerin ölçülmesinde önemli bir etkisinin olduğu unutulmamalıdır.

Tablo 3. TBF1180 ana malzeme ve birleştirme sonrası çekme testi sonuçları (TBF1180 base material and after joining tensile test results).

Kaynak Hızı (mm/s)	Ölçüm No	Çekme Dayanımı (MPa)	Ortalama	Ölçüm No	Uzama (%)	Ortalama	Kopma yeri	Verim (%)
100	1. ölçüm	872,10	869,21	1. ölçüm	5,28	5,16	Kaynak metali	71
	2. ölçüm	866,32		2. ölçüm	5,05		Kaynak metali	
130	1. ölçüm	1232,39	1235,37	1. ölçüm	15,90	16,03	Ana malzeme	100
	2. ölçüm	1238,35		2. ölçüm	16,17		Ana malzeme	
150	1. ölçüm	1233,06	1230,95	1. ölçüm	16,17	16,15	Ana malzeme	100
	2. ölçüm	1228,85		2. ölçüm	16,14		Ana malzeme	
170	1. ölçüm	1236,89	1238,15	1. ölçüm	16,51	16,72	Ana malzeme	100
	2. ölçüm	1239,42		2. ölçüm	16,93		Ana malzeme	
Ana malzeme (TBF1180)		Katalog	Ölçülen	Verim: ana metalin mukavemetine göre kaynaklı bir bağlantının mukavemetini ifade eder. %100 bağlantı verimliliği, kaynağın ana metal ile aynı mukavemete sahip olduğunu gösterir.				
Çekme Dayanımı (MPa)		1222	1227,9					
Uzama (%)		18	16,6					



Şekil 12. Çekme test sonuçları a) ötelenmiş ve b) bindirme biçiminde (Tensile test results in a) offset and b) overlap graphic).

Yukarıda veriler Tablo ve grafikler incelendiğinde 100 mm/s kaynak hızıyla yapılan birleştirmenin kopma noktası ve çekme dayanımı birleştirme için kabul edilemez bir noktadadır. Ana malzemenin çekme dayanımı 1200 MPa civarındayken 100 mm/s kaynak hızıyla gerçekleştirilen birleştirmenin ulaştığı çekme dayanımı 860-870 MPa arasındadır. Dolayısıyla bu numunede kopma kaynak metalinde gerçekleşmiştir. Diğer birleştirmelerde kaynak hızının artması ile numunelerin çekme dayanımı ana malzeme ile aynı değerlere gelmiş olup kopmalar ana malzemelerden gerçekleşmektedir. Bu test sonuçlarından ideal kaynak parametrelerinin bu değerler olduğu sonucu çıkarılabilir. Çünkü bu üç numunenin kopma yerleri kaynak metali ve ITAB değil ana malzemedir. Kaynaklanabilirliği kötü olmayan malzemelerin ideal kaynak ekinin en az ana malzemeler kadar mukavemet vermesi gerekliliği bilinmektedir. Dolayısıyla kaynak sonrasında kaynaklı bağlantılarda kopmanın ana

malzemeden olması ideal kaynak ekinin elde edildiğini göstermektedir [18]. Özellikle yüksek mukavemetli çeliklerde ilave metalin kullanıldığı durumlarda çoğu kez kopmalar kaynak metali veya ITAB'dan gerçekleşmektedir. Özellikle 22MnB5 ve Q&P (Quench and Partioning) gibi yüksek mukavemetli malzemelerin kaynağı esnasında ITAB'da meydana gelen yumuşak bölge, çekme testinde kaynaklı bağlantının hem bu bölgeden kopmasına hem de ciddi verim düşüşlerine neden olmaktadır. Çalışmada kullanılan TBF1180 malzemesinde de kaynaktan sonra ITAB'da yumuşak bölgenin varlığı Şekil 10'daki sertlik grafiklerinde açıkça görülmektedir. Ancak TBF malzemelerin kaynağında ITAB'da meydana gelen yumuşak bölge diğer yüksek mukavemetli çeliklere göre hem çok az hem de dar bir alanda meydana gelmektedir. Bu nedenle 22MnB5 ve Q&P gibi kaynaklı çeliklerin çekme testinde kopma ITAB'ın yumuşak bölgesinde meydana gelirken kaynaklı

TBF1180 malzemelerin çekme testinde kopma ana malzemeden olabilmektedir. Bu farklılığın çekme testi esnasında TBF malzeme ITAB'ında dar ve düşük bir miktarda olan bu yumuşak bölgenin hızla pekleşerek ana malzeme özelliklerine ulaşmasından kaynaklanabileceği düşünülmektedir. 22MnB5 ve Q&P gibi malzemelerde bu bölgenin hem daha geniş hem de ana malzemeden belirgin bir değerde düşük olası kaynaklı bağlantının bu bölgeden boyun vermesi ve kopmasıyla sonuçlanmaktadır. Tuncel ve arkadaşları [19] 22MnB5 malzemeleri farklı lazer gücü ve farklı kaynak hızlarında birleştirmiş ve üç farklı lazer gücü için kaynak hızı artırdığında çekme mukavemeti ve uzama yüzdesi değerlerinin azaldığını ve çekme testi sonucunda ısı girdisi düşük olan numuneler kaynak metalinden kırılırken, ısı girdisi yüksek olan numunelerin ITAB'ın yumuşak bölgesinden kırıldığını rapor etmişlerdir. Benzer şekilde Jia ve arkadaşları da [20] ultra yüksek dayanımlı 22MnB5 ve Q235 çelik malzemeleri fiber lazer yöntemi ile 3.5 kW lazer gücü ve 5 farklı kaynak hızı (3, 4, 5 ve 6 m/dk) kullanarak birleştirmişler çalışmaları sonucunda 22MnB5 malzemelerin kendi aralarındaki birleştirmelerinde en yüksek kaynak hızlarında

(6 m/dk) yeterli nüfuziyet elde edilememiş ve kopmalar kaynak metalinden gerçekleşmiştir. Diğer bütün hızlarda kopma ITAB'ın yumuşak bölgesinden gerçekleşmiş ve kaba tanelerin ve sert, kırılğan fazın oluşması nedeniyle herhangi bir görünür boyunlanma oluşumu olmadan kırıldıklarını rapor etmişlerdir.

3.4. Erichsen Çökertme Testi (Erichsen Cupping Test)

Lazer kaynak yöntemi ile birleştirilmiş kaynaklı malzemelerin kaynak sonrası şekillendirme özelliklerinin bilinmesinde Erichsen çökertme testleri kullanılmaktadır. Test sonrası kaynaklı numunelerin oda sıcaklığında şekillendirilebilirlik üzerindeki etkisini incelemek için çökme yükseklikleri ve kalınlık dağılımları ölçülür [21]. Bu amaç doğrultusunda 150 mm/s hız ile yapılan birleştirme dikkate alınarak Erichsen çökertme testi uygulanmıştır. Kaynaklı numunelerden 150 mm/s hızla birleştirilen numuneye uygulanan test sonrası cihazın ekran görüntüsü ve testin yapıldığı bölgenin yakın mesafeden görüntüleri Şekil 13'de verilmiştir.



Şekil 13. Erichsen çökertme test görüntüleri ve test sonuçları (Erichsen cupping test images and test results).

150 mm/s hız ile birleştirilen numuneye uygulanan test sonucunda bir yırtılma gerçekleşmemiştir. Burada kaynaklı numunenin çökertme derinliği 5.1 mm olarak ölçülmüştür. Lakin yırtılma olmaması bu malzemenin şekillendirilebilirliğinin iyi olduğu anlamına gelmemektedir. Burada yırtılma olmayışının sebebi kaynak bölgesinin sağlam olmasının yanında makine gücünün yetersiz olduğunu göstermektedir. Numunenin makro görüntüsüne bakıldığında uygulanan 4.98 ton basınça rağmen kaynak bölgesinde (kaynak metal ve ITAB) çatlama ve yırtık gözlenmemiştir. Kaynaklı numune üzerinde oluşan çukurlaşma derinliği kaynaklı malzemenin şekillendirilebilirliğinin iyi olduğunun bir göstergesi olarak değerlendirilebilir.

Di ve arkadaşları [22] 1,5 mm kalınlıkta DP780 ve DP980 çeliklere fiber lazer kaynak işlemi

gerçekleştirmiş, dayanım, şekillendirilebilme gibi özellikleri incelemişlerdir. Erichsen çökertme deneyi sonucu farklı malzemelerin birleşmesinde şekillendirilebilirliğin daha kötü olduğu belirtilmiş, sebebi asimetrik deformasyona ve farklı yumuşama derecelerine bağlanmıştır. Çatlağın DP780'in yumuşamış bölgesinden başladığı ve kaynak bölgesine paralel olarak ilerlediği belirtilmiştir.

Jia ve arkadaşları [23] 1,36 mm kalınlığında QP980 ve 1,2 mm kalınlığında B1500HS çeliklerini fiber lazer ile alın kaynağı işlemi gerçekleştirmişler ve Erichsen çökertme deneyinde çatlak başlangıcının B1500HS'nin ITAB'ının yumuşamış bölgesinde olduğu belirtilmiştir. Huan ve arkadaşları [24] DP590, DP780 ve DP980 çelikleri lazer kaynağı ile birleştirdikleri çalışmalarına Erichsen çökertme deneyi uygulamışlar ve kaynaklı numunelerde ana malzemenin %81,1'i ile %91,7'si arası dayanım

değerleri belirlemiştir. Hamidinejad ve arkadaşları [25] IF çeliklerini CO₂ lazer kaynak yöntemi ile birleştirmişler ve kaynaklı numunelere Erichsen çökertme testi uygulamışlar ve çalışmaları sonucunda üç tür kırılma hatası gözlemlenmiştir. Bunlar artan gözenek sayısı ve düşük kaynak sünekliği nedeniyle meydana gelen ayrılma; ikinci olarak ana malzeme şekillendirme sınırını (istenen tip) aşacak şekilde oluşan ana malzeme yırtılması ve ITAB'dan başlayan ve erken oluşan yırtılma tipi kırılmadır. Bandyopadhyay ve arkadaşları [26] da DP980, DP600 ve yüksek dayanımlı IF çeliklerini fiber lazer kaynağı ile birleştirmişler ve Erichsen çökertme testi sırasında iki farklı başarısızlık modeli gözlemlendiğini ve DP980'de kaynağa yakın yumuşak bölgede lokalize boyun verme ve kaynağa paralel yumuşak bölge civarında yayılan kırılma ve yüksek dayanımlı IF çeliği ile DP600'lerde yırtılmanın başladığı ve kaynak boyunca ana metale dik yönde yayıldığını rapor etmişlerdir. Bu çalışmadan elde edilen Erichsen çökertme testi sonrasında kaynak bölgesinde dikkate değer bir kaynak hatasının (yetersiz ergime, nüfuziyet azlığı, gaz boşluğu, mikro çatlak vb) oluşmadığı sonucu çıkarılabilir.

4. SONUÇLAR (CONCLUSION)

Bu çalışmada otomotiv endüstrisinde sıklıkla kullanılan TBF1180 çelikler 4 kW fiber lazer kaynak (Trumpf Trudisk 4001) yöntemi ile birleştirilmiş ve birleştirmeler çekme testi, Erichsen çökertme test, sertlik testi ve makro/mikroyapı incelemeleri yapılarak karakterize edilmiştir. Çalışmalardan elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

- Kaynaklı numunelere yapılan göz ile muayene sonucunda kaynak esnasında kullanılan parametrelerin yeterli ergimeyi sağladığı, kaynak kep ve kökünün malzeme kesit kalınlıkları boyunca olduğu yani gözle görülebilecek herhangi bir kaynak kusurunun (makro çatlak, gözenek, yenme olukları vb.) oluşmadığı görülmüştür.
- Makro/mikroyapı çalışmaları sonucunda tüm birleştirmelerde kaynak metalinin simetrik oluştuğu, kaynak esnasındaki fiktürleme sayesinde malzemeler arasında eksenel

kaşıklığın olmadığı ve kaynak metali, ITAB ve ana malzemelerin farklı tane morfolojilerine sahip oldukları tespit edilmiştir.

- Mikroyapı çalışmaları sonucunda ITAB'da -üst kritik, -inter kritik ve -kritik altı olmak üzere üç farklı bölge tespit edilmiştir. Burada üst kritik ITAB genel itibariyle martenzitten oluşurken, interkritik ITAB ferrit ve martenzitten, kritik altı ITAB ise temperlenmiş martenzit ve ferritten oluştuğu belirlenmiştir.
- Kaynaklı birleştirmelere ait mikroyapılar incelendiğinde kaynak metali yapısının kabalaşmış lamellerden oluştuğu ve yapının martenzit-beynit olduğu tespit edilmiştir. Kaynaktan önce ağırlıklı beynitik olan ana malzeme mikroyapısı, kaynak işlemi sonrası artan soğuma hızı ile birlikte martenzit fazı lehine artış ile beraber beynit fazının miktarının azaldığı tespit edilmiştir.
- Sertlik ölçüm çalışmaları sonucunda en yüksek sertlik değerleri kaynak metallere ölçülmüştür. Kritik altı ITAB'ın bir kısmı kaynak sıcaklığından etkilenecek şekilde temperlenmiş, dolayısıyla bu bölgedeki sertlik değeri ana malzeme sertliğinden düşük (yumuşak bölge), diğer bölge sertlik değerleri ana malzemeden daha yüksek bulunmuştur.
- Uygulanan çekme testlerine göre kaynaklı birleştirmelerin 100 mm/s hızla birleştirilen numunede yüksek ısı girdisi nedeniyle kopma kaynak metalinde meydana gelirken, diğer birleştirmelerde kopmanın ana malzemelerden gerçekleştiği tespit edilmiştir.
- Kaynaklı numunelerin kaynak bölgesinin kaynak sonrası şekillenebilirliğini ölçmek için yapılan Erichsen çökertme testi sonrasında makinanın uyguladığı maksimum yük sınırına ulaşılmış ve bu yükte yırtılma oluşmamıştır. Ancak kaynaklı numunede malzeme kalınlığının yaklaşık 3.4 katı oluşan çukur derinliği kaynak bölgesinde kaynak hatalarının oluşmadığına işaret etmekte dolayısıyla kaynak bölgesinin şekillenebilirliği hakkında fikir vermektedir.

ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazarı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan edeler.

The author of this article declares that materials and methods they use in their work do not require ethical committee approval and/or legal-specific permission.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur. There is no conflict of interest in this study.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Siyambaş Y., Turgut Y., HSLA Çeliğinin Delinmesinde Kesme Parametrelerinin Çap Değişimi ve Çapak Yüksekliği Üzerindeki Etkilerinin Gri İlişkisel Analiz Yöntemiyle Araştırılması, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji, 8(320–334), (2020).
- [2] Erişir E., Bilir, OG., Sözer, YE., Ararat, Ö., Davut, K., Partial austenitisation and TBF Steel Composed of Ferrite, Bainitic Ferrite, and Austenite, Materials Science And Technology, 39(1), 105–116 (2023).
- [3] Kenneth, Gibbs, P. (2019). Strain Path Effect on Austenite Transformation And Ductility in Strain Path Effect on Austenite Transformation And Ductility in TBF 1180 Steel, MSc Thesis, School Of Technology Brigham Young University, Utah, 1-5.
- [4] Billur, E., Çetin, B., Gürleyik, M., New Generation Advanced High Strength Steels: Developments, Trends And Constraints, International Journal of Scientific and Technological Research, 2(50-62) (2016).
- [5] Mohrbacher H, Yang J-R, Chen Y-W, Rehr J, Hebesberger T., Metallurgical Effects of Niobium in Dual Phase Steel, Metals, 10(1-3), (2020).
- [6] Hidroğlu, M. (2022). Nokta Direnç Kaynağı ile Birleştirilen Yüksek ve Ultra Yüksek Dayanımlı Otomotiv Çeliklerinin Kaynak Kabiliyetinin İncelenmesi, Doktora Tezi, Karabük Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Karabük, 1-149.
- [7] Hidroğlu, M., Kahraman, Ü., Kahraman, N., The Effect Of AC And MFDC Resistance Spot Welding Technology on Mechanical Properties Of New Generation Automotive Steels, Pamukkale University Journal Of Engineering Sciences, 27(4), (2021).
- [8] Huin, T., Dancette, S., Fabrègue D., Dupuy, T., Investigation of The Failure of Advanced High Strength Steels Heterogeneous Spot Welds, Metals, 6 (1-19), (2016).
- [9] Aydın, H., Yılmaz, İ. Ö., Bilici, A. Y., Elektrik Direnç Punta Kaynağı ile Birleştirilen TBF/DP600 Çeliklerinin Mikroyapı ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi, Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 37(609-624), (2022).
- [10] Başer, A.T., Resistance Spot Welding of Zn-Coated Third Generation Automotive Steels Using Mid-Frequency Direct Current Technology, Transactions of The Indian Institute of Metals, 76(49–57), (2023).
- [11] Uyguntürk, E. (2020). Titanyum Boruların TIG ve Lazer Kaynak Yöntemleri ile Birleştirilebilirliğinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Karabük, 1-3.
- [12] Quintino, L., Costa, A., Miranda, R., Yapp, D., Kumar, V., Kong, C. J., Welding With High Power Fiber Lasers – A Preliminary Study, Materials And Design, 28(1231–1237), (2007).
- [13] Stadler, M, Gruber, M, Schnitzer, R, Hofer, C., Microstructural Characterization of a Double Pulse Resistance Spot Welded 1200 MPa TBF Steel, Welding in the World, 64(335-343), (2020).
- [14] Stadler, M., S., Chnitzer, R., Gruber, M., Hofer, C., Improving the Mechanical Performance of a Resistance Spot Welded 1200 MPa TBF Steel, International Journal Of Materials Research, 112(262-265), (2021).
- [15] Salminen, A., Farrokhi, F., Unt, A., Poutiainen, I., Effect of Optical Parameters on Fiber Laser Welding Of Ultrahigh Strength Steels and Weld Mechanical Properties at Subzero Temperatures, Journal of Laser Applications, 28(2), (2016).
- [16] Altay, M. (2021). Otomotiv Endüstrisinde Kullanılan Yüksek Mukavemetli DP1200 Çeliğinde Lazer Kaynak Parametrelerinin Optimizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Bursa Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa, 1-138.
- [17] Tunçel, O. (2020). Lazer Kaynağı ile Birleştirilmiş Farklı Türdeki Yüksek Mukavemetli Çeliklerde Mekanik ve Mikroyapı İlişkilerinin İncelenmesi, Doktora Tezi, Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa, 86-164.
- [18] Akay, A. A., Kaya, Y., Kahraman, N., Tozaltı Ark Kaynak Yöntemi ile Birleştirilen X60, X65 ve X70 Çeliklerin Kaynak Bölgesinin Etüdü,

- Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisi, 3 (2), 34-42, (2013).
- [19] Tuncel, O., Aydın, H., Davut, K., “Effect of heat input on HAZ softening in fiber laser welding of 22MnB5 steel.”, *Optics and Laser Technology*, 1-7, (2023).
- [20] Jia, Q., Guo, W., Wan, Z., Peng, Y., Zou, G., Tian, Z., Zhou, Y.N., Microstructure and mechanical properties of laser welded dissimilar joints between QP and boron alloyed martensitic steels, *Journal of Materials Processing Tech.*, 259;58–67, (2018).
- [21] Dinda, S. K., Sk, M.B., Roy, G.G., Srirangam, P., Microstructure and Mechanical Properties of Electron Beam Welded Dissimilar Steel To Fe–Al Alloy Joints, *Materials Science & Engineering A*, 677(182–192), (2016).
- [22] Di, H., Sun, Q., Wang, X., Li, J., Microstructure And Properties in Dissimilar/Similar Weld Joints Between DP780 And DP980 Steels Processed By Fiber Laser Welding, *Journal of Materials Science & Technology*, 33(1561-1571), (2017).
- [23] Jia, Q., Guo, W., Wan, Z., Peng, Y., Zou, G., Tian, Z., Zhou, Y.N., Microstructure And Mechanical Properties Of Laser Welded Dissimilar Joints Between QP and Boron Alloyed Martensitic Steels, *Journal Of Materials Processing Tech.*, 259(58–67), (2018).
- [24] Huan P., Wang, X., Yang, L., Zheng, Z., Hu, Z., Zhang, M., C., C., Effect of Martensite Content On Failure Behavior Of Laser Welded Dual-Phase Steel Joints During Deformation, *Journal of Materials Engineering And Performance*, 28(1801-1809), (2019).
- [25] Hamidinejad, S.M., Hasanniya, M.H., Salari, N., Valizadeh, E., CO₂ Laser Welding of Interstitial Free Galvanized Steel Sheets Used in Tailor Welded Blanks, *Int Journal of Advanced Manuf Technol*, 64(195–206), (2013).
- [26] Bandyopadhyay, K., Panda, S. K., Saha, P., Investigations Into the Influence of Weld Zone on Formability of Fiber Laser-Welded Advanced High Strength Steel, *Journal of Materials Engineering And Performance*, 23(1465–1479), (2014).

Investigation of The Weldability of PLA Plus Sheets with Different Infill Ratios by Friction Stir Welding

Nergizhan ANAÇ^{1*}, Oğuz KOÇAR¹, Cihan ALTUOK¹

¹Zonguldak Bülent Ecevit University, Faculty of Engineering, Department of Mechanical Engineering, Zonguldak, Turkey

Article Info

Research article
Received: 03/12/2023
Revision: 01/02/2024
Accepted: 20/02/2024

Keywords

Friction Stir Welding
3D Printing
PLA Plus
Infill Ratio
Mechanical Properties
Heat Generation

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 03/12/2023
Düzeltilme: 01/02/2024
Kabul: 20/02/2024

Anahtar Kelimeler

Sürtünme Karıştırma
Kaynağı
3B Yazıcı
PLA Plus
Doluluk Oranı
Meknaik Özellikler
Isı Oluşumu

Graphical/Tabular Abstract (Grafik Özet)

In this study, the weldability of PLA Plus sheets with different filling ratios (20, 40, 60, 80 and 100%) prepared by 3D printing at different filling ratios was investigated by friction stir welding. / Bu çalışmada, farklı doluluk oranlarında 3B baskı ile hazırlanan farklı doluluk oranlarında ki (%20, 40, 60, 80 ve 100) PLA Plus plakaların sürtünme karıştırma kaynağı ile kaynaklanabilirliği incelenmiştir.

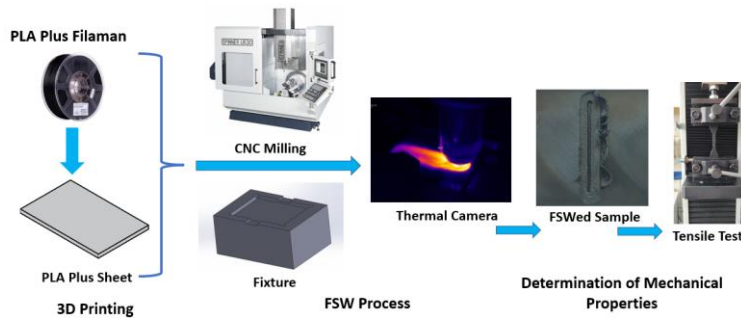


Figure A: Flow chart illustrating the welding of specimens from the 3D printing process and determination of weld strength/ **Şekil A:** 3B baskı sürecinden numunelerin birleştirilmesi ve kaynak mukavemetinin belirlenmesini gösteren akış diyagramı

Highlights (Önemli noktalar)

- Friction stir welding of PLA Plus plates with different infill ratios was investigated. / Farklı doluluk oranlarındaki PLA Plus plakaların sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilebilirliği incelenmiştir.
- The mechanical properties and weld strength of the parts changed depending on the infill ratio. / Doluluk oranına bağlı olarak parçaların mekanik özellikleri ve kaynak dayanımları değişmiştir.
- While significant welding defects occurred at 20% and 40% infill ratios, FSW was successfully performed at 60% and 80% infill ratios. / %20 ve %40 doluluk oranlarında önemli kaynak kusurları oluşurken 60% ve 80% doluluk oranlarında başarıyla SKK gerçekleştirilmiştir.

Aim (Amaç): The aim of this study is to investigate the weldability of PLA Plus sheets with different infill ratios printed in 3D printer by friction stir welding. / 3B printerde basılmış farklı doluluk oranlarındaki PLA Plus plakaların sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilebilirliğinin incelenmesidir.

Originality (Özgünlük):

The weldability of 3D printing of different infill ratios, which are not included in the literature, has been examined and brought to the literature. / Literatürde yer almayan farklı doluluk oranların 3B baskıların kaynaklanabilirliği incelenerek literatüre kazandırılmıştır.

Results (Bulgular): The highest weld strengths were 2.14, 9.18, 17.47, 29.4 and 41.12 MPa, respectively. / En yüksek kaynak mukavemeti sırasıyla 2.14, 9.18, 17.47, 29.4 ve 41.12 MPa olarak belirlenmiştir.

Conclusion (Sonuç): Significant weld defects occurred at low infill ratios (20% and 40%) due to insufficient material. At 60%, 80% and 100% infill ratios, the welding process was performed successfully. As a result, it can be said that parts can be joined using SKK at infill ratios above 60%. / Düşük doluluk oranlarında (%20 ve %40) malzeme yetersizliğinden dolayı önemli kaynak hataları oluşmuştur. %60, %80 ve %100 doluluk oranlarında kaynak işlemi başarı ile gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak %60 üzeri doluluk oranlarında SKK kullanılarak parçaların birleştirilebileceği görülmüştür.



Investigation of The Weldability of PLA Plus Sheets with Different Infill Ratios by Friction Stir Welding

Nergizhan ANAÇ^{1*}, Oğuz KOÇAR¹, Cihan ALTUOK¹

¹Zonguldak Bülent Ecevit University, Faculty of Engineering, Department of Mechanical Engineering, Zonguldak, Turkey

Article Info

Research article
Received: 03/12/2023
Revision: 01/02/2024
Accepted: 20/02/2024

Keywords

Friction Stir Welding
3D Printing
PLA Plus
Infill Ratio
Mechanical Properties
Heat Generation

Abstract

Although the joining processes of plastics are typically carried out through welding, adhesive bonding, or mechanical fastening elements, the production of complex and large parts often requires welding technology. In this study, the effect of part infill ratio (20%, 40%, 60%, 80%, and 100%) on the welding strength of 3D printed PLA Plus (polylactic acid) parts was evaluated through friction stir welding (FSW). Tensile tests and temperature measurements were carried out to examine the effects of friction stir welding process parameters (feed rate: 50 and 100 mm/min and rotational speed: 1000 and 1500 rpm) on the structure and mechanical properties of friction stir welding. Moreover, visual inspections were performed to detect defects in the weld zone. Compared to the PLA Plus samples given as reference according to the infill ratios, the highest welding strengths were obtained at 80%, 60% and 100% infill ratios (29.4 MPa, 17.47 MPa and 41.12 MPa and 112.38%, 97.48%, 87.04% efficiency, respectively). As a result, it was determined that at low infill ratios (20% and 40%), the weld quality was negatively affected, and a surface tunnel defect occurred in the weld zone. It has been determined that the weld quality in FSW is significantly affected by the temperature occurring during the process. The study has shown that parts printed at different infill ratios, especially on a 3D printer, can be combined with friction stir welding and that the efficiency of the welding process can be increased by optimizing the infill ratios.

Farklı Doluluk Oranlarına Sahip PLA Plus Plakaların Sürtünme Karıştırma Kaynağı İle Kaynaklanabilirliğinin İncelenmesi

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 03/12/2023
Düzeltilme: 01/02/2024
Kabul: 20/02/2024

Anahtar Kelimeler

Sürtünme Karıştırma
Kaynağı
3B Yazıcı
PLA Plus
Doluluk Oranı
Meknaik Özellikler
Isı Oluşumu

Öz

Plastiklerin birleştirme işlemleri; genellikle kaynak, yapıştırma veya mekanik bağlama elemanları ile gerçekleştirilmesine rağmen, karmaşık ve büyük parçaların üretimi çoğunlukla kaynak teknolojisi gerektirmektedir. Bu çalışmada; 3B basılmış PLA Plus parçaların sürtünme karıştırma kaynağıyla (SKK) birleştirilmesinde, parça doluluk oranlarının (%20, %40, %60, %80 ve %100) kaynak mukavemetine etkisi değerlendirilmiştir. Sürtünme karıştırma kaynağı işlem parametrelerinin (ilerleme hızı: 50 ve 100 mm/min ve dönme hızı: 1000 ve 1500 rpm), sürtünme karıştırma kaynağının yapısı ve mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini incelemek için çekme testleri ve sıcaklık ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca kaynak bölgesindeki kusurları tespit etmek için görsel incelemeler yapılmıştır. Doluluk oranlarına göre referans olarak verilen PLA Plus numunelerine kıyasla en yüksek kaynak mukavemetleri sırasıyla %80, %60 ve %100 doluluk oranında (sırasıyla 29.4 MPa, 17.47 MPa ve 41.12 MPa ve %112.38, %97.48, %87.04 verimlilik) elde edilmiştir. Sonuç olarak düşük doluluk oranlarında (%20 ve %40) kaynak kalitesinin olumsuz etkilendiği ve kaynak bölgesinde surface tunnel kusurunun oluştuğu belirlenmiştir. SKK'de kaynak kalitesinin işlem sırasında ortaya çıkan sıcaklıktan önemli derecede etkilendiği belirlenmiştir. Yapılan çalışma, özellikle 3B yazıcıda farklı doluluk oranlarında basılan parçaların sürtünme karıştırma kaynağıyla birleştirilebilir olduğunu ve doluluk oranlarının optimizasyonu ile kaynak işleminin verimliliğinin artırılabilirliğini göstermektedir.

1. INTRODUCTION (GİRİŞ)

Additive manufacturing method is an innovative and high-tech production method that emerged with Industry 4.0. Unlike traditional manufacturing technologies that have been used for many years, this method has gained rapid popularity due to its

ability to adjust the infill ratio of the parts, produce complex parts in a same production process, and offer advantages in terms of time and cost. There are various additive manufacturing methods with different working systems in which metal, plastic, ceramic and composite materials are transformed into products. Today, the primary additive

manufacturing method for plastic part production is the process of 3D printing. Although there are some legal restrictions on their use, plastic materials have become irreplaceable in most industries due to their lightness and low costs. For this reason, 3D printers using thermoplastic-based consumables are very popular among academic researchers as well as commercial users. However, despite its many advantages, the fact that part dimensions are limited to the printer's table dimensions is a difficult situation for manufacturing in printers. To overcome this deficiency, assembly or joining processes are applied to the produced parts [1]. In particular, the joining of plastic materials manufactured with a 3D printer using the welding method has aroused interest in recent years and therefore the studies on Friction Stir Welding (FSW) have increased [2]. Friction stir welding is a solid-state welding process that has the ability to join similar and dissimilar materials. Studies focusing on friction stir welding are valuable for industrial applications where it is desired to join parts that are not possible to join with other joining methods or are costly. It has been discovered that it is possible to join PMMA (poly methylmethacrylate) parts printed from 3D printed using friction stir welding, and that the welded parts have high welding efficiency [3]. In another study [4], in which the weldability of 3D printed polypropylene/graphene (PP/GNP) nanocomposites was evaluated using FSW, it was proven that high quality strong joints can be made between polymer nanocomposites by determining appropriate FSW parameters. The multi-walled carbon nanotubes has been used to enhance the mechanical properties in the friction stir welding of 3D printed ABS parts [1]. Additionally, it has been reported that the addition of nano powder to the welding process increases the weld strength [5], Forcellese et al. [6] used ABS Plus P430 material and Tiwary et al. [8] conducted various studies examining the effects of friction stir welding parameters on the mechanical performance of welded joints using ABS and PETG plates. Anaç [7] investigated the joinability of PLA Plus/PLA Plus, HDPE/HDPE and PLA Plus/HDPE plates by FSW using two different pin geometries (square and triangle), two different tool feed rates (30 mm/min and 50 mm/min) and two different rotational speed (1000 rpm and 1500 rpm) process parameters. The highest weld strength was obtained at triangle pin geometry, 1000 rpm rotational speed and 50 mm/min traverse speed for joining PLA Plus plates and at square pin geometry, 1500 rpm rotational speed and 50 mm/min traverse speed for joining HDPE plates. In PLA Plus/HDPE sheets, the joining process was performed by offsetting the tool to the HDPE sheet side.

Sharma et al. [9] examined the feasibility of combining 3D printed PLA sheets using FSW to increase the use of biodegradable polymers instead of petroleum-based polymers. They examined their effects on welding strength and welding efficiency by using three different rotational speeds (700, 1400 and 2000 rpm), three different feed rates (20, 30 and 40 mm/min) and three different pin geometries (cylindrical, threaded, and conical pins) in the FSW process. They have indicated that the cylindrical pin geometry yields better results in joining, and as the feed rate increases, the welding strength decreases.

In another study, the feasibility of joining 3D printed PLA sheets with FSW was investigated using a conical cylindrical pin. When welding efficiency was examined, it was stated that joining was achieved with 40% welding efficiency at 1400 rpm tool rotational speed and 10 mm/min feed rate [10]. Kumar et al. [11] combined 3D printed Al-reinforced ABS and PA6 thermoplastic composites by friction stir welding. It is stated that the research results will reduce the time loss in joining/filling the cracks of the oil/gas pipeline.

In general, a review of the literature indicates that researchers consider various variables for friction stir welding, including process parameters, types of materials to be welded, tool pin forms, and material production methods (such as plastic injection, additive manufacturing). However, it has been determined that in all these studies, the 3D printed materials used for welding have infill ratio of 100%. No opinions or studies regarding the weldability of parts with different infill ratios were found in the literature. However, it is known that one of the most significant advantages of 3D printers is the ability to produce parts with low infill ratios [12]. Based on this information, in this study, the joining of PLA Plus plates produced at different infill ratios on a 3D printer using the FSW method was investigated. Two different feed rates (50 and 100 mm/min) and two different rotational speeds (1000 and 1500 rpm) were used as FSW process parameters. Thermal images were taken during welding process to examine the effect of part infill ratios (20%, 40%, 60%, 80% and 100%) and process parameters on weld quality. Additionally, visual inspections were made in the weld zone after welding. The data obtained in this study can be used directly in relevant applications in the welding industry.

2. MATERIALS AND METHODS (MATERİYAL VE METOD)

2.1. Features of Pla Plus Filament (PLA Plus Malzemenin Özellikleri)

Polylactic acid (PLA) is a widely used and preferred material in additive manufacturing due to its ease of production/printing and compatibility with 3D printer technology. For this reason, its derivative PLA Plus filaments were used in the experiments. PLA offers heat resistance up to 140 °C, UV resistance and impact resistance. It has high bio content and thus reduces the carbon footprint. Additionally, it is non-toxic in nature and is a thermoplastic that does not harm human health [13-16]. PLA Plus is a version of standard PLA with enhanced mechanical properties. PLA Plus has a higher level of toughness and higher impact resistance compared to PLA [17]. The properties of the filaments used in the study are given in Table 1.

Table 1. Mechanical/technical properties of filament materials (Filament malzemelerinin teknik/mekanik özellikleri) [18]

Mechanical Properties	PLA Plus
Diameter (mm)	1.75
Brand	eSUN
Color	Black
Tensile Strength (MPa)	63
Elongation at Break (%)	20
Density (g/cm ³)	1.23

2.2. 3D Printing Process of Pla Plus Material (Pla Plus'ın 3B Baskı Süreci)

In the study, an Ender 3 S1 printer was used to print samples of PLA Plus filament in specified dimensions, with printing parameters values of nozzle temperature 210 °C, table temperature 60 °C and printing speed 60 mm/sec. To determine the mechanical properties of 3D printed test specimens at different infill ratios (20%, 40%, 60%, 80%, and 100%), tensile test samples (ASTM D638-10) and PLA Plus plates with dimensions of 112x72 mm were printed for friction stir welding. The layer thickness is fixed at 0.1 mm in all samples. The flow process of the printing process is given in Figure 1, the dimensions of the tensile test samples are given in Figure 1 a, and the dimensions of the FSW samples are given in Figure 1 b.

In additive manufacturing method, product quality and mechanical properties are influenced by various process parameters, including material used, nozzle temperature, layer thickness, printing speed, bed

temperature, etc. [19, 20]. All samples in the experiments were printed flat in the XYZ axis, while samples with different infill ratios were printed in a grid pattern. For samples with a 100% infill ratio, production was carried out by the extruder following a linear path at angles of 45 and -45 degrees in each layer, respectively. Figure 2 provides images of FSW samples with different infill ratios taken from Ultimaker Cura 5.2.1 software.

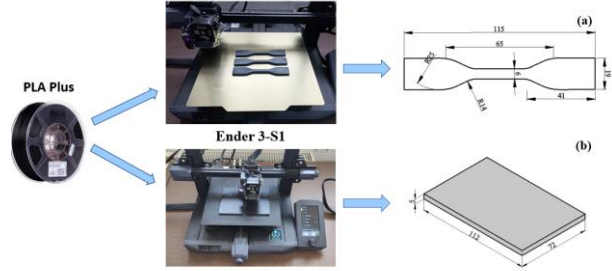


Figure 1. Printing samples from PLA Plus filament (PLA Plus filamentten basılan numuneler)

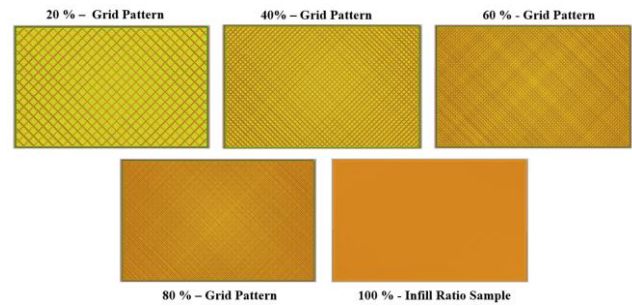


Figure 2. View of FSW sheets at different infill ratios (Farklı doluluk oranlarındaki SKK plakaların görünüşü)

2.3. FSW Process Parameters and Experimental Design (SKK İşlem Parametreleri ve Deneysel Tasarım)

In FSW, weld quality is directly affected by process parameters. Therefore, there are many studies in the literature to determine the effects of process parameters. In some of these studies, tool feed rate, tool shoulder shape [21, 22], tool shoulder surface [23], pin geometry [24-26], tool rotational speed [27-29], tool plunge speed, tool inclination angle [30], tool material and tool design have been studied in detail [31-32]. The reason why weld quality is affected by process parameters is that process parameters play an important role in the amount of heat generated during the FSW process. The material flow and proper mixing of the material in the welding area depends on the amount of heat generated during welding. Insufficient heat can lead to inadequate plasticization of the material, while excessive heat can result in over plasticization and material overflowing out of the welding area.

In the study, tool feed rate and tool rotational speed, which are important parameters affecting the amount of heat generated in the welding area, were used as experimental variables [32, 33]. Process parameters are given in Table 2. FSW process parameters were determined at two different tool rotational speeds (1000 and 1500 rpm), two different feed rates (50 and 100 mm/min) and five different infill ratios (20%, 40%, 60%, 80% and 100%) as 3D printing parameters. Table 3 provides the experiment set designed according to infill ratios and process parameters. For the assessment of weld quality, the tensile strengths of plates printed with a

3D printer (for all infill ratios) were determined and added to Table 3 as reference (Ref) values.

Table 2. FSW process parameter values (SKK işlem parametreleri)

Pin Geometry	Infill Ratio (%)	Feed Rate (mm/min)	Rotational Speed (rpm)
Square	20	50	1000
	40		
	60	100	1500
	80		
	100		

Table 3. Experimental set for PLA Plus plates with different infill ratios (Farklı doluluk oranlarına sahip PLA Plus plakalar için deney seti)

	Layer Thickness (mm)	Pin Geometry	Infill Ratio	Feed Rate (mm/min)	Rotational Speed (rpm)	Ultimate Tensile Stress (UTS) (MPa)	Efficiency (%)
Reference	0.1	-	20	-	-	15.45±1.42	
1	0.1	Square	20	50	1000	1.58±0.35	10.23
2	0.1	Square	20	50	1500	1.95±0.42	12.62
3	0.1	Square	20	100	1000	1.76±0.13	11.39
4	0.1	Square	20	100	1500	2.14±0.21	13.85
Reference	0.1	-	40	-	-	17.68±1.63	
5	0.1	Square	40	50	1000	4.49±1.31	25.39
6	0.1	Square	40	50	1500	9.18±0.91	51.92
7	0.1	Square	40	100	1000	2.66±0.93	15.04
8	0.1	Square	40	100	1500	2.71±0.69	15.32
Reference	0.1	-	60	-	-	17.92±0.96	
9	0.1	Square	60	50	1000	3.91±0.76	21.82
10	0.1	Square	60	50	1500	3.88±0.98	21.65
11	0.1	Square	60	100	1000	5.18±0.66	28.9
12	0.1	Square	60	100	1500	17.47±0.49	97.48
Reference	0.1	-	80	-	-	26.16±0.85	
13	0.1	Square	80	50	1000	4.88±0.63	18.65
14	0.1	Square	80	50	1500	4.29±0.81	16.39
15	0.1	Square	80	100	1000	29.4±2.21	112.38
16	0.1	Square	80	100	1500	21.86±0.19	83.56
Reference	0.1	-	100	-	-	47.24±1.36	
17	0.1	Square	100	50	1000	25.88±0.27	54.78
18	0.1	Square	100	50	1500	31.32±1.76	66.3
19	0.1	Square	100	100	1000	38.39±6.34	81.27
20	0.1	Square	100	100	1500	41.12±7.7	87.04

Figure 3 shows the technical drawing of the fixed process parameters and pin geometry used in the FSW process. Tool shoulder penetration depth was determined as 1 mm, pin height as 3.5 mm, pin penetration depth as 4.5 mm, and tool shoulder

diameter as 20 mm. Since the thickness of PLA Plus plates was 5 mm, the gap between the pin and the plate was 0.5 mm. Since there was no pin contact in the area colored red in Figure 3, the heat generated during the FSW process resulted in the joint.

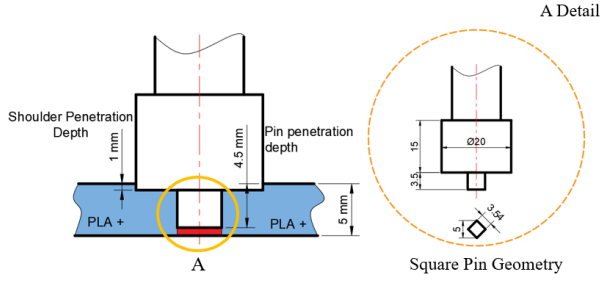


Figure 3. View of process parameters and pin geometry in FSW (SKK işlem parametreleri ve pin geometrisi)

2.4. Characteristics of FSW Equipments and Test Materials (SKK Ekipmanlarının ve Test Malzemelerinin Özellikleri)

There are two important equipment in the application of the FSW process. The first of these is a conventional or CNC milling machine for joining PLA Plus plates printed on a 3D printer. In this study, Spinner U630 CNC (22 kW, 12000 rpm, y-axis 530 mm, z-axis 465 mm and table size 650 mm) milling machine was used for the FSW process and SolidCam commercial software was used to extract G-codes. Figure 4 shows the FSW process and the image of the measurement made with a thermal

camera during the process, the sample view after the welding and an example sample during the last tensile test. The second important equipment in the FSW process is the fixture. During the FSW process, movement of parts or separation of parts from each other negatively affects the welding. Therefore, special molds are designed and produced to fix PLA Plus plates.

Figure 5 shows the welding direction according to the CNC machine, the input and exit hole locations of the pin, and the areas where hardness measurement was made. The plunge into the entry and exit points was made from the top of the part at a speed of 10 mm/min, and the tool was kept at the entry point for 10 seconds to generate the necessary heat in the weld. Three repeated tensile tests were performed to determine the weld strength, and five repeated measurements were made from the weld zone, the heat affected zone and the main material to determine the hardness change. For tensile tests, a WDW-5 model universal tensile testing device with a capacity of 5 kN was used. Tensile tests were performed at room temperature at a tensile speed of 2 mm/min. To better evaluate the quality of the weld, temperature measurements were made during FSW using the Fluke Ti32 thermal camera.

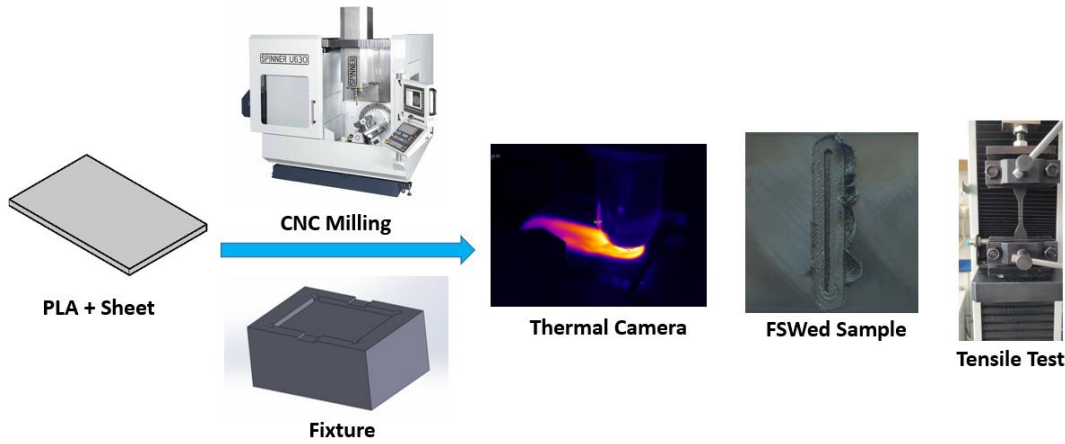


Figure 4. Overview of the FSW process (SKK yöntemine genel bakış)

3. RESULTS AND DISCUSSION (BULGULAR ve TARTIŞMA)

The study investigated the weldability of plates obtained from PLA Plus filament using a 3D printer by FSW. PLA Plus plates with five different infill ratios (20%, 40%, 60%, 80%, and 100%) were joined using FSW, with a square pin geometry, two different feed rates (50 mm/min and 100 mm/min), and two different tool rotational speeds (1000 rpm and 1500 rpm). Tensile specimens were extracted from the welded parts to assess the welding qualities. Additionally, the weld zone, heat-affected

zone, and base material hardness were measured and compared. Thermal images were captured to evaluate the heat generated during FSW. Finally, visual inspections were conducted on the welded samples to identify welding defects.

3.1. Mechanical Properties of Pla Plus Materials at Different Infill Ratios (Farklı Doluluk Oranlarındaki Pla Plus Malzemelerinin Mekanik Özellikleri)

The stress-strain diagram and elongation values of PLA Plus material at different infill ratios are given in Figure 6. Graphs were drawn from experimental data close to the average UTS and percent

elongation value. While the strength at 40% and 60% infill ratio (17.68 ± 1.63 and 17.92 ± 0.96 MPa) tended to increase compared to the strength at 20% infill ratio (15.45 ± 1.42 MPa), the ductility of the material decreased. When the data obtained from the parts with 40% and 60% infill ratios were evaluated together, no significant change was observed in the strength and elongation rates. Evlen et al. [34] stated in their studies that while the tensile strength of the parts increased gradually from 10% infill ratio to 30% infill ratio, the strength decreased at 40% and 50% infill ratio. They stated that this situation results from the inadequate adhesion between the layers in organic materials such as PLA. At 80% and 100% infill ratios, strength (26.16 ± 0.8 and 47.24 ± 1.3 MPa) and elongation values increased significantly depending on the infill ratio.

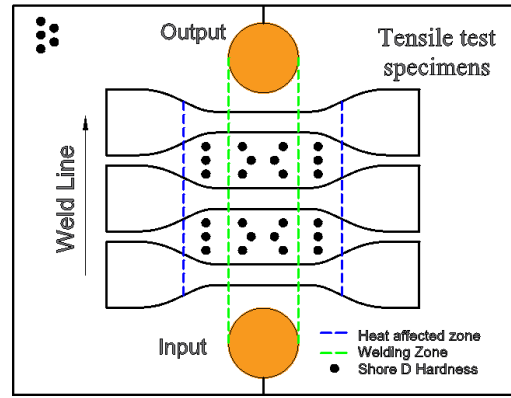


Figure 5. Tensile test samples and hardness measurement locations (Çekme testi numunesi ve sertlik ölçüm noktalarının temsili gösterimi)

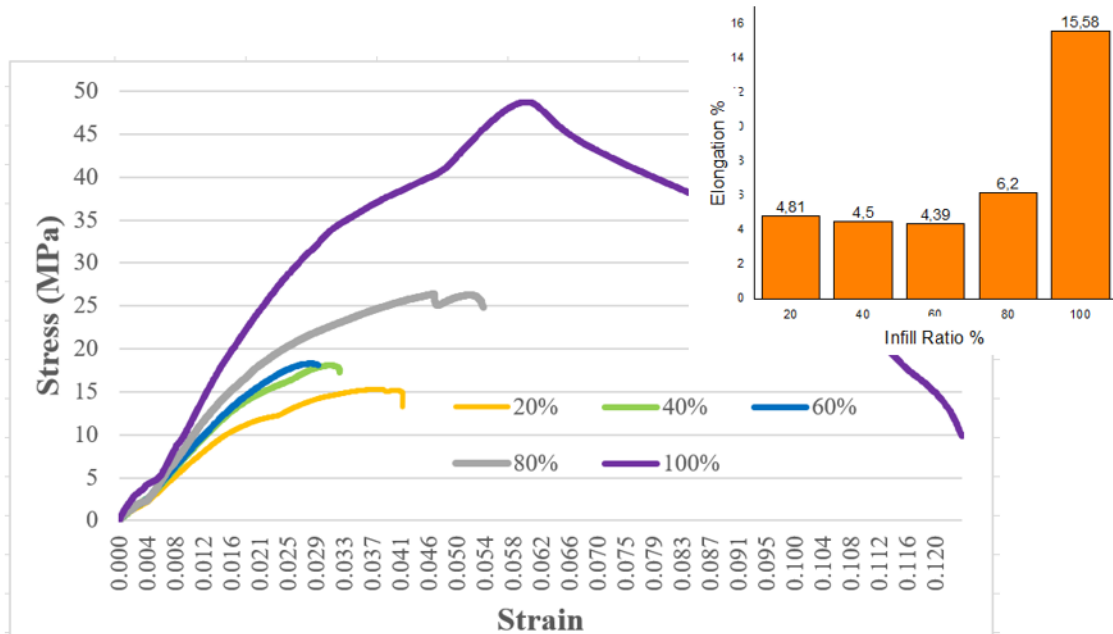


Figure 6. Mechanical properties of PLA Plus material according to different infill ratios (Farklı doluluk oranlarına göre PLA Plus malzemenin mekanik özellikleri)

3.2. General Evaluation of Weld Strengths (Kaynak Mukavemetinin Genel Değerlendirilmesi)

In Figure 7, the welding strengths (ultimate tensile stress) of the samples with different part infill ratios are given after the FSW process, and in Table 3, the welding efficiencies compared to the reference samples are given. The red columns in Figure 7 show reference values for all part infill ratios. The highest tensile strength value at 20%, 60% and 100% infill ratios were obtained at 100 mm/min feed rate and 1500 rpm rotational speed while it was obtained at 50 mm/min feed rate and 1500 rpm rotational speed at 40% infill ratio. It was obtained at a feed rate of 100 mm/min and a rotational speed of 1000 rpm at 80% infill ratio. Tensile strength was

low at 20% and 40% infill ratios, which resulted by the insufficient amount of material to facilitate material flow during FSW. It was observed that the weld strength increased as the infill ratio increased, and the parts were combined with 97.48%, 112.38% and 87.04% efficiency at 60%, 80% and 100% infill ratios, respectively. Especially when joining parts with 80% infill ratio, the weld strength was higher than the reference sample strength. This situation can be explained by the voids in the part balancing the heat generated during welding and preventing excessive plasticization of the material in the welding area. The results have shown that friction stir welding is promising for joining parts with low infill ratios (provided that the infill ratio is determined by optimization).

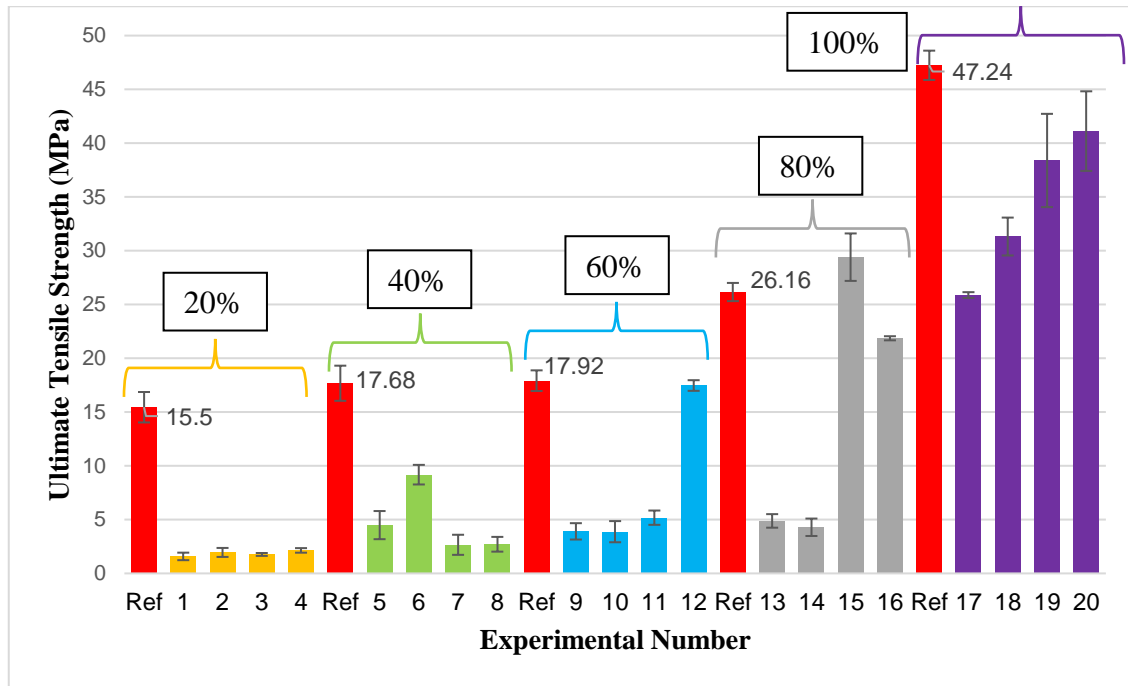


Figure 7. Weld strengths after FSW process (SKK işleminden sonra kaynak kalitesi)

Figure 8 shows the basic concepts of FSW (tool entry and exit points, welding direction, tool rotational direction, advancing side (AS), retreating side (RS) and welding defects). Additionally, in Figure 8, sample images with the best and worst welding strengths after FSW are given for infill ratios of 20%, 40%, and 60%, while in Figure 9, the samples are presented for infill ratios of 80% and 100%. In all samples, a flash defect was observed at the end of the tool shoulder. Surface tunnel defects along the weld line occurred at infill ratios of 20%, 40%, and 60%. It is believed that this condition is attributed to the low infill ratio, leading to insufficient material in the weld zone and causing the surface tunnel defect. Surface tunnel defects did not occur at 80% infill ratio. In samples with poor weld quality at 100% infill ratio, surface tunnel defects were observed, while in samples with good weld quality at 100% infill ratio, no surface tunnel defects were observed. The reason for the occurrence of surface tunnel defects in samples with 100% infill ratio can be explained by insufficient material flow due to inappropriate process parameters. When Figure 8 a is compared with Figure 8b, it is determined that in Figure 8 a, due to inappropriate process parameters, voids occur in the

weld zone on both the AS and RS sides compared to the sample in Figure 8b. When comparing Figure 8 c and Figure 8 d for the 40% infill ratio, it can be observed that in the sample with lower welding strength (Figure 8 c), there are voids at the edges of the tool shoulder area. These voids have adversely affected the welding strength. For the 60% infill ratio (Figure 8 e), the low feed rate and high rotational speed have led to excessive plasticization of the material, causing it to overflow from the weld zone.

Figure 9 a and Figure 9 b show images of the best and worst welded samples for 80% infill ratio. In Figure 9 b, it is understood that the weld lines resulting from the tool rotation form a continuous structure, and the material flow is uninterrupted. In Figure 9a, the defect occurring along the weld line indicates that the material flow is interrupted, and the selected parameters are inappropriate. In Figure 9c, material flow negatively affecting the weld quality has been observed. When examining the weld lines in Figure 9d, it was determined that the weld seam is well-formed.

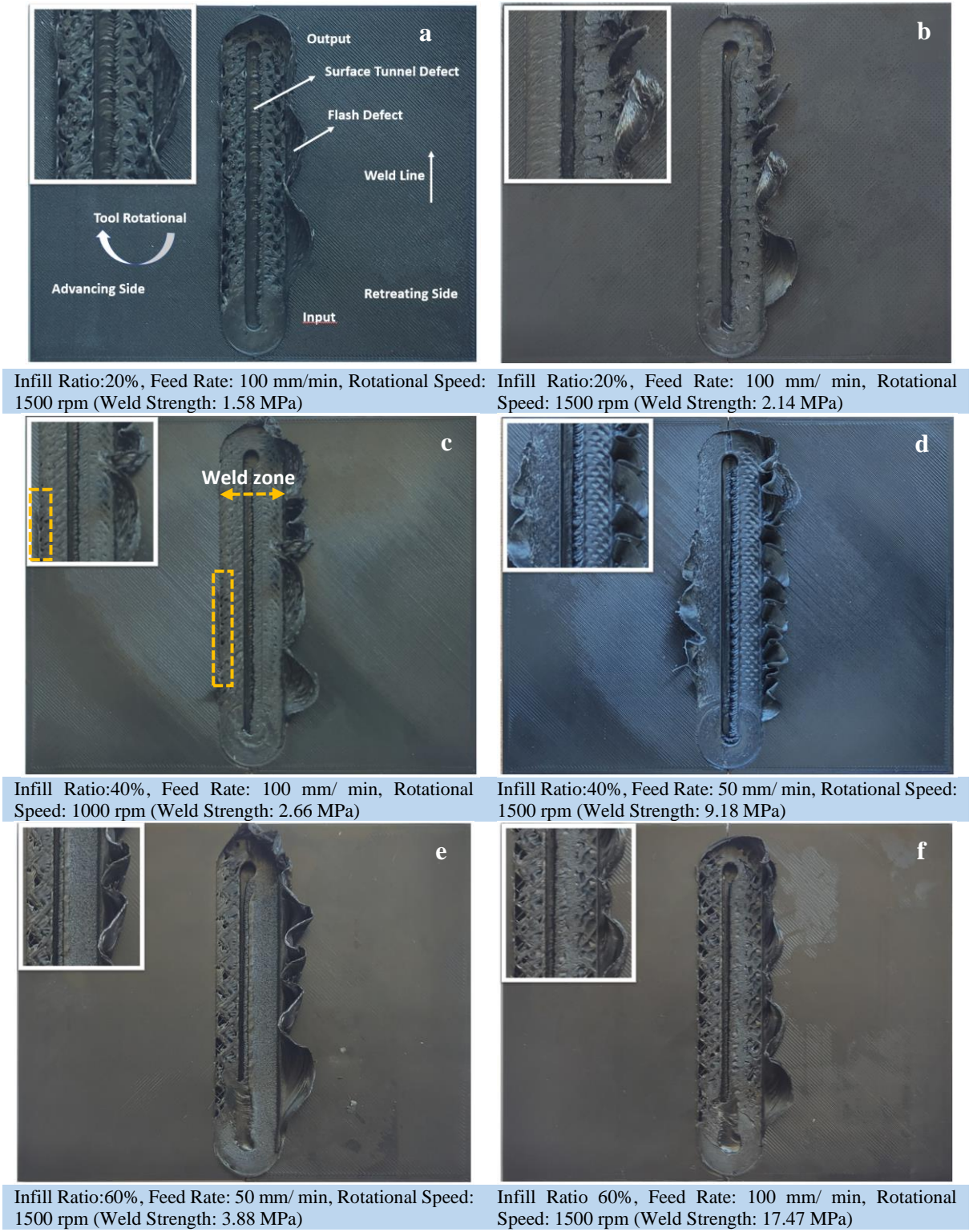


Figure 8. The view of parts with 20%, 40%, and 60% infill ratios after FSW (SKK sonrası %20, %40 ve %60 doluluk oranlarındaki parçalar)

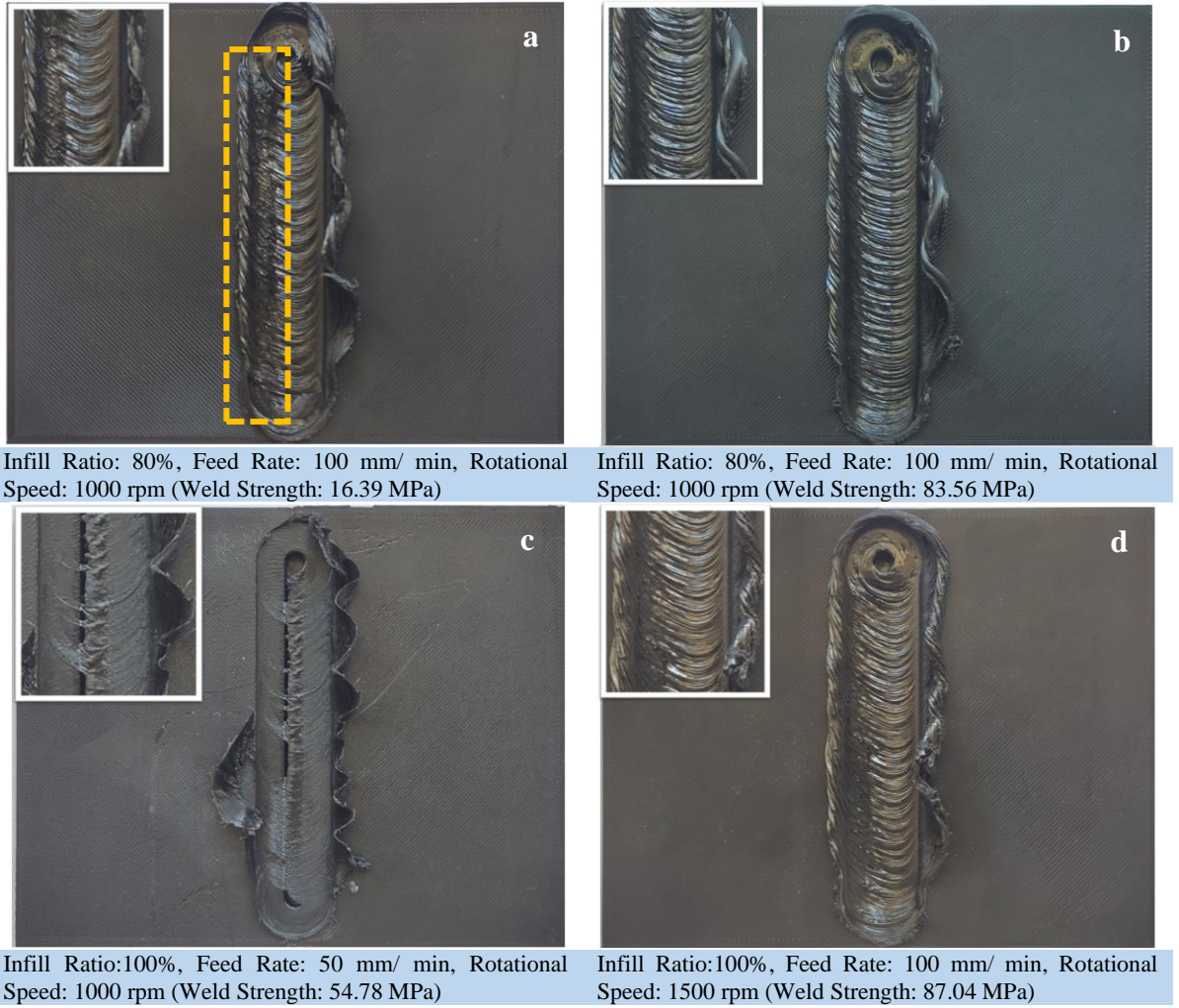


Figure 9. The view of parts with 80% and 100% infill ratios after FSW (SKK sonrası %80ve %100 doluluk oranlarındaki parçalar)

3.3. Evaluation of Weld Strength Based on Tool Rotational Speed (Takım Dönüş Hızına Bağlı Kaynak Dayanımının Değerlendirilmesi)

Figure 10 illustrates the variation in weld strength based on rotational speed. It has been determined that the weld quality is not affected by the rotational speed for infill ratios of 20% and 40% at a 100 mm/min feed rate. At 100% infill ratio, weld strength increased with the increase of rotational speed at both feed rates (50 and 100 mm/min). It is seen that the effect of 100 mm/min feed rate increases significantly after 60% infill ratio. While the weld strength increased with increasing rotational speed at 60% and 100% infill ratio, the weld strength decreased with the increase of rotational speed for both feed rates at 80% infill ratio. As a result, it can be said that the low infill ratio makes it difficult to join the parts and limits the effects of the process parameters.

3.4. Evaluation of Weld Strength According to Tool Feed Rate (Takım İlerleme Hızına Göre Kaynak Dayanımının Değerlendirilmesi)

Figure 11 shows the welding strength according to the feed rate. Although the feed rate changed at 1000 rpm rotational speed, the weld strength did not change up to 80% infill ratio. Welding strength increased significantly at 100 mm/min feed rate at 80% infill ratio, and weld quality increased with the increase in feed rate at 100% infill ratio. There was an increase in weld strength at 1500 rpm rotational speed, 50 mm/min at 40% infill ratio, and 100 mm/min feed rate at 60% and 80% infill ratio. It has been determined that the effect of feed rate increases especially at 80% and 100% infill ratios. As a result, it was determined that the feed rate had a greater effect on the weld quality. It can be said that after 60% infill ratio, the feed rate has an impact on the weld quality and has a positive effect. In the FSW process, overheating in the welding area negatively affects the weld quality. Increasing the feed rate during the FSW process will prevent the weld zone from overheating.

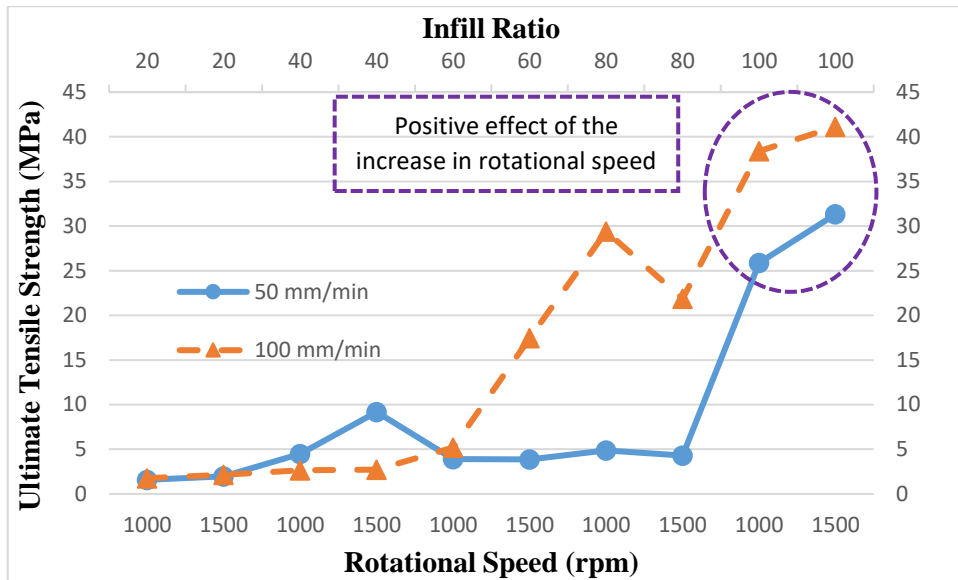


Figure 10. Weld strength depending on rotational speed (Takım dönme hızına bağlı kaynak dayanımı)

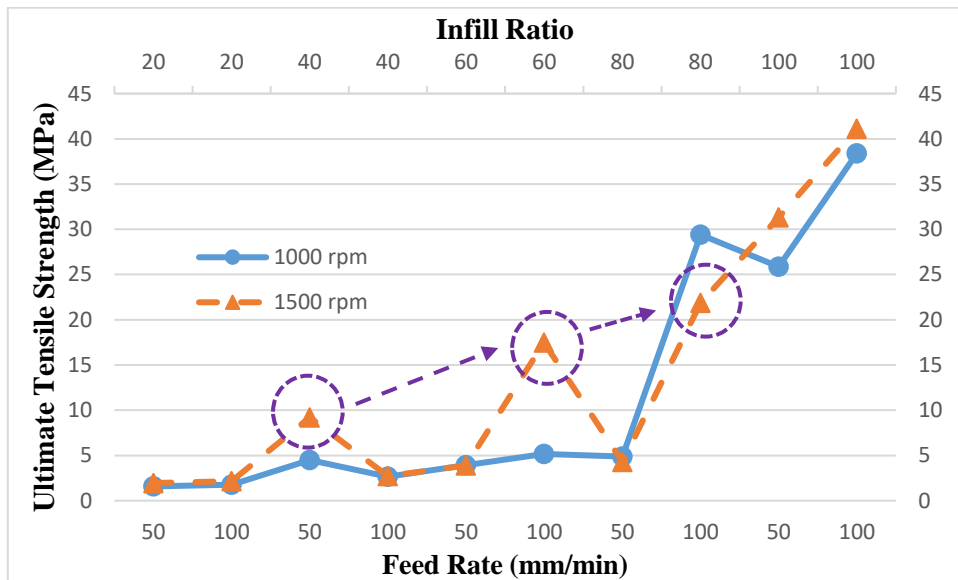


Figure 11. Welding strength depending on feed rate (Takım ilerleme hızına bağlı kaynak dayanımı)

3.5. Evaluation of The Heat Generated During The FSW Process (SKK Sırasında Oluşan Isının Değerlendirilmesi)

The temperatures measured during FSW are given in Figure 12, and the highest, the lowest, and optimum temperature values obtained from thermal images are given in Table 4. When Figure 12 is examined, it is determined that the temperature in the weld zone during FSW was not affected by the process parameters at 20% infill ratio, and the temperature during FSW increased from 40% to 80% infill ratio. The reason for this is that at low infill ratios (20%), the friction of the shoulder against the part is insufficient and therefore negatively affects the welding process (material flow and welding temperature). The increase in the heat generated during the process at 60% and 80%

infill ratios is believed to be due to the hindrance caused by the air in the voids within the part's structure, making it difficult for the welding heat to dissipate and leading to its accumulation in the welding area. This phenomenon is supported by the fact that the temperature in the welding area at 100% infill ratio tends to decrease again.

Figure 13 presents thermal camera images of the samples with the highest welding strength obtained when joining parts with different infill ratios FSW. When different infill ratios were considered individually, the temperatures for the highest welding strength were determined as 85.25°C, 118.6°C, 139.95°C, 166.18°C, and 136.18°C, respectively. The temperatures for the lowest welding strength were determined as 96.58°C, 134.88°C, 132.11°C, 175.39°C, and 163.39°C, respectively. The glass transition temperature of

PLA material was 60° C. The temperatures obtained during the FSW process were between 85.25 °C and 189.17 °C, which were above the glass transition temperature. Sharma et al. [9] found the temperature in the weld zone in the range of 75.9-140.7 °C in the images taken with an IR camera in the joining of PLA sheets with FSW. They stated that since the generated welding temperature was above the glass transition temperature, it was easier for the softened polymer to mix with each other, resulting in high-quality welds.

According to the results in Table 4, it has been observed that the temperatures yielding the highest welding strength were within the range of the lowest and highest temperature values. The reason for this is that low temperatures adversely affect material flow, while high temperatures negatively affect welding strength due to excessive plasticization of the material in the weld zone [35,36].

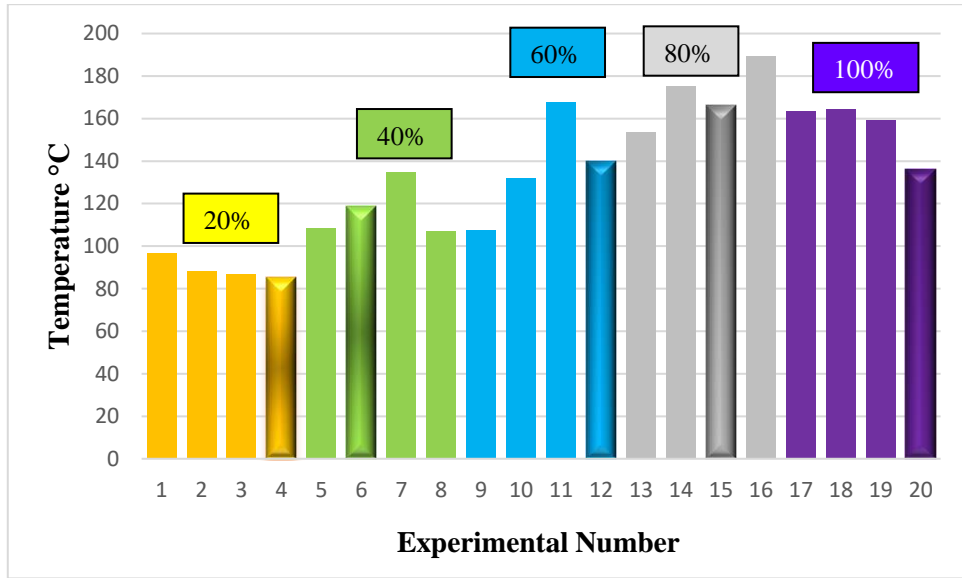


Figure 12. Temperatures measured during the FSW process (SKK işlemi sırasında ölçülen sıcaklıklar)

Table 4. The highest/lowest/optimum temperature during FSW by different infill ratio

Infill Ratio	Lowest Temperature (°C)	Highest Temperature (°C)	Temperature of Optimum Welding Strength (°C)
20	85.25 (FR:100 mm/min- RS:1500 rpm)	96.58 (FR:50 mm/min- RS:1000 rpm)	85.25 (FR:100 mm/min- RS:1500 rpm)
40	106.88 (FR:100 mm/min- RS:1500 rpm)	134.88 (FR:100 mm/min- RS:1000 rpm)	118.6 (FR:50 mm/min- RS:1500 rpm)
60	107.66 (FR:50 mm/min- RS:1000 rpm)	167.53 (FR:100 mm/min- RS:1000 rpm)	139.95 (FR:100 mm/min- RS:1500 rpm)
80	153.49 (FR:50 mm/min- RS:1000 rpm)	189.17 (FR:1000 mm/min- RS:1500 rpm)	166.18 (FR:100 mm/min- RS:1000 rpm)
100	136.18 (FR:100 mm/min- RS:1500 rpm)	164.29 (FR:50 mm/min- RS:1500 rpm)	136.18 (FR:100 mm/min- RS:1500 rpm)

FR: Feed Rate, RS: Rotational Speed

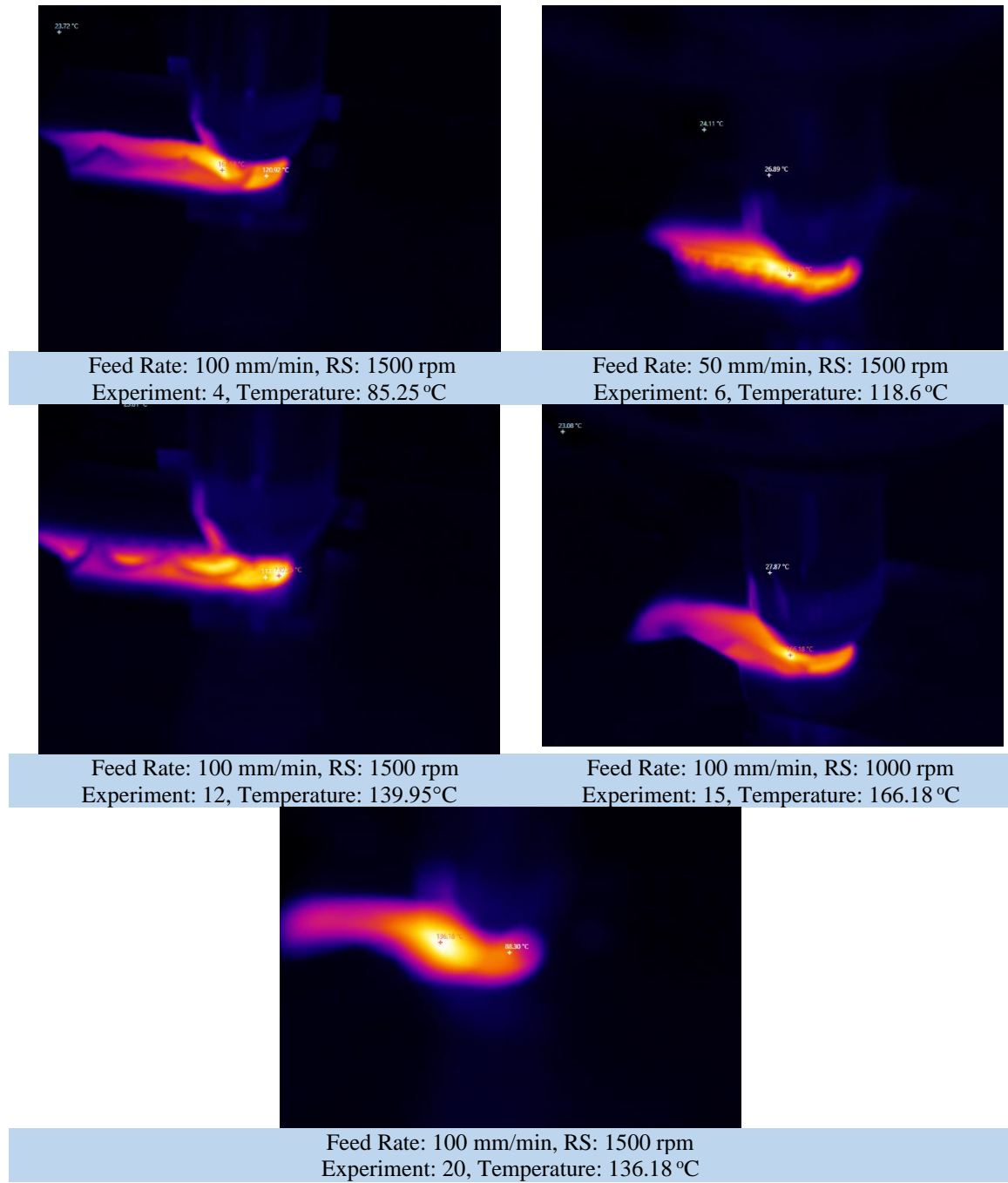


Figure 13. Thermal imaging of highest welding strength (En yüksek kaynak mukavemetine sahip deneylerden termal görüntüler)

4. CONCLUSIONS (SONUÇLAR)

In the study, the joining behavior of PLA Plus sheets with different infill ratio was examined using FSW. Square pin geometry, two different feed rates (50 and 100 mm/min) and two different tool rotational speeds (1000 and 1500 rpm) were used for welding. The grid pattern was produced as an infill pattern at different infill ratios, and a linear pattern with a 45/-45° angle was produced at 100% infill ratio. The mechanical properties of the PLA Plus material were determined for all infill ratios and the welding efficiency was determined by comparing it with the strength of the welded samples. The weldability of

PLA Plus sheets at different infill ratios and the effect of feed rate and rotational speed on the welding process were analyzed experimentally. The key findings of this study are summarized below: Compared to the 20% infill ratio in the reference samples, the strength increased and the % elongation decreased at 40% and 60% infill ratios. At 80% and 100% infill ratios, the strength and % elongation values increased significantly.

The highest tensile strength values for 20%, 60% and 100% infill ratios were obtained at 100 mm/min feed rate and 1500 rpm rotational speed (2.14, 17.47 and 41.12 MPa, respectively), and at 50 mm/min

feed rate and 1500 mm/min rpm rotational speed for 40% infill ratio (9.18 MPa). Additionally, the highest tensile strength values were obtained at 100 mm/min feed rate and 1000 rpm rotational speed (29.4 MPa) at 80% infill ratio.

It was determined that the effect of the process parameters on the joining was very low at 20% and 40% infill ratios, and the effect of the process parameters increased as the infill ratio increased. While flash defect occurred in all samples, surface tunnel defect formation was identified as a result of material insufficiency at 20%, 40% and 60% infilling ratios. When the temperatures occurring during FSW were examined, it was determined that there was an increase from 40% to 80% infill ratio, while there was a decrease in the 100% infill ratio. The insufficient friction during welding at 20% and 40% infill ratios negatively impacts temperature formation, thereby affecting weld quality negatively. On the other hand, it is presumed that temperatures increased at 60% and 80% infill ratios due to the air in the voids, making heat diffusion difficult. In future studies, the part infill ratios can be changed in the range of 70%-100% and their combinability with FSW can be examined. In addition, the effects of infill ratios on FSW process in dissimilar materials can be examined.

DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS (ETİK STANDARTLARIN BEYANI)

The author of this article declares that the materials and methods they use in their work do not require ethical committee approval and/or legal-specific permission.

Bu makalenin yazarı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

AUTHORS' CONTRIBUTIONS (YAZARLARIN KATKILARI)

Nergizhan ANAÇ: She conducted the experiments, analyzed the results and performed the writing process.

Deneyleri yapmış, sonuçlarını analiz etmiş ve makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

Oğuz KOÇAR: He conducted the experiments, analyzed the results and performed the writing process.

Deneyleri yapmış, sonuçlarını analiz etmiş ve makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

Cihan ALTUOK: He conducted the experiments and analyzed the results and performed the writing process.

Deneyleri yapmış, sonuçlarını analiz etmiş ve makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

CONFLICT OF INTEREST (ÇIKAR ÇATIŞMASI)

There is no conflict of interest in this study.

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

NOMENCLATURE (KISALTMA)

3D	3 Dimensions
FR	Feed Rate
FSW	Friction Stir Welding
PLA	Polylactic Acid
RS	Rotational Speed

REFERENCES (KAYNAKLAR)

- [1] Javadi MS, Ehteshamfar MV, Adibi H. A comprehensive analysis and prediction of the effect of groove shape and volume fraction of multi-walled carbon nanotubes on the polymer 3D-printed parts in the friction stir welding process. *Polymer Testing*, 2023;117: 107844.
- [2] Singh S, Prakash C, Gupta MK. On friction-stir welding of 3D printed thermoplastics, in *Materials forming, machining and post processing*. Springer, 75-91; 2019.
- [3] Petousis M, Mountakis N, Vidakis N. Optimization of hybrid friction stir welding of PMMA: 3D-printed parts and conventional sheets welding efficiency in single-and two-axis welding traces. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2023;127: 2401-2423.
- [4] Afshari M, Hardani H, Hamounpeyma M, Samadi MR. Friction stir welding of polypropylene based graphene nanocomposites fabricated with 3-D printing: An investigation on the microstructure and mechanical properties. *Journal of Composite Materials*. 2023; 57: 1523-1538.
- [5] Azhiri RB, Tekiyeh RM, Zeynali E, Ahmadnia M, Javidpour F. Measurement and evaluation of joint properties in friction stir welding of ABS sheets reinforced by nanosilica addition. *Measurement*. 2018; 127: 198-204.
- [6] Forcellese A, Mancina T, Pieralisi M. Vita, A. Friction stir welding of additively manufactured blanks in thermoplastic polymer. *Procedia CIRP*. 2022; 112: 448-453.
- [7] Anaç N. The mechanical properties of dissimilar/similar polymer materials joined by friction stir welding. *Heliyon*. 2023; 9: e17627.
- [8] Tiwary VK, Ravi NJ, Arunkumar P, Shivakumar S, Deshpande AS, Malik VR. Investigations on friction stir joining of 3D printed parts to overcome bed size limitation

- and enhance joint quality for unmanned aircraft systems. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science. 2020; 234: 4857-4871.
- [9] Sharma AKR, Roy Choudhury M, Debnath K. Experimental investigation of friction stir welding of PLA. *Welding in the World*. 2020; 64: 1011-1021.
- [10] Senthil S, Kumar MB. Effect of tool rotational speed and traverse speed on friction stir welding of 3d-printed polylactic acid material. *Applied Science and Engineering Progress*. 2022; 15: 1-9.
- [11] Kumar R, Singh R, Ahuja I. Mechanical, thermal and micrographic investigations of friction stir welded: 3D printed melt flow compatible dissimilar thermoplastics. *Journal of Manufacturing Processes*. 2019; 38: 387-395.
- [12] İpekçi A, Kam M, Saruhan H. Investigation of 3D printing occupancy rates effect on mechanical properties and surface roughness of PET-G material products. *Journal of New Results in Science*. 2018; 7: 1-8.
- [13] Incorporated. P.S. 3 Types of Plastic Used in 3D Printing, <https://www.polymersolutions.com/blog/plastic-in-3d-printing/>.
- [14] Kyutoku H, Maeda N, Sakamoto H, Nishimura H, Yamada K. Effect of surface treatment of cellulose fiber (CF) on durability of PLA/CF bio-composites. *Carbohydrate polymers*. 2019; 203: 95-102.
- [15] Karakuş S. Design And Manufacturing Of A Two-Stage Reduction Gearbox With 3d Printers. *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry*. 2023; 7: 18-28.
- [16] Singh J., Singh, S., Dhawan, V., Mechanical and biodegradation behaviour of jute/polylactic acid green composites. *Asian Journal of Engineering and Applied Technology*. 2018; 7: 52-57.
- [17] Ultimaker. Ultimaker PLA TDS, <https://support.makerbot.com/s/article/1667410781972>.
- [18] eSUN. PLA+, https://www.esun3d.com/uploads/eSUN_PLA+-Filament_TDS_V4.0.pdf.
- [19] Günay M, Gündüz S, Yılmaz H, Yaşar N, Kaçar R. PLA esaslı numunelerde çekme dayanımı için 3D baskı işlem parametrelerinin optimizasyonu. *Politeknik Dergisi*. 2020; 23: 73-79.
- [20] Bilgin M. Abs Esaslı Numunelerin 3d Yazıcı İle Üretmesinde İşlem Parametrelerinin Optimizasyonu. *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry*. 2022; 6: 236-249.
- [21] Devuri V, Mahapatra MM, Harsha SP, Mandal NR. Effect of shoulder surface dimension and geometries on FSW of AA7039. *Journal for Manufacturing Science and Production*. 2014; 14: 183-194.
- [22] Sun T, Reynolds AP, Roy MJ, Withers PJ, Prangnell PB. The effect of shoulder coupling on the residual stress and hardness distribution in AA7050 friction stir butt welds. *Materials Science and Engineering: A*. 2018; 735: 218-227.
- [23] Hou W, Ding Y, Huang G, Huda N, Shah LHA, Piao Z, Shen Y, Shen Z, Gerlich A. The role of pin eccentricity in friction stir welding of Al-Mg-Si alloy sheets: microstructural evolution and mechanical properties. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2022; 121: 7661-7675.
- [24] Sharma N, Siddiquee AN, Khan ZA, Mohammed MT. Material stirring during FSW of Al-Cu: Effect of pin profile. *Materials and Manufacturing Processes*. 2018; 33:786-794.
- [25] Kumar PS, Chander MS. Effect of tool pin geometry on FSW dissimilar aluminum alloys-(AA5083 & AA6061). *Materials Today: Proceedings*. 2021; 39: 472-477.
- [26] Darmadi DB, Talice M. Improving the strength of friction stir welded joint by double side friction welding and varying pin geometry. *Engineering Science and Technology, an International Journal*. 2021; 24: 637-647.
- [27] Hynes NRJ, Velu PS. Effect of rotational speed on Ti-6Al-4V-AA 6061 friction welded joints. *Journal of manufacturing processes*. 2018; 32: 288-297.
- [28] Lombard H, Hattingh DG, Steuwer, A, James MN. Effect of process parameters on the residual stresses in AA5083-H321 friction stir welds. *Materials Science and Engineering: A*. 2009; 501: 119-124.
- [29] Rajakumar S, Muralidharan C, Balasubramanian V, Influence of friction stir welding process and tool parameters on strength properties of AA7075-T6 aluminium alloy joints. *Materials & Design*. 2011; 32: 535-549.
- [30] Arici A, Selale S. Effects of tool tilt angle on tensile strength and fracture locations of friction stir welding of polyethylene. *Science and technology of welding and joining*. 2007; 12: 536-539.
- [31] Hovanski Y, Upadhyay P, Carsley J, Luzanski T, Carlson B, Eisenmenger M, Soulami D, Marshall D, Landino B, Hartfield-Wunsch S.

- High-Speed Friction-Stir Welding to Enable Aluminum Tailor-Welded Blanks. *Jom.* 2015; 67: 1045-1053.
- [32] Bhardwaj N, Narayanan RG, Dixit US, Hashmi MSJ. Recent developments in friction stir welding and resulting industrial practices. *Advances in Materials and Processing Technologies.* 2019; 5: 461-496.
- [33] Zhang Y, Cao X, Larose S, Wanjara P. Review of tools for friction stir welding and processing. *Canadian Metallurgical Quarterly.* 2012; 51: 250-261.
- [34] Evlen H, Özdemir MA, Çalışkan A. Doluluk oranlarının PLA ve PET malzemelerin mekanik özellikleri üzerine etkileri. *Politeknik Dergisi.* 2019; 22: 1031-1037.
- [35] Vijendra B, Sharma A. Induction heated tool assisted friction-stir welding (i-FSW): A novel hybrid process for joining of thermoplastics. *Journal of Manufacturing Processes.* 2015; 20: 234-244.
- [36] Bilgin M, Karabulut Ş, Özdemir A. Alüminyum Magnezyum Alaşımlarının Sürtünme Karıştırma Kaynağı İle Kaynak Edilebilirliğinin Değerlendirilmesi. *Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology.* 2017; 5: 191-209.

Ceramic Particle Reinforced Camshaft Lobes: A Performance Evaluation and Comparative Analysis

Afşın Alper CERİT¹ , Fehmi NAİR² , Hafız Muhammad Numan ZAFAR* 

¹ Erciyes University, Department of Industrial Design Engineering, Kayseri 38039, Türkiye

² Erciyes University, Department of Mechanical Engineering, Kayseri 38039, Türkiye

³ Kim Technologies, Kayseri, Türkiye

Article Info

Research article

Received: 28/01/2024

Revision: 28/02/2024

Accepted: 02/03/2024

Keywords

Metal Matrix Composites
Camshafts, Tribology
Powder Metallurgy
Cam Materials

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi

Başvuru: 28/01/2024

Düzeltilme: 28/02/2024

Kabul: 02/03/2024

Anahtar Kelimeler

Metal Matrisli Kompozitler
Kam milleri
Triboloji
Toz Metalurji
Kam Malzemeler

Graphical/Tabular Abstract (Grafik Özet)

This study reports the wear performance of ceramic reinforced Al matrix composites as a replacement of the conventional camshaft lobes. / Bu çalışma, geleneksel kam mili malzemelerin yerine seramik takviyeli Al matris kompozitlerin kullanımı açısından aşınma performansını araştırmaktadır.

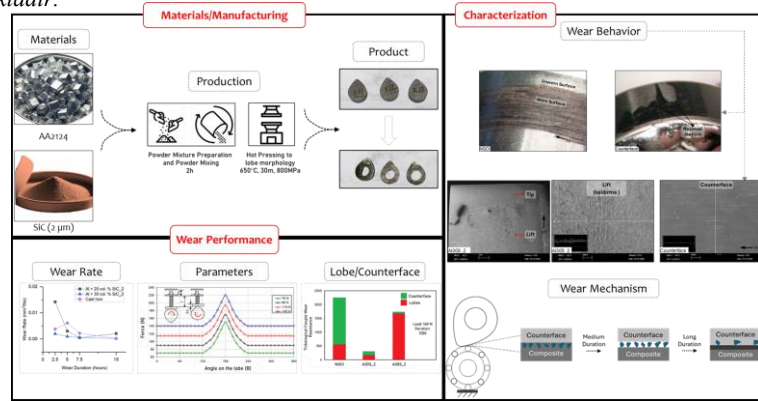


Figure A: Manufacturing, wear performance and characterization of wear behavior of particle reinforced Al matrix cams. / **Şekil A:** Parçacık takviyeli Al matrisli kamların üretimi, aşınma performansı ve karakterizasyonu.

Highlights (Önemli noktalar)

- Short-scale lab tests might not capture real-world wear of ceramic reinforced Al matrix cam lobes. / Küçük ölçekli laboratuvar testleri, seramik parçacık takviyeli Al matrisli kam mili malzemelerin gerçek şartlarda aşınma davranışını tam olarak yansıtmayabilir.
- Composites with higher ceramic content show improved wear resistance initially. / Seramik miktarı artınca kompozitler başlangıçta daha iyi aşınma direnci gösterir.
- Longer durations of wear cause surface-hardening and reduced wear, however, for highest ceramic content, it causes significant wear in the counterface. / Uzun süreli yüzey temasları kamların yüzeyinin sertleşmesine ve bunun sonucunda daha az aşınmasına sebep olur, ancak seramik miktarı fazla olan kompozitler karşı malzemenin aşırı aşınmasına neden olur.

Aim (Amaç): This study aims to determine the wear performance of the Al matrix ceramic particle reinforced camshaft lobes. / Bu çalışmanın amacı seramik parçacık takviyeli Al matrisli kompozitlerin aşınma performansını değerlendirmektir.

Originality (Özgünlük): The wear performance of ceramic particle reinforced Al matrix cams in the end product form and under semi-real conditions is not evaluated before. / Seramik parçacık takviyeli Al matrisli kamların aşınma performansı, daha önce nihai ürün formunda ve yarı-gerçekçi koşullar altında değerlendirilmemiştir.

Results (Bulgular): Results showed that the ceramic content in the Al matrix cams can be changed in order to attain a pre-determined wear behavior. / Sonuçlar, Al matrisli kamlarda önceden belirlenmiş bir aşınma davranışı elde etmek için seramik içeriğinin ayarlanabileceğini göstermiştir.

Conclusion (Sonuç): Al+20 vol. % SiC composite showed adequate wear resistance with a little counterface wear, offering a practical balance between durability and component protection. / Al+%20 SiC kompoziti, az miktarda karşı yüzey aşınması ile uygun aşınma direnci göstererek, dayanıklılık ve karşı parça koruma bakımından pratik bir denge sunar.



Ceramic Particle Reinforced Camshaft Lobes: A Performance Evaluation and Comparative Analysis

Afşın Alper CERİT¹ , Fehmi NAİR² , Hafız Muhammad Numan ZAFAR^{3*} 

¹ Erciyes University, Department of Industrial Design Engineering, Kayseri 38039, Türkiye

² Erciyes University, Department of Mechanical Engineering, Kayseri 38039, Türkiye

³ Kim Technologies, Kayseri, Türkiye

Article Info

Research article

Received: 28/01/2024

Revision: 28/02/2024

Accepted: 02/03/2024

Keywords

Metal Matrix Composites

Camshafts

Tribology

Powder Metallurgy

Cam Materials

Abstract

Ceramic reinforced metal matrix composite (CMMC) lobes in engines could improve fuel efficiency and wear resistance compared to traditional steel lobes but require absolute evaluation. However, ensuring safe CMMC cam operation demands extensive wear testing, mimicking real-world conditions over longer durations instead of limited lab evaluations. This study is an extension of the previously reported feasibility analysis of the ceramic particle reinforced Al matrix composite lobes. The performance of the best selected (Al + 20, 30 vol. % SiC(2µm)) composites for wear durations of 2.5, 5, 7.5, and 15 h is reported with various combinations of pressures and compared with the reference lobes. Results showed that the higher content of ceramic particles improved the wear resistance, however, the influence diminished at larger durations due to surface hardening of the composites. The wear performance of the composite (Al + 30 vol.% SiC) reached 73% of the conventional cams but it also caused significant wear in the counterface due to initiation of three-body-wear by the dislodged ceramic particles.

Seramik Partikül Takviyeli Kam Malzemeleri: Bir Performans Değerlendirmesi ve Karşılaştırmalı Analiz

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi

Başvuru: 28/01/2024

Düzeltilme: 28/02/2024

Kabul: 02/03/2024

Anahtar Kelimeler

Metal Matrisli

Kompozitler

Kam Milleri

Triboloji

Toz Metalurjisi

Kam Mili Malzemeleri

Öz

Motorlarda yakıt verimliliği ve aşınma direnci artırmak için geleneksel kamların yerine Seramik Takviyeli Metal Matrisli Kompozitlerin (CMMC) kullanımı mutlak performans değerlendirmesi gerektirir. Bununla birlikte, kamların güvenli bir şekilde çalışması için gerçek koşulları taklit eden kapsamlı aşınma testleri gereklidir. Bu çalışma, daha önce yayınlanan seramik parçacık takviyeli Al matris kompozit kamların fizibilite analizinin bir uzantısıdır. Seçilen en iyi (Al + 20, 30 % SiC (2 µm)) kompozit kamlar gerçek şartları taklit eden düzenekte 2,5, 5, 7,5 ve 15 saatlik aşınma testlerine tabi tutularak referans kamları ile karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, seramik miktarına bağlı olarak aşınma direncinin arttığını, ancak uzun süre aşınan kompozitler için yüzey sertleşmesi nedeniyle aşınma direncinde artırma eyleminin azaldığını göstermiştir. Ayrıca, Al + %30 SiC kompozitin aşınma performansı geleneksel kamların %73' üne ulaşmıştır. Ancak, kopan seramik parçacıklar üç cisimli aşınmanın başlamasına sebep olarak karşı yüzeyde ciddi miktarda aşınmaya yol açar.

1. INTRODUCTION (GİRİŞ)

The fuel injection during the engine operation into the combustion chamber is controlled by the cams that are attached to the camshafts. Therefore, the physical and operational characteristics of the cams can significantly influence the operational capabilities of the engine. High wear resistance and a long lifespan are necessary for integration as camshaft lobes. The successful integration of ceramic-reinforced lightweight cams into camshafts

can lead to low production costs and fuel consumption, as ceramic-based composites possess excellent wear resistance and lightweight characteristics.

The failures in automotive vehicles are divided into isolated and widespread failures that are occurred due to abuse, age, human-machine interaction errors, and improper maintenance. Heyes et al. [1] studied 70 cases of vehicle component failures and reported a striking 41% share by the engine

components. By using appropriate material selection, design, and processing techniques during the manufacturing stage and by properly evaluating the performance of different engine components, failures can be prevented.

The feasibility of using the Al matrix ceramic reinforced cams as a replacement to conventionally used high alloy steels [2-4] was investigated in the previous study [5]. However, results showed that the behavior of the cams was influenced not only by the types and ratios of the ceramic (B_4C or SiC) particles, but also by the size of the reinforcement particles. However, since the mentioned study [5] was intended to develop a virtual engine-like wear environment and conduct the feasibility analysis of the ceramic reinforced Al matrix composite as cams, influence of longer durations of the wear tests was not reported. But for a proper representation of said composites to be claimed as a replacement to conventional steels cams, performance evaluation is inevitable.

Barothi et al. [6] attempted to improve the engine performance by manipulating the camshaft lobe geometry. Results showed that changing the lobe lift height from 12 mm to 12.43 mm resulted in a 4.1% increase in cylinder filling efficiency during intake stroke. However, the power consumption was slightly increased (from 323.72 kW to 334.18 kW) owing to modified lift height in the lobes. Burdzik et al. [7] collected 40 cams from Cinquecento 700 engine that had already been exposed to real-life wear for a range of 1250 to 48500 km. It was reported that while wear intensity was fairly dependent on the cam angles, the justifications to these maxima required incorporation of pressure calculations. Overall, the wear behavior was independent of the type of cams used for assessment. Godino et al. [8] analyzed the recurring major failure in the valve train system (engine valves opening/closing system) of 130 buses (out of 400 urban buses fleet) and reported excessive damage on the cam nose, especially after 500 thousand km. The reasons for the failures, after a systematic analysis, were declared to be a combination of wear (low hardness of the cam nose) and fatigue cracking in the cam subsurface.

Using ceramic particles in a matrix with improved interface compatibility is an obvious way to counteract wear in mechanical parts that interact physically; ceramic particle reinforced Al matrix composites are a success from an engineering standpoint. However, as the sliding distance (or duration of wear exposure) increases, the wear

response might not be similar throughout the experiment [11]. Supposing laterally uniform microstructure, friction induced elevated temperatures, fatigue induced surficial changes, and most importantly, the deformation induced hardening of the top surface triggers microstructural evolution that is absent at the initial stages of the wearing [16]. Such a situation necessitates considering the extended duration wear tests while defining absolute wear behavior of the composites.

Shinde et al. [11] manufactured Al-12Si matrix B_4C using ultrasonic stir casting and studied the influence of speed and sliding distance on the microstructure during wear. While the friction coefficient remained fairly unchanged, the wear behavior was complex with respect to the sliding distance – combined influence of additional factors of load and sliding speed needed to be incorporated as well. Muley et al. [17] reported that ceramic reinforced metallic composites (Mg alloy-AZ31B + 1.5wt% Al_2O_3 -1wt% Ca [9], Al 2219/ SiC_p + Gr_p [18], and Al alloy LM25 + SiC_p + Gr [16]) show different wear behavior at different stages of the sliding distance. For example, Alidokht et al. [9] reported that wear mode changed from ploughing caused by ceramic particles to abrasion and adhesion after 1500 m mark for $Mg+Al_2O_3$. Basavarajappa et al. [18] also reported a non-linear increase in the wear rate with increasing sliding distances. The wear mode changed again after 1500 m mark to abrasive wear that was caused by the cracked Si_3N_4 particles. Raju et al. [12] examined the wear of SiC and AlN hybrid composites for up to 1000 m and reported improved wear resistance compared to single-particle reinforced composites and attributed it to synergistic effects at the interface. It can be seen from Table 1 that although studies on the medium sliding distance of the ceramic particle reinforced Al matrix composites at the laboratory scale are available, extended sliding distance/durations are not as abundant. A contributing factor to this is the smaller size of the specimens and the constraints of the tribology-related machinery. In order to solve this problem, a much-automated system with minimum performance degradation must be prepared. The working principles and the component details of the setup are already detailed in the previous study [5]. The setup mimics the real-life engine conditions based on the principles of the valve train system (actuation of engine valves using lobes on the camshaft) in dry and wet conditions. Setup has monitoring capabilities such as checking the temperature of the oil and angular speed wheel.

Table 1. Selected studies from the literature dealing with short/medium/long distance laboratory research and case studies (Literatürden kısa/orta/uzun mesafeli laboratuvar araştırmaları ve vaka incelemeleri ile ilgili seçilmiş araştırmalar)

Examples	No	Composite/Material	Wear Testing Standards	Environment	Counterface, Hardness	Rotation Speed	Sample Dimensions (mm)	Exposure Distance (m)	Exposure Duration	Load (N)	Velocity (m/s)	Ref.
Laboratory (short or medium distance)	1	Al + SiC (30 µm)/MS ₂ (5µm)	Pin-on-disk	Dry	AISI D3, 58HRC	630 to 1600 rpm	10	200 to 1500	nr	10, 25, 40	0.35	[9]
	2	Al + Al ₂ O ₃ (<50 µm)	ASTM G 133	Dry	AISI 52100, 64 HRC	nr	1.5	500	nr	5.3	0.12	[10]
	3	Al-12Si + B ₄ C (<500 nm)	ASTM G 99	Dry	EN31, 60–62 HRC	nr	6	500, 1200, 3000	40 minutes	20	0.25 – 1.25	[11]
	4	Al + Li-Si ₃ N ₄	ASTM G 99	Dry	EN24,-	600 to 1500 rpm	10Φx30 (Dxl)	1000	nr	9.81, 14.71, 19.62	nr	[12]
	5	Al + WC (8–15 µm)	nr	Dry	nr	nr	12x12x40 (txhxl)	1200	nr	10, 20, 30	2	[13]
Laboratory (long distance)	1	Al + Fe ₂ O ₃ -Mg	nr	Dry	Carbon Steel, 64 HRC	nr	6Φx30 (Dxl)	6000, 12000, 18000	60, 120, 180 minutes	10, 20, 30	-	[14]
	2	Al + fly ash	ASTM G 99	Dry	EN-31, 65 HRC	80 to	8Φx27 (Dxl)	18000	6 hours	10, 25, 35	0.628	[15]
Real Life Case Studies	1	Cinquecento 700 Engine	Real life wear	Wet*	nr	nr	nr	1250 – 48500 km	nr	nr	nr	[7]
	2	Medium Carbon Steel (C55E*) (from urban buses)	Real life wear	Wet*	High Hardness Steel (HRC 73+)	nr	nr	nr	nr	nr	nr	[8]

*: Estimation, nr: Not Reported, D: diameter of specimen, l: length of specimen, t: thickness of specimen, h: width of specimen, rpm: rounds of disk per minute, HRC: Rockwell C hardness,

Current study deals with the extended duration (2.5, 5, 7.5, 15 h) wear of the camshaft lobes of Al+SiC and Al+B₄C composites under dry and wet conditions. While the composites are manufactured by a combination of stir casting and squeeze casting in a mold of lobe geometry, results were compared with reference samples (AA2124 matrix and nodular graphite cast iron).

2.MATERIALS AND METHODS (MATERYAL VE METOD)

2.1. Materials and Test Samples (Malzemeler ve Test Numuneleri)

Starting materials were based on the powder forms of SiC (two particle size), B₄C (single particle size) and Al AA2124 alloy. AA2124 aluminum alloy is known for exceptional strength, fatigue resistance, and adequate weldability and is widely used in the aircraft and automotive industry as critical weight-to-strength sensitive structural components such as wing skins and pistons. B₄C and SiC are famous for having exceptional hardness and thermal resilience making them appropriate candidates for various fields. For example, B₄C is industrially known as an advanced ceramic used against ballistic threats, while SiC is used in the furnaces and resists oxidation for inherent chemical inertness.

Only the reinforcement ratios of 20 and 30 vol. % were used in the current study because the wear behavior of the ceramic particles containing 10 vol. % did not differ significantly. Moreover, the

reinforcement particles, which were smaller in size (B₄C: 1-7 µm, SiC: 2 µm), showed a better wear performance compared to larger ceramic particle size (SiC: 20 µm) composites [5]. For these reasons, only the 20 and 30 vol% SiC with an average particle size of 2 µm were used in the study – the selected raw materials are shown in Figure 1(a).

Samples are prepared using powder metallurgy in three steps: mixture preparation, powder mixing, and hot pressing in a mold. The parameters are detailed in Figure 1(b). Test samples are prepared with an increasing fraction (20 and 30 vol.% SiC) of ceramic particles (Figure 1(c)). These samples were selected after the feasibility tests conducted in the previous study [5] on a broader range of types of composites (Figure 1(c)). The final product is in the camshaft lobe form because of the geometry of the specially prepared mold (Figure 1(d)). The detailed images of the mold components can be found in the previous paper [5]. Finally, reference materials for validating and comparing the wear behavior were also prepared, as shown in Figure 1(e).

One of the major issues related to the manufacturing of powder metallurgy composites is the presence of porosity. While the reduction in the porosity is related to the powder particles' characteristics (size, size distribution, morphology), pressure (compaction during cold/hot pressing for increasing inter-particle contacts[19]), temperature (for initiating the mass transport at interparticle boundaries) and finally the duration of the treatment

(in case chemical reactions happen at the interfaces that depend on atomic diffusion[20]), the pressure and temperature are most influential. Therefore, in order to achieve the highest density in the composites, different pressure-temperature values were attempted before the cams were produced.

As mentioned above, 200, 400, 600, and 800 MPa were attempted at temperatures of 23, 250, 450, and 650 °C for the samples reinforced with 10, 20, and 30 vol.% SiC. The maximum densities these composites reached (taking 100% as the theoretical density) are shown in Figure 2. It can be seen that at lower temperatures, it requires higher pressure values in order to reach closer to the theoretical density as shown in Figure 2(a). Additionally, the sintering of samples in which ceramic particles are present is unsatisfactory as compared to the non-reinforced samples. This is attributed to the ceramic nature and negligible yielding of the ceramic particles[21] under the pressure (Figure 2(a)). Regardless of the temperatures used, higher compression values increase the density of the composites that reaches a maximum value at 650 °C for 800 MPa as shown in (Figure 2(d)). This was the reason all composites were sintered at these parameters for 30 minutes.

Other than the composites used in the study, reference nodular graphite cast iron (NGCI) was also subjected to several characterizing stages in order to see the mechanical aspects of the used materials. That is to say that while the hardness of each specimen was measured individually, the hardness of the NGCI was also measured and it was checked whether it required any further hardening

practices. For example, in literature authors have reported increasing the mechanical properties of the camshaft lobes using several treatments (chills to acquire ledeburitic surface [3], induction hardening [22], austempering of the ductile irons [23], and cathodic electrolytic plasma hardening [24]). Figure 3 shows NGCI has some influence of the induction hardening (8%) but almost negligible influence of the post hardening grinding operation (0.1%). As for the composites, the hardness increased with the increasing content of the ceramic particles regardless of the types of ceramics used.

Finally, the images of the manufactured selected cams before and after the wear tests are given in Figure 4(a). Later, samples were perforated after being removed from the mold to fit the shaft as shown in Figure 4(b). Additionally, the bearings, that were used as the counterface, are also shown in Figure 4(b).

2.2. Wear Performance Tests (Aşınma Performans Testleri)

Wear tests were conducted using a setup which is explained in detail somewhere else [5]. For reference, the tests were conducted under wet conditions in a virtual engine-like environment. Regardless of the working principles of the specially designed virtual engine-like environment for the wear tests, the load on the samples (70, 90, 115, and 140 N), test durations (2.5, 5, 7.5, and 15 h), and angular speed (500 rpm) could be controlled. The wear tests were conducted using a commercial oil (60 mlt DEW® SAE10W40) that could be heated (and maintained) to a temperature of 90 °C.

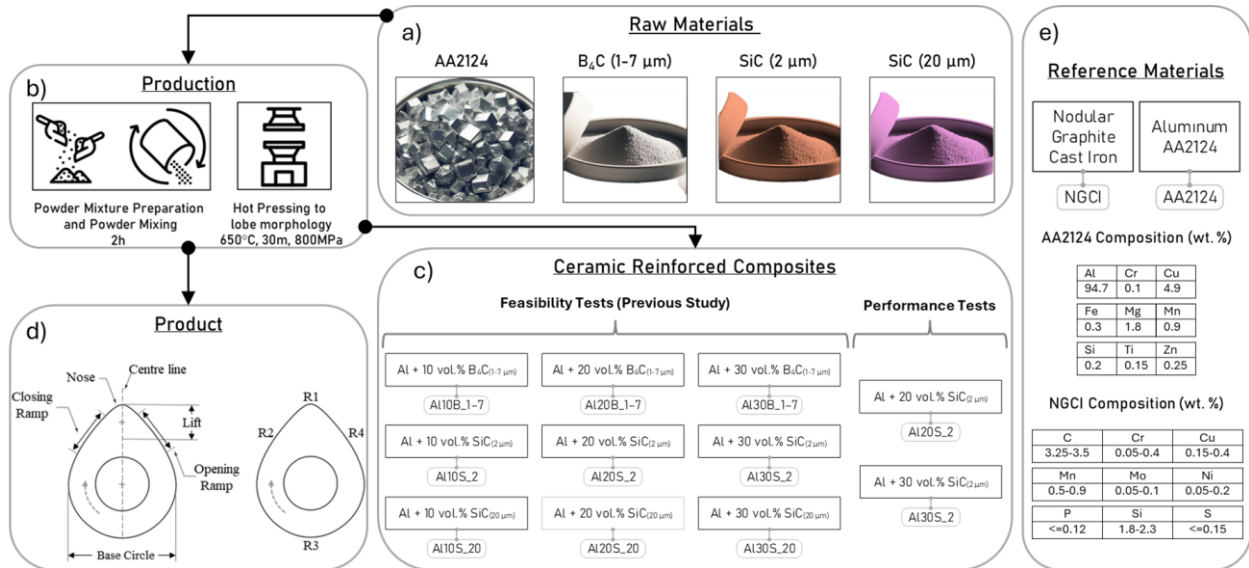


Figure 1. a) Starting materials, b) production conditions and steps, c) product mixtures and tags, d) final product and e) reference materials and their composition (NGCI: Nodular graphite cast iron), (a) Başlangıç malzemeleri, b) Üretim koşulları ve aşamaları, c) Ürün karışımları ve etiketleri, d) Nihai ürün ve e) Referans malzemeler ve içeriği (NGCI: küresel grafitli dökme demir),)

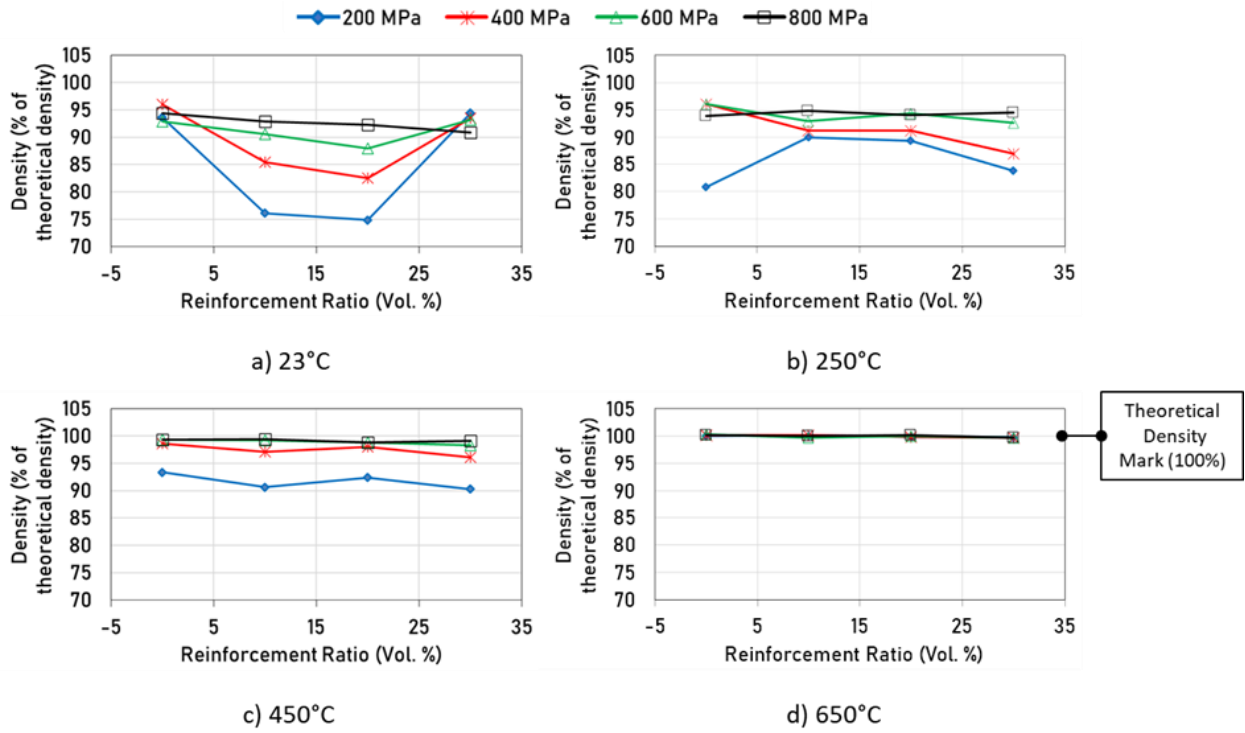


Figure 2. Details of the attempted pressure and temperature values for reaching maximum theoretical density in the composites (Kompozitlerde maksimum teorik yoğunluğa ulaşmak için denenen basınç ve sıcaklık değerleri)

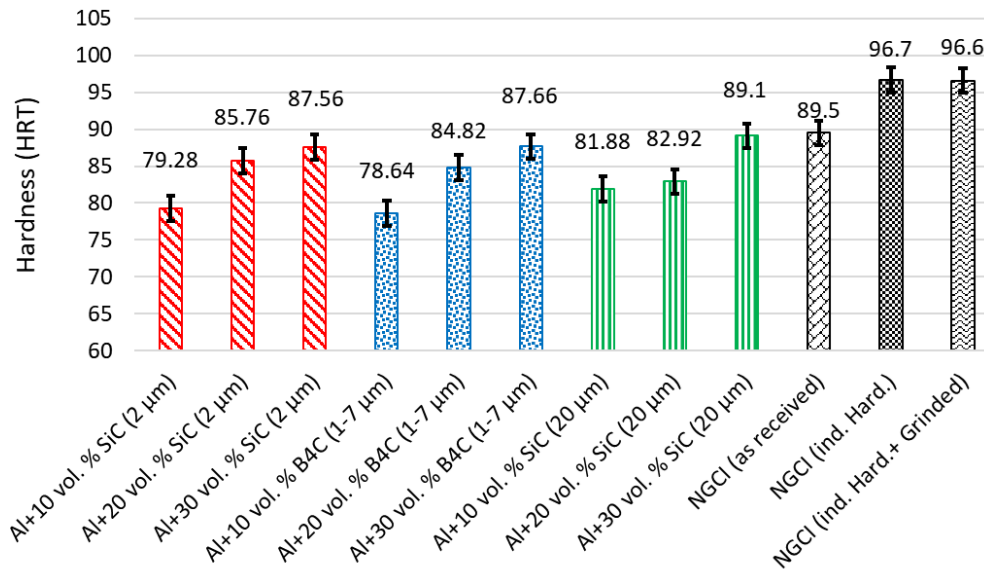


Figure 3. Hardness of the composites and influence of different treatments on the hardness of the counterface (NGCI) (Kompozitlerin sertliği ve farklı işlemlerin karşı malzemenin sertliği üzerindeki etkisi (NGCI))

The density of each sample was measured using the Archimedes principle. The mass of the samples before and after the wear tests was measured. Using the change in the mass (Δm) and the density (ρ), the volume of the material loss was calculated. Later, this volume was divided by the product of time and contact load to calculate the wear rate (W). The wear resistance is calculated by taking the inverse of the wear rate and it is further divided by the

density of the sample to measure the specific wear resistance of the sample.

3. RESULTS (BULGULAR)

It was reported in the previous study [5] that overall, the wear rate of the composites decreased with the increase in the ceramic content under dry wear. Only the results from the 2 μm reinforced specimens are given for the performance evaluation

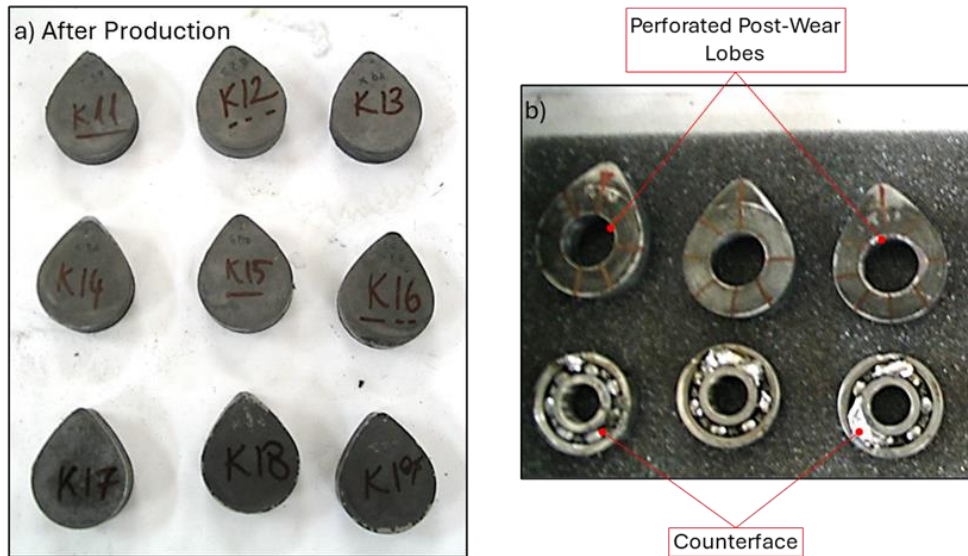


Figure 4. Images of the camshaft lobes a) before and b) after perforation, and counterfaces (Kam mili malzemelerin a) delme işleminden önceki ve b) sonraki ve karşı malzemelerin görüntüleri)

tests. There are two reasons behind that: i) the wear rate of the composites which had larger ceramic reinforcements ($20\ \mu\text{m}$ compared to $2\ \mu\text{m}$) initiated three body abrasive wear (especially A30S_20 specimens) and reduced the wear resistance of composites. ii) the difference in the wear rate was more prominent for the 20 and 30 vol. % ceramic content. In other words, based on the results of the previous study, only the best performing samples are selected for the extended duration wear performance evaluation. Finally, the lobes made of merely the Al matrix could not complete the testing because it was pasted to the counterface. With these realizations presented, performance wear test results are given in Figure 5.

It can be seen from the **Figure 5** that the wear rate of the composites is slightly higher than the cast iron, especially at shorter durations. However, as the duration of the wear increases, the overall wear rate is almost similar for all the samples. Additionally, the higher ceramic content reduces the wear in the composites, much significantly, at the lower sliding distances/wear durations. Reduced wear in the composites has been reported by various authors such as Bhowmik et al. [25] and Uzkut et al. [26] with increasing SiC content.

One of the important issues related to the wear of the metals or metal matrix composites is the plastic deformation due to repeating action of sliding. For example, when two surfaces interact for a longer duration, the top surface is plastically deformed and hardened [27]. Since samples are also subjected to a force of 115 N, the phenomenon of deformation under loading is further encouraged. The wearing of such a hardened surface can happen under two circumstances: a) spalling [10] that is possible if

there are major cracks or grooves formed during wear in the subsurface, and b) further increasing the load so that cracks could be formed in the hardened surface. In comparison to the fresh surface, the hardened surface that has deformed past its plastic limit is more difficult to wear in both situations. Because of this, regardless of the ratios of reinforcement, composites exhibit somewhat less wear over extended periods of time, as shown in **Figure 5(a)**.

The A30S_2 and NGCI specimens exhibit comparable wear loss in the composites, but their wear behaviors are not the same. It should be mentioned that the study's goal is to offer a lightweight substitute for the cast iron camshaft lobes that are currently in use. The benefits of adding ceramic-reinforced camshaft lobes are thus much more accurately represented when the wear resistance (inverse of wear rate) is divided by the density of the tested samples. The specific wear resistance of the camshaft lobes tested in this study is given in Figure 6 and the advantage of the A30S_2 specimen can be clearly seen.

It's critical to realize that a mechanical component's wear cannot be addressed separately. It is imperative that a component not be added to the machine if it exhibits adequate wear resistance but results in excessive wear on the counterface. Therefore, current study reports the results of the wear tests in conjunction with the wear in the counterface. Figure 7 shows the combined wear resistance of the counterface and the composite lobes.

It can be seen in Figure 7(a) that although wear resistance of the 30 vol.% SiC reinforced composite

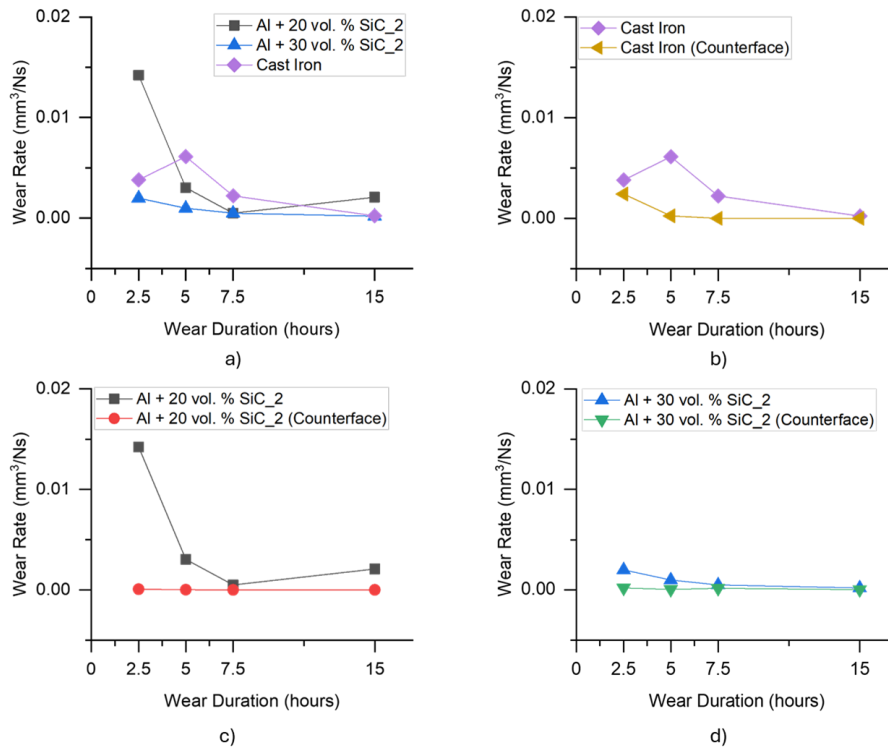


Figure 5. Wear rates of the a) tested samples and comparison with the counterfaces for b) NGCI, c) A20S_2, d) A30S_2 under a load of 115 N, angular speed of 500 rpm (a) test edilen numunelerin aşınma oranları ve b) NGCI, c) A20S_2, d) A30S_2 ile karşı yüzeylerle karşılaştırılması, 115 N yük, 500 rpm açısal hız)

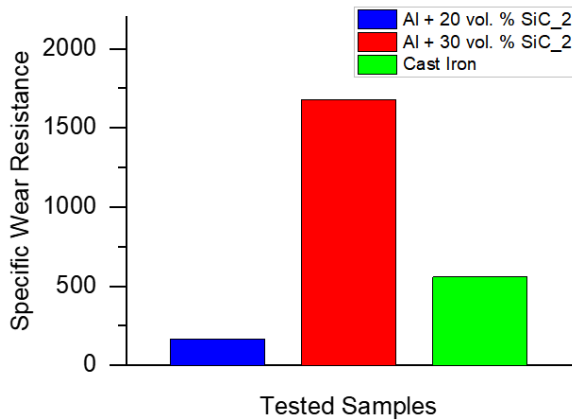


Figure 6. The specific wear resistance of the camshaft lobes (Kam mili malzemelerin spesifik aşınma direnci)

lobes is higher; it occurs on the expense of excessive wear in the counterface – a situation that is not preferred. Although the wear resistance of the 20 vol.% SiC composites is lower, it shows a fairly (almost 1:1) ratio of the wear that is divided between counterface and composite lobe. Figure 7(b) shows the comparative specific wear resistance of the samples taking the wear resistance of the NGCI as 100%. Here again, the specific wear resistance of the A20S_2 is lower than the A30S_2.

In order to analyze the influence of the impact force on the wear resistance of the composites, some

samples were selected to complete the wear tests at increasing loads. The load profiles for increasing loads at the tip (180° represents tip) are shown in **Hata! Başvuru kaynağı bulunamadı.**(a). The details about the springs compression and the methodology that is used for calculating the load value is given in detail somewhere else [5]. One of the influences of the higher loads is the reduction in the vibration between the contacting surfaces of counterface and camshaft lobe. Reduction in the vibration also reduces the repeating impacts on the wear specimen. As the angular speeds increase, so does the impact intensity. Because of this, the composites' wear resistance is increased, and their wear rate is slightly reduced as a result of the higher load values as shown in **Hata! Başvuru kaynağı bulunamadı.**(b). Alidokht et al. [9] reported a slight increase in the wear loss 25% for increasing load from 10 to 25 N and 30% for increasing load from 25 N to 40 N for Al + SiC composites. Other authors [12-15] have also reported the influencing of increasing loads on the wear behavior of similar composites (see Table 1), however, the results might not agree with the current experiment. The reason behind that is the difference in the wear setup mechanism (such as reduction of vibration at increasing loads) peculiar to the current wear evaluation setup this project uses. As for the wear of the counterface, except for the NGCI specimen, the wear rate remained fairly

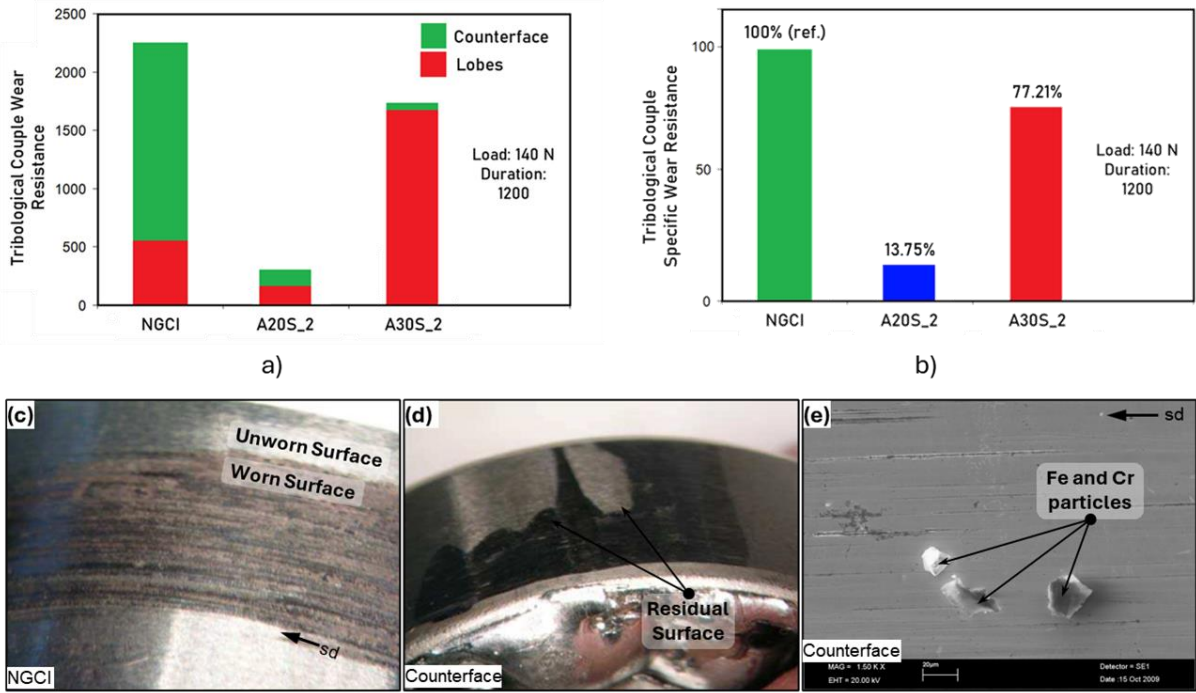


Figure 7. a) Tribological couple wear resistance and b) tribological couple specific wear resistance of the selected composites and reference cast iron. Wear in the c) NGCI and d, e) counterface (a) Seçilen kompozitlerin ve referans dökme demirin tribolojik çift aşınma direnci ve b) tribolojik çiftin spesifik aşınma direnci. c) NGCI ve d, e) karşı yüzeyinde aşınma)

similar at all wear durations (Figure 5(b, c, d)). The reason for higher wear in the counterface against the NGCI is the higher hardness[28] of NGCI which in turn was intentionally improved using the induction hardness treatment [22] (Figure 3) at shorter durations. As the wear duration increases, the surface of the counterface or the NGCI is deformation-strengthened and wear in both interacting faces is reduced. Additionally, Figure 7(c) shows that the worn surface of the NGCI lobes has sliding wear traces where aggressive grooves are not formed. The counterface, while being worn

against NGCI, also lacks excessive wear traces Figure 7(d).

It can be seen in **Hata! Başvuru kaynağı bulunamadı.**(a) that surface of the Al + 30 vol.% SiC (2 μ m) is much susceptible to wear at tip and at the lift region, based on the surface roughness.

The micrographs subsection provides the surface roughness of the scanned line on the micrograph. It is commonly known that wear-induced scratches and grooves increase surface roughness. Additionally, there remains a transition region

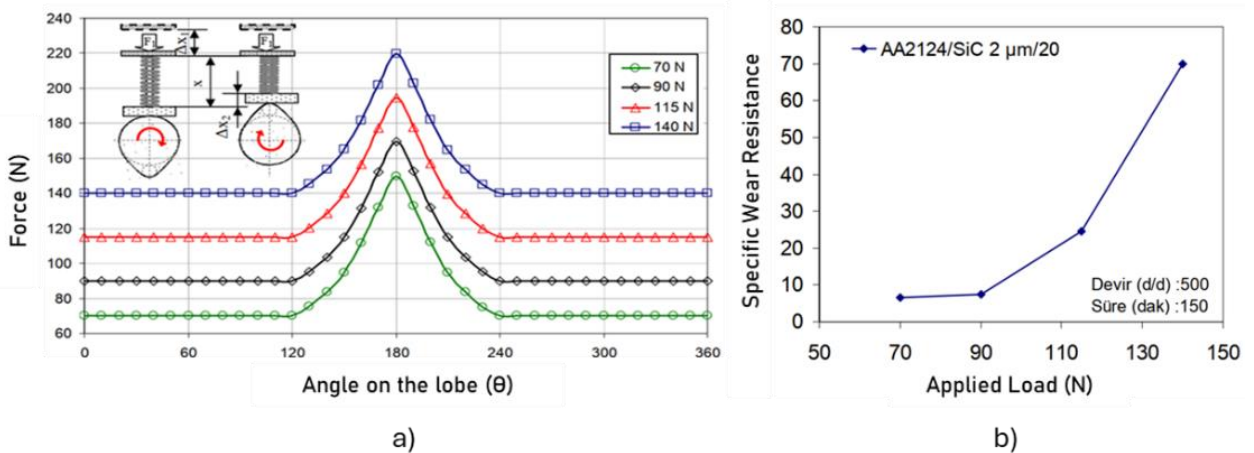


Figure 8. a) The load profiles of the camshaft lobes and b) influence of increasing applied loads on the specific wear resistance of the camshaft lobes (a) yük profilleri ve b) artan yüklerin kamların spesifik aşınma direnci üzerindeki etkisi)

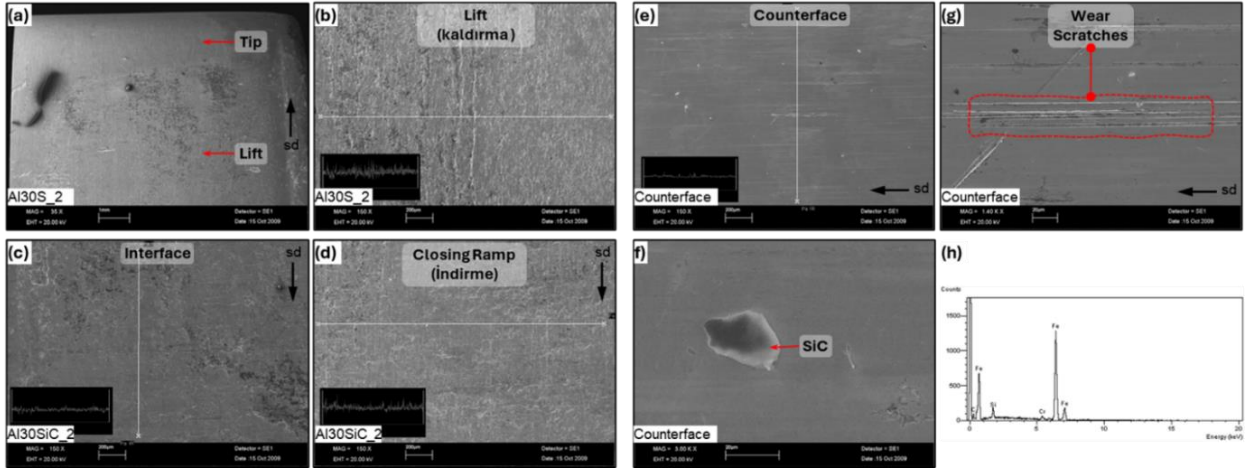


Figure 9. Microstructure of the different regions of the composite lobe and the counterface (Kompozit kamın ve karşı yüzeyin farklı bölgelerinin mikro yapısı)

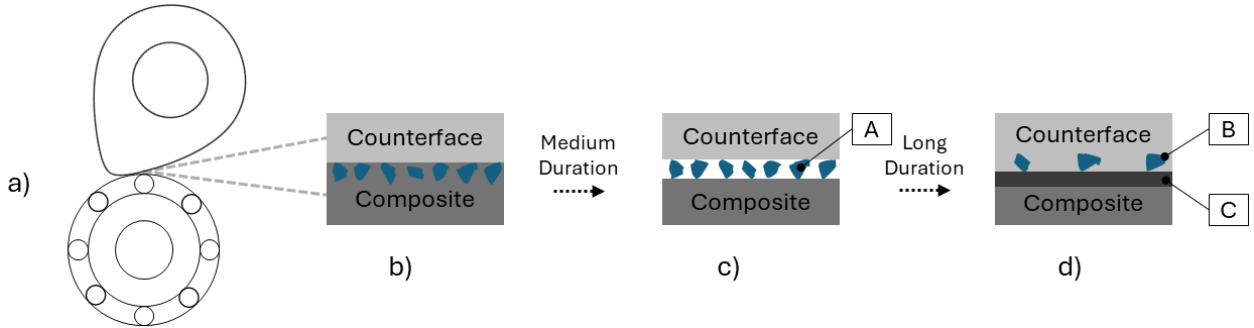


Figure 10. a, b, c, d) Various microstructural features at the counterface and composite interfaces. A: dislodged ceramic particles, B: embedded ceramic particles, C: hardened top surface. (Karşı yüzey ve kompozit arayüzlerde çeşitli mikroyapısal özellikler. A: yerinden çıkmış seramik parçacıkları, B: gömülü seramik parçacıkları, C: sertleşmiş üst yüzey)

between the lift and tip that has lower roughness **Hata! Başvuru kaynağı bulunamadı.**(c) compared to tip **Hata! Başvuru kaynağı bulunamadı.**(b) and lift **Hata! Başvuru kaynağı bulunamadı.**(d). As for the closing ramp, the roughness is slightly lower than the tip since this region of the cam does not counter the load imposed by the springs. Our previous study [5] as well as Burdzik et al. [7] reported a region dependency of wear in the camshaft lobes after 2.5 h and a distance of 1250 – 48500 km, respectively.

The microstructure of the counterface reveals that the wear scratches on the counterface are not considerable deep (**Hata! Başvuru kaynağı bulunamadı.**(g)) enough to increase the surface roughness dramatically (**Hata! Başvuru kaynağı bulunamadı.**(e)). This behavior is attributed to the smaller size (2 μm) of the ceramic particles. However, it must be noted that there was a significant wear in the counterface against the A30S_2 specimen (as shown in Figure 7 (a)). So, if the surface roughness of the counterface is lower,

wear has to occur via mechanism of excessive ceramic particles that must have initiated the three-body abrasive wear and not via the mechanism of the aggressive ploughing in the counterface. This claim is supported by the transferring and embedding of the SiC particles from the composite to the counterface as shown in **Hata! Başvuru kaynağı bulunamadı.**(f) and confirmed with the EDS analysis shown in **Hata! Başvuru kaynağı bulunamadı.**(h). Because of the viscous oil, some of the counterface's broken particles remain inside the wear system for an extended period of time, as shown in Figure 7. Figure 10 schematically shows the initiation of three body abrasive wear due to dislodged ceramic particles (annotation **A**) and formation of hardened layer due to repeating sliding loads (annotation **C**) for a longer (above 10 hours) duration.

4. CONCLUSIONS (SONUÇLAR)

This study reported the performance potential of ceramic-reinforced Al matrix composites (CMMCs) as lightweight alternatives to cast iron

camshafts in engines, with a particular focus on their wear performance under semi-engine like conditions. Following conclusions from the study can be deduced.

- Ceramic reinforced Al matrix composites exhibited a positive correlation in wear with higher SiC content (20% and 30% tested), showcasing their potential for weight reduction without significantly compromising the performance.
- As the duration of the experiment increased, the wear loss of the composites showed similar values due to formation of hardened top surface. The surface is hardened due to fatigue and sliding under loads that yields the metallic matrix beyond its elastic limit.
- Al + 20 vol. % SiC composite showed adequate wear resistance with a little counterface wear, offering a practical balance between durability and component protection. As for the Al + 30 vol. % SiC, it showed superior wear resistance, but it triggered significant counterface wear due to dislodged SiC particles that initiated three-body abrasive wear.

ACKNOWLEDGMENTS (TEŞEKKÜR)

The authors are grateful for the financial support of the Erciyes University Scientific Research Projects Coordination Unit, grant number FBT07-55, and the Scientific and Technological Research Council of Türkiye (TUBITAK), grant number 106M021. Authors are grateful to Kim Technologies, Kayseri for providing assistance in the characterization of the produced samples.

DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS (ETİK STANDARTLARIN BEYANI)

The authors of this article declare that the materials and methods they use in their work do not require ethical committee approval and/or legal-specific permission.

Bu makalenin yazarı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

AUTHORS' CONTRIBUTIONS (YAZARLARIN Denklemleri buraya yazın.N KATKILARI)

Alper Afşın CERİT: He designed the testing setup, manufactured the test samples, conducted the experiments, created test reports and analyzed the results.

Test düzeneğini tasarladı, test numunelerini üretti, deneyleri gerçekleştirdi, test raporları oluşturdu ve sonuçları analiz etti.

Fehmi NAİR: He supervised the project, designed the wear testing setup, created sources, guided the manufacturing process, conducted the experiments, and analyzed the results.

Projeyi denetledi, aşınma testi düzeneğini tasarladı, kaynaklar oluşturdu, üretim sürecini yönlendirdi, deneyleri yürüttü ve sonuçları analiz etti.

HM Numan ZAFAR: He analyzed the test results, designed the tests report methodology, explained the wear mechanisms and prepared the manuscript.

Test sonuçlarını analiz etti, test raporu metodolojisini tasarladı, aşınma mekanizmalarını açıkladı ve makaleyi hazırladı.

CONFLICT OF INTEREST (ÇIKAR ÇATIŞMASI)

There is no conflict of interest in this study.

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

REFERENCES (KAYNAKLAR)

- [1] Heyes, AM, Automotive component failures. Engineering Failure Analysis, 5 (1998) 129-141.
- [2] Colin García, E, et al., Microstructural and Mechanical Assessment of Camshafts Produced by Ductile Cast Iron Low Alloyed with Vanadium. Metals, 11 (2021) 1-18.
- [3] Gafur, MA, Haque, MN, and Prabhu, KN, Effect of chill thickness and superheat on casting/chill interfacial heat transfer during solidification of commercially pure aluminium. Journal of Materials Processing Technology, 133 (2003) 257-265.
- [4] Dahuri, SM, Subri, NHA, and Noor, NM, Stress analysis of engine camshaft from light metal. International Journal of Scientific and Engineering Research, 2 (2018) 37-44.
- [5] Cerit, AA, et al., Comparison of the surface morphologies of ceramic reinforced metal matrix composite cams after wear tests under dry and wet conditions. Journal of Composite Materials, 57 (2023) 1541-1556.
- [6] Barothi, L, et al. Study regarding the influence of geometrical characteristics of the distribution system on truck engines efficiency parameters. in IOP Conference Series: "Materials Science and Engineering". 2022. Chisinau, Republic of Moldova: IOP Publishing.
- [7] Burdzik, R, et al., Attempt to assess operational wear of camshaft cams. Archives of Materials Science and Engineering, 57 (2012) 57-62.
- [8] Godiño, JAV, et al., Failure analysis of an overhead valve train system in urban buses.

- Engineering Failure Analysis 96 (2019) 455-467.
- [9] Alidokht, SA, Abdollah-Zadeh, A, and Assadi, H, Effect of applied load on the dry sliding wear behaviour and the subsurface deformation on hybrid metal matrix composite. *Wear*, 305 (2013) 291-298.
- [10] Jamaati, R, Naseri, M, and Toroghinejad, MR, Wear behavior of nanostructured Al/Al₂O₃ composite fabricated via accumulative roll bonding (ARB) process. *Materials & Design*, 59 (2014) 540-549.
- [11] Shinde, DM and Sahoo, P, Influence of Speed and Sliding Distance on the Tribological Performance of Submicron Particulate Reinforced Al-12Si /1.5 Wt% B₄C Composite. *International Journal of Metalcasting*, 16 (2022) 739-758.
- [12] K, R and M, B, Dry Sliding Wear Behavior of Aluminum Metal Matrix Composite Reinforced with Lithium and Silicon Nitride. *Silicon*, 14 (2022) 115-125.
- [13] Buliwal, A, Dhakar, B, and Pare, V, Fabrication of aluminum based metal matrix composite using stir casting method and characterize its tribological properties. *Materials Today: Proceedings*, 61 (2022) 78-83.
- [14] Singh, C, Mer, KKS, and Kumar, H, *Synthesis and Dry Sliding Wear Characterization of Aluminum based Metal Matrix Composite Reinforced with In-situ (Iron ore) Alumina*, in *Department of Mechanical Engineering Govind Ballabh Pant Engineering College Ghurdauri*. 2010. p. 198.
- [15] Shivaprakash, YM, Basavaraj, Y, and Sreenivasa Prasad, KV, Comparative study of tribological characteristics of AA2024+ 10% fly ash composite in non-heat treated and heat treated conditions. *International Journal of Research in Engineering and Technology*, 2 (2013) 275-280.
- [16] Suresha, S and Sridhara, BK, Effect of silicon carbide particulates on wear resistance of graphitic aluminium matrix composites. *Materials & Design*, 31 (2010) 4470-4477.
- [17] Muley, AV and Ruchika, Wear and friction (Tribological) characteristic of aluminum based metal matrix hybrid composite: An overview. *Materials Today: Proceedings*, (2023).
- [18] Basavarajappa, S, et al., Dry sliding wear behavior of Al 2219/SiCp-Gr hybrid metal matrix composites. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 15 (2006) 668-674.
- [19] Schumacher, EE and Souden, AG, Some aspects of powder metallurgy. *The Bell System Technical Journal*, 23 (1944) 422-457.
- [20] Zafar, HMN and Nair, F, Fabrication and Microscale Characterization of Iron Matrix Composite Wires Reinforced by in situ Synthesized Iron Boride Phases. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 48 (2023) 3909-3930.
- [21] Zafar, HMN and Nair, F, Quantitative Analysis of Codeformation Behavior of Ceramic and Metallic Particle System. *Journal of Materials Engineering and Performance*, (2023).
- [22] Doyon, G, Rudnev, V, and Maher, J, *Induction hardening of crankshafts and camshafts*, in *ASM Handbook*, V.R.G.E. Totten, Editor. 2014, ASM International: Ohio, USA. p. 172-186.
- [23] Cruz Ramírez, A, et al., Evaluation of CADI Low Alloyed with Chromium for Camshafts Application. *Metals*, 12 (2022) 1-24.
- [24] Dayanç, A, Karaca, B, and Kumruoğlu, L, The cathodic electrolytic plasma hardening of steel and cast iron based automotive camshafts. *Acta Physica Polonica B*, 131 (2017) 374-378.
- [25] Bhowmik, A, Dey, D, and Biswas, A, Microstructure, mechanical and wear behaviour of Al7075/SiC aluminium matrix composite fabricated by stir casting. *Indian Journal of Engineering and Materials Sciences*, 28 (2021) 46-54.
- [26] Uzcut, M, Abrasive wear behaviour of SiCp-reinforced 2011 Al-alloy composites. *Materials and Technology*, 47 (2013) 635-638.
- [27] Alpas, AT, Hu, H, and Zhang, J, Plastic deformation and damage accumulation below the worn surfaces. *Wear*, 162 (1993) 188-195.
- [28] Gangopadhyay, A, Soltis, E, and Johnson, MD, Valvetrain friction and wear: Influence of surface engineering and lubricants. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, 218 (2004) 147-156.

Sürekli Mıknatıslı Akı Anahtarlama Motorunda Mıknatıs, Stator ve Rotor Geometrilerinin Tork ve Tork Dalgalanmasına Etkisinin İncelenmesi

SümeYYe ÇARKIT^{1*}  Nurettin ÜSTKOYUNCU²  Taner ÇARKIT³ 

¹Kırklareli Üniversitesi, Gıda Arzı Güvenliği ve Dijitalleşme Ortak Uygulama ve Araştırma Merkezi, Kırklareli

²Erciyes Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Kayseri

³Kırklareli Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Kırklareli

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 11/12/2023
Düzeltilme: 08/01/2024
Kabul: 24/01/2024

Anahtar Kelimeler

Sürekli mıknatıslı akı anahtarlama motor
Sonlu elemanlar yöntemi
Ortalama tork
Tork dalgalanması

Articel Info

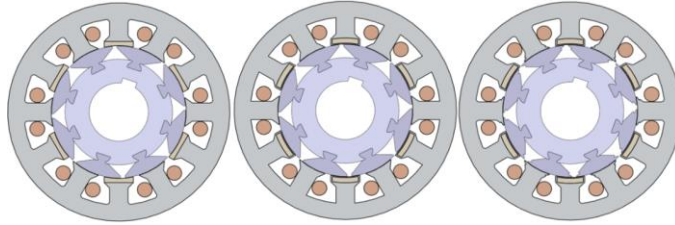
Research article
Received: 11/12/2023
Revision: 08/01/2024
Accepted: 24/01/2024

Keywords

Permanent magnet flux
switched motor
Finite element method
Average torque
Torque ripple

Grafik Özeti (Graphical/Tabular Abstract)

Bu çalışmada, referans motor üzerinde tasarımsal değişiklikler yapılarak uygun tork değeri, düşük tork dalgalanması, üretim kolaylığı ve geniş hız aralığında çalışma yeterliliği elde edilmeye çalışılmıştır. / In this study, it has been tried to obtain appropriate torque value, low torque fluctuation, ease of production, and operating capability in a wide speed range by making design changes on the reference engine.



Şekil A: Motor yapılarının kesit görünüşleri, sırasıyla: Referans motor, Motor-1, Motor-2 / **Figure A:** Cross-sectional appearances of motor structures, respectively: Reference motor, Motor-1, Motor-2

Önemli Noktalar (Highlights)

- Literatürdeki motorun yapısal değişiklikleri ile yeni motorların tasarlanması / Designing new motors with structural changes of the motor in the literature
- Motorun kutuplarına uygulanan değişikliklerle optimum tasarımın elde edilmesi / Achieving optimum design by changes applied to the poles of the motor
- Literatürdeki motor ile tasarlanan motorların tork ve tork dalgalanması açısından karşılaştırılması / Comparison of the motor in the literature and the designed motors in terms of torque and torque ripple

Amaç (Aim): Motor-1 ve Motor-2 olarak adlandırılan iki motor yapısı, düşük tork dalgalanma oranı ve daha kolay imalat süreci sağlamak amacıyla sunulmuştur. / Two motor structures called Motor-1 and Motor-2 are presented to provide a low torque ripple rate and an easier process of manufacturing.

Özgünlük (Originality): Referans motorun mıknatıs geometrisinde ve konumuna, stator ve rotor çıkıntılarında değişiklikler yapılarak tork dalgalanmasında ciddi düşüişlere ulaşılmıştır. / Significant reductions in torque ripple have been achieved by making changes to the magnet geometry and position of the reference motor, as well as the stator and rotor protrusions.

Bulgular (Results): Önerilen her iki motor yapısında da referans motora göre ortalama tork değerinde yaklaşık %5 oranında bir azalma olduğu görülmektedir. Öte yandan tasarlanan ikinci motorun yapısı sayesinde tork dalgalanmasında ortalama %40 oranında azalma elde edilmektedir. / It is observed that there is a decrease of approximately 5% in the average torque value in both two proposed motor structures when compared with that of the reference motor. On the other hand, thanks to the second designed motor structure, an average of 40% reduction in the torque ripple is obtained.

Sonuç (Conclusion):

Literatürdeki referans motora göre daha kolay üretim sağlamak ve minimum tork dalgalanması elde etmek için iki yeni motor yapısı önerilmiştir. Elde edilen sonuçlar göstermektedirki, tasarlanan motorlar birçok uygulamadaki avantajlarıyla diğer elektrik motorlarına oldukça çekici bir alternatif oluşturmaktadır. / Two new motor structures have been proposed to ensure easier production and to achieve minimum torque fluctuation compared to the reference engine in the literature. The results obtained show that the designed motors are a very attractive alternative to other electric motors with their advantages in many applications.



Sürekli Mıknatıslı Akı Anahtarlama Motorunda Mıknatıs, Stator ve Rotor Geometrilerinin Tork ve Tork Dalgalanmasına Etkisinin İncelenmesi

SümeYYe ÇARKIT^{1*} Nurettin ÜSTKOYUNCU² Taner ÇARKIT³

¹Kırklareli Üniversitesi, Gıda Arzı Güvenliği ve Dijitalleşme Ortak Uygulama ve Araştırma Merkezi, Kırklareli

²Erciyes Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Kayseri

³Kırklareli Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Kırklareli

Makale Bilgisi

Research article
Received: 11/12/2023
Revision: 08/01/2024
Accepted: 24/01/2024

Anahtar kelimeler

Sürekli mıknatıslı akı anahtarlama motor
Sonlu elemanlar yöntemi
Ortalama tork
Tork dalgalanması

Öz

Bu çalışmada, referans alınan bir sürekli mıknatıslı akı anahtarlama motora (SMAAM) ait mıknatıs geometrisi ve konumu ile stator ve rotor çıkıntılarında değişiklikler yapılarak yeni tasarımlar gerçekleştirilmiştir. Referans tasarım olarak daha önce literatüre sunulmuş olan üç fazlı bir SMAAM temel alınmış ve tüm motor yapılarına ait benzetim çalışmaları yapılmıştır. Adil bir kıyaslama yapılabilmesi için benzetim çalışmalarında tüm SMAAM tasarımlarında temel parametre ve kullanılan malzemeler korunmuştur. Yapılan tasarımsal değişiklikler ile kabul edilebilir tork değeri beraberinde düşük tork dalgalanması, üretim kolaylığı ve geniş hız aralığında çalışma yeterliliği elde edilmeye çalışılmıştır. Analiz çalışmaları, elektrik makinelerinin analizinde yaygın bir şekilde kullanılmakta olan ve oldukça doğru sonuçlar verebilen sonlu elemanlar yöntemi (SEY) temel alınarak gerçekleştirilmiştir. Referans alınmış olan ve tasarlanan yeni SMAAM yapılarına ait elde edilen sonuçlar kapsamlı bir şekilde karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmalar sonunda tork değerinde kabul edilebilir azalmalar görülürken tork dalgalanmasında ciddi düşüşler olduğu sonucuna varılmıştır.

Investigation of the Effects of Magnet, Stator and Rotor Geometries on Torque and Torque Ripple in Permanent Magnet Flux Switching Motor

Article Info

Araştırma makalesi
Başvuru: 11/12/2023
Düzelme: 08/01/2024
Kabul: 24/01/2024

Keywords

Permanent magnet flux
switched motor
Finite element method
Average torque
Torque ripple

Abstract

In this study, new designs have been realized by changing the magnet geometry and position, stator and rotor protrusions of a reference permanent magnet flux switching motor (PMFSM). As a reference design, a three-phase PMFSM which was previously presented in the literature, was taken as a basis and simulation studies of all motor structures were carried out. In order to make a fair comparison, the basic parameters and materials in all PMFSM designs are preserved in the simulation studies. With the design changes, it has been tried to achieve acceptable torque value, low torque ripple, ease of production and working sufficiency in a wide speed range. Analysis studies were carried out on the basis of the finite element method (FEM), which is widely used in the analysis of electrical machines and can give very accurate results. The results obtained for the referenced and designed new PMFSM structures were extensively compared. These comparisons are concluded that while acceptable decreases have been observed in the torque value, there are serious decreases in the torque ripple.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Sürekli mıknatıslı akı anahtarlama motorlar (SMAAM) yakın bir geçmişte sahip yeni bir elektrik motor çeşidi olup sürekli mıknatıslı senkron motorlar (SMSM) ile anahtarlama relüktans motorların (ARM) bir kombinasyonu olarak kabul edilmektedir [1]. Bu nedenle SMAAM'ler, hem

SMSM'lerin hem de ARM'lerin sahip olduğu yüksek güç yoğunluğu, düşük bakım maliyeti, kolay kontrol edilebilirlik ve yüksek çalışma hızı gibi avantajlara sahiptir [2-4].

SMAAM'lerin sahip olduğu diğer bir avantaj ise hem statoru hem de rotoru çıkıntılı yapıya sahip olup rotorunda sargı ya da sürekli mıknatıs

bulunmamasıdır. SMAAM'lerin sadece statorundaki çıkıntılı kutuplarda sürekli mıknatıs ve armatür sargıları bulunmaktadır [5, 6]. SMAAM'lerin sahip olduğu çift çıkıntılı yapı ve beraberinde meydana gelen akı saçılmaları nedeniyle ortaya çıkan tork dalgalanması önemli bir problem olarak karşımıza çıkmaktadır [7]. Tork dalgalanması akustik gürültüye, hızda dalgalanmaya, titreşime neden olmakta ve motor ömrünü kısaltmaktadır [8]. Dolayısıyla düşük bir tork dalgalanması beraberinde yüksek tork elde edilmesi literatürde yapılmakta olan çalışmaların temelini teşkil etmektedir. Literatürde motor tasarımı ve kontrol yöntemleri göz önünde bulundurularak tork dalgalanmasının azaltılabilemesi için yapılmış çok sayıda çalışma bulunmaktadır [8-10]. Sürekli mıknatıs (SM) geometrisinin tasarımsal optimizasyonu, geleneksel SM motorlarının tork karakteristiklerinin iyileştirilebilmesi için tercih edilen tipik bir yöntemdir [11]. Bununla birlikte, SMAAM'lerde SM'ler, stator kutuplarına yerleştirildiği için SM geometrisinin optimize edilmesi yerine rotor yapısının optimize edilmesi daha uygun bir yöntem olarak görülmektedir [7].

Bu çalışmada, Zulu vd.'nin [2], 2012 yılında geliştirdikleri SMAAM yapısı temel alınarak kolay üretilebilir özelliklerine sahip ve daha düşük tork dalgalanması sağlayabilecek yeni yapıların tasarlanması amaçlanmıştır. İlerleyen kısımlarda ortaya konan yapılardan ilki "Motor-1" ve ikincisi ise "Motor-2" olarak adlandırılmıştır. İlk tasarlanan Motor-1 yapısında, statordaki SM'lerin konumu ve geometrisi değiştirilmiş, sunulan Motor-2 yapısında ise, Motor-1 yapısına ek olarak stator ve rotor kutup başlarına çentik yapısı eklenmiştir. Referans alınan ve tasarlanan motor yapıları, adil bir karşılaştırma yapılabilmesi için aynı tasarım parametreleri ve malzemeler kullanılarak analiz edilmiştir. Tüm motor yapılarının analizleri, sonlu elemanlar yöntemi (SEY) kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

2. SÜREKLİ MIKNATISLI AKI ANAHTARLAMALI MOTORLAR (PERMANENT MAGNET FLUX SWITCHING MOTORS)

Akı anahtarlamalı motorların (AAM) hem stator hem de rotor kutupları çıkıntılı yapıya sahip olup statorunda mıknatıs bulunan akı anahtarlamalı motorlar, sürekli mıknatıslı akı anahtarlamalı motor olarak isimlendirilmektedir. SMAAM'lerin statorunda hem sürekli mıknatıslar hem de armatür sargıları bulunmaktadır. Rotorlarında ise herhangi bir sargı ya da mıknatıs bulunmamaktadır [12]. İlerleyen kısımlarda referans alınan ve önerilen SMAAM yapıları hakkında detaylar verilmiştir.

2.1. Referans Tasarım (Reference Design)

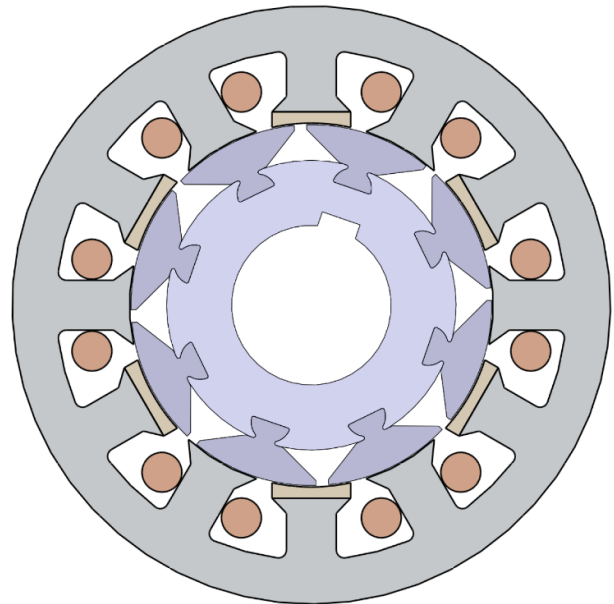
Zulu vd.'nin gerçekleştirdiği 12 stator kutbuna ve 8 segmentli rotor kutbuna sahip üç fazlı referans SMAAM yapısı Şekil 1'de gösterilmiş ve referans tasarıma ait tasarım parametreleri Tablo 1'de verilmiştir [2]. Referans alınmış olan SMAAM'nin iki boyutlu SEY ile gerçekleştirilen analizleri sonucunda elde edilen statik tork grafiği ise Şekil 2'de gösterilmiştir. Referans olarak alınan çalışmada, SEY ile elde edilen sonuçlar prototip testlerinde elde edilen sonuçlarla doğrulanmıştır [12]. Şekil 2'de gösterilen statik tork grafiğinde armatür akımı değeri sıfır iken sürekli mıknatıslar sebebiyle bir vuruş torkunun oluştuğu görülmektedir. Vuruş torku, SM içeren makinelerde stator kutuplarına yerleştirilen mıknatıslar ile rotor kutupları arasındaki manyetik etkileşim sonucu ortaya çıkmaktadır [13]. Referans motorun 500 dev/dak hızda çalışırken sahip olduğu tork grafiği ise Şekil 3'te gösterilmektedir. Armatür sargılarına uygulanan akım değerleri ise Eş. 1'de verilmiştir.

$$I_A = I_{max} \cdot \sin(\omega \cdot t)$$

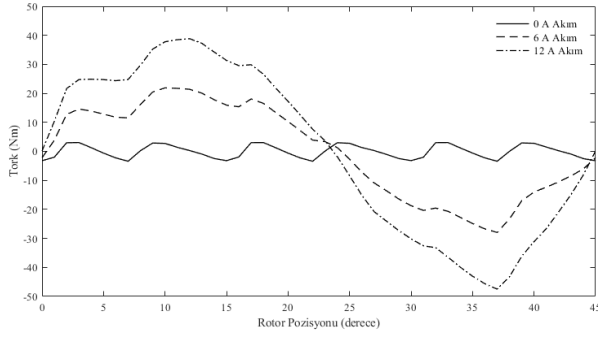
$$I_B = I_{max} \cdot \sin(\omega \cdot t - 120^\circ) \quad (1)$$

$$I_C = I_{max} \cdot \sin(\omega \cdot t - 240^\circ)$$

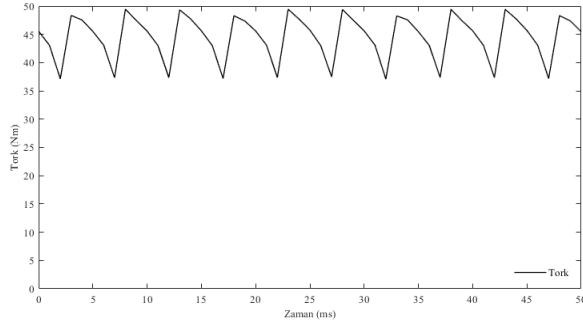
Eş. 1'deki I_A , I_B ve I_C değerleri sırasıyla A, B ve C armatür sargılarına uygulanan akım değerlerini, I_{max} maksimum akım değerini, ω açısal hızı, t ise zamanı ifade etmektedir. Eş. 2'de I_{max} değeri tanımlanırken, Eş. 3'de frekans bilgisi verilmiştir.



Şekil 1. Referans alınan SMAAM yapısı (Referenced PMFSM structure)



Şekil 2. Referans motor tasarımına ait statik tork karakteristiği (Static torque characteristic of the reference motor design)



Şekil 3. I_{max} değeri için referans motor tasarımına ait tork karakteristiği (Torque characteristic of the reference motor design for I_{max} value)

Tablo 1. Referans alınan SMAAM'ye ait tasarım parametreleri (Design parameters of the referenced PMFSM)

Eksenel uzunluk (mm)	150
Stator dış yarıçapı (mm)	75
Stator iç yarıçapı (mm)	45.6
Stator et kalınlığı (mm)	11
Stator kutup genişliği (mm)	12.5
Stator kutup açısı (°)	25
Stator kutup açıklığı açısı (°)	5
Hava aralığı (mm)	0.35
Armatür sarım sayısı (tur)	100
İletken tel çapı (mm)	1.25
İletken toplam alanı (mm ²)	491
Rotor dış yarıçapı (mm)	45.25
Rotor iç yarıçapı (mm)	30
Rotor kutup açısı (°)	41
Rotor kutup açıklığının açısı (°)	4
Mıknatıs yüzey alanı (mm ²)	62.92

Eş. 2'deki I akımı, Eş. 3'teki f frekansı, n motorun hızını, P ise rotor kutup sayısını ifade etmektedir. Eş. 4'de τ_{max} , τ_{min} ve τ_{ort} sırasıyla maksimum tork,

minimum tork ve ortalama tork değerlerini ifade etmektedir. Referans motorun 500 dev/dak hızda üretmiş olduğu ortalama tork değeri 44.5 Nm ve bu esnada ortaya çıkan tork dalgalanma değeri %27.8 olmaktadır. Tork dalgalanma değeri, Eş. 4'deki matematiksel ifade ile hesaplanmaktadır [7].

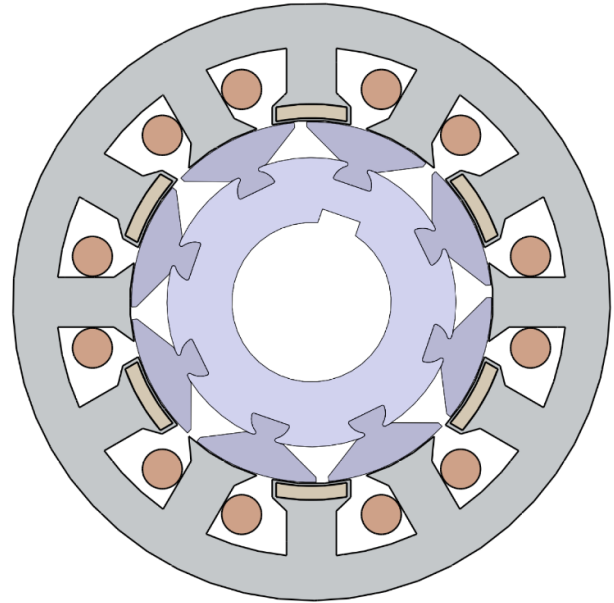
$$I_{max} = \sqrt{2} \cdot I \quad (2)$$

$$f = \frac{n \cdot P}{120} \quad (3)$$

$$\% \text{ Dalgalanma} = \frac{\tau_{max} - \tau_{min}}{\tau_{ort}} \quad (4)$$

2.2. Motor-1'in Tasarımı (Design of the Motor-1)

Referans motorda yapılan revizyon sonucunda Şekil 4'te gösterilen Motor-1 isimli ilk motor elde edilmiştir. Tasarımda daha kolay bir üretimin sağlanabilmesi adına sürekli mıknatıslar stator kutbuna gömülmüştür. Bununla birlikte adil bir karşılaştırma yapılabilmesi için referans tasarıma ait tasarım parametreleri korunmuş ve sürekli mıknatısların birim hacminin aynı kalmasına özellikle özen gösterilmiştir.



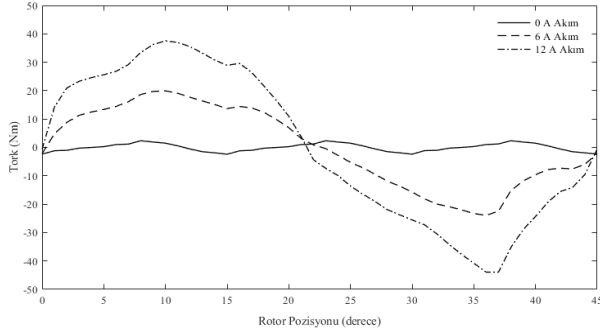
Şekil 4. Motor-1'in yapısı (Structure of Motor-1)

Motor-1 tasarımında, motora ait üretim sürecinin kolaylaştırılması hedeflenmiş olup bunun yanında motor tarafından üretilecek tork değerinin de kabul edilebilir sınırlar içerisinde kalmasına dikkat edilmiştir. Motor-1'in SEY ile analizleri sonucunda elde edilen statik tork karakteristiği Şekil 5'te gösterilmiştir.

2.3. Motor-2'nin Tasarımı (Design of the Motor-2)

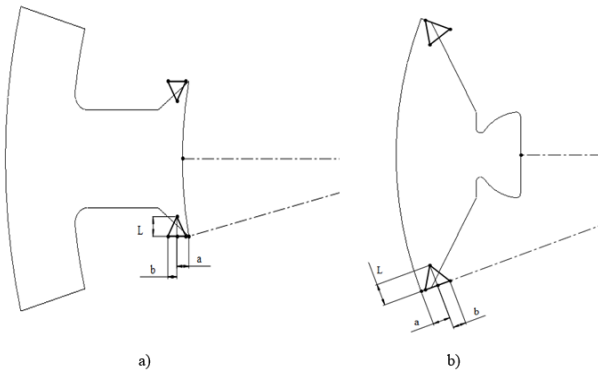
Literatürde gömülü sürekli mıknatıslarda tork dalgalanmasının azaltılabilmesi için rotora ilave

deliklerin açılması, rotor yüzeyine çentik açılması, mıknatıslar için özel cepler açılması, kademeli ve eliptik rotor kullanımı gibi farklı uygulamalar ve çalışmalar yapılmıştır [7, 14, 15]. Bunlardan birisi olan çentik açılması dikkate alınarak Motor-2 tasarımı gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5. Motor-1 tasarımına ait statik tork karakteristiği (Static torque characteristic of Motor-1 design)

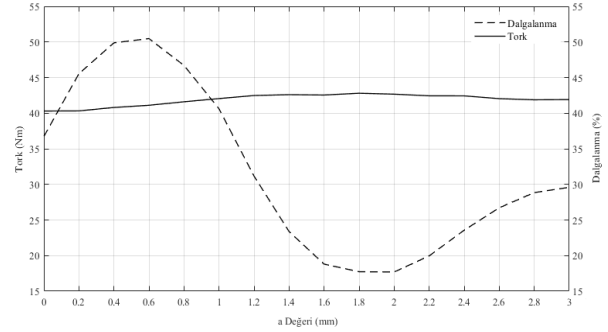
Motor-2 tasarımında, Motor-1 tasarımına ek olarak stator ve rotor kutup başlarında çentik yapısı oluşturulmuştur. Şekil 6'da çentik yapısını belirleyen a , b ve L parametreleri gösterilmiştir. Daha iyi tork karakteristiklerinin elde edilebilmesi için çentiğin geometrisi ve konumu değiştirilerek revizyonlar yapılmıştır. Burada a çentiğin en uç noktaya olan mesafesini, b çentik genişliğini, L ise çentik derinliğini ifade etmekte olup ilgili parametreler için yapılan çalışmalar sonucunda tasarımsal uygunluk göz önüne alınarak belirli referans aralıklar belirlenmiştir.



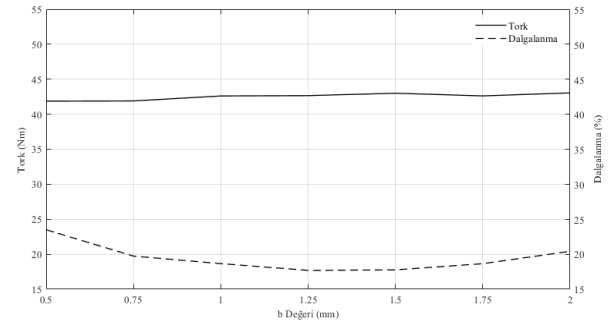
Şekil 6. Motor-2 tasarımına ait çentik geometri parametreleri a) Stator kutbu b) Rotor kutbu (Notch geometry parameters of Motor-2 design a) Stator pole b) Rotor pole)

Vuruntu torku üzerinde büyük bir etkiye sahip olduğundan, çentiğin konumu kutup başlarından çok uzakta olmamalıdır, bu nedenle a parametresinin değeri 0 mm ile 3 mm aralığında seçilmiştir. Ayrıca çentiklerin kutupların yanlarında bulunması beraberinde çentik derinliği ve çentik genişliği manyetik relüktansı doğrudan etkilediğinden daha yüksek ortalama tork elde

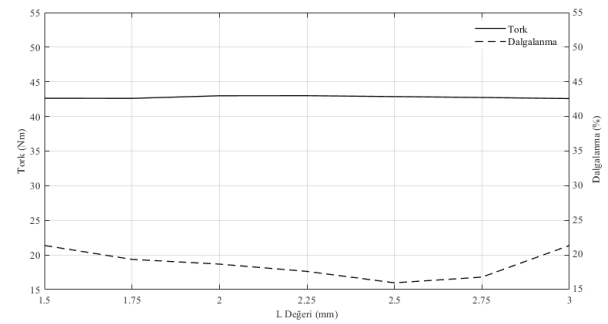
edilebilmesi için çentik derinliği ve çentik genişliği küçük olmalıdır [16]. Bu çalışmada L değeri 1.5 mm ile 3 mm aralığında, b ise 0.5 mm ile 2 mm aralığında seçilmiştir.



Şekil 7. a parametresinin farklı değerleri için elde edilen tork ve dalgalanma karakteristiği (Torque and ripple characteristics obtained for different values of parameter a)



Şekil 8. b parametresinin farklı değerleri için elde edilen tork ve dalgalanma karakteristiği (Torque and ripple characteristics obtained for different values of the b parameter)



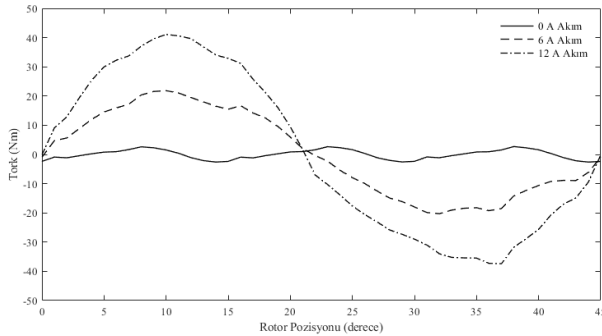
Şekil 9. L parametresinin farklı değerleri için elde edilen tork ve dalgalanma karakteristiği (Torque and ripple characteristics obtained for different values of the L parameter)

İlk olarak en düşük tork dalgalanmasının sağlanabilmesi amacıyla a parametresinin en uygun değerinin belirlenebilmesi için $b=1.25$ mm ve $L=2.2$ mm değerleri dikkate alınmıştır. 0 mm ile 3 mm arasında a değerinin 0.2 mm aralıklarla değiştirilmesi suretiyle uygulanan 2B SEY analizleri sonucunda elde edilen tork ve tork dalgalanması karakteristikleri Şekil 7'de gösterilmiştir. Şekil 7'den görülebileceği üzere $a=2$ mm değerinde yalnızca %4.3 oranında azalan

ortalama tork karşılık tork dalgalanması minimum değerine sahip olmaktadır.

Benzer şekilde, b parametresinin en uygun değerinin belirlenebilmesi için; $a=2$ mm ve $L=2.2$ mm değerleri sabit tutulmuştur. 0.5-2 mm arasında olan b parametresinin değeri 0.25 mm aralıklarla değiştirilerek yapılan 2B SEY analizleri sonunda elde edilen tork ve tork dalgalanma karakteristiği Şekil 8'de gösterilmiştir. Tork dalgalanmasının minimum değeri b parametresi 1.5 mm iken elde edilmiştir. Son olarak, $a=2$ mm ve $b=1.5$ mm değerleri sabit tutularak L parametresine ait değerler 0.25 mm aralıklarla 1.5 mm'den 3 mm'ye kadar değiştirilerek 2B SEY analizleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan analizler neticesinde, Şekil 9'daki tork ve tork dalgalanma karakteristiğinden $L=2.5$ mm değerinde tork dalgalanmasının minimum olduğu sonucu elde edilmiştir.

Gerçekleştirilen çalışmalarda, tork dalgalanması hususunda optimum sonuçları veren parametre değerlerinin elde edilmesine çalışılmış olup a , b ve L parametrelerine ait bu değerler sırasıyla 2.0 mm, 1.5 mm ve 2.5 mm olarak tespit edilmiştir. İlgili çentik parametre değerleri ile tasarlanan Motor-2 yapısına ait statik tork karakteristikleri Şekil 10'da gösterilmiştir.



Şekil 10. Motor-2 tasarımına ait statik tork karakteristiği (Static torque characteristic of the Motor-2 design)

3. BENZETİM SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ (EVALUATION OF SIMULATION RESULTS)

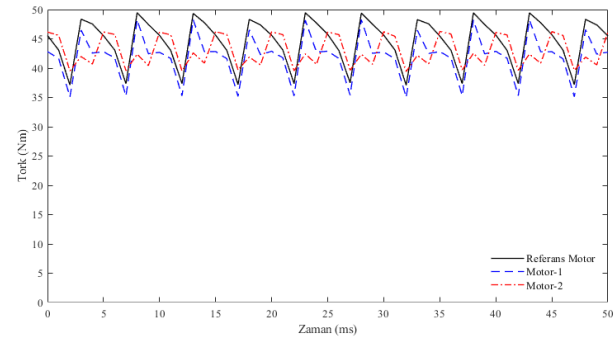
Tablo 2'de özetlendiği üzere, referans alınan motor ile kıyaslandığında; tasarlanan iki motor yapısında da ortalama tork değerinde düşüş olduğu gözlenmiştir. Tablo 2'den de açıkça görülebileceği üzere motor üretiminin kolay bir şekilde yapılabilmesi adına gerçekleştirilen ilk tasarımda ortalama tork ve tork dalgalanması ile ilgili olumsuzluklar meydana gelmiştir. Yapılan ilk tasarımın bu dezavantajlarını ortadan kaldırmak için yapılan ikinci tasarımda ise ilk tasarıma göre bir miktar ortalama tork değerinde iyileşme sağlanmış

olsa dahi referans tasarımdan daha düşük bir ortalama tork değeri elde edilmiştir. Buna karşın tork dalgalanması ile ilgili her iki motora göre çok ciddi avantajlar sağlanmıştır.

Tablo 2. Motorların analiz sonuçlarının karşılaştırması (Comparison of engine analysis results)

SMAAM Çeşidi	Ortalama Tork (Nm)	Değişim (%)	Tork Dalgalanması (%)	Değişim (%)
Referans	44.5	0.0	27.8	0.0
Motor-1	42.0	-5.6	31.5	13.3
Motor-2	42.6	-4.3	16.7	-39.9

Motorlar, 500 dev/dak nominal hızda çalışırken elde edilen tork karakteristikleri Şekil 11'de karşılaştırılmıştır.



Şekil 11. I_{max} değeri için referans tasarım ve gerçekleştirilen tasarımların tork grafiği (Torque graph of reference design and realized designs for I_{max} value)

Gerek Tablo 2'de verilen değerler gerekse de Şekil 11'de gösterilen grafikler incelendiğinde Motor-2 tasarımın tork dalgalanmasında çok önemli bir iyileşme sağladığı görülmektedir. Özellikle segmental yapıda olan tasarımlarda tork dalgalanmasının çok ciddi bir problem olduğu düşünüldüğünde Motor-2 tasarımının sunduğu bu avantaj ile önemli bir alternatif sağladığı görülmektedir. Literatürde yapılan örnek bir çentik uygulamasında tork dalgalanma değerinde %37.2'lik bir azalma tespit edilmişken [7], bu çalışmadaki çentik uygulamasında da %39.9'luk bir azalma elde edilmiştir. Literatürde aynı amaçla yapılan farklı çalışmalarla karşılaştırıldığında bu çalışmadaki elde edilen sonuçların kabul edilebilir olduğu görülmektedir.

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada, klasik SMAAM'lerden farklı olan radyal eksenli mıknatısa sahip 12 stator kutuplu ve

8 rotor kutuplu daha önceden literatüre sunulmuş olan bir SMAAM referans alınarak tasarımlar gerçekleştirilmiştir. Referans alınan SMAAM üzerinde üretimin daha kolay olarak gerçekleştirilebilmesi için mıknatıs geometrisi ile konumu değiştirilmiştir. Tork dalgalanmasının azaltılabilmesi için ise kutup başlarına çentik uygulaması yapılmış ve iki yeni motor tasarımı gerçekleştirilmiştir. Tasarımlar, sonlu eleman analizleri neticesinde elde edilen ortalama tork ve tork dalgalanması değerleri dikkate alınarak karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak, ortalama tork açısından değerlendirildiğinde referans tasarımın gerisinde kaldığı görülen yeni tasarımlarda özellikle çentik uygulamasının tork dalgalanmasını ciddi oranda düşürdüğü sonucuna ulaşılmıştır.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

Çalışma herhangi bir araştırma kurumundan veya fonundan destek almamıştır.

The study received no support from any research institution or fund.

ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazarı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

The author of this article declares that the materials and methods they use in their work do not require ethical committee approval and/or legal-specific permission.

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

Sümeyye ÇARKIT: Analizleri yapmış, sonuçları değerlendirmiş ve makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

She conducted the analysis, evaluated the results, and performed the writing process.

Nurettin ÜSTKOYUNCU: Sonuçları analiz etmiş, makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiş ve akademik danışmanlığını yapmıştır.

He analyzed the results, wrote the article, and served as its academic advisor.

Taner ÇARKIT: Sonuçları analiz etmiş, makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiş ve yazım kurallarını kontrol etmiştir.

He analyzed the results, wrote the article, and checked the writing rules.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

There is no conflict of interest in this study.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] İlhan E, Paulides JJH, Lomonova EA. Fast torque estimation of in-wheel parallel flux switching machines for hybrid trucks. *COMPEL International Journal of Computations and Mathematics in Electrical*. 2011; 31(1): 40-53.
- [2] Zulu A, Mecrow BC, Armstrong M. Permanent-magnet flux-switching synchronous motor employing a segmental rotor. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2012; 48(6): 2259-2267.
- [3] Somesan L, Padurariu E, Viorel I, A, Szabo L. Design of a permanent magnet flux-switching machine. 9th International Conference Elektro. 2012; 256-259.
- [4] Eduku S, Chen Q, Xu G, Liu G, Liao J, Zhang X. A new fault-tolerant rotor permanent magnet flux-switching motor. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*. 2022; 8(3): 3606-3617.
- [5] Kamil KR, Kamil JI, Wang QC. Optimization of flux switching permanent magnet motor to enhance the traction of an electric vehicle. 12th International Renewable Energy Congress. 2021; 1-6.
- [6] Üstkoyuncu N, Eroğul O. Anahtarlamalı relüktans motor tabanlı medikal santrifüj sistemi. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C*. 2018; 6(1): 536-543.
- [7] Zhao J, Yan Y, Li B, Liu X, Chen Z. Influence of different rotor teeth shapes on the performance of flux switching permanent magnet machines used for electric vehicles. *Energies*. 2014; 7(12): 8056-8075.
- [8] Khan B, Khan F, Ullah W, Ullah B, Hussam S. Torque ripples reduction and performance analysis of electrically excited flux switching motor. *IEEE Access*. 2022; 10: 4307-4317.
- [9] Fei W, Luk PCK, Shen J. Torque analysis of permanent-magnet flux switching machines with rotor step skewing. *IEEE Transactions on Magnetics*. 2012; 48: 2664-2673.
- [10] Wang Y, Geng L, Hao W, Xiao W. Improved control strategy for fault-tolerant flux-switching permanent-magnet machine under short-circuit condition. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2019; 34(5): 4536-4557.

- [11] Zhao W, Lipo TA, Kwon B. Material-efficient permanent-magnet shape for torque pulsation minimization in SPM motors for automotive applications. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2014; 61: 5779-5787.
- [12] Zulu A. Flux switching machines using segmental rotors. PhD Thesis, Newcastle University, United Kingdom. 2010; 250.
- [13] Saygın A, Aksöz A. Aynı fiziksel ve elektromanyetik parametreler altında EASMSM ve ORSMSM'un vuruuntu torkuna göre karşılaştırılması. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*. 2018; 6(3): 659-667.
- [14] Kioumarsı A, Moallem M, Fahimi B. Mitigation of torque ripple in interior permanent magnet motors by optimal shape design. *IEEE Transactions on Magnetics*. 2006; 42(11): 3706-3711.
- [15] Yamazaki K, Kumaga M, Ikemi T, Ohki S. A novel rotor design of interior permanent-magnet synchronous motors to cope with both maximum torque and iron-loss reduction. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2013; 49(6): 2478-2486.
- [16] Çarkıt S. Elektrikli araç tahrik sistemleri için akı anahtarlamaalı motor tasarımı. Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri. 2020; 84.



Determination of Solar Radiation Value by Month Using Artificial Neural Network Model; Ankara, Sivas, Erzurum example

Sinem UZUN^{1*} , Hatice ARSLANTAŞ¹

¹Erzincan Binali Yıldırım University, Faculty of Engineering and Architecture, Erzincan, Türkiye

Article Info

Research article
Received: 16/01/2024
Revision: 15/02/2024
Accepted: 19/02/2024

Keywords

Artificial neural network
Latitude
Meteorological datas
Solar radiation

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 16/01/2024
Düzeltilme: 15/02/2024
Kabul: 19/02/2024

Anahtar Kelimeler

Yapay sinir ağı
Enlem
Meteorolojik veriler
Güneş radyasyonu

Graphical/Tabular Abstract (Grafik Özet)

This study examines the estimation of solar radiation using artificial neural network (ANN) models in Turkish cities with similar latitude values such as Ankara, Sivas and Erzurum. The aim of the study is to investigate whether cities at similar latitudes exhibit similar trends in solar radiation values, despite their geographical differences. In the study, solar radiation was estimated with a multilayer neural network. / Bu çalışma, Ankara, Sivas ve Erzurum gibi benzer enlem değerlerine sahip Türkiye şehirlerinde yapay sinir ağı (YSA) modellerini kullanarak güneş ışınımının tahmin edilmesini incelemektedir. Çalışmanın amacı, coğrafi farklılıklarına rağmen, benzer enlemdeki şehirlerin güneş ışınımı değerlerinde benzer eğilimler sergileyip sergilemediğini araştırmaktır. Çalışmada çok katmanlı sinir ağı ile güneş ışınımı tahmini yapılmıştır.

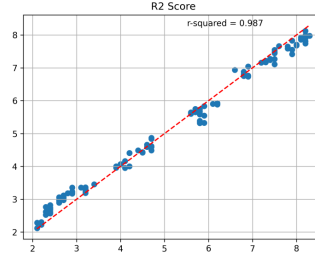


Figure A: R2 score value /Şekil A: R2 skor değeri

Highlights (Önemli noktalar)

- 70% of the data set is allocated to training and 30% to testing data set. / Veri setinin %70'i eğitim, %30'u ise test veri setine ayrılmıştır.
- Similar solar radiation trends were obtained in the same latitude regions. / Aynı enlem bölgelerinde benzer güneş ışınımı eğilimleri elde edilmiştir.
- R2 value was determined as 0.984. / R2 değeri 0,984 olarak belirlenmiştir.

Aim (Amaç): The aim of this study is to investigate whether cities at similar latitudes exhibit similar trends in solar radiation values, despite their geographical differences./ Bu çalışmanın amacı, coğrafi farklılıklarına rağmen, benzer enlemdeki şehirlerin güneş ışınımı değerlerinde benzer eğilimler sergileyip sergilemediğini araştırmaktır.

Originality (Özgünlük): This study was carried out for Ankara, Sivas and Erzurum, which have similar latitude values./ Benzer enlem değerlerine sahip Ankara, Sivas ve Erzurum için bu çalışma gerçekleştirilmiştir.

Results (Bulgular): As a result, similar solar radiation trends were obtained in the same latitude regions, the results were confirmed by meteorological data. While the solar radiation value taken from meteorological data for Ankara in July was 8.2 kWh/m²d, this value was obtained as approximately 7.9 kWh/m²d with the artificial neural network model./ Sonuç olarak, aynı enlem bölgelerinde benzer güneş ışınımı eğilimleri elde edilmiş, sonuçlar meteorolojik veriler ile doğrulanmıştır. Temmuz ayında Ankara için meteorolojik verilerden alınan solar radyasyon değeri 8.2 kWh/m²d iken yapay sinir ağı modeli ile bu değer yaklaşık 7.9 kWh/m²d olarak elde edilmiştir.

Conclusion (Sonuç): The analyzes revealed the ability of the ANN model to successfully predict solar radiation values. Agreement between predicted values and measured values was observed, indicating that the model has wide applicability in different climatic conditions. The results obtained from this study show that the ANN method can be used effectively in estimating solar radiation values./ Analizler, YSA modelinin güneş ışınım değerlerini başarılı bir şekilde tahmin etme yeteneğini ortaya çıkardı. Tahmin edilen değerler ile ölçülen değerler arasında uyumun gözlenmesi, modelin farklı iklim koşullarında geniş uygulanabilirliğe sahip olduğunu göstermektedir. Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar, güneş ışınımı değerlerinin tahmin edilmesinde YSA yönteminin etkin bir şekilde kullanılabileceğini göstermektedir.



Determination of Solar Radiation Value by Month Using Artificial Neural Network Model; Ankara, Sivas, Erzurum example

Sinem UZUN^{1*} , Hatice ARSLANTAŞ¹ ¹Erzincan Binali Yıldırım University, Faculty of Engineering and Architecture, Erzincan, Türkiye

Article Info

Research article

Received: 16/01/2024

Revision: 15/02/2024

Accepted: 19/02/2024

Keywords

Artificial neural network

Latitude

Meteorological data

Solar radiation

Abstract

This research examines the estimation of solar radiation using artificial neural network (ANN) models in Turkish cities with similar latitude values such as Ankara, Sivas and Erzurum. The aim of this study is to investigate whether cities at similar latitudes exhibit similar trends in solar radiation values, despite their geographical differences. In this study, solar radiation prediction was made for 3 cities with a multi layer perceptron neural network. Monthly solar radiation intensity was estimated for the 10-year period between 2012 and 2022 with a total of 4764 samples taken from the General Directorate of State Meteorology. An artificial neural network model was developed with 8 neurons in the first hidden layer and 4 neurons in the second hidden layer. The optimizer used in compiling the model was determined as Adam, the loss function as 'mean_squared_error' and the metric as 'mse'. ReLU activation function was used in the input layer and hidden layers. A 10-year solar radiation intensity value was used in the output layer. 70% of the data set is reserved for training and 30% for testing data set. As a result, similar solar radiation trends were obtained in the same latitude regions, the results were confirmed by meteorological data. While the solar radiation value taken from meteorological data for Ankara in July was 8.2 kWh/m²d, this value was obtained as approximately 7.9 kWh/m²d with the artificial neural network model. Additionally, as a result of the study, the R2 value was determined as 0.984.

Yapay Sinir Ağı Modeli Kullanılarak Aylara Göre Güneş Radyasyon Değerinin Belirlenmesi; Ankara, Sivas, Erzurum örneği

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi

Başvuru: 16/01/2024

Düzeltilme: 15/02/2024

Kabul: 19/02/2024

Anahtar Kelimeler

Yapay sinir ağı

Enlem

Meteorolojik veriler

Güneş radyasyonu

Öz

Bu araştırma, Ankara, Sivas ve Erzurum gibi benzer enlem değerlerine sahip Türkiye şehirlerinde yapay sinir ağı (YSA) modellerini kullanarak güneş ışınımının tahmin edilmesini incelemektedir. Bu çalışmanın amacı, coğrafi farklılıklarına rağmen, benzer enlemdaki şehirlerin güneş ışınımı değerlerinde benzer eğilimler sergileyip sergilemediğini araştırmaktır. Bu çalışmada çok katmanlı sinir ağı ile 3 şehir için güneş ışınımı tahmini yapılmıştır. Devlet Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nden alınan toplam 4764 numune ile 2012-2022 yılları arasındaki 10 yıllık süre için aylık güneş radyasyon yoğunluğu tahmin edilmiştir. İlk gizli katmanda 8 nöron, ikinci gizli katmanda 4 nöron bulunan bir yapay sinir ağı modeli geliştirilmiş ve Modelin derlenmesinde kullanılan optimizasyon fonksiyonu Adam, kayıp fonksiyonu 'mean_squared_error' ve metrik ise 'mse' olarak belirlenmiştir. Giriş katmanında ve gizli katmanlarda ReLU aktivasyon fonksiyonu kullanılmıştır. Çıkış katmanında 10 yıllık güneş ışınım şiddeti değeri kullanılmıştır. Veri setinin %70'i eğitim, %30'u ise test veri setine ayrılmıştır. Sonuç olarak, aynı enlem bölgelerinde benzer güneş ışınımı eğilimleri elde edilmiş, sonuçlar meteorolojik veriler ile doğrulanmıştır. Temmuz ayında Ankara için meteorolojik verilerden alınan solar radyasyon değeri 8.2 kWh/m²d iken yapay sinir ağı modeli ile bu değer yaklaşık 7.9 kWh/m²d olarak elde edilmiştir. Ayrıca çalışmanın sonucunda, R2 değeri 0,984 olarak belirlenmiştir.

1. INTRODUCTION (GİRİŞ)

Solar energy is an important resource to meet the increasing energy needs in the world [1]. It has many advantages (unlike fossil fuels) such as being an unlimited and renewable resource, being environmentally friendly, having low maintenance

costs, being able to produce and use electricity in a wider geographical area so that there is no need to lay energy transmission lines over long distances and being produced locally increases energy independence [2-4].

With the developing technology in recent years, the use of artificial intelligence and related artificial neural network models has also increased. Artificial neural networks have begun to be used in many applications, from neurological rehabilitation studies [5] to air pollution prediction [6], from economic studies [7-9] to student achievement evaluation [10]. Another important area where artificial neural network models are used is climate and weather studies. For example, in the study conducted for Muğla province, an artificial neural network model based on meteorological data was used to predict the dew point temperature in 2019. The analyzes show that the model makes predictions with acceptable accuracy and can be especially useful for agriculture. This study highlights that artificial neural networks are an effective tool for making dew point prediction for a specific region and meteorological parameters and can be used for similar predictions in the future [11].

In another study, by using Artificial Neural Network (ANN) to predict daily solar radiation in the Samsun region, the highest performance was achieved with 9 different meteorological variables such as average temperature, humidity and wind speed. When evaluated with the test data, the ANN model demonstrated successful prediction power with an R value of 0.9603 and an MSE value of 0.3516 and it was seen that the sunshine duration alone was effective in the prediction. This study reveals that ANN is a powerful tool in solar radiation prediction and can improve the prediction performance of different meteorological variables [12].

In the study, which aims to develop Artificial Neural Network (ANN) models to predict the soil temperature of the next year with monthly meteorological data between 1970 and 2011 collected from 88 stations in Turkey, five separate ANN models were used for five different soil depths. And the resulting predictions are more accurate and closer to actual measured soil temperatures than regression models [13].

Researchers examined the artificial neural network model developed for Slovenia for different climates and predicted half-hour diffuse solar radiation. This study provides one of the first examples of a regionally transferable diffuse solar radiation model [14].

There are also studies using artificial neural network models for power estimation in photovoltaic panels [15] and comparison of thermal efficiencies of solar collectors [16].

Radiation prediction studies using artificial neural network modeling have also gained momentum. A study on the subject developed [17] a model that estimates solar radiation values using data obtained from a small-scale solar power plant in Konya and information from meteorology. The model predicted solar radiation with 86% accuracy using the data recorded at the power plant and the voltage and power values obtained from the PV panel. Again, in a study conducted to estimate solar radiation, an artificial neural network (ANN) was used with meteorological data collected from a weather station in Porto. The analysis reveals that ANN can predict solar radiation in different weather conditions with an accuracy of up to 99% in sunny and clear weather and in rainy and cloudy weather conditions with up to 96% accuracy [18]. The common result obtained from many studies [19-22] conducted for solar radiation prediction is that artificial neural network modeling gives results very close to meteorological data.

In climate and weather studies such as weather forecasting, ANNs are often trained to predict future weather conditions using a variety of meteorological data such as current weather conditions, temperature, humidity, wind speed and direction. By analyzing historical data, such models learn certain patterns and can make predictions for future weather. Since artificial neural network models were very effective in determining solar radiation in previous studies, within the scope of this study, radiation estimation for some cities in Turkey was made with the artificial neural network model. The cities discussed are Ankara, Sivas and Erzurum. These three cities considered have similar latitude values. The aim of this study is; to investigate whether solar radiation values of cities at the same latitude show similar trends.

2. MATERIALS AND METHODS (MATERIALS AND METHODS)

Turkey is a country that is generally exposed to high amounts of sunlight throughout the year. In most parts of the country, the number of sunny days is quite high and the average annual sunshine duration is quite high. This shows that Turkey is a rich source of solar radiation and has a high solar energy potential. While this potential creates a favorable environment for the installation and use of solar energy systems in the country, it is considered an important resource in terms of energy production and sustainability. A map representation of the distribution of Turkey's monthly average daily solar radiation is given in Figure 1 [23].

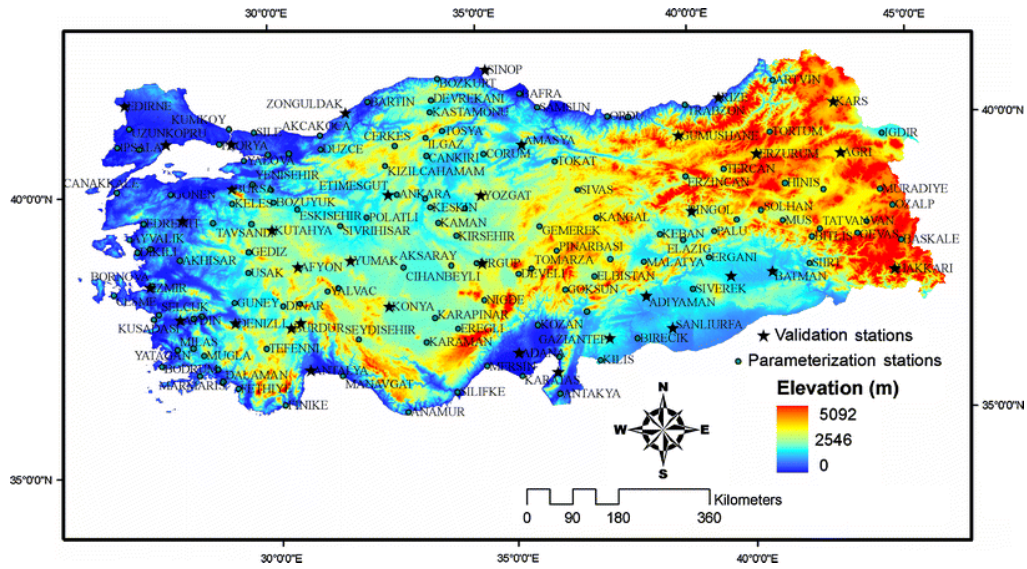


Figure 1. Distribution of monthly average daily solar radiation (Aylık ortalama günlük güneş ışınımının dağılımı)

In this study, the climate data and radiation intensity of the cities of Ankara, Sivas and Erzurum, located at similar latitude values, were determined. Ankara, Erzurum and Sivas have similar latitude values and

their latitude values are shown in Table 1. Location of Ankara, Sivas and Erzurum on the map of Türkiye is shown in Figure 2.

Table 1. Latitude information of cities (Şehirlerin enlem bilgileri)

City	Latitude
Ankara	39°54' N
Sivas	39°45' N
Erzurum	39°55' N



Figure 2. Location of Ankara, Sivas and Erzurum on the map of Türkiye (Ankara, Sivas ve Erzurum'un Türkiye Haritasındaki Konumu)

Apart from latitude, other data considered are longitude and altitude values. The largest part of the data set consists of climate data. This climate data; average temperature, average highest and lowest

temperature, number of rainy days, average monthly total rainfall, sunshine duration, cloudiness index and wind speed values. The averages of the climate data discussed in the study are shown in

Table 2. Within the scope of this study, all climate data of the last 10 years, that is, between 2012 and 2022, were considered. However, since this amounts to a lot of data, Table 2 gives the average

values of the climate data considered for the three cities. The three lines next to each value represent the values for Ankara, Sivas and Erzurum, respectively.

Table 2. Climate data for Ankara, Sivas and Erzurum (Ankara, Sivas ve Erzurum için iklim verileri)

Parameter	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	July	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	City
Average temperature (°C)	-1	1	5	10	15	19	23	23	18	12	5	1	Ankara
	-1	-0	5	11	15	19	22	22	18	13	6	1	Sivas
	-10	-8	-3	4	9	14	18	18	13	7	-1	-7	Erzurum
Ave. highest temperature (°C)	4	6	11	16	21	26	30	29	25	19	11	5	Ankara
	2	4	10	16	21	25	29	30	26	19	11	5	Sivas
	-4	-3	2	10	16	21	25	26	21	14	5	-2	Erzurum
Ave. lowest temperature (°C)	-5	-4	-1	4	8	12	15	15	10	5	0	-3	Ankara
	-5	-4	0	5	9	12	15	14	11	7	1	-3	Sivas
	-15	-14	-8	-2	2	6	9	9	4	-1	-6	-12	Erzurum
Precipitation (day)	5.4	4.9	5.7	6.3	6.5	4.8	2.4	1.8	2.5	4.2	4.7	5.9	Ankara
	5.0	5.0	6.4	7.5	8.2	4.6	1.5	1.1	2.4	4.9	5.4	5.5	Sivas
	3.7	4.0	5.1	8.1	8.6	5.0	2.5	1.8	3.3	5.9	4.8	4.0	Erzurum
Average monthly total rainfall (mm)	0.9	0.8	0.9	1.3	1.3	1.0	0.5	0.4	0.5	0.9	1.0	1.1	Ankara
	20.6	19.7	27	39.5	40.8	22.5	7.7	4.1	11.7	29.5	32.9	25.9	Sivas
	1.6	2.5	13.3	35.5	45.8	26.9	13.1	9.1	18.8	33.2	20.8	5.3	Erzurum
Sunshine duration (hour)	9.7	10.7	12.0	13.3	14.4	15.0	14.7	13.7	12.4	11.1	10.0	9.4	Ankara
	9.7	10.7	12.0	13.3	14.4	14.9	14.6	13.7	12.4	11.1	10.0	9.4	Sivas
	9.7	10.7	12	13.3	14.4	15	14.7	13.7	12.4	11.1	10	9.4	Erzurum
Cloudiness index (%)	50	50	47	43	33	15	4	3	15	35	46	52	Ankara
	52	54	50	47	37	16	3	3	16	40	48	53	Sivas
	47	48	48	49	38	14	3	2	13	36	44	46	Erzurum
Wind speed (m/s)	3.1	3.5	3.5	3.2	2.9	3	3.3	3.3	3	2.9	2.9	3.1	Ankara
	4.3	4.5	4.3	3.9	3.3	3.6	4.2	4	3.4	3.3	3.7	4.2	Sivas
	3.3	3.5	3.7	3.7	3.1	3	3.3	3	2.9	2.9	3	3.1	Erzurum

The method of this study is based on the use of artificial neural network. Artificial neural networks (ANNs) are one of the artificial intelligence models that mimic the functioning of the human brain. In data analytics and prediction, artificial neural networks are very important in determining future trends.

In this study, solar radiation prediction was made for 3 cities with a multi layer perceptron neural network. Monthly solar radiation intensity was estimated for the 10 years between 2012 and 2022 with a total of 4764 samples taken from Turkish State Meteorological Service [24]. The proposed ANN model is shown in Figure 3. The model in this study is designed for a regression problem with 11 features in the input. These features; year, month, city, temperature, highest temperature, lowest

temperature, number of rainy days, total rainfall average, sunshine duration, cloudiness index and wind speed values. There are 8 neurons in the first hidden layer and 4 neurons in the second hidden layer. The Dropout layer is added before the output layer to prevent network overfitting. The optimizer used in compiling the model was determined as Adam, the loss function as 'mean_squared_error' and the metric as 'mse'. ReLU activation function was used in the input layer and hidden layers. In the output layer, the solar radiation intensity value for 10 years was used. 70% of the data set is divided into training and 30% is divided into testing data set. Data are normalized between [-1, 1] with min max normalization. The model was trained for 50 epochs. The trained network was tested with the test dataset.

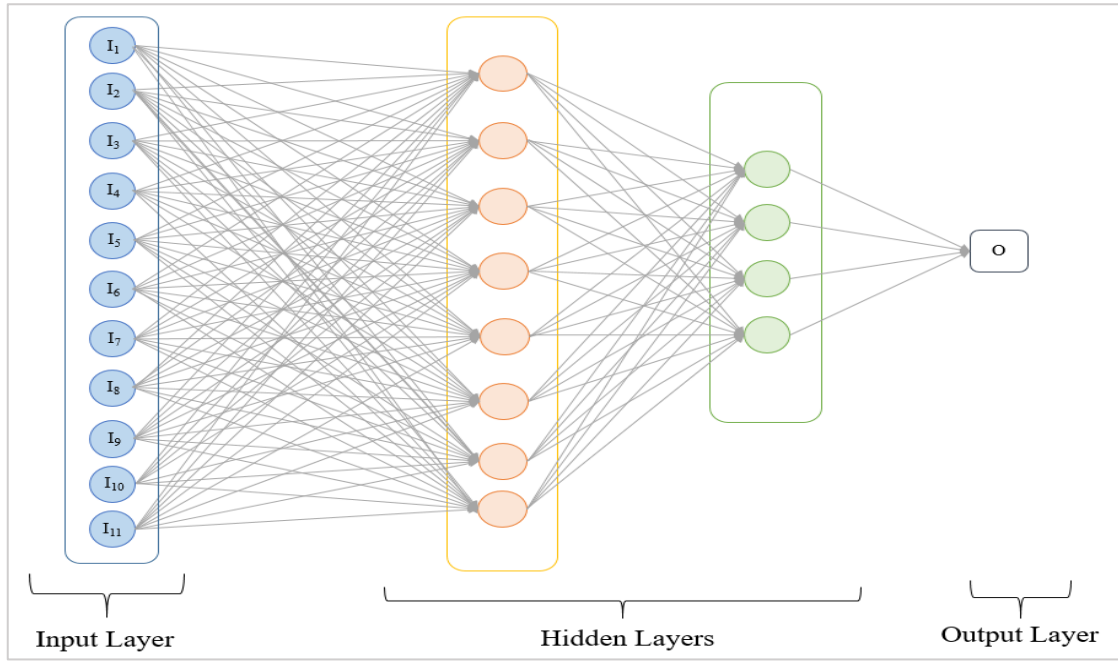


Figure 3. Proposed Artificial neural network model (Önerilen Yapay sinir ağı modeli)

To evaluate the performance of the model, Mean Absolute Error (MAE) (Eq.1), Mean Squared Error (MSE) (Eq.2), and Correlation Coefficient (R2) (Eq.3) [25] metrics were used. While the correlation coefficient R shows the relationship between variables, MSE measures the predictive performance of the model. Both are used in analysis to help evaluate model accuracy and relationships.

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_{true,i} - y_{pred,i}| \quad (1)$$

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_{true,i} - y_{pred,i})^2 \quad (2)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_{true,i} - y_{pred,i})^2}{\sum_{i=1}^n (y_{true,i} - \bar{y}_{true})^2} \quad (3)$$

3. RESULTS (BULGULAR)

Within the scope of the study, radiation exposure was estimated for three different cities with similar latitude values. Comparative graphics were obtained with Turkish Meteorological Service (TMS) data. Figure 4 shows how the model's loss changes for each epoch during training. The loss of the model decreased and became almost constant after 25 epochs. Figure 5 shows the comparison of

the solar radiation value obtained by the ANN model with the TMS for Ankara. Accordingly, just like in TMS, the month with the highest solar radiation was determined as July. And the solar radiation value here is approximately 8.2 kWh/m²d. Similarly, the month with the lowest solar radiation is December and the solar radiation value here is approximately 2.4 kWh/m²d.

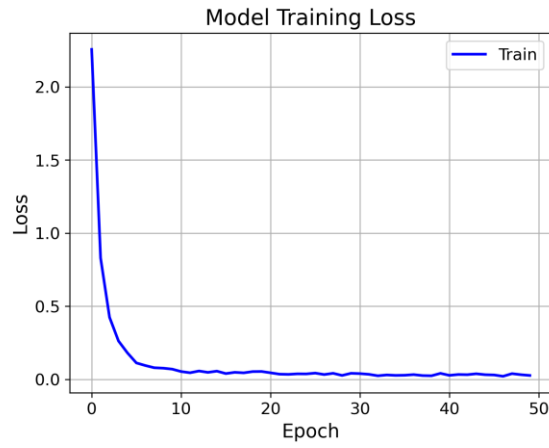


Figure 4. Model train loss graph (Model eğitim kayıp grafiği)

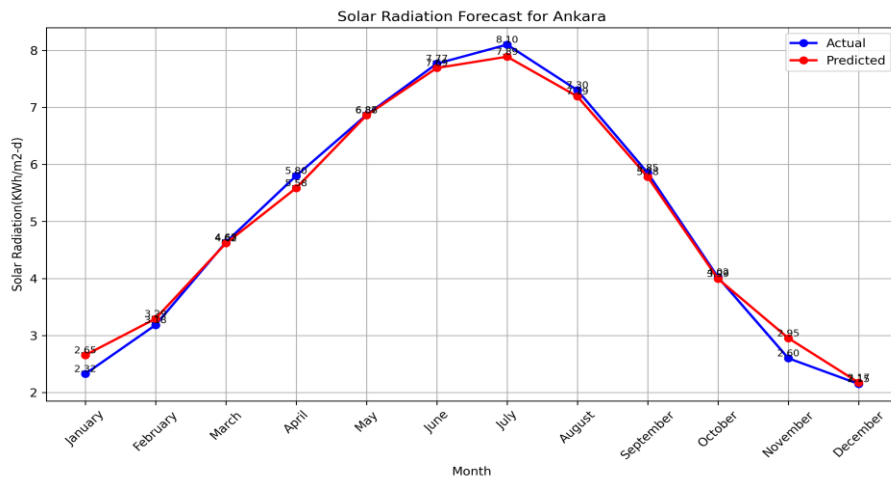


Figure 5. Monthly solar radiation values for Ankara (Ankara için aylık güneş radyasyon değerleri)

Figures 6 and 7 show monthly solar radiation values for Sivas and Erzurum provinces. Just like in Ankara, the ANN model was compatible with TMS

data in these cities. In previous similar studies, the artificial neural network model was compatible with the reference [26].

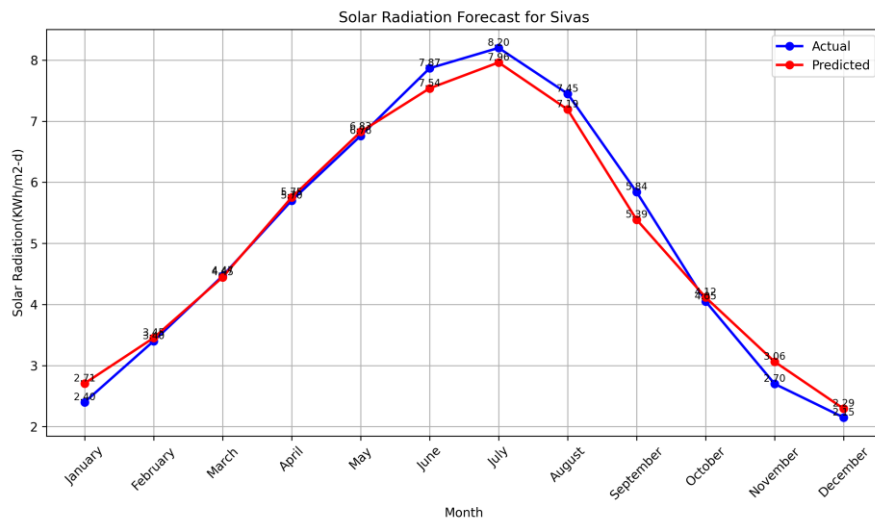


Figure 6. Monthly solar radiation values for Sivas (Sivas için aylık güneş radyasyon değerleri)

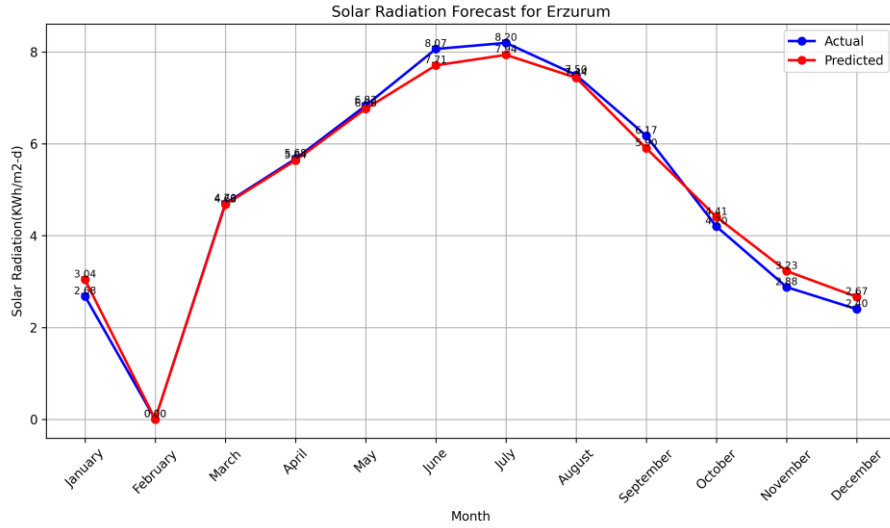


Figure 7. Monthly solar radiation values for Erzurum (Erzurum için aylık güneş radyasyon değerleri)

Artificial neural network (ANN) modeling is often used for regression problems. Regression is the process of using input variables to predict an output variable. The R2 score is a commonly used metric to evaluate the performance of regression models and is important for understanding how well the model makes predictions. The higher the R2 value,

the better the model fits the real data. An R2 value approaching 1 means that the model explains the dependent variable perfectly. The R2 value of 0.984 shown in Figure 8 is a very high value and shows that the model explains a large part of the variance in the data set.

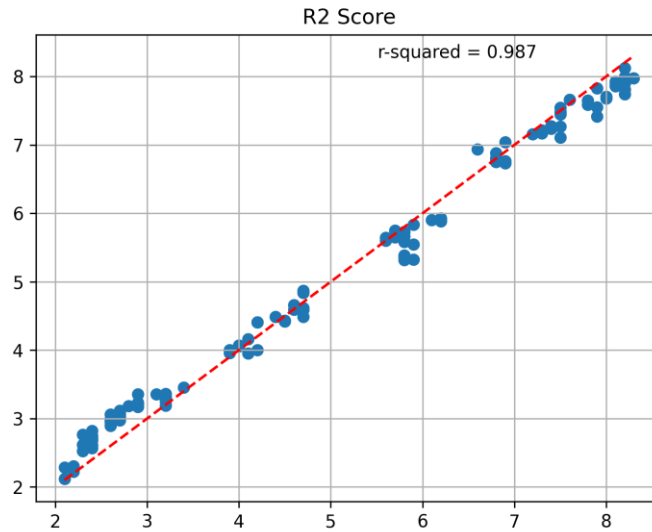


Figure 8. R2 score value of the artificial neural network model used in this study (Bu çalışmada kullanılan yapay sinir ağı modelinin R2 skor değeri)

4. CONCLUSIONS (SONUÇLAR)

This study focuses on estimating solar radiation values through artificial neural network (ANN) modelling, using meteorological and geographical data in Ankara, Sivas and Erzurum provinces. In order to understand the effects of climate on forecasting, basic meteorological variables such as

highest temperature, lowest temperature and number of rainy days were selected as inputs of this model. The diversity resulting from different climate zones and similar latitude values in the specified provinces was selected to evaluate the overall performance of the ANN model.

Similar solar radiation values are expected in the same latitude regions. However, different factors can cause differences in solar radiation values between cities. These factors include cloud cover, climatic conditions, geographical features, local topography and air pollution. Therefore, solar radiation values of cities located at the same latitude may show similar trends, but may not be exactly the same.

The analyzes revealed the ability of the ANN model to successfully predict solar radiation values. Agreement between predicted values and measured values was observed, indicating that the model has wide applicability in different climatic conditions. The results obtained from this study show that the ANN method can be used effectively in estimating solar radiation values. In addition, the fact that it provides high-precision predictions that will guide future studies increases the scientific importance of the research.

ACKNOWLEDGMENTS (TEŞEKKÜR)

The authors would like to thank the Turkish State Meteorological Service for sharing Turkey's climate data for this study.

DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS (ETİK STANDARTLARIN BEYANI)

The author of this article declares that the materials and methods they use in their work do not require ethical committee approval and/or legal-specific permission.

AUTHORS' CONTRIBUTIONS (YAZARLARIN KATKILARI)

Sinem UZUN: She contributed to the analysis, analyzed the results and performed the writing process.

Hatice ARSLANTAŞ: She performed the analyzes and contributed to interpreting the results.

CONFLICT OF INTEREST (ÇIKAR ÇATIŞMASI)

There is no conflict of interest in this study.

REFERENCES (KAYNAKLAR)

[1] Acır, A., Canlı, M.E., Ata, İ., Tanürün, H.R. (2019). Effects of a circular-shaped turbulator

having varying hole numbers on energy and exergy efficiencies of a solar air heater. *International Journal of Ambient Energy*, Volume 40, Issue 7, 739-748.

- [2] Çırak, B., Pınar, A. (2021). Investigation of Innovations in Solar Generator Systems. *Journal of Soft Computing and Artificial Intelligence*, 2(1), 27-40.
- [3] Şimşek, B., Peñçe, İ., Naz, M.Y., Güngör, A. (2020). The Future of Fossil Energy Sources and The Change of Global Energy Policies. *Techno-Science*, 3:1, 46-49.
- [4] Temiz, D., Gökmen, A. (2010). The Importance Of Renewable Energy Sources In Turkey. *International Journal of Economics and Finance Studies*, Vol 2, No 2, 23-30.
- [5] Kara, G., Altuğ, F., Kavaklıoğlu, K., Cavlak, U. (2020). Nörolojik rehabilitasyonda yapay sinir ağı uygulamaları. *Cukurova Medical Journal*, 45(4), 1844 -1846.
- [6] Akbulut, İ., Özcan, B. (2020). Hava Kirliliği Tahmini: Yapay Sinir Ağları Ve Regresyon Yöntemleriyle Bir Karşılaştırma. *Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 3(1), 12- 22.
- [7] Ertaylan, A., Aktaş, Ö., Doğan, Y. (2021). Yapay Sinir Ağları İle Piyasa Takas Fiyatı Tahminlemesi. *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen Ve Mühendislik Dergisi*, 23(67), 93 – 105.
- [8] Çınaroğlu, E., Avcı, T. (2020). Thy Hisse Senedi Değerinin Yapay Sinir Ağları İle Tahmini. *Atatürk Üniversitesi İktisadi Ve İdari Bilimler Dergisi*, 34(1), 1 – 19.
- [9] Yavuz, M., Sakarya, Ş., Özdemir, N. (2015). Yapay Sinir Ağları İle Risk-Getiri Tahmini Ve Portföy Analizi. *Niğde Üniversitesi İktisadi Ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 8(4), 87 - 107.
- [10] Aydoğan, İ., Zırhlioğlu, G. (2018). Öğrenci Başarılarının Yapay Sinir Ağları ile Kestirilmesi. *Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi Eğitim Fakültesi Dergisi*, 15(1), 577 – 610.
- [11] Can, N.S., Şahin, A.Ş. (2021). Yapay sinir ağları metodu ile günlük çiğ noktası sıcaklığı tahmini. *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 11(4), 1154 – 1163.
- [12] Arıman, S., Taflan, G.Y., Çelik, E. (2021). Samsun Bölgesi için Güneş Radyasyonunun Yapay Sinir Ağı ile Tahmini. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, no.25, 680-687.

- [13] Aslay, F., Özen, Ü. (2013). Meteorolojik Parametreler Kullanılarak Yapay Sinir Ağları İle Toprak Sıcaklığının Tahmini. *Politeknik Dergisi*, 16(4), 139-145.
- [14] Boznar, M.Z., Grasic, B., Oliveira, A.P., Soares, J., Mlakar, P. (2017). Spatially transferable regional model for half-hourly values of diffuse solar radiation for general sky conditions based on perceptron artificial neural networks. *Renewable Energy*, Volume 103, Pages 794-810.
- [15] Akal, D., Umut, İ. (2022). Fotovoltaik Panellerde Güç Tahminlenmesi için Yapay Zekâ Yöntemlerinin Kullanılması. *Tekirdağ Ziraat Fakültesi Dergisi*, 19(2), 435-445.
- [16] Daş, M., Akpınar, E. (2018). Sabit ve Hareketli Hava ile Isıtılan Güneş Kolektörlerinin Isıl Verimliliklerinin Karşılaştırılması ve Yapay Sinir Ağları ile Modellenmesi. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 30(1), 41-46.
- [17] Arslan, M., Terzioğlu, H. (2020). Estimation of Solar Radiation Value using Artificial Intelligence Networks. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, Ejosat Özel Sayı (ICCEES), 488-497.
- [18] Şeker, M. (2021). Yapay Sinir Ağı (YSA) Kullanılarak Meteorolojik Verilere Dayalı Solar Radyasyon tahmini. *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 23(69), 923-935.
- [19] Tehrani, A.A., Veisi, O., Fakhr, B.V., Du, D. (2024). Predicting solar radiation in the urban area: A data-driven analysis for sustainable city planning using artificial neural networking. *Sustainable Cities and Society*, Volume 100, 105042.
- [20] Nimmy, P., Nagaraja, K.V., Srilatha, P., Karthik, K., Sawmya, G., Kumar, R.S.V., Khan, U., Hussain, S.M., Hendy, A.S., Ali, M.R. (2023). Implication of radiation on the thermal behavior of a partially wetted dovetail fin using an artificial neural network. *Case Studies in Thermal Engineering*, Volume 51, 103552.
- [21] Veisi, O., Shakibamanesh, A., Rahbar, M. (2022). Using intelligent multi-objective optimization and artificial neural networking to achieve maximum solar radiation with minimum volume in the archetype urban block. *Sustainable Cities and Society*, Volume 86, 104101.
- [22] Li, H., He, X., Hu, Y., Lv, W., Yang, L. (2024). Research on the generation method of missing hourly solar radiation data based on multiple neural network algorithm. *Energy*, Volume 287, 129650.
- [23] Evrendilek, F., Ertekin, C. (2008). Assessing solar radiation models using multiple variables over Turkey. *Climate Dynamics*, 31, 131-149.
- [24] <https://www.mgm.gov.tr/>
- [25] Çakıroğlu, R., Tanürün, H.E., Acır, A. et al. (2023). Optimization of NACA 4412 augmented with a gurney flap by using grey relational analysis. *J Braz. Soc. Mech. Sci. Eng.* 45, 167.
- [26] Ertürk, S., Kara, H., Akkuş, C., Genç, G. (2023). Türkiye’de Farklı İklim Kuşakları İçin Yapay Sinir Ağları Kullanılarak Güneş Işınımının Tahmini. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım Ve Teknoloji*, 11(4): 885-892.



Examining The Phase Formation of Aging and Shallow Cryogenic Process Applied to Aluminum Alloys with Thermal Analysis

Gözde ALTUNTAŞ^{1,2*} Bülent BOSTAN²

¹Department of Graduate School of Natural and Applied Sciences, Gazi University, 06500 Ankara, Turkey

² Department of Metallurgy and Materials Eng., Gazi University, 06500 Ankara, Turkey

Article Info

Research article
Received: 03/03/2024
Revision: 14/03/2024
Accepted: 14/03/2024

Keywords

7075 Al alloy
Thermal analysis
Cryogenic treatment
Retrosession and re-aging

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 03/03/2024
Düzeltilme: 14/03/2024
Kabul: 14/03/2024

Anahtar Kelimeler

7075 Al alaşımı
Termal analiz
Kriyojenik İşlem
Retrosesyon ve yeniden
yaşlandırma

Graphical/Tabular Abstract (Grafik Özet)

In this study, retrosession and re-aging heat treatments were combined with cryogenic processes and the transformations of the phases formed were examined by thermal analysis./ Bu çalışma ile retrosesyon ve yeniden yaşlandırma ısıl işlemleri kriyojenik işlem ile kombinasyonları yapılarak oluşan fazların dönüşümleri termal analizler ile incelenmiştir.

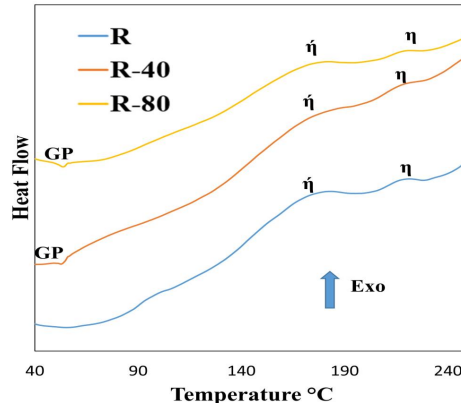


Figure A: Phase transformations with thermal analysis /Şekil A: Termal analizler ile faz dönüşümleri

Highlights (Önemli noktalar)

- Cryogenic combinations with retrosession and re-aging/ Retrosesyon ve yeniden yaşlandırma ile kriyojenik kombinasyonlar
- Examination of changing phase transformation temperatures with thermal analysis/ değişen faz dönüşüm sıcaklıkların termal analizler ile incelenmesi
- Activation energy calculations of the formed phases using different methods/ oluşan fazların farklı yöntemlerle aktivasyon enerjisi hesaplamaları

Aim (Amaç): Examination of phase transformations that occur with aging and cryogenic process with thermal analysis. / yaşlandırma ve kriyojenik işlem ile oluşan faz dönüşümlerinin termal analizler ile incelenmesi

Originality (Özgünlük): Failure to investigate the kinetics of the phases formed by combining the retrosession and re-aging process with the cryogenic process. / daha önce Retrosesyon ve yeniden yaşlandırma işlemi kriyojenik işlem ile birleştirilerek oluşan fazların kinetiklerinin araştırılmaması

Results (Bulgular): With cryogenic treatment, the activation energy, which was 200 kJ/mol, decreased to 100 kJ/mol. / Kriyojenik işlem ile 200 kJ/mol olan aktivasyon enerjisi 100 kJ/mol değerlerine kadar düşmüştür

Conclusion (Sonuç): In the DSC graphs, it was observed that GP transformations occurred clearly in the samples subjected to cryogenic treatment. Additionally, it has been observed that activation energy decreases when cryogenic treatment is applied. This decrease shows that the η phase will form more easily through the diffusion mechanism./DSC grafiklerinde kriyojenik işleme tabi tutulan örneklerde GP dönüşümlerinin net bir şekilde meydana geldiği gözlemlendi. Ayrıca kriyojenik arıtma uygulandığında aktivasyon enerjisinin azaldığı gözlemlenmiştir. Bu azalma difüzyon mekanizmasıyla η fazının daha kolay oluşacağını göstermektedir.



Examining The Phase Formation of Aging and Shallow Cryogenic Process Applied to Aluminum Alloys with Thermal Analysis

Gözde ALTUNTAŞ^{1,2*} Bülent BOSTAN²

¹Department of Graduate School of Natural and Applied Sciences, Gazi University, 06500 Ankara, Turkey

² Department of Metallurgy and Materials Eng., Gazi University, 06500 Ankara, Turkey

Article Info

Research article
Received: 03/03/2024
Revision: 14/03/2024
Accepted: 14/03/2024

Keywords

Electro Discharge
Machining
Ti-6Al-4V Alloy
Keyseat
Measurement Accuracy

Abstract

In this study, cryogenic treatment was applied to the 7*** series alloy, which is one of the aluminum alloys frequently used in the aviation and space industry, after the retrogression and re-aging process, and the phase formations were examined by thermal analysis. First of all, solution heat treatment was applied at 480 °C for 2 hours and water was given. After quenching, artificial aging heat treatment was applied at 120 °C for 24 hours. To start the RRA (retrogression and re-aging) heat treatment, after artificial aging, retrogression was performed at 200 °C for 10 minutes and quenched. Then, re-aging was performed at 120 °C for 24 hours and the aging process was completed. After the RRA heat treatment, cryogenic treatment was applied for 2 hours at -40 °C, -80 °C respectively. The heat treated samples were analyzed with a differential thermal analyzer and the transformations of GP, η' and η phases were found. Since the η' phase is known as the strength-increasing phase in the structure, the activation energies of each sample were calculated using the Augis-Bennet and Kissinger equations. The results showed that the activation energy of the sample treated with -40 cryogenic treatment was 50% less than the sample without cryogenic treatment. This situation proved with the Arrhenius equation that the formation of the η' phase would be easier.

Ti-6Al-4V Alaşımının Elektor Erozyon ile İşleminde İşleme Parametrelerinin Ölçüm Doğruluğuna Etkisinin İncelenmesi

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 03/03/2024
Düzeltilme: 14/03/2024
Kabul: 14/03/2024

Anahtar Kelimeler

7075 Al alloy
Thermal analysis
Cryogenic treatment
Retrogression and re-aging

Öz

Bu çalışmada havacılık ve uzay endüstrisinde sıklıkla kullanılan alüminyum alaşımlarından biri olan 7*** serisi alaşımına retrogresyon ve yeniden yaşlandırma işlemleri sonrasında kriyojenik işlem uygulanmış ve termal yöntemlerle faz oluşumları incelenmiştir. Öncelikle 480 °C'de 2 saat çözelti ısıtma işlemi uygulandı ve su verildi. Söndürme işleminin ardından 120°C'de 24 saat yapay yaşlandırma ısıtma işlemi uygulandı. RRA (retrogresyon ve yeniden yaşlandırma) ısıtma işlemine başlamak için yapay yaşlandırmanın ardından 200 °C'de 10 dakika süreyle retrogresyon uygulandı ve söndürüldü. Daha sonra 120 °C'de 24 saat süreyle yeniden yaşlandırma yapılarak yaşlandırma işlemi tamamlandı. RRA ısıtma işleminin ardından sırasıyla -40 °C ve -80 °C'de 2 saat kriyojenik işlem uygulandı. Isıtma işlemi görmüş numuneler diferansiyel termal analiz cihazı ile analiz edilmiş ve GP, η' ve η fazlarının dönüşümleri bulunmuştur. η' fazı yapıda mukavemet artırıcı faz olarak bilindiğinden her numunenin η' fazının aktivasyon enerjileri Augis-Bennet ve Kissinger denklemleri kullanılarak hesaplandı. Sonuçlar, -40°C kriyojenik işleme tabi tutulan numunenin aktivasyon enerjisinin, kriyojenik işlem uygulanmayan numuneye göre %50 daha az olduğunu gösterdi. Bu durum Arrhenius denklemi ile η' fazının oluşumunun daha kolay olacağını kanıtladı.

1. INTRODUCTION (GİRİŞ)

Al-Zn-Mg-Cu (7xxx) alloys, preferred in the aviation and space industry, are an aluminum alloy group that can be reached to the highest strength levels with various aging heat treatment techniques.

These alloys, which normally have high ductility, naturally have good forming properties [1-3]. However, due to the effect of aging heat treatment, their formability decreases very quickly and continues to change as the aging time increases. In general, the aging process of ageable aluminum

alloys begins with solution heat treatment between 550-400 °C and natural aging at room temperature after quenching. The purpose of the aging heat treatment is to ensure the formation of a new phase from a supersaturated solid phase under the influence of time and temperature [4-7]. It was discovered by Cina in the 1970s that the heat treatment known as Retrogression and Re-Aging (RRA), that is, re-resolution and re-aging, increases both the strength and corrosion crack resistance in 7xxx series aluminum alloys. RRA heat treatment begins with the short-term re-resolution and quenching of the alloy, which has been subjected to T6 or T651 heat treatment, at a temperature range of 160-280 °C. It then continues with the re-aging process, as in the T6 artificial aging heat treatment. With RRA heat treatment, T6 and T73 properties are achieved together. Dimensional changes of the precipitates formed in the RRA process have significant effects on the yield strength of the alloy [8]. In order to understand which microstructural parameters control the corrosion susceptibility of this alloy, studies have been conducted to characterize microstructural differences under various heat treatment conditions. It has been observed that the microstructure of Al 7075-T73 shows much coarser grain boundary precipitates than those in the T6 temper. This combination has been found to result in good performance in terms of both resistance to stress corrosion cracking and mechanical strength [9-11]. In the early stages of the RRA heat treatment, a decrease in yield strength occurs due to the partial dissolution of the GP regions. As η phases form and reach a stable size, the yield strength increases over time. It has been shown in different studies that there is a decrease again due to the coarsening of the precipitates over time. It has been shown in TEM studies that during the dissolution of GP regions, the growth of the pre-existing η phase and the formation of new η precipitates on the undissolved GP regions can occur simultaneously [12]. With the dissolution of GP regions, the matrix becomes enriched in zinc and magnesium. This allows the nucleation and growth of the η phase. It has been found that this dissolution is more effective at temperatures above 180°C. As the retrogression time increases, the volume fractions and sizes of the precipitates also increase. Therefore, dissolution time is of mechanical importance. Increasing the retrogression period causes especially the η precipitate to become coarser. Since η precipitates are less than the critical size and are unstable at this

phase retrogression temperature, they will begin to dissolve slowly when the first heat treatment begins [11-13]. In the re-aging heat treatment, the mechanism of growth and re-precipitation of partially dissolved η precipitates is active. In some studies, it has been said that the RRA structure contains more nucleated precipitates than in the T6 heat treatment condition. The higher hardness as a result of RRA heat treatment compared to the T65 heat treatment condition is explained by the presence of more and finer η precipitates [14]. In the re-aging heat treatment, the mechanism of growth and re-precipitation of partially dissolved η precipitates is active. In some studies, it has been said that the RRA structure contains more nucleated precipitates than in the T6 heat treatment condition. The higher hardness as a result of RRA heat treatment compared to the T65 heat treatment condition is explained by the presence of more and finer η precipitates. It has been argued that GP regions may also grow during re-aging, but the nucleation and growth of the η phase is the effective mechanism in re-aging [13,14].

They said that thermal analysis is one of the most used techniques to analyse the behavior of aluminum alloys in order to analyse the precipitation of Guinier-Preston (GP) zones and the different phases formed. They showed that it is possible to calculate the activation energies of the resulting phases using DSC [15].

Natural aging, artificial aging and RRA have been studied in many studies in the literature. The corrosion resistance, mechanical properties and phase transformations of these heat treatments were examined with thermal analysis. However, the changes in the transformation temperatures and activation energies of the phases formed by combining these thermal processes with cryogenic processes have not been studied before. This study, for the first time in the literature, provided a different perspective on phase transformations in aluminum alloys and enabled detailed calculations in terms of physical metallurgy. With the applied cryogenic process, more formation of the η phase was achieved, and this was supported by thermal analyses.

2. MATERIALS AND METHODS (MATERIAL VE METOD)

In the experimental study, commercially purchased 7xxx-series aluminum alloy was used. Solution heat

treatment was applied in a high-temperature furnace at 480 °C for 2 h and then quenched. The aging process was heated to 120 °C in a horizontal high temperature furnace and an artificial aging heat treatment was applied for 24 hours. To begin the RRA heat treatment, artificial aging was followed by retrogression at 200 °C for 10 min and quenched. The aging process was then completed by re-aging at 120 °C for 24 hours. The heat treatments were carried out in an argon atmosphere. These samples are coded R. Following the RRA heat treatment,

cryogenic treatment was applied for 2 hours at -40 °C, -80 °C, respectively, in an HST DWC branded cooling device, and the samples were coded as R-40 and R-80. Phase transformation temperatures and activation energies of the samples were determined by DSC analysis with the HİTACHI DSC 7020 brand device. Tests were carried out in the temperature range of 40°C to 250°C, with four different heating rates. Figure 1 shows the flow chart of the experimental studies.

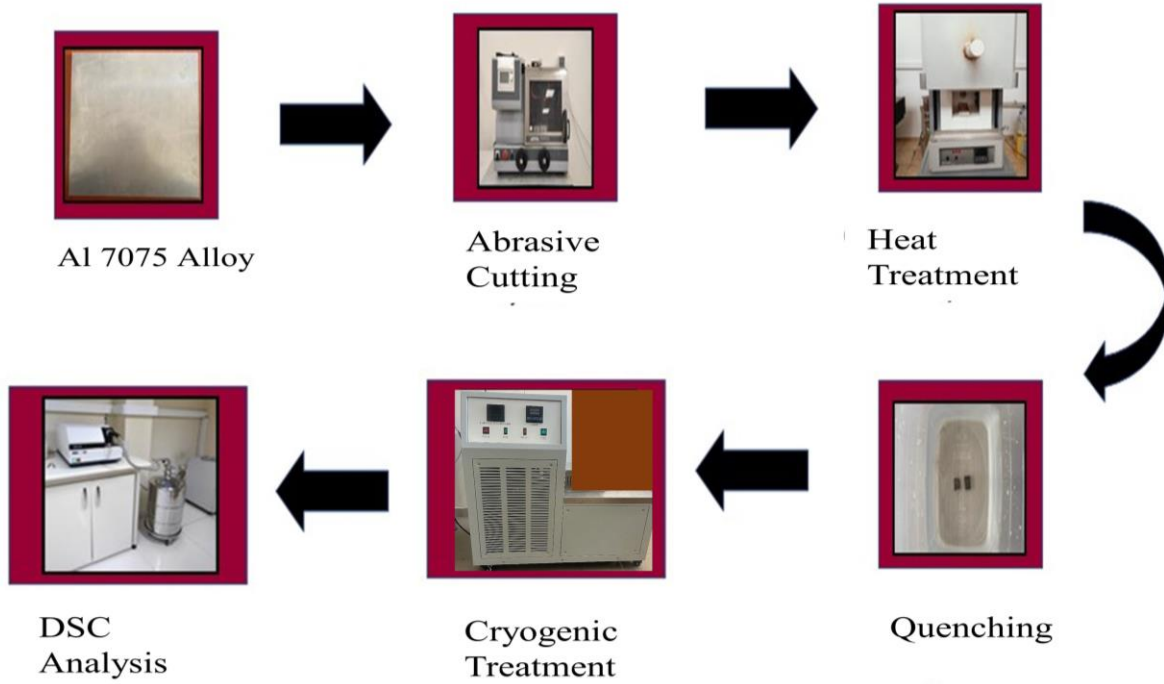


Figure 1. Flow chart of experimental studies (Deneysel çalışmaların akış şeması)

2. RESULTS (BULGULAR)

After the aging heat treatment, precipitates and phases begin to form in the 7075 aluminum alloy. The sequence of these phases as stated in the literature is shown in Figure 2. These phases form after certain temperatures. The dimensional difference, shape and distribution between GP zones largely depend on the alloy. If the size difference between Al and solute is small, spherical GP regions are formed, while large differences lead to the formation of plate-shaped GP regions. The sizes of GP regions are between 1-5 nm. GP regions are not a separate phase. They occur as a result of concentration differences. They are unstable structures that are completely compatible with the matrix [16,17]. These regions will then form metastable transition phases and finally the stable precipitate phase. The reason why transition phases

meet before the stable equilibrium phase occurs; It is desired to reduce step by step the very large energy barrier that must be overcome for the formation of the equilibrium phase [18]. There are 2 types of GP zones. It is often seen when natural aging is done. It is consistent with the internal ordering of Zn and Al/Mg on the matrix lattice. GP II zones are formed by aging at temperatures above 70 °C after quenching at temperatures above 450 °C [19]. After the aging process from GPI to GPII and the growing GP regions, the η phase begins to form in the microstructure. The main hardening phase phase η (fine precipitates of metastable $MgZn_2$ rich in Zn and Mg) is semi-compatible and meta-stable with the Al matrix, at least one surface of which is semi-compatible with the matrix [20].

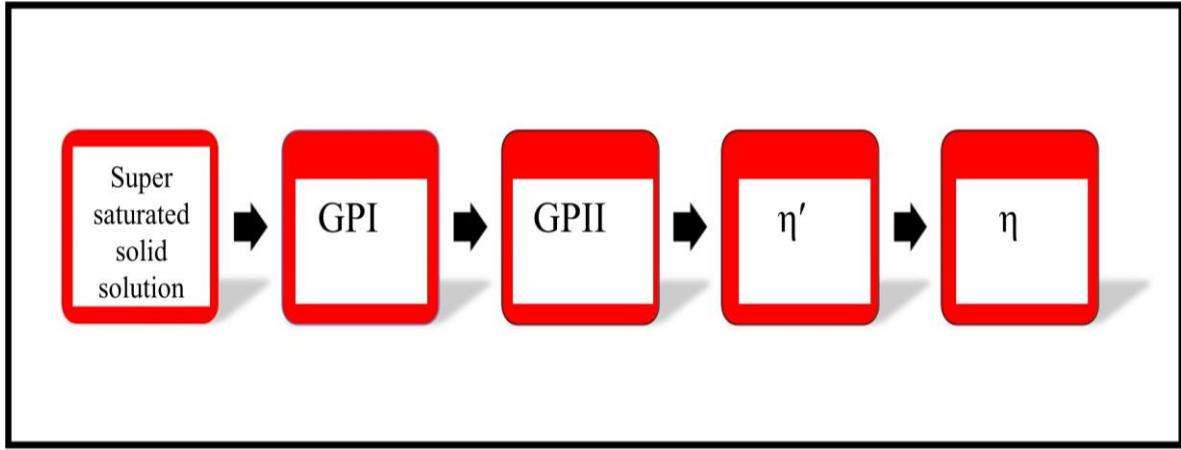


Figure 2. Sequence of phases formed by RRA heat treatment (RRA ısı ile oluşan fazların sıralaması)

The transformation temperatures of GP, η' and η phases were determined by DSC analyses. The activation energies of the η phase, which is the main strength-increasing phase, were calculated and the phase formation enthalpies were found using the Augis-Bennet and Kissinger equations. In the DSC graphs, it was observed that GP transformations occurred clearly in the samples subjected to

cryogenic treatment. The significant transformations in the obtained GP regions showed that the cryogenic process created new nucleation points. The higher the number of GP sites, the more η phases occur. Because as the diameter of the GP regions increases, there will be a transformation to η phase. In other words, GP regions constitute the nucleation point for the η phase [23,24].

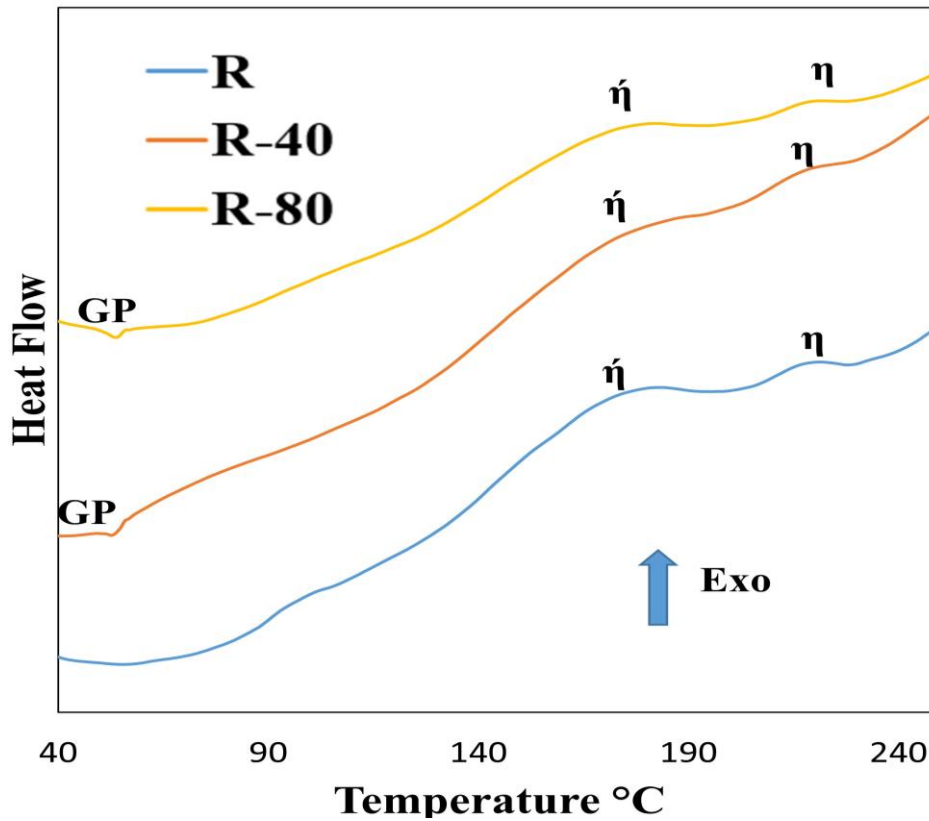


Figure 3. Transformations of phases formed by RRA heat treatment and cryogenic treatment (RRA ısı ile oluşan fazların dönüşümleri)

Kissinger equations [21];

$$\ln(B/Tx^2) = -(Ea/RTx) + C$$

Multiplying the slope of the graph of $\ln(\beta/Tp^2)$ versus $1000/Tp$ by the gas constant will equal the activation energy. Augis-Bennet equations [22]; $\ln(B/Tx - T0) = -(Ea/RTx) + \ln K0$

In this method, multiplying $\ln(\beta/(Tp-T0))$ by the slope of the line corresponding to $(1000/Tp)$ and the gas constant gives the activation energy. Here;

Ea: activation energy

R is the gas constant (R=8.314 j/molK).

T is the temperature

B shows heating rates.

With these two equations, the ratio of the partial areas of the η phase included in the DSC analyzes to the entire area, the slopes in the heating rates with the activation energies in Table 1 were calculated. It can be seen that the activation energy is highest for the η phase of the R sample. The values in Table 1 were calculated by obtaining the graphs in Figures 3 and 4. It can perform the same calculations in both equations. The same calculations were made with different equations, the similarity of the results was tested and deviations were checked. For this reason, calculations were made with two different equations. In previous studies, the activation energies of the GP, η and η phases formed during aging were calculated [25]. However, the kinetics of the phases formed after RRA have not been studied. The mechanism in the formation of phases with RRA and cryogenic process, the difference in growth and nucleation formation causes the change in activation energy.

Table 1. Activation energy of the η phase formed in the samples (Numunelerde oluşan η fazının aktivasyon enerjisi)

Samples	Slope (kissinger)	Slope (Augist bennet)	Average Activation energy (kj/mol)
R	-24,448	-24,242	201
R-40	-12,313	-13,237	102
R-80	-18,697	-18,492	155

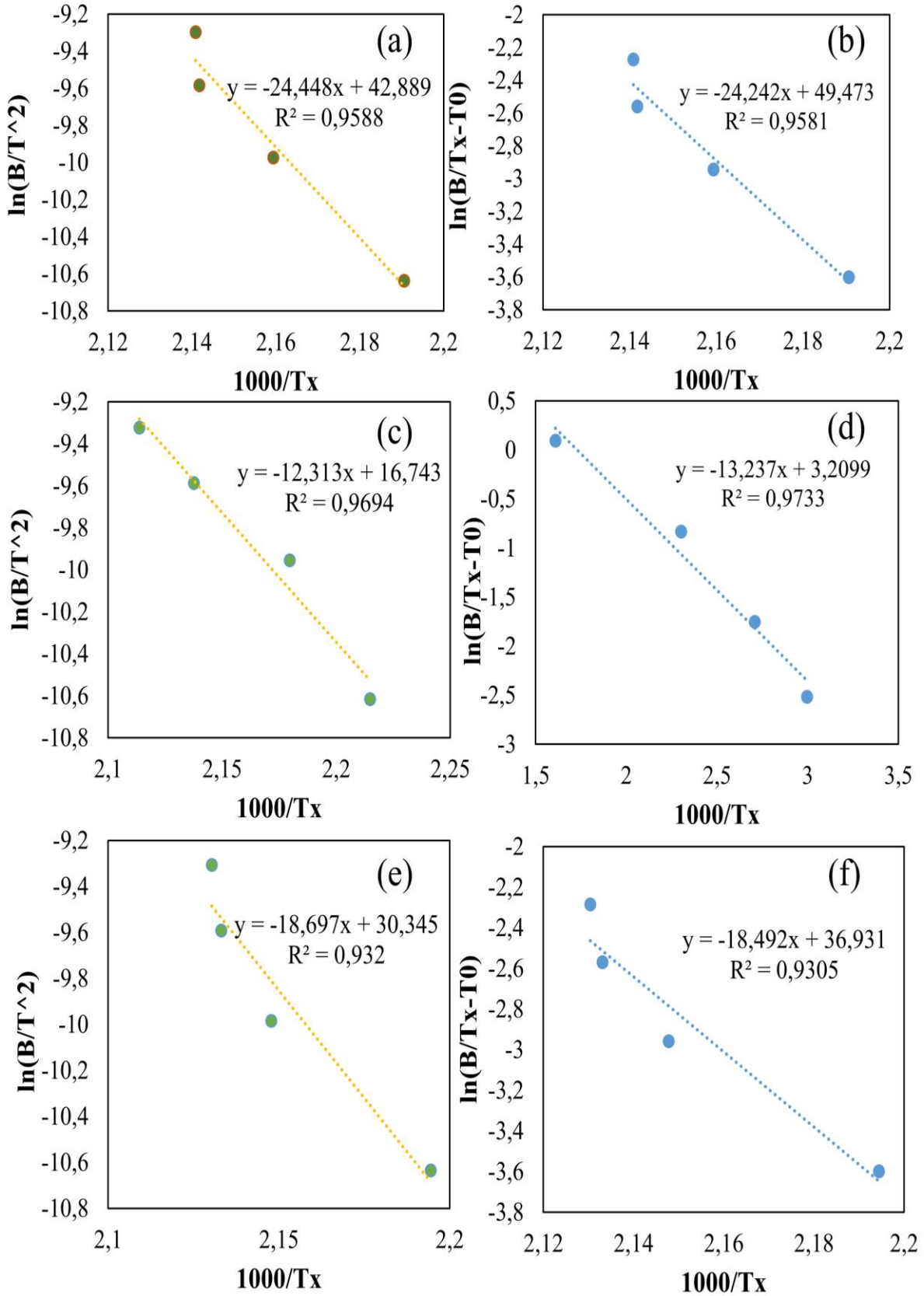


Figure 4. Slope graphs of the samples drawn with kissinger and Augis-Bennet equations (a) R sample kissinger (b) R sample Augis-Bennet (c) R-40 sample kissinger (d) R-40 sample Augis-Bennet (e) R-80 sample kissinger (f) R- 80 specimens of Augis-Bennet (Kissinger ve Augis-Bennet denklemleri ile çizilen örneklerin eğim grafikleri (a) R örneği Kissinger (b) R örneği Augis-Bennet (c) R-40 örneği Kissinger (d) R-40 örneği Augis-Bennet (e) R-80 örnek öpüşme (f) R- 80 Augis-Bennet örneği)

CONCLUSIONS (SONUÇLAR)

In this study, RRA and cryogenic process were applied to 7*** series aluminum alloy, and the transformations and activation energies of the phases formed for the first time in the literature were calculated with this heat treatment route. The results obtained showed that the cryogenic process created new nucleation points. In the DSC graphs, it was observed that GP transformations occurred clearly

ACKNOWLEDGMENTS (TEŞEKKÜR)

This study was supported by Gazi University scientific research projects number FGA-2024-9104. We would like to thank our university BAP coordinatorship.

Bu çalışma Gazi Üniversitesi FGA-2024-9104 numaralı bilimsel araştırma projeleri tarafından desteklenmiştir. Üniversitemiz BAP koordinatörlüğüne teşekkür ederiz.

DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS (ETİK STANDARTLARIN BEYANI)

The author of this article declares that the materials and methods they use in their work do not require ethical committee approval and/or legal-specific permission.

Bu makalenin yazarı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

REFERENCES (KAYNAKLAR)

- [1] Karakoca, Y. E., & AYTAÇ, A. (2022). Investigation of Drillability of CFRP/Al 7075 Stack. *Mechanics*, 28(6), 430-438.
- [2] Altuntaş, G., Altuntaş, O., & Bostan, B. (2021). Characterization of Al-7075/T651 alloy by RRA heat treatment and different pre-deformation effects. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 74, 3025-3033.
- [3] Altuntaş, G., & Bostan, B. (2022). Metallurgical characterization of natural aging effects on pre-deformed Al 7075/T651 alloy during retrogression and re-aging heat treatment. *Kov. Mater*, 60(4), 209-222.

in the samples subjected to cryogenic treatment. The higher the number of GPs, the more η phase will occur. Because when GP regions grow, they will turn into η phase. Additionally, it has been observed that activation energy decreases when cryogenic treatment is applied. This decrease shows that the η phase will form more easily through the diffusion mechanism.

AUTHORS' CONTRIBUTIONS (YAZARLARIN KATKILARI)

Gözde ALTUNTAŞ: She conducted the experiments, analyzed the results and performed the writing process.

Deneyleri yapmış, sonuçlarını analiz etmiş ve maklenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

Bülent Bostan: He analyzed the results and performed the writing process.

Sonuçlarını analiz etmiş ve maklenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

CONFLICT OF INTEREST (ÇIKAR ÇATIŞMASI)

There is no conflict of interest in this study.

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

[4] Altuntaş, O. (2022). Enhancement of impact toughness properties of Al 7075 alloy via double aging heat treatment. *Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology*, 10(2), 195-202.

[5] Mavi, A., Kaplan, Y., & Aksoz, S. (2021). Effects of aging and deep cryogenic treatment on wear behavior of Al7075 Alloy. *Journal of Tribology*, 143(12), 121702.

[6] Ozer, M., Dalli, K., & Ozer, A. (2023). Effect of ball-burnishing on surface integrity and fatigue behaviour of 7175-T6 AA. *Materials Science and Technology*, 39(2), 248-257.

[7] Ozer, M., Kaplan, Y., Ozer, A., & Aksoz, S. (2023). Influence of different sintering techniques on the wear properties of Al-15Si-2.5 Cu-0.5 Mg/B4C composites. *Science of Sintering*, (00), 60-60.

- [8] Cina, B. M., and Gan, R. (1974). Reducing the susceptibility of alloys, particularly aluminium alloys, to stress corrosion cracking. US patent, 3856584.
- [9] Holt, R. T., Rosario, V., & Durham, K. (1995). RRA Treatment of 7075-T6 Material from a CC130 Hercules Sloping Longeron. NRC/IAR Report LTR-ST-2021.
- [10] Park, J. K., & Ardell, A. J. (1984). Effect of retrogression and reaging treatments on the microstructure of Al-7075-T651. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 15, 1531-1543.
- [11] Danh, N. C., Rajan, K., & Wallace, W. (1983). A TEM study of microstructural changes during retrogression and reaging in 7075 aluminum. *Metallurgical Transactions A*, 14, 1843-1850.
- [12] Naeem, H. T., Ahmad, K. R., Mohammad, K. S., & Rahmat, A. (2014). Evolution of the retrogression and reaging treatment on microstructure and properties of aluminum alloy (Al-Zn-Mg-Cu). *Advanced materials research*, 925, 258-262.
- [13] Ohnishi, T., Ibaraki, Y., & Ito, T. (1989). Improvement of fracture toughness in 7475 aluminum alloy by the RRA (retrogression and re-aging) process. *Materials transactions, JIM*, 30(8), 601-607.
- [14] Xu, X., Zhao, Y., Ma, B., & Zhang, M. (2015). Electropulsing induced evolution of grain-boundary precipitates without loss of strength in the 7075 Al alloy. *Materials Characterization*, 105, 90-94.
- [15] Khalfallah, A., Raho, A. A., Amzert, S., & Djemli, A. (2019). Precipitation kinetics of GP zones, metastable η' phase and equilibrium η phase in Al- 5.46 wt.% Zn- 1.67 wt.% Mg alloy. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 29(2), 233-241.
- [16] Altuntaş, G., Özdemir, A. T., & Bostan, B. (2023). A survey of the effect of cryogenic treatment and natural ageing on structural changes and second-phase precipitation in Al-Zn-Mg-Cu alloy. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 1-13.
- [17] Callister, W. D., and Rethwisch, D. G. (2011). *Materials science and engineering* (Vol. 5). NY: John Wiley and Sons.
- [18] Robinson J. S., Cudd R. L., Tanner D. A., Dolan G. P., Quench Sensitivity and Tensile Property Inhomogeneity in 7010 Forgings, *Journal of Materials Processing Technology*, 2001, 119, 261-267
- [19] Ferragut, R., Somoza, A., & Tolley, A. (1999). Microstructural evolution of 7012 alloy during the early stages of artificial ageing. *Acta Materialia*, 47(17), 4355-4364.
- [20] Berg, L. K., Gjønnes, J., Hansen, V. X., Li, X. Z., Knutson-Wedel, M., Schryvers, D., & Wallenberg, L. R. (2001). GP-zones in Al-Zn-Mg alloys and their role in artificial aging. *Acta materialia*, 49(17), 3443-3451.
- [21] Elder, J. P. (1985). The general applicability of the Kissinger equation in thermal analysis. *Journal of thermal analysis*, 30, 657-669.
- [22] Augis, J. A., & Bennett, J. E. (1978). Calculation of the Avrami parameters for heterogeneous solid state reactions using a modification of the Kissinger method. *Journal of thermal analysis*, 13, 283-292.
- [23] Sha, G., & Cerezo, A. (2004). Early-stage precipitation in Al-Zn-Mg-Cu alloy (7050). *Acta materialia*, 52(15), 4503-4516.
- [24] Karabulut, Ş., & Karakoç, H. (2017). Investigation of surface roughness in the milling of Al7075 and open-cell SiC foam composite and optimization of machining parameters. *Neural Computing and Applications*, 28, 313-327.
- [25] Khalfallah, A., Raho, A. A., Amzert, S., & Djemli, A. (2019). Precipitation kinetics of GP zones, metastable η' phase and equilibrium η phase in Al- 5.46 wt.% Zn- 1.67 wt.% Mg alloy. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 29(2), 233-241.

Elektro Erozyon Yöntemi ile İşlenen Al2024-T3 Malzemesinin İşleme Parametrelerinin Optimizasyonu

Semih GÜNER¹  Mustafa YURDAKUL²  Emre AYHAN^{3*}  Yusuf Tansel İÇ⁴ 

¹Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makina Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye

²Gazi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye

³Gazi Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Elektronik ve Otomasyon Bölümü, Ankara, Türkiye

⁴Başkent Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 18/02/2024
Düzeltilme: 01/03/2024
Kabul: 16/03/2024

Anahtar Kelimeler

Alüminyum
Al2024
Elektro erozyon
Optimizasyon

Article Info

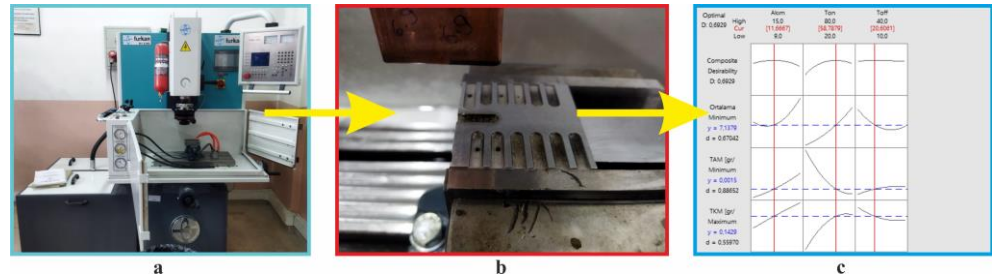
Research article
Received: 18/02/2024
Revision: 01/03/2024
Accepted: 16/03/2024

Keywords

Aluminum alloy
Al2024
Electro Discharge
Machining
Optimization

Grafik Özet (Graphical/Tabular Abstract)

Bu çalışmada Al2024-T3 malzemesinin işlenmesinde elektro erozyon yöntemi uygulanarak, talaş kaldırma miktarı (TKM), takım aşınma miktarı (TAM) ve ortalama yüzey pürüzlülüğü (R_a) olarak sıralanabilecek performans yanıtları üzerinden sonuçlar elde edilmiştir. / In this study, by applying the electro discharge machining in the machining of Al2024-T3 material, performance responses were obtained based on the data of material removal rate (TKM), tool wear rate (TAM) and average surface roughness (R_a) data.



Şekil A: a) Elektro erozyon tezgahı / Electro discharge machine b) Deney numunesi / Figure A: Specimen c) "Response Optimizer" sonuçları / "Response Optimizer" results

Önemli noktalar (Highlights)

- Elektro erozyon yöntemi ile alüminyum işleme / Aluminum machining by electrodischarge method
- Yanıt yüzeyi metodolojisi / Response surface design
- Optimum sonuçların elde edileceği işleme parametrelerinin tespit edilmesi / Determination of machining parameters to obtain optimum results

Amaç (Aim): Bu çalışmada Al2024-T3 malzemesinin işlenmesinde elektro erozyon yöntemi uygulanarak, talaş kaldırma miktarı (TKM), takım aşınma miktarı (TAM) ve ortalama yüzey pürüzlülüğü (R_a) kullanılarak işleme parametrelerinin tespit edilmesi amaçlanmıştır. / In this study, it was aimed to determine the machining parameters by applying the electro discharge method in the machining of Al2024-T3 material, using the amount of material removal rate (TKM), the amount of tool wear (TAM) and the average surface roughness (R_a).

Özgünlük (Originality): Al2024-T3 malzemesinin elektro erozyon yöntemiyle işlenmesinde işleme parametrelerinin belirlenmesidir. / It is the determination of machining parameters in the processing of Al2024-T3 material by electro discharge method.

Bulgular (Results): Yapılan varyans analizi (ANOVA) sonucunda işlemede etkin parametrelerin sırasıyla T_{on} , I_p ve T_{off} olduğu tespit edilmiştir. / As a result of the analysis of variance (ANOVA), it was determined that the effective parameters in processing were T_{on} , I_p and T_{off} , respectively.

Sonuç (Conclusion): TKM, TAM ve R_a için optimum değerlerin elde edileceği işleme parametreleri I_p için 11,6667 A, T_{on} için 58,7879 μs ve T_{off} için 20,6061 olarak bulunmuştur. / The optimum values for TKM, TAM and R_a were found to be 11,6667 A for I_p , 58,7879 μs for T_{on} and 20,6061 for T_{off} .



Elektro Erozyon Yöntemi ile İşlenen Al2024-T3 Malzemesinin İşleme Parametrelerinin Optimizasyonu

Semih GÜNER¹ Mustafa YURDAKUL² Emre AYHAN^{3*} Yusuf Tansel İÇ⁴

¹Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makina Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye

²Gazi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye

³Gazi Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Elektronik ve Otomasyon Bölümü, Ankara, Türkiye

⁴Başkent Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 18/02/2024
Düzeltilme: 01/03/2024
Kabul: 16/03/2024

Anahtar Kelimeler

Alüminyum alaşımı
Al2024-T3
Elektro erozyon işleme
Optimizasyon

Öz

Günümüzde alüminyum alaşımları hafif olması, yüksek dayanım sunması ve ekonomik olmaları gibi sebeplerle havacılık, otomotiv ve savunma sanayiinde yoğun olarak tercih edilmektedir. Bu çalışmada Al2024-T3 malzemesinin işlenmesinde elektro erozyon yöntemi uygulanarak, talaş kaldırma miktarı (TKM), takım aşınma miktarı (TAM) ve ortalama yüzey pürüzlülüğü (R_a) olarak sıralanabilecek performans yanıtları üzerinden sonuçlar elde edilmiştir. Yapılan deneylerde boşalım akımı (I_p), vurum süresi (T_{on}) ve vurum aralığı (T_{off}) parametrelerinin performans yanıtları üzerindeki etkileri incelenmiştir. Yapılan varyans analizi (ANOVA) sonucunda deney sonuçları üzerinde etkin parametrelerin sırasıyla T_{on} , I_p ve T_{off} olduğu tespit edilmiştir. Çalışmanın devamında performans yanıtlarını eniyileyecek parametre değerlerinin tespiti amacıyla bir optimizasyon çalışmasına da yer verilmiştir. TKM, TAM ve R_a için optimum değerlerin elde edileceği işleme parametreleri I_p için 11,6667 A, T_{on} için 58,7879 μs ve T_{off} için 20,6061 olarak bulunmuştur.

Optimization of Machining Parameters of Al2024-T3 Material Machined with Electro Discharge Machining

Article Info

Research article
Received: 18/02/2024
Revision: 01/03/2024
Accepted: 16/03/2024

Keywords

Aluminum alloy
Al2024-T3
Electro Discharge
Machining
Optimization

Abstract

Aluminum alloys are widely preferred in the aviation, automotive and defense industries today due to their lightness, high strength and economical nature. In this study, by applying the electro discharge machining in the machining of Al2024-T3 material, performance responses were obtained based on the data of material removal rate (TKM), tool wear rate (TAM) and average surface roughness (R_a) data. In the experiments, the effects of discharge current (I_p), pulse duration (T_{on}) and pulse interval (T_{off}) parameters were examined. As a result of the analysis of variance (ANOVA), it was determined that the effective parameters on the experimental results were T_{on} , I_p and T_{off} , respectively. Additionally, an optimization process was applied to the experimental results to obtain the appropriate values of machining parameters. The optimum values for TKM, TAM and R_a were found to be 11,6667 A for I_p , 58,7879 μs for T_{on} and 20,6061 for T_{off} .

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Al2024 alaşımları sağlamış oldukları üstün mukavemet/ağırlık oranı değerleri sebebiyle günümüzde havacılık uygulamalarında yapısal malzeme olarak yaygın şekilde kullanılmaktadır. Ayrıca ısıl işlem uygulanabilmesi, yorulma dayanımının yüksek olması ve kaplanarak korozyona karşı direnç özelliğinin artırılabilmesi

Al2024 alaşımlarının imalatta tercih edilmesinde önemli rol oynamaktadır [1].

Elektro erozyon ile işleme (EEİ) yöntemi, dielektrik sıvı ile doldurulmuş bir ortamda elektriksel olarak iletken iş parçası ve takım arasında doğru şekilde kontrol edilen bir elektrik deşarjı (kıvılcım) gerçekleşmesiyle talaş kaldıran alışılmamış işleme yöntemidir [2]. Sertliğine bakılmaksızın işlenmesi zor malzemelerin yüksek hassasiyetle imalatı bu

yöntem ile gerçekleştirilebilmektedir. Elektrot malzemesi, talaş kaldırma işlemi sırasında yüksek ısıdan dolayı bir miktar eriyebilir veya buharlaşabilir. Eriyen veya buharlaşan parçacıkların kıvılcımın olduğu bölgeden uzaklaştırma işlemi dielektrik sıvı vasıtasıyla gerçekleştirilir.

Literatürde Al2024 malzemenin EEİ yöntemi ile işlenmesi üzerine yapılan çalışmalar mevcuttur. Bu çalışmaların çoğunluğunun işlenebilirlik, optimizasyon ve işleme yönteminin geliştirilmesine yönelik yapıldığı görülmektedir. Çalışmanın bu kısmında literatürde konu ile ilgili yapılan çalışmalardan bahsedilecektir.

Srivastava ve arkadaşları EEİ yöntemi ile işlenen SiC ile güçlendirilmiş Al2024 malzeme için optimum yüzey pürüzlülüğü ve malzeme kaldırma oranının tespit edilmesi üzerine çalışmışlardır. Söz konusu çalışmada işleme parametreleri optimizasyonunda Yüzey Yanıt Yöntemini (RSM) tercih etmişlerdir. Çalışma sonucunda boşalım akımı, vurum süresi ve takviye yüzdesi değerlerinin artmasıyla yüzey pürüzlülüğünün arttığı görülmüştür. Ayrıca malzeme kaldırma oranı, tepe akımı ve darbe süresi değerlerinin artışı ile arttığı, takviye süresinin artışı ile azaldığı gözlemlenmiştir [3].

Mehmood ve arkadaşları yaptıkları çalışmada EEİ ile Al2024 T6 malzemeyi işleyerek, işleme parametrelerinin yüzey kalitesine ve yorulma performansına etkisini ele almışlardır. Çalışmada beş farklı boşalım akımı değeri belirlenirken diğer parametreler sabit tutularak deneyler yapılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda, yüksek boşalım akımının daha kısa yorulma ömrüne yol açtığı ve yüzey pürüzlülük değerini arttırdığı görülmüştür. Ayrıca, boşalım akımının beyaz tabaka kalınlığı ve sertlik değerleri üzerinde paralel etki gösterdiği de görülmüştür [4].

Arunachalam ve arkadaşları EEİ ve frezeleme yöntemlerinin alüminyum alaşımlarının korozyon ve korozyon yorulma davranışı üzerindeki etkisini ele almışlardır. Çalışmada yüzey kalitesi, mikroyapısal analiz, elektrokimyasal testler ve korozyon yorulma testleri üzerinden sonuçlar elde edilmiştir. Çalışmada elde edilen bulgular EEİ'nin malzeme üzerinde korozyon yönelimini arttırdığını göstermiştir [5].

Guruprakash ve arkadaşları yaptıkları çalışmada EEİ yönteminde farklı işleme parametrelerinin Al2024 malzeme üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Deney sonuçları yüzey pürüzlülüğü ve malzeme kaldırma oranı değerleri kullanılarak

yorumlanmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda optimum darbe süresinde referans geriliminin artışı yüzey pürüzlülüğüne ve malzeme kaldırma oranına pozitif yönde etki yaptığı görülmüştür [6].

Yahya ve Manning çalışmalarında EEİ yönteminde malzeme kaldırma oranına ilişkin elektriksel ve fiziksel parametre etkilerini araştırmışlardır. Çalışmada malzeme kaldırma oranını etkileyen faktörlerin tespiti için bir matematiksel model oluşturulmuştur. Deneyler sonucuna gerilim, akım, kıvılcım frekansı ve vurum süresinin malzeme kaldırma oranını doğrudan etkileyen faktörler olduğu tespit edilmişlerdir [7].

Singh ve Pradhan yapmış oldukları çalışmada farklı malzemeler üzerinde EEİ yöntemini uygulayarak malzeme kaldırma oranı, takım aşınma oranı ve yüzey pürüzlülüğü gibi performans parametrelerinin optimizasyonu üzerine veriler elde etmişlerdir [8].

Sanghani ve Acharya yapmış oldukları çalışmada EEİ'nin çeşitli performans ölçümlerinin iyileştirilmesi ve optimizasyonuna ilişkin araştırmaları ele almışlardır. Genellikle yapılan çalışmalarda işleme parametreleri olarak vurum süresi, vurum aralığı, boşalım akımı, gerilim değerlerinin malzeme kaldırma oranı, yüzey pürüzlülüğü ve takım aşınma oranına olan etkisinin incelendiği ifade edilmiştir. Bahse konu olan çalışmalarda deney sonuçlarının optimizasyonunda Taguchi, Yanıt Yüzeyi Metodolojisi (RSM), Yapay Sinir Ağı (ANN) ve Genetik Algoritma (GA) yöntemlerinin kullanıldığını ifade etmişlerdir [9].

Bhuyan ve arkadaşları çalışmalarında EEİ ile işlemede Al-24%SiC metal matrisli kompozit malzeme kullanarak işleme parametrelerinin optimizasyonunu ele almışlardır. Malzeme kaldırma oranı, takım aşınma oranı ve yüzey pürüzlülüğüne proses parametreleri olarak boşalım akımı, vurum süresi ve dielektrik yıkama basıncı değerlerinin etkisi incelenmiştir. Deney sonuçlarının optimizasyonunda çok kriterli karar verme yöntemlerinden biri olan TOPSIS yöntemi uygulanmıştır [10].

Daneshmand ve Masoudi çalışmalarında Al2024 ve Al/7.5%Al₂O₃ malzemelerinin EEİ ile işlenmesi sonucu malzeme kaldırma, takım aşınma oranı ve yüzey pürüzlülüğünü etkileyen işleme parametrelerinin tespiti üzerine çalışmışlardır. Çalışmada regresyon analizi aracılığıyla bir matematiksel model elde edilmiştir. Deney sonuçları Taguchi yöntemi ve ANOVA analizi ile

yorumlanarak etkin işleme parametreleri ortaya konmuştur [11].

Satpathy ve arkadaşları EEİ yöntemini AlSiC metal matrisli kompozit malzeme üzerinde uygulayarak malzeme kaldırma oranı, takım aşınma oranı ve yüzey pürüzlülüğüne etki eden işleme parametrelerinin tayini üzerine çalışmışlardır. Çalışmada, Temel Bileşen Analizi (PCA) ve optimum giriş parametre setlerini elde etmek için TOPSIS yönteminden faydalanılmıştır [12].

Alagarsamy ve arkadaşları yapmış oldukları çalışmada EEİ ile işleme yönteminde boşalım akımı, vuruş süresi ve vuruş aralığı gibi işleme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü üzerine etkisini ele almışlardır. Çalışmada AlZrO₂ metal matrisli kompozit malzeme kullanılmıştır. Deneyler Yanıt Yüzey Yöntemi (RSM) aracılığıyla planlanmıştır. İşleme parametreleri ve parametrelerin etkileşimlerini göstermek için ANOVA kullanılmıştır [13].

Phimoolchat ve Muttamara yapmış oldukları çalışmada Al2024 malzemesinin EEİ ile işlenmesinde işleme parametrelerinin Gri İlişkisel Analiz (GRA) yöntemini kullanarak optimizasyonunu ele almışlardır. Proses

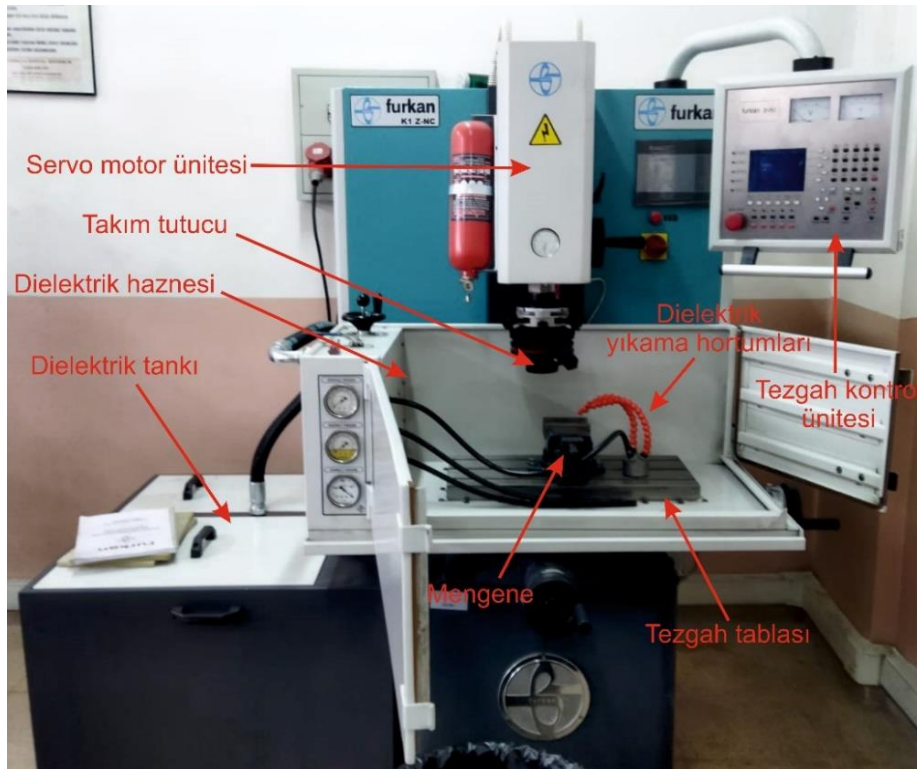
parametreleri olarak vuruş süresi, boşalım akımı, görev faktörü ve gerilim belirlenmiştir. Malzeme kaldırma oranı, takım aşınma oranı ve yüzey pürüzlülüğü gibi performans parametreleri incelenmiştir [14].

Literatür çalışmaları genel olarak değerlendirildiğinde, deney sonuçlarının yorumlanmasında farklı istatistiksel yöntemlerin kullanıldığı görülmektedir. Bu çalışmalarda çoğunlukla etkin parametrelerin tespiti üzerine yapıldığı ve deney sonuçlarının birbirinden bağımsız olarak değerlendirildiği tespit edilmiştir. Bu bilgiler doğrultusunda, Al2024 malzemenin EEİ yöntemi ile işlenmesi ve deney sonuçlarının değerlendirilmesinde çok kriterli karar verme yönteminin uygulandığı çalışmaların literatüre katkı sağlayacağı fikri ortaya çıkmıştır.

2. EXPERIMENTAL STUDY (DENEYSEL ÇALIŞMA)

2.1. Electro Discharge Machine (Elektro Erozyon Tezgahı)

Deneylerde Furkan K1 Z-NC marka dalma elektro erozyon tezgahı kullanılmıştır (Şekil 1). Tezgaha ait teknik özellikler Tablo 1’de verilmiştir.



Şekil 1. Elektro erozyon tezgahı (Electro discharge machine)

Tablo 1. Furkan K1 Z-NC elektro erozyon tezgahı teknik özellikleri (Furkan K1 Z-NC Electro discharge machine technical properties) [15]

Tezgah Özellikleri	
Tezgah gücü (kVA)	3,5
En yüksek çalışma akımı (A)	25
İş tablası ölçüleri (mm)	550 x 250
İşlenebilir en büyük parça boyutu (mm)	790 x 490 x 300
Eksenlerdeki hareket hassasiyeti (mm)	0,005
Dielektrik tank kapasitesi (lt)	270
Pompa kapasitesi (lt/dk)	40
Dielektrik filtre hassasiyeti (μm)	5

2.2. Deney Numunesi (Specimen)

Deneylerde numune malzemesi olarak Al2024-T3 alaşımı kullanılmıştır (Tablo 2). Al2024-T3 malzeme geleneksel imalat yöntemleriyle şekillendirilebilen bir malzeme olmasına karşın, günümüzde sürdürülebilir ve yeşil üretime duyulan talep nedeniyle geleneksel olmayan işleme yöntemleriyle şekillendirilmesi tercih edilmektedir [16]. Deney numunesi 51 x 51 x 8 mm boyutlarında

olup numuneye ait mekanik özellikler Tablo 3'te verilmiştir.

2.3. Takım (Tool)

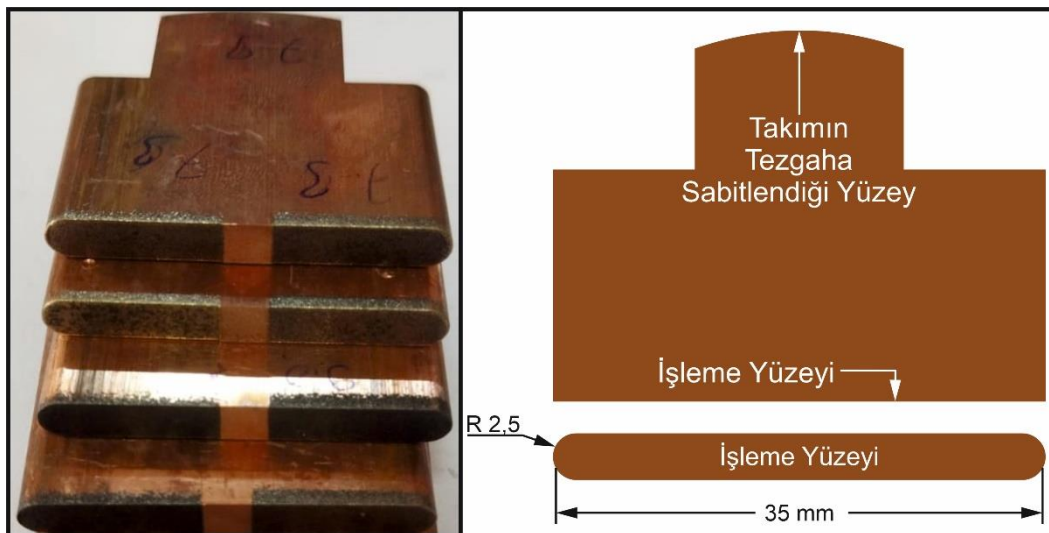
Deneylerde bakır malzemeden üretilmiş takımlar (elektrot) kullanılmıştır. Tel erozyon tezgahında kesilerek hazırlanmış olan elektrotun geometrisi ve boyutları Şekil 2'de verilmiştir. Takım malzemesine ait mekanik ve fiziksel özellikler Tablo 4'te verilmiştir.

Tablo 2. Al2024-T3 malzemenin içeriği (Content of Al2024-T3 material) [17]

Alaşım İçeriği (%)								
Al	Cu	Mg	Fe	Si	Mn	Zn	Cr	Diğer
92,5	4	1,5	0,5	0,5	0,5	0,25	0,1	0,15

Tablo 3. Deney numunesinin özellikleri (Specimen properties) [18]

Deney Numunesinin Özellikleri	
Sertlik (HB)	120
Çekme dayanımı (MPa)	475
Akma dayanımı (MPa)	340
Kopma uzaması (%)	18

**Şekil 2.** Takım geometrisi ve boyutları (Tool geometry and dimensions)

Tablo 4. Bakır elektrotun özellikleri (Cooper tool properties) [15]

Bakır Elektrotun Özellikleri	
Yoğunluk (kg/m ³)	2660
Sertlik (Vickers)	87
Çekme dayanımı (MPa)	275-350
Akma dayanımı (MPa)	125-145
Elektriksel iletkenlik (Ωm)	$5,98 \times 10^{-8}$
Erime sıcaklığı (°C)	590,6 - 638

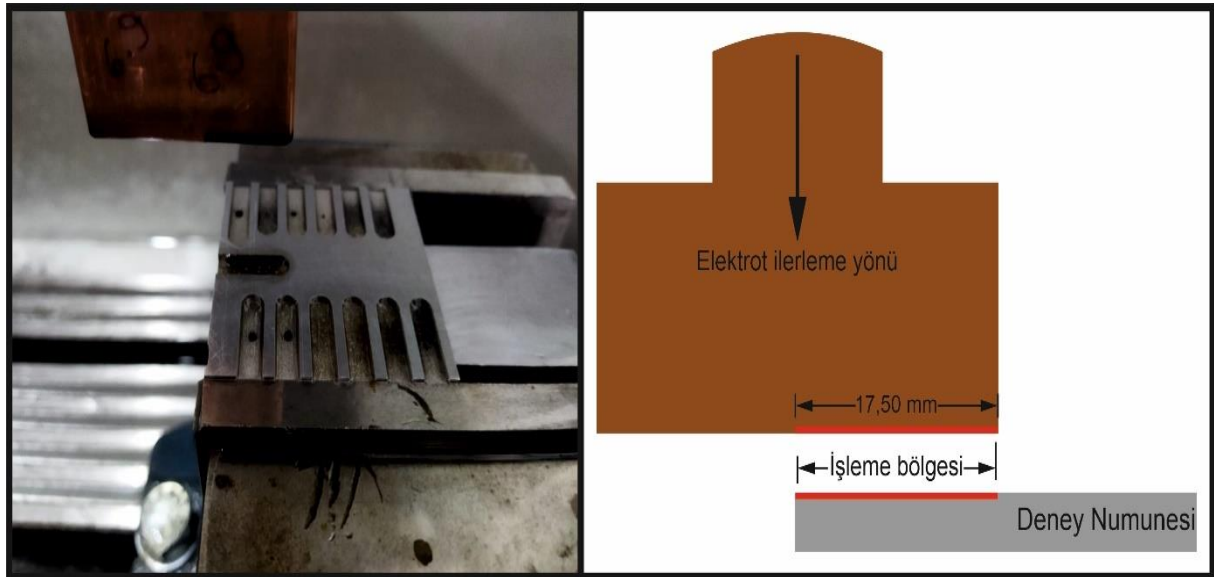
Deneylerde takım işleme yüzeyinin 17,5 mm uzunluğundaki kısmı işleme yapacak şekilde deney numunesinin kenarına göre hizalanmıştır (Şekil 3). Bu sayede deneyler sonucunda elde edilen geometrilerin kesit görüntüleri başka bir imalat yöntemine gerek duymadan elde edilebilmiştir.

2.4. Dielektrik Sıvısı (Dielectric Fluid)

Deneylerde işlem esnasında yüksek parlama noktasına, düşük viskoziteye ve yüksek oksidasyon kararlılığına sahip standart Belone EDM F tanımlı dielektrik sıvısı kullanılmıştır. Deneylerde kıvılcımla aşınma oluşan bölgeye 8 psi basınçla yanal yıkama yapacak şekilde sıvı akışı uygulanmıştır. Kullanılan dielektrik elektro erozyon sıvısının özellikleri Tablo 5'te verilmiştir.

2.5. Deney Parametreleri (Experimental Parameters)

İncelenen literatür çalışmalarından da faydalanılarak belirlenen deney parametreleri ve parametrelere ait değerler Tablo 6'da verilmiştir. Boşalım akımı, vurum süresi ve vurum aralığı etkisi incelenecek deney parametreleri olarak belirlenmiştir. Yüksek boşalım akımı değerlerinde malzeme kaldırma oranı artarken, yüzey kalitesi düşmekte ve takım aşınması artmaktadır [19]. Vurum aralığının artması ile işleme süresi de artmaktadır. Ayrıca vurum aralığı değerlerinin işleme sonucuna oluşan yüzeyin pürüzlülüğü üzerinde doğrudan etkiye sahip olduğu görülmüştür [16].

**Şekil 3.** Deneylerde kullanılan işleme bölgesi (Machining zone of the experiments)**Tablo 5.** Elektro erozyon sıvısının özellikleri (Dielectric fluid properties) [15]

Görünüş	C&B
Yoğunluk (kg/m ³)	0,760
Renk (Saybolt)	+30
Kinematik vizkozite (mm ² /s)	1,910
Alevlenme noktası (°C)	102

Tablo 6. Deney parametreleri (Experimental parameters)

Deney Parametresi	Parametre Değeri		
	Alt	Orta	Üst
Seviyeler			
Boşalım akımı [I_p] (A)	9	12,5	15
Vurum süresi [T_{on}] (μs)	20	40	80
Vurum aralığı [T_{off}] (μs)	10	20	40
Referans voltajı (V)	55		
Açık devre voltajı (V)	130		
İşleme süresi (sn)	2		
Geri çekme mesafesi (mm)	2		
İşleme derinliği (mm)	2		
Dielektrik basıncı (psi)	8		
Hassasiyet	25		
Dielektrik sıvısı uygulama biçimi	Sürekli		
Kutuplama	Takım pozitif, deney numunesi negatif		
Tank doluluğu	Deney numunesinin üst yüzeyinden 25 mm yukarıda		
İşleme bölgesi boyutları (mm)	17,5 x 5		

3. DENEY SONUÇLARI (EXPERIMENTAL RESULTS)

Tablo 6'da verilen parametreler belirlenerek çalışma kapsamında 27 adet deney yapılmıştır (Şekil 4). Deney sonuçlarının yorumlanmasında 3 farklı performans çıktısından faydalanılmıştır. Bunlar talaş kaldırma miktarı (TKM), takım aşınma miktarı (TAM) ve ortalama yüzey pürüzlülüğü (R_a) değerleridir.

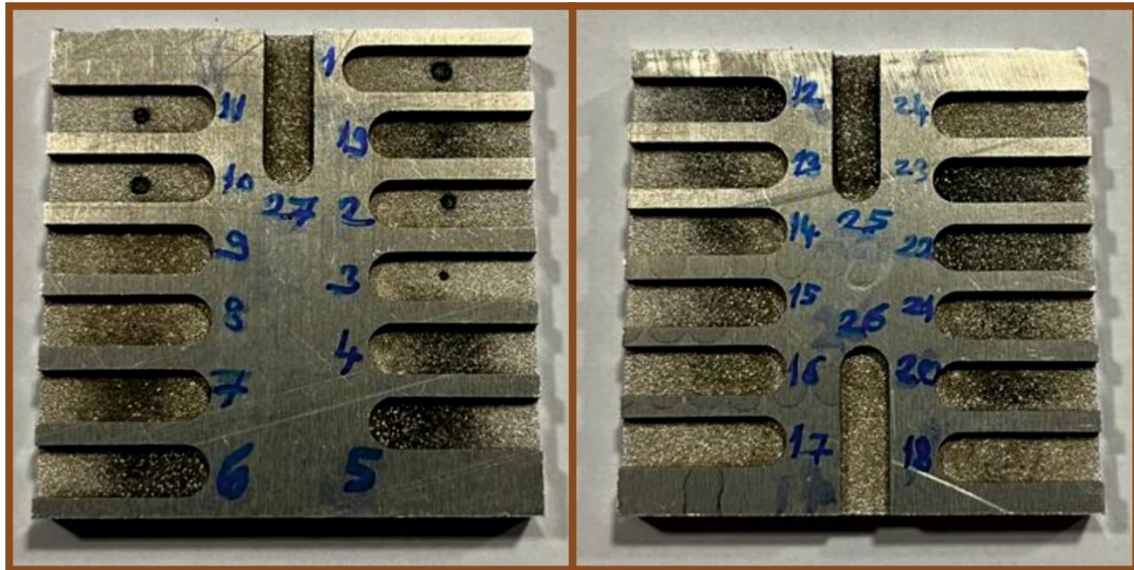
TKM, deneyde kaldırılan talaş miktarının deney süresine oranlanması ile hesaplanan bir değer olup Eşitlik 3.1'den hesaplanmıştır.

$$TKM = \frac{(\text{Numunenin işleme öncesi ağırlığı} - \text{Numunenin işleme sonrası ağırlığı})}{(\text{İşleme süresi})} \quad [gr/dk] \quad (3.1) [15]$$

Diğer bir performans çıktısı olan TAM değeri ise her bir deney esnasında elektrotta (takımda) meydana gelen aşınma miktarının ölçüsüdür ve Eşitlik 3.2'den hesaplanmıştır.

$$TAM = \frac{(\text{Takımın işleme öncesi ağırlığı} - \text{Takımın işleme sonrası ağırlığı})}{(\text{İşleme süresi})} \quad [gr/dk] \quad (3.2) [15]$$

TKM ve TAM değerlerinin hesaplanabilmesi için her bir deneyin başlangıcında deney numunesinin ve takımın ağırlıkları dijital terazi aracılığıyla ölçülmüştür. Yapılan ölçüm sonuçlarına göre hesaplanan TKM ve TAM değerleri Tablo 7'de verilmiştir.

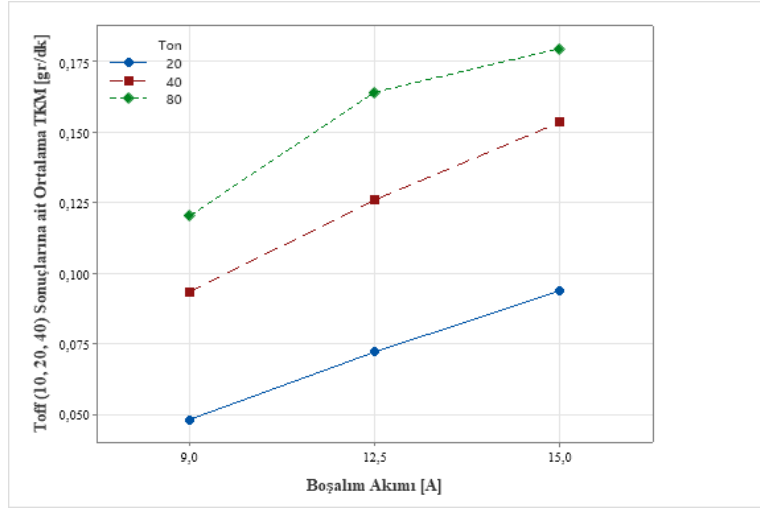
**Şekil 4.** Deney sonuçları (Experimental results)

Deneylerin sonucunda numunede oluşan yeni yüzeylerin pürüzlülük değerleri de deneylerin yorumlanmasında kullanılmıştır. Her bir deney için yüzey pürüzlülük parametreleri ölçülerek R_a elde edilmiştir. Yüzey pürüzlülük parametreleri Mitutoyo SJ-210 cihazı ile ölçülmüştür. Deney sonuçlarının yorumlanması amacıyla Şekil 5 ile Şekil 10 arasında verilen grafikler oluşturulmuştur. Deney çıktılarından biri olan TKM değerleri incelendiğinde; I_p ve T_{on} değerlerindeki artış TKM'yi arttırdığı, T_{off} değerlerindeki artış ise TKM değerini arttırdığı görülmektedir (Şekil 5-6).

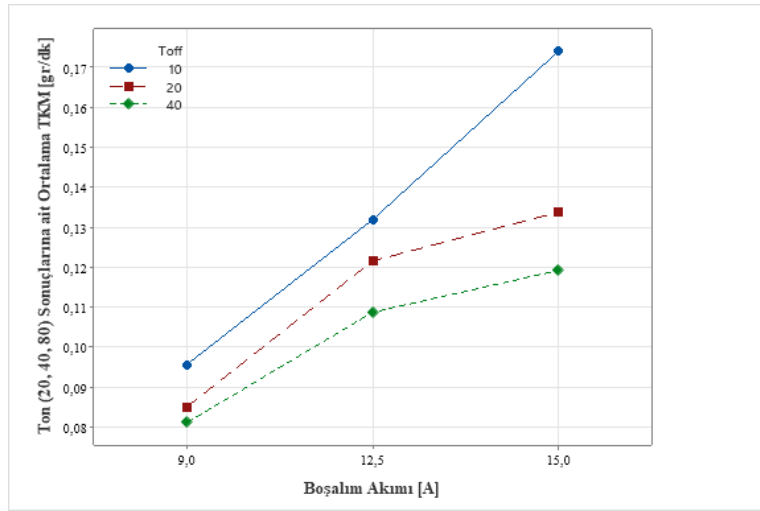
TAM değerleri için deney sonuçları incelendiğinde; I_p ve T_{off} değerlerinin artışının TAM değerlerini arttırdığı, ancak Ton değerlerindeki artışın TAM değerlerini azalttığı anlaşılmaktadır (Şekil 7-8). Şekil 9 ve 10'da verilen R_a sonuçlarına ait grafikler incelendiğinde; I_p ve T_{on} değerlerindeki artışın yüzey pürüzlülüğünün artmasına, T_{off} değerlerindeki artışın ise yüzey pürüzlülüğünün azalmasına sebep olduğu görülmektedir. Elde edilen bu sonuçlar literatür çalışmaları ile uyumluluk göstermektedir.

Tablo 7. Deney sonuçları tablosu (Table of experimental results)

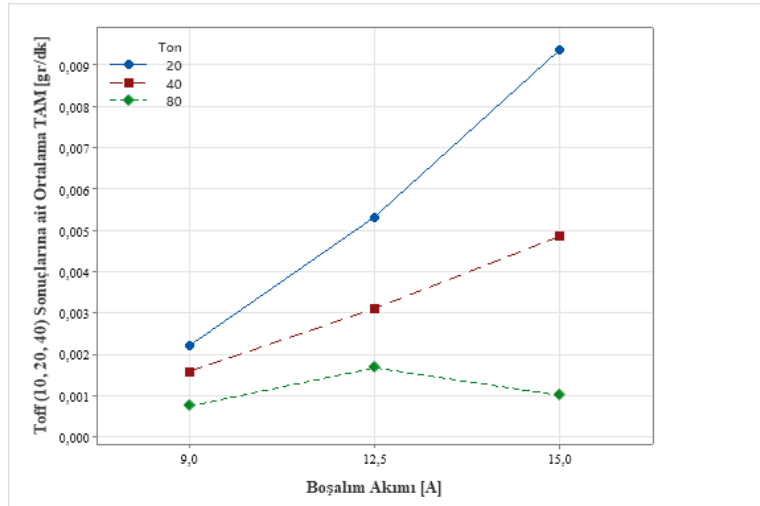
Deney Numarası	I_p [A]	T_{on} [μ s]	T_{off} [μ s]	Numunenin İlk Ağırlığı [gr]	Takım İlk Ağırlığı [gr]	Numunenin Son Ağırlığı [gr]	Takım Son Ağırlığı [gr]	İşleme Süresi [dk]	TKM [gr/dk]	TAM [gr/dk]	R_a [μ m]
1	9	20	10	58,7253	56,6134	58,2042	56,5924	8,967	0,058115	0,002342	6,489
2	9	20	20	57,7306	56,5974	57,2659	56,5746	12,033	0,039000	0,001895	5,492
3	9	20	40	57,2613	56,6223	56,7972	56,5988	9,900	0,047343	0,002374	5,483
4	9	40	10	56,7926	56,5769	56,3415	56,5724	4,483	0,101665	0,001004	7,390
5	9	40	20	56,3368	56,5746	55,8606	56,5642	5,067	0,094895	0,002053	6,407
6	9	40	40	55,8506	56,5988	55,3715	56,5889	5,850	0,083607	0,001692	7,169
7	9	80	10	55,3615	56,5724	54,8755	56,5698	3,900	0,127179	0,000667	9,306
8	9	80	20	54,8655	56,8310	54,3702	56,8290	4,167	0,121272	0,000480	8,771
9	9	80	40	54,3592	56,8290	53,8702	56,8242	4,450	0,112360	0,001079	7,970
10	12,5	20	10	53,8375	56,5970	53,4114	56,5692	5,717	0,080257	0,004863	6,861
11	12,5	20	20	53,3787	56,5713	52,9364	56,5351	6,617	0,071773	0,005471	6,171
12	12,5	20	40	52,9038	56,5894	52,4893	56,5502	6,950	0,064331	0,005640	5,699
13	12,5	40	10	52,4567	56,5692	52,0082	56,5578	3,433	0,140155	0,003320	8,106
14	12,5	40	20	51,9755	56,5351	51,5120	56,5241	3,817	0,130009	0,002882	6,583
15	12,5	40	40	51,4793	56,5509	51,0416	56,5373	4,367	0,107702	0,003115	6,374
16	12,5	80	10	51,0090	56,5900	50,5332	56,5870	2,900	0,175310	0,001034	9,910
17	12,5	80	20	50,5006	56,2574	50,0281	56,2525	3,100	0,162935	0,001581	9,237
18	12,5	80	40	49,9955	56,5870	49,5142	56,5790	3,333	0,154200	0,002400	8,014
19	15	20	10	58,2042	56,5924	57,7352	56,5549	4,033	0,116281	0,009298	8,694
20	15	20	20	49,4815	56,1072	49,0417	56,0584	5,150	0,091748	0,009476	8,747
21	15	20	40	49,0090	56,2525	48,5780	56,1933	6,317	0,073393	0,009372	9,486
22	15	40	10	48,5454	55,8790	48,0738	55,8705	2,783	0,181186	0,003054	8,525
23	15	40	20	48,0411	56,0584	47,5902	56,0401	3,217	0,150342	0,005689	7,363
24	15	40	40	47,5575	55,8705	47,1126	55,8489	3,700	0,129081	0,005838	9,311
25	15	80	10	47,0799	56,6015	46,5960	56,5995	2,300	0,224609	0,000870	10,504
26	15	80	20	46,5300	56,5949	46,1287	56,5918	2,933	0,159307	0,001057	9,580
27	15	80	40	46,0627	55,5052	45,6399	55,5018	3,150	0,155175	0,001079	9,470



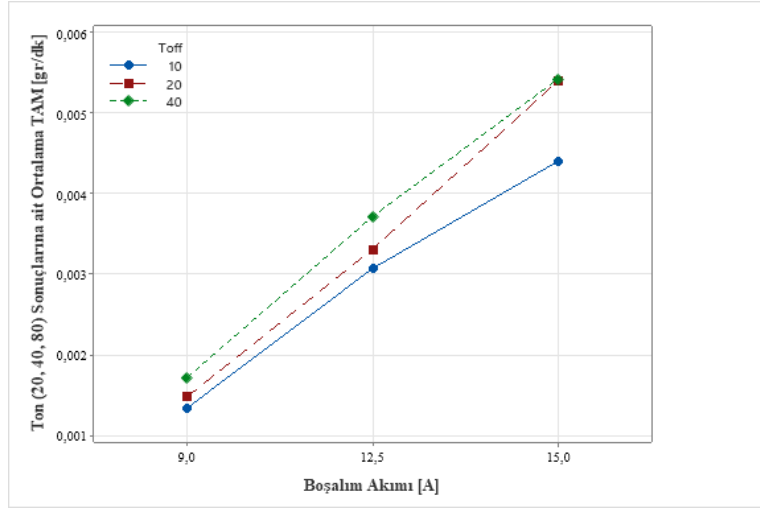
Şekil 5. TKM'nin I_p ve T_{on} değerlerine göre değişimi (Variation of TKM according to I_p and T_{on} values)



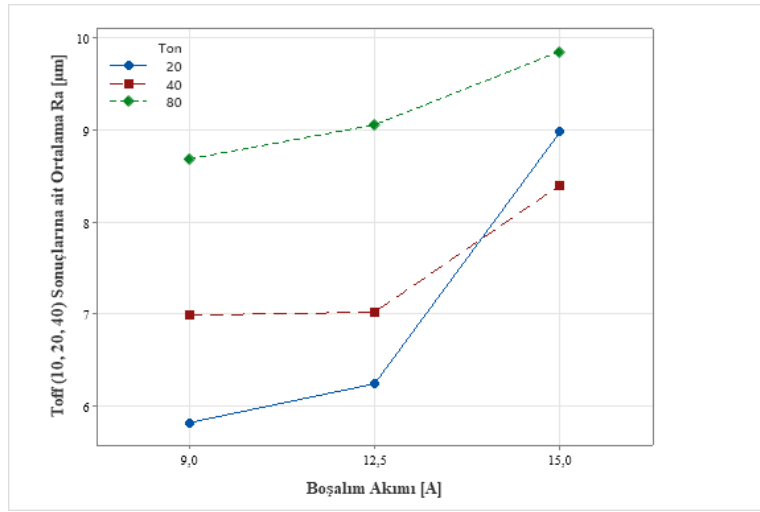
Şekil 6. TKM'nin I_p ve T_{off} değerlerine göre değişimi (Variation of TKM according to I_p and T_{off} values)



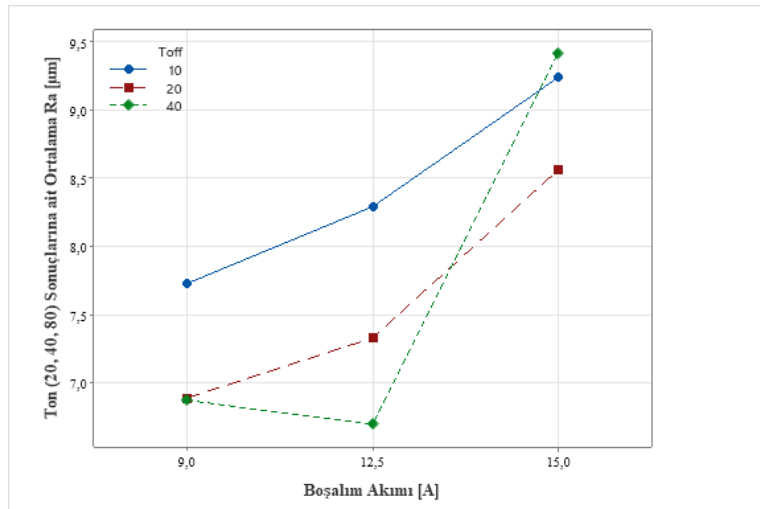
Şekil 7. TAM'ın I_p ve T_{on} değerlerine göre değişimi (Variation of TAM according to I_p and T_{on} values)



Şekil 8. TAM'ın I_p ve T_{off} değerlerine göre değişimi (Variation of TAM according to I_p and T_{off} values)



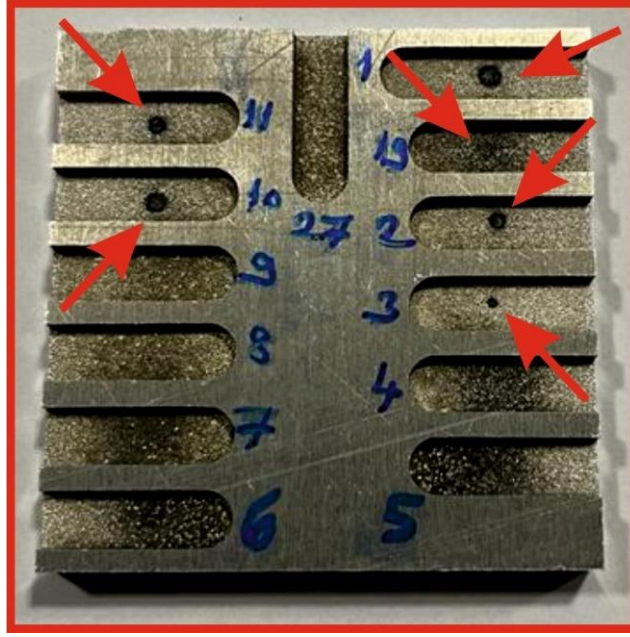
Şekil 9. R_a 'nın I_p ve T_{on} değerlerine göre değişimi (Variation of R_a according to I_p and T_{on} values)



Şekil 10. R_a 'nın I_p ve T_{off} değerlerine göre değişimi (Variation of R_a according to I_p and T_{off} values)

1, 2, 3, 10, 11 ve 19 numaralı deneylerde oluşan yüzeylerin üzerinde koyu renkli bölgelerin oluştuğu görülmüştür (Şekil 11). Bu bölgelerin, işleme esnasında takıma karbon moleküllerinin yapışması

ve bundan dolayı takım iş parçası arasında meydana gelen kısa devre sebebiyle oluştuğu bilinmektedir [20].



Şekil 11. Takım ve numune arasında kısa devre oluşan deneyler (Experiments with a short circuit between the tool and the specimen)

EEİ bünyesinde çok yönlü ve bütünlük alt işlemler barındıran bir operasyon olup; elektrik, akışınlar mekaniği, ısı transferi ve kimyasal reaksiyon gibi çoklu fiziksel olayların eş zamanlı meydana gelmesiyle gerçekleşmektedir. Bu sebeple performans çıktılarının yorumlanmasında ve en uygun değerlerin belirlenmesinde istatistiksel yöntemlerden de faydalanılmıştır. Performans çıktılarının analizi için Minitab programında yer alan Yanıt Yüzeyi Metodolojisi (Response Surface Design (RSM)) modülü kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan bu metot, süreçleri geliştirmek, iyileştirmek ve optimize etmek için sıklıkla tercih edilen istatistiksel ve matematiksel bir yöntemdir [21].

Minitab'de TKM, TAM ve R_a sonuçları için oluşturulan modellerin performanslarına ait bilgiler Tablo 8'de verilmiştir. Tablo 8'de yer alan S değeri,

deney sonuçları ile programın oluşturduğu modelin arasındaki farkın standart sapmasını ifade etmektedir. Dolayısıyla bu değer 0 eşit veya yakın olması modelin verdiği yanıtın başarısını arttırmaktadır. Tabloda yer alan R-sq değeri oluşturulan model ile deney verilerinin uyum yüzdesini ifade etmektedir. Tablodaki R-sq(adj) değeri, model tarafından elde edilen sonuçların varyasyonunun, deney sayısına göre modeldeki tahminlerin ayarlanmış yüzdesini ifade etmektedir. Son olarak tabloda yer alan R-sq(pred) değeri modelin yeni deney sonuçları için yanıtı ne kadar iyi tahmin ettiğini göstermektedir. İşleme parametrelerinin performans çıktıları üzerine olan etkisinin belirlenmesi amacıyla varyans analizi (ANOVA) sonuçları elde edilerek Tablo 9'da verilmiştir. Varyans analizi sonuçlarından TKM, TAM ve R_a sonuçları üzerinde sırasıyla T_{on} , I_p ve T_{off} parametrelerinin etkili olduğu anlaşılmaktadır

Tablo 8. Deney sonuçlarına ait modellerin performans parametreleri (Performance parameters of the models of the experimental results)

	S	R-sq (%)	R-sq(adj) (%)	R-sq(pred) (%)
TKM	0,0093748	97,18	95,69	92,61
TAM	0,0007931	94,48	91,56	86,42
R_a	0,605613	89,03	83,23	73,38

Tablo 9. Modellerin varyans analizi (ANOVA) sonuçları (Results of analysis of variance (ANOVA) of models)

Terim	Serbestlik Derecesi	TKM		TAM		R _a	
		Düzeltilmiş Kareler Toplamı	F-Değeri	Düzeltilmiş Kareler Toplamı	F-Değeri	Düzeltilmiş Kareler Toplamı	F-Değeri
Model	9	0,05149	65,1	0,000183	32,34	50,6254	15,34
Doğrusal etki	3	0,04722	179,09	0,000129	68,43	39,4926	35,89
I _p	1	0,012595	143,31	0,000046	72,8	15,2284	41,52
T _{on}	1	0,029979	341,11	0,000082	129,86	20,6619	56,34
T _{off}	1	0,004054	46,13	0,000002	3,27	3,1381	8,56
Karelerin etkisi	3	0,004262	16,16	0,000006	3,12	6,5223	5,93
I _p x I _p	1	0,000011	0,12	0	0,48	4,1915	11,43
T _{on} x T _{on}	1	0,00366	41,65	0,000005	8,38	0,4259	1,16
T _{off} x T _{off}	1	0,000591	6,72	0	0,49	1,9049	5,19
İkili etkileşim	3	0,001181	4,48	0,000032	17,04	3,7749	3,43
I _p x T _{on}	1	0,000134	1,52	0,000032	50,72	2,1054	5,74
I _p x T _{off}	1	0,000986	11,22	0	0,32	0,6669	1,82
T _{on} x T _{off}	1	0,000061	0,69	0	0,09	1,0025	2,73
Hata	17	0,001494		0,000011		6,235	
Toplam	26	0,052984		0,000194		56,8604	

Oluşturulan modellere ait katsayılar ve P-değerleri ise Tablo 10'da verilmiştir. Tablo 10'da verilen ve her bir model tarafından hesaplanan katsayılar, modelin etkililiğini incelemek için kullanılır. Aynı tabloda yer alan P-değerleri ise ilgili terimlerin TKM, TAM ve R_a modellerindeki istatistiksel önemini ifade etmektedir. Literatür çalışmalarında, P-değerinin 0,05 değerinden düşük veya eşit olmasının ilgili parametrenin model için istatistiksel

olarak anlamlı olduğu ifade edilmektedir [21]. Tablo 9'da verilen katsayıları ve P-değerleri dikkate alınarak TKM, TAM ve R_a için regresyon denklemleri elde edilmiştir (Eşitlik 3.3,3.4 ve 3.5). I_p, T_{on} ve T_{off} etkisi gözlemlenen deney parametreleri olması sebebiyle tekil etkilerinin P-değerlerine bakılmaksızın regresyon denklemlerinde yer alması gerekmektedir.

Tablo 10. Modellere ait katsayılar ve P-değerleri (Coefficients and P-values of the models)

Terim	TKM		TAM		R _a	
	Katsayı	P-Değeri	Katsayı	P-Değeri	Katsayı	P-Değeri
Denklem Sabiti	0,13103	0,000	0,002289	0,000	6,664	0,000
I _p	0,02692	0,000	0,001623	0,000	0,936	0,000
T _{on}	0,04125	0,000	-0,002153	0,000	1,083	0,000
T _{off}	-0,01517	0,000	0,000341	0,088	-0,422	0,009
I _p x I _p	-0,00138	0,731	0,000232	0,497	0,864	0,004
T _{on} x T _{on}	-0,02830	0,000	0,001074	0,010	0,305	0,296
T _{off} x T _{off}	0,01137	0,019	-0,000261	0,492	0,646	0,036
I _p x T _{on}	0,00326	0,234	-0,001594	0,000	-0,409	0,028
I _p x T _{off}	-0,00886	0,004	0,000126	0,581	0,230	0,195
T _{on} x T _{off}	-0,00217	0,417	0,000067	0,765	-0,279	0,117

$$TKM = 0,13103 + 0,02692I_p + 0,04125T_{on} - 0,01517T_{off} - 0,02830T_{on}^2 + 0,01137T_{off}^2 - 0,00886I_pT_{off} \quad (3.3)$$

$$TAM = 0,002289 + 0,001623I_p - 0,002153T_{on} - 0,000341T_{off} - 0,001074T_{on}^2 - 0,001594I_pT_{on} \quad (3.4)$$

$$R_a = 6,664 + 0,936I_p + 1,083T_{on} - 0,422T_{off} + 0,864I_p^2 + 0,646T_{off}^2 - 0,409I_pT_{on} \quad (3.5)$$

4. OPTİMİZASYON (OPTIMIZATION)

Performans çıktılarının optimizasyonu için Minitab programında yer alan “Response Optimizer” modülü kullanılmıştır. Bu aşamada daha önce oluşturulmuş modeller aracılığıyla üç performans çıktısı (Eş. 3.3,3.4,3.5) eş zamanlı olarak optimize edilecek ve optimum faktör değerlerinin belirlenmesi gerçekleştirilecektir. Optimizasyon sonucunda performans çıktılarından TKM'nin en büyük, TAM ve Ra'nın ise en küçük olması hedeflenmektedir.

Optimizasyon hedeflerinin tanımlanması işleminin ardından optimizasyon işlemi gerçekleştirilmiştir (Şekil 12). Hesaplanan optimum performans çıktıları ve bu değerlerin elde edildiği işleme parametreleri Tablo 11’de verilmiştir.

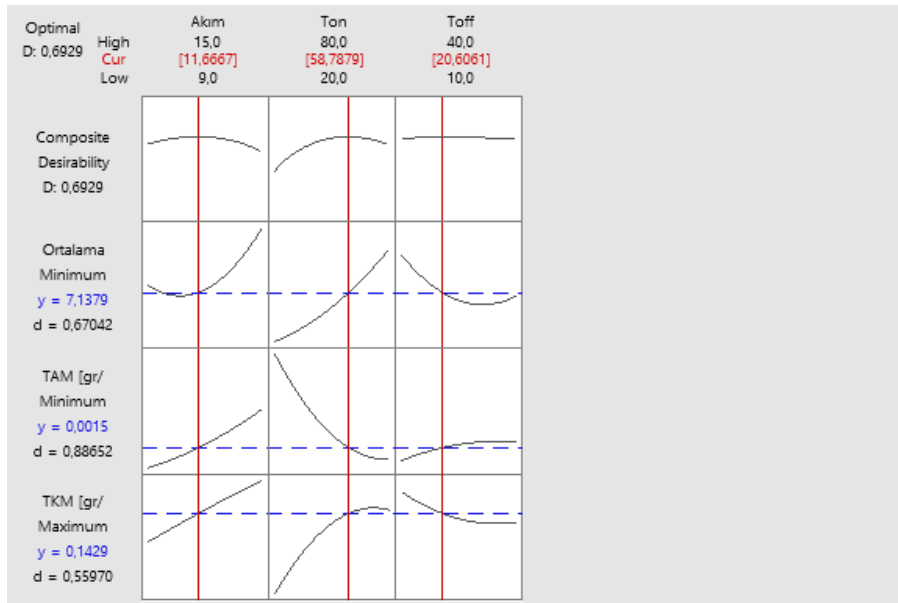
Tablo 11’de verilen işleme parametreleri kullanılarak yapılacak deneylerin sonuçları TKM, TAM ve Ra için en iyi sonuçları verecektir. Bu noktada erozyon tezgahının elde edilen işleme parametrelerinde çalıştırılabilmesi karşılaşılabilecek tek kısıttır. En iyi sonuçların elde edileceği işleme parametreleri deneylerin yapıldığı elektro erozyon tezgahının çalışma sınırları içerisinde.

5. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışmada boşalım akımı, vurum süresi ve vurum aralığı parametrelerinin elektro erozyon yöntemiyle işlenen Al2024-T3 ile ilişkisi incelenmiştir. İnceleme TKM, TAM ve Ra sonuçları üzerinden yapılmıştır. Deney sonuçları literatür çalışmaları ile uyumluluk gösterdiği anlaşılmaktadır. Deney sonuçlarının yorumlanmasında Yanıt Yüzeyi Metodolojisi aracılığıyla oluşturulan modellerden faydalanılmıştır. Çalışmanın son kısmında performans çıktıları için hedefler belirlenerek, optimum değerlerin elde edileceği işleme parametreleri ($I_p=11,6667$, $T_{on}= 58,7879$ ve $T_{off}= 20,6061$) tespit edilmiştir.

Çalışmada sonunda tespit edilen optimum sonuçların elde edileceği işleme parametreleri incelendiğinde deney tasarımında belirlenen parametrelerinin en büyük ve en küçük değerlerinin arasında kalan değerler olduğu görülmektedir. Aksi bir durumda yani sınır değerlerin optimum sonuçları sağladığı tespit sonucu elde edilmiş olsaydı, deney tasarımında belirlenen parametrelerin gözden geçirilmesi söz konusu idi.

Bu çalışma ile aynı koşullar altında araştırma yapan ve sonuçlarını bu çalışmada elde edilen verilerle karşılaştıran araştırmalara yardımcı olacağı ve literatüre katkı sağlayacağı düşünülmektedir.



Şekil 12. “Response Optimizer” sonuçları (“Response Optimizer” results)

Tablo 11. Optimum işleme parametreleri ve sonuçları (Optimum machinnig parameters and their results)

I_p [A]	T_{on} [μ s]	T_{off} [μ s]	TKM [gr/dk]	TAM [gr/dk]	R_a [μ m]
11,6667	58,7879	20,6061	0,14288	0,001501	7,138

ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazarı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

The author of this article declares that the materials and methods they use in their work do not require ethical committee approval and/or legal-specific permission.

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

Semih GÜNER: Deneyleri yapmış, sonuçlarını analiz etmiştir.

He conducted experiments and analyzed the results.

Mustafa YURDAKUL: Verileri analiz etmiştir sonuçları yorumlamıştır.

He analyzed the data and interpreted the results.

Emre AYHAN: Verilerin analizinde kullanılan modelleri oluşturmuş ve makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

He created the models used in the analysis of the data and wrote the article.

Yusuf Tansel İÇ: Verileri analiz etmiş ve sonuçları yorumlamıştır.

He analyzed the data and interpreted the results.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

There is no conflict of interest in this study.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Dave, S., Vora, J. J., Thakkar, N., Singh, A., Srivastava, S., Gadhvi, B., Patel, V., & Kumar, A. (2016). Optimization of EDM Drilling Parameters for Aluminum 2024 Alloy Using Response Surface Methodology and Genetic Algorithm. *Key Engineering Materials*, 706, 3–8.
- [2] Norliana Mohd Abbas, Darius G. Solomon, Md. Fuad Bahari (2077). A review on current research trends in electrical discharge machining (EDM). *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 47(7-8), 1214-1228.

- [3] Srivastava, A., Dixit, A. R., and Tiwari, S. (2014). Experimental investigation of wire edm process parameters on aluminium metal matrix composite Al2024/SiC, *International Journal of Advanced Research and Innovation*, 2(2), 511-515.
- [4] Mehmood, S., Shah, M., Pasha, R. A., and S. A. (2017). Evaluation of fatigue behaviour and surface characteristics of aluminium alloy 2024 T6 after electric discharge machining, *Journal of Materials Engineering and Performance*, 26(10), 4910-4922.
- [5] Arunachalam, S. R., Galyon Dorman, S. E., Buckley, R. T., Conrad, N. A., and Fawaz, S. A. (2018). Effect of electrical discharge machining on corrosion and corrosion fatigue behavior of aluminium alloys, *International Journal of Fatigue*, 111, 44-53.
- [6] Kumar, T. R., Guruprakash, T., Kumar, P. R., and Gokul, R. (2019). Study on surface roughness and material removal rate (MRR) of aluminium 2024 in electrical discharge machining, *International Journal of Engineering Applied Sciences and Technology*, 4(7), 144-148.
- [7] Yahya, A., and Manning, C. D. (2004). Determination of material removal rate of an electro-discharge machine using dimensional analysis, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 37(10), 1467-1471.
- [8] Singh, V., and Pradhan, S. K. (2013). Optimization of EDM process parameters: a review, *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 3(4).
- [9] Sanghani, C. R., and Acharya, G. D. (2014). A review of research on improvement and optimization of performance measures for electrical discharge machining, *Journal of Engineering Research and Applications*, 4(1), 433-450.
- [10] Bhuyan, R. K., Routara, B. C., and Parida, A. K. (2015). An approach for optimization the process parameter by using TOPSIS method of Al-24%SiC metal matrix composite during

- EDM, *Materials Today: Proceedings*, 2(4-5), 3116-3124.
- [11] Daneshmand, S., and Msoudi, B. (2018). Investigation and optimization of the electro-discharge machining parameters of 2024 aluminium alloy and Al/7.5%Al₂O₃ particulate-reinforced metal matrix composite, *Sci Eng Compos Mater*, 25(1), 159-172.
- [12] Satpathy, A., Tripathy, S., Senapati, N. P., and Brahma, M. K. (2017). Optimization of EDM process parameters for AlSiC-20% SiC reinforced metal matrix composite with multi response using TOPSIS, *Materials Today: Proceedings*, 4(2), 3043-3052.
- [13] Alagarsamy, S. V., Ravichandran, M., Sakthivelu, S., Kumar, S. D., Chanakyan, C., and Meignanamoorthy, M. (2020). Optimization of electric discharge machining parameters on surface roughness for Al/ZrO₂ composite through response surface methodology, *Materials Today: Proceedings*, 27(2), 1006-1012.
- [14] Phimoolchat, J., and Muttamara, A. (2019). Multi-objective optimization of electro discharge machining parameters for 2024 aluminum alloys using Grey-Taguchi method, *Materials Science Forum*, 998, 55-60.
- [15] Işık, A. T. (2022). *Semente Karbürün Elektro Erozyon ile İşlenmesinde İşleme Parametrelerinin Optimizasyonu (Doktora tezi)*. Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük.
- [16] Samuel, A. U., Araoyinbo, A. O., Elewa, R. R., and Biodun, M. B. (2021). Effect of Machining of Aluminium Alloys with Emphasis on Aluminium 6061 Alloy – A Review, *IOP Conf. Ser.*, 1107, 012157.
- [17] Kabakçı, M. O., Karaağaç, İ., ve Demirel, M. Y. (2020). Tavlama İşleminin Al 2024-T3 Sac Malzemesinin Şekillendirilebilirliğine ve Mikroyapıya Etkilerinin Deneysel Araştırılması. *Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology*, 8(1), 169-181.
- [18] Aydın, H., ve Bayram, A. (2010). Farklı Isıl İşlem Koşullarındaki 2024 Alüminyum Alaşımlarının Korozyon Sonrası Mekanik Özelliklerindeki Kaybın Belirlenmesi. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 15(1).
- [19] Yahya, A., Manning C.D. (2004), Determination of material removal rate of an electro-discharge machine using dimensional analysis. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 37, 1467–1471.
- [20] Işık, A. T., Cakıroğlu, R. (2022). Investigation of Workpiece and Tool Surface Quality in Electro Discharge Machining of Al 5083 Alloy Produced by Powder Metallurgy. *İmalat Teknolojileri ve Uygulamaları*, 3(1), 47-58.
- [21] Emre Ayhan, Mustafa Yurdakul, Can Çoğun and Yusuf Tansel iç (2023), The entropy method integrated RSM model to evaluate hole geometries in electrochemical blind hole drilling, *Australian Journal of Mechanical Engineering*.

Utilizing Alkali Pre- Treated Banana Waste in Sustainable Particleboard Manufacturing

Abdullah BERAM^{1*} 

¹Pamukkale University, Faculty of Architecture and Design, Department of Industrial Design, Denizli, Türkiye

Article Info

Research article
Received: 13/03/2024
Revision: 15/03/2024
Accepted: 16/03/2024

Keywords

Waste Utilization
Alkaline Pretreatment
Sustainable Materials
Particleboard

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 13/03/2024
Düzeltilme: 15/03/2024
Kabul: 16/03/2024

Anahtar Kelimeler

Atık Kullanımı
Alkali Ön İşlem
Sürdürülebilir Malzemeler
Yongalevha

Graphical/Tabular Abstract (Grafik Özet)

In this study, the board production performance of particles obtained from the leaves and stems of the waste banana plant was examined. Alkaline pre-treatment was applied to the particles to examine the effect on usage performance before production. / Bu çalışmada, atık halde bulunan muz bitkisinin yaprak ve gövdelerinden elde edilen yongaların levha üretim performansı incelenmiştir. Yongalara çalışma öncesi kullanım performansı etkisini incelemek için alkali ön işlem uygulanmıştır.



Figure A: Board production process / Şekil A: Levha üretim süreci

Highlights (Önemli noktalar)

- It attracts attention with its alternative raw material source and usage possibilities. / Alternatif hammadde kaynağı ve kullanım olanakları bakımından dikkat çekmektedir.
- The performance of the boards obtained from banana waste reveals their usability. / Muz atıklarından elde edilen levhaların performansları kullanılabilirliğini ortaya koymaktadır.
- The effect of alkali pretreatment application on the boards is clearly seen. / Alkali ön işlem uygulamasının yongalar üzerine etkisi açıkça görülmektedir.

Aim (Amaç): The aim of this study is primarily to evaluate banana plant wastes that are waste and not used in any way. It is to obtain added value by producing particleboard from waste materials. Additionally, performance differences can be achieved through alkaline pre-treatment application. / Bu çalışmadaki amaç öncelikle atık halde bulunan ve her hangi bir şekilde kullanılmayan muz bitkisi atıklarının değerlendirilmesidir. Atıklardan yongalevha üretirek katkı değer elde etmektir. Ayrıca, alkali ön işlem uygulaması ile de performans farklılıkları oluşturmaktadır.

Originality (Özgünlük): In this study, alkaline pre-treatment was applied to waste banana plant particles before board production. In this way, its effects on board performance were added to the literature. / Bu çalışmada, atık muz bitkisi yongalarına levha üretim öncesi alkali ön işlem uygulaması yapılmıştır. Bu sayede, levha performansı üzerine etkileri literatüre eklenmiştir.

Results (Bulgular): There have been changes in the performance of the boards produced with alkaline pretreatment applied at different concentrations. The ideal concentration rate was found to be 1%. There were also notable differences in surface properties. / Farklı derişimlerde uygulanan alkali ön işlem ile üretilen levhaların performanslarında değişimler olmuştur. İdeal derişim oranının %1 olduğu görülmüştür. Yüzeý özelliklerinde de dikkate değer farklılıklar gerçekteşmiştir.

Conclusion (Sonuç): It reveals the feasibility of using banana waste as an alternative raw material source in particleboard production. / Muz atıklarının yongalevha üretiminde alternatif bir hammadde kaynağı olarak kullanılmasının uygulanabilirliğini ortaya koymaktadır.



Utilizing Alkali Pre- Treated Banana Waste in Sustainable Particleboard Manufacturing

Abdullah BERAM^{1*}

¹Pamukkale University, Faculty of Architecture and Design, Department of Industrial Design, Denizli, Türkiye

Article Info

Research article
Received: 13/03/2024
Revision: 15/03/2024
Accepted: 16/03/2024

Keywords

Waste Utilization
Alkaline Pretreatment
Sustainable Materials
Particleboard

Abstract

Banana (*Musa acuminata* colla) cultivation and trade are widespread across various regions and countries globally. Nonetheless, substantial quantities of waste, primarily comprising leaves and stems of the banana plant, are annually disposed of into the environment post-harvest. This study aims to highlight this issue and propose an alternative solution in response to the escalating demand for raw materials. To this end, alkaline pretreatment was administered to particles derived from banana waste leaves and stems using NaOH solutions at concentrations of 1%, 3%, and 5%, followed by board production. Results indicate that water absorption (WA) and thickness swelling (TS) values of the produced boards increased with alkaline treatment. However, the mechanical properties stipulated in the TS-EN 312 (2012) standard were satisfactorily achieved with 1% NaOH treatment, while higher concentrations adversely affected internal bond strength (IB), modulus of elasticity (MOE), and modulus of rupture (MOR). In the surface properties tests of the boards, increasing the alkali concentration decreased values of the surface roughness and the contact angle. Overall, the findings suggest the viability of utilizing banana waste as an alternative resource.

Sürdürülebilir Yongalevha Üretiminde Alkali Ön İşlem Uygulanmış Muz Atığının Kullanımı

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 13/03/2024
Düzeltilme: 15/03/2024
Kabul: 16/03/2024

Anahtar Kelimeler

Atık Kullanımı
Alkali Ön İşlem
Sürdürülebilir Malzemeler
Yongalevha

Öz

Muz bitkisi (*Musa acuminata* colla) dünyanın birçok bölgesinde ve ülkesinde üretimi ve ticareti yapılmaktadır. Bununla birlikte, her yıl muz bitkisinin yaprak ve saplarından oluşan önemli miktarda atık, hasat sonrasında çevreye atılmaktadır. Bu çalışma, bu konuyu vurgulamayı ve artan hammadde talebine yanıt olarak alternatif bir çözüm önermeyi amaçlamaktadır. Bu amaçla, atık halde bulunan muz yaprakları ve gövdelerinden elde edilen yongalara, %1, %3 ve %5 derişimlerde NaOH çözeltileri kullanılarak alkali ön işleme uygulanmış ve ardından levha üretimi gerçekleştirilmiştir. Üretilen levhaların su alma (SA) ve kalınlığına şişme (KŞ) değerleri alkali işlem derişimi arttıkça yükselmiştir. TS-EN 312 (2012) standardında beklenen mekanik özelliklere %1'lik NaOH işlemi grup örneklerinde ulaşılmıştır. Derişimin daha fazla artması, eğilmede elastikiyet modülü (EM), eğilme direnci (ED) ve yüzeye dik çekme direnci (YDÇD) değerlerinin düşmesine neden olmuştur. Levhaların yüzey özellikleri testlerinde ise, alkali derişiminin artması yüzey pürüzlülüğünü azaltmış, temas açısını düşürmüştür. Bu çalışmanın sonuçları genel olarak, muz atıklarının alternatif bir kaynak olarak kullanılmasının uygulanabilirliğini ortaya koymaktadır.

1. INTRODUCTION (GİRİŞ)

Wood material, which has an important place in the social, economic and technological development of humanity, is decreasing day by day. It is having difficulty meeting the increasing demand. Increasing demand for forest products has put the forest industry in search of alternative raw material sources. At present, wood costs are generally on the rise due to surpassing demand over supply. So, non-

wood lignocellulosic resources, particularly agricultural wastes, are currently being utilized or introduced as feedstock for pulp, paper, and composite production in the wood industry [1-7].

In the 21st century, the importance of clean production and sustainability issues has increased. Therefore, there has been greater focus in the particleboard industry on environmental factors such as sustainable forest management practices

and recycling processes [8-10]. Hence, assessing the viability of employing diverse types of agricultural residues in the production of composites, contingent upon the characteristics of the raw materials, holds significant importance. Particleboard is a type of board produced naturally or synthetically, wood-based, in different forms. This versatile material finds applications ranging from exterior facades of architectural structures to interior coverings, as well as in furniture and packaging industries [11-14].

Different methods are used for lignocellulosic materials to increase usability efficiency in particle board production. Alkali pretreatment is one of these methods. Alkali treatment is a commonly employed method to alter the surface characteristics of particles and fibers, thereby augmenting the presence of reactive OH groups in the material. This process facilitates enhanced adhesion between particles and fibers, consequently improving the mechanical properties of composites. Sodium hydroxide (NaOH) serves as a frequently utilized chemical reagent for treating both wooden and non-wooden materials to improve the mechanical properties [15-20].

The global banana industry spans over 130 countries, encompassing more than 5 million hectares of plantation and yielding a total production of 96 million tons, as reported by the FAO in 2018. Notably, over 80% of the bananas harvested are designated for local consumption within the respective countries of cultivation. With international trade of approximately \$9 million annually, it benefits many developing countries [21-22]. Banana fibers, originating as agricultural waste from banana cultivation, are abundantly found in tropical regions worldwide. These fibers are typically categorized as lignocellulosic materials, characterized by helically woven cellulose microfibrils embedded within an amorphous matrix composed of lignin and hemicelluloses [23-24].

Banana plantations worldwide generate substantial amounts of banana waste, including banana pseudostems, which are often left to decompose, releasing significant quantities of methane gas and carbon dioxide. The emissions resulting from burning this waste have a detrimental impact on the environment, potentially exacerbating global warming annually. On average, every ton of banana waste emits half a ton of carbon dioxide per year. Hence, there is a pressing need to explore the potential for converting this waste into a valuable resource by extracting fibers from bananas. Failure

to address this issue could lead to a significant disposal problem in the future [25-28].

This study explores the producing novel boards utilizing waste banana stems and leaves through a straightforward process technology, aiming to assess its effectiveness. For this purpose, collected banana leaves and stems were shredded and turned into particles. Alkaline pre-treatment was applied to the particles with NaOH solutions. The effect of alkali pretreatment application on the physical, mechanical and surface properties of the board was investigated.

2. MATERIALS AND METHODS (MATERİYAL VE METOD)

2.1. Material (Materyal)

Banana waste materials (leaves and stem) were collected from Anamur-Mersin region of Türkiye thrown into the environment as post-harvest waste in the summer of 2023. The collected waste materials were ground in a hammer mill to a size that could pass through 1-3 mm sieves. After grinding, the chips were dried until ready. Then, the resulting particles were spread out and air-dried for a period of 4 weeks. The hardener (Ammonium chloride) and resin (Urea formaldehyde) utilized in the study were procured from Aytteks Chemical Industry Ltd. Denizli/Türkiye. The hardener and resin used in production are products that have standard features and are widely used in the industry [17].

The particles used in the study were stored in NaOH solutions at concentrations of 1%, 3% and 5% (w/v) at room temperature for 24 hours. After treatment, they were thoroughly rinsed with water, kept in a 10% acetic acid solution to neutralize residual NaOH and then rinsed with water again. The rinsed fibers were spread and air dried.

2.2. Method (Metot)

Particleboard production was carried out by following the production stages in [17]. Compliance with the TS-EN 312 (2012) standard was ensured during sizing and conditioning phases [29]. Physical properties of the produced boards were assessed through water absorption (WA) and thickness swelling (TS) tests, while mechanical properties were evaluated through internal bond strength (IB), modulus of elasticity (MOE), and modulus of rupture (MOR) tests. Sample preparation and testing procedures adhered to relevant standards, namely TS-EN 319 (1999), TS-EN 310 (1999), and TS-EN 317 (1999) [30-32]. Surface roughness

measurements were performed according to DIN 4768 (1990) standard [33], and water contact angle measurements followed the same methodology as per DIN 4768 (1990) standard [34]. Consistently, identical equipment as detailed in [35] was utilized for both surface properties assessments.

SPSS® 20.0 for Windows® software was conducted for statistical analysis of the study's results. The data underwent analysis of variance (ANOVA) testing. In instances where the ANOVA test indicated statistical differences, a Duncan test was employed to identify distinct groups (IBM Corp., Armonk, NY, USA).

3. RESULTS (BULGULAR)

The physical properties of boards produced from untreated and treated banana particles are summarized in Table 1. Utilizing ANOVA analysis, a statistically significant distinction was observed between the untreated and treated groups concerning the physical properties of the specimens under investigation. Following the application of the Duncan test, four homogeneous clusters emerged within each dataset corresponding to TS-2, TS-24, WA-2, and WA-24.

Table 1. Physical properties of the boards produced from treated and untreated banana particles (Alkali ön işlem görmüş ve görmemiş yongalardan elde edilen levhaların fiziksel özellikleri).

Sample Type	WA-2 h	WA-24 h	TS-2 h	TS-24 h
Control	36.67 (2.57) ¹ a ²	58.05 (4.71) a	16.22 (2.84) a	26.45 (1.58) a
1% NaOH	45.71 (3.84) b	71.12 (5.04) b	23.61 (2.25) b	35.52 (2.05) b
3% NaOH	59.66 (4.62) c	84.39 (6.34) c	29.83 (1.93) c	41.78 (2.14) c
5% NaOH	74.24 (5.44) d	96.58 (6.07) d	34.18 (2.11) d	44.91 (2.86) d
* ¹ : Standard deviation, ² : Groups defined by different letters in each column according to the Duncan test (for D ₀ , WA (2 and 24 h), TS (2 and 24 h) and WPG p<0.01). N:20				

It was noted that the values for WA-2, WA-24, TS-2, and TS-24 increased with the escalation of NaOH solution concentrations at 1%, 3%, and 5% during alkali modification. Research indicates that with higher concentrations of NaOH in the particles or fibers of lignocellulosic-based products subjected to alkali treatment, there is a decrease in the quantity of hydrophobic extractive substances and lignin. Although the quantity of hydrophilic hemicellulose diminishes post-treatment, there is a proportional increase in the content of hydrophilic cellulose [15, 17, 36-38].

The mechanical properties of boards fabricated from untreated and treated banana particles are detailed in Table 2. A significant difference was detected in the mechanical characteristics of the test samples between the treated and untreated groups, as per the ANOVA analysis. Following the application of the Duncan test, three homogenous groups were delineated for each of the variables: MOR, MOE, and IB.

Table 2. Mechanical properties of the boards produced from treated and untreated banana particles (Alkali ön işlem görmüş ve görmemiş yongalardan elde edilen levhaların mekanik özellikleri).

Sample Type	MOR (N/mm ²)	MOE (N/mm ²)	IB (N/mm ²)
Control	9.51 (0.68) ¹ b ²	1483 (93) b	0.25 (0.04) b
1% NaOH	11.87 (1.14) a	1726 (138) a	0.30 (0.04) a
3% NaOH	9.43 (0.32) b	1439 (105) b	0.23 (0.03) b
5% NaOH	7.21 (0.58) c	1174 (114) c	0.17 (0.05) c
* ¹ : Standard deviation, ² : Groups defined by different letters in each column according to the Duncan test (for MOR, MOE, and IB p < 0.05); N=10			

In comparison to boards manufactured with untreated particles, those crafted with 1% NaOH-treated particles exhibited elevated MOE, MOR, and IB values. Particleboards treated with 3% NaOH displayed mechanical properties that did not

significantly differ from untreated boards. However, particleboards treated with 5% NaOH exhibited significantly lower mechanical properties. The study's findings indicate that only boards manufactured with 1% NaOH treated particles

fulfilled the minimum requirements for MOE, MOR, and IB values (should have minimum values of 1600 N/mm², 10 N/mm² and 0.24 N/mm² respectively) specified for interior fitment particleboards (including furniture) and general-purpose applications in dry conditions, as outlined in TS-EN 312, 2012 [29]. However, applying more than 1% NaOH treatment resulted in a decline in mechanical property values. Lignin serves as a natural adhesive, contributing to robust adhesion and thereby enhancing bonding and dimensional stability. However, the application of alkali pretreatment leads to a reduction in lignin content, potentially compromising adhesion and internal bonding. Research indicates that exceeding a 1%

NaOH concentration in lignocellulosic fibers can induce fiber weakening, ultimately resulting in diminished mechanical properties [38-40].

Table 3 presents the surface roughness and contact angle attributes of board samples produced from both untreated and treated banana particles. The ANOVA test revealed a statistically significant distinction in surface properties between the experimental specimens of the untreated and treated sample groups. Subsequent application of the Duncan test identified three coherent and comparable groups within each dataset pertaining to surface roughness and contact angle.

Table 3. Surface roughness and contact angle properties of the boards produced from treated and untreated banana particles. (Alkali ön işlem görmüş ve görmemiş yongalardan elde edilen levhaların yüzey pürüzlülüğü ve temas açısı özellikleri).

Sample Type	Surface roughness (Ra) ()	Changes (%)	Contact Angle (°)	Changes (%)
Control	13.89 (1.46) ¹ a ²	-	67 (5.36) a	-
1% NaOH	10.56 (0.85) b	-23.9	54 (4.06) b	-19.4
3% NaOH	8.37 (0.66) c	-39.7	45 (3.74) c	-32.8
5% NaOH	7.22 (0.41) d	-48.1	39 (3.37) d	-41.8

¹: Standard deviation, ²: Groups defined by different letters in each column according to the Duncan test (surface roughness and contact angle p<0.01); N=10

Table 3 presents the average values of the three roughness parameters obtained from the sample surfaces. The average roughness parameter (Ra) exhibited a decrease with increasing solution ratio, ranging between 7.22 and 13.89. In comparison to the control group, the group treated with 1% NaOH displayed the smallest alteration, showing a 23.9% change, whereas the group treated with 5% NaOH demonstrated the most significant variation with a 48.1% shift. Research conducted by [41] established that the appropriate range of surface roughness for particleboard falls between 3.67 and 5.46 μm . Surface roughness is influenced by various factors, encompassing characteristics such as the annual ring structure, differentiation between hardwood and sapwood, as well as the distribution and cellular arrangement [42-44]. Moreover, the alkali concentration increase to a certain point is an effective method to increase the strength of banana fiber composites. However, increasing the concentration above certain points causes excessive "delignification" which causes weakening of fiber [45-47]. These fibers may increase adhesion and may also affect surface properties. Particles with enhanced adhesion potential could contribute to reduced roughness on the board surface.

Table 3 illustrates the contact angle values of the studied groups. It has been observed that as the NaOH concentration ratio increases, the contact angle decreases, with values ranging between 39 and 67. The highest hydrophobic sample group, exhibiting a contact angle of 67 was determined to be the control group, indicating a 41.8% decrease in hydrophobicity compared to the group treated with a 5% NaOH solution. Consistent with the findings regarding water absorption, an increase in NaOH solution ratio resulted in a decrease in the contact angle. The effect of alkali treatment on lignocellulosic material has been demonstrated by some studies. Enhanced deformation in the fibers makes the structure more hydrophilic. This situation can be explained by the gradual decrease of the contact angle on the surface [48-51].

4. CONCLUSIONS (SONUÇLAR)

In this study, banana waste materials (leaves and stem) made into particles were treated with 1%, 3% and 5% NaOH solutions. The alkali treatments effects on the physical and mechanical properties and surface properties of the particleboards produced were analyzed. The study was also conducted to highlight the significance and scale of

banana plant waste. Elevating the concentration of NaOH application caused the boards to have more hydrophilic properties. This aspect warrants further investigation, particularly in the context of utilizing banana waste biomass. The findings indicate that only boards manufactured with 1% NaOH treated particles fulfilled the minimum requirements for mechanical properties specified for TS-EN 312, 2012. However, the mechanical properties of the particleboards show promising results in terms of achieving the desired values through the development of different methods. It was determined that the contact angle values decreased as the NaOH solution concentration increased. Despite that, It was observed that the surface roughness gradually decreased with increasing NaOH solution. By conducting various surface properties research, boards with more quality surface properties obtained from banana waste can be produced.

DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS (ETİK STANDARTLARIN BEYANI)

The author of this article declares that the materials and methods they use in their work do not require ethical committee approval and/or legal-specific permission.

Bu makalenin yazarı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

AUTHORS' CONTRIBUTIONS (YAZARLARIN KATKILARI)

Abdullah BERAM: He conducted the experiments, analyzed the results and performed the writing process.

Deneyleri yapmış, sonuçlarını analiz etmiş ve maklenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

CONFLICT OF INTEREST (ÇIKAR ÇATIŞMASI)

There is no conflict of interest in this study.

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

REFERENCES (KAYNAKLAR)

- [1] Bektaş, İ., Güler, C., Kalaycıoğlu, H., Ayçiçeği (*Helianthus annuus* L.) saplarından üre-formaldehit tutkalı ile yongalevha üretimi. Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Fen ve Mühendislik Dergisi, 5(2) (2002) 49-56.
- [2] Yaşar, S., Güller, B., Göktürk Baydar, N., Farklı asma (*Vitis vinifera* L.) çeşitlerinin budama atıklarındaki lignin, karbonhidrat miktarları ve lif özellikleri. Bartın Orman Fakültesi Dergisi. 11(16) (2009) 71-79.
- [3] Yasar, S., Guntekin, E., Cengiz, M., Tanriverdi, H., The correlation of chemical characteristics and UF-Resin ratios to physical and mechanical properties of particleboard manufactured from vine prunings. Scientific Research and Essays, 5(8) (2010) 737-741.
- [4] Haitao X. B., Huijuan Zhanga, B., Ya Ouyanga, B., Li Liua, B., Yu Wang, B., Two-dimensional hierarchical porous carbon composites derived from corn stalks for electrode materials with high performance. Electrochimica Acta 214 (2016) 119–128.
- [5] Tutus, A., Çiçekler, M., Evaluation of common wheat stubbles (*Triticum aestivum* L.) for pulp and paper production. Drvna industrija, 67(3) (2016) 271-279.
- [6] Comlekcioglu, N., Tutus, A., Cicekler, M., Canak, A., Zengin, G., Investigation of *Isatis tinctoria* and *Isatis buschiana* stalks as raw materials for pulp and paper production. Drvna Industrija, 67(3) (2016) 249-255.
- [7] Çiçekler, M., Özdemir, A., Tutuş, A., Characterization of pulp and paper properties produced from okra (*Abelmoschus esculentus*) stalks. Drvna Industrija, 73(4) (2022) 423-430.
- [8] Tiryaki, S., Aydın, A., Adanur, H., Hammadde tedarik sorunlarının Türkiye mobilya üretimi açısından değerlendirilmesi ve bir projeksiyon çalışması. Ormanlık Araştırma Dergisi, 9(Özel Sayı) (2022) 247-253.
- [9] Yıldırım, İ., Emiroğlu, E., Türkiye ve dünyada orman ürünleri sanayi sektörüne ait bazı ürünlerin karşılaştırmalı analizleri. Ormanlık Araştırma Dergisi, 9(Özel Sayı), (2022) 155-164.
- [10] Pędzik, M., Tomczak, K., Janiszewska-Latterini, D., Tomczak, A., Rogoziński, T., Management of forest residues as a raw material for the production of particleboards. Forests, 13(11), (2022) 19-33.
- [11] Şahin, P., (2013). Orman ürünleri sanayi sektörünün veri zarflama analizi yardımıyla etkinlik ölçümü. Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- [12] Ayrılmış, N., Göksel, U., Bağlı, E., Özkan, İ., Ahşap sandviç kompozit levhaların yapısı ve mobilya endüstrisinde kullanımı. Kastamonu University Journal of Forestry Faculty, 15(1) (2015) 37-48.
- [13] Asdrubali, F., Ferracuti, B., Lombardi, L., Guattari, C., Evangelisti, L., Grazieschi, G., A review of structural, thermo-physical, acoustical, and environmental properties of wooden materials for building applications.

- Building and Environment, 114 (2017) 307-332.
- [14] Lee, S. H., Lum, W. C., Boon, J. G., Kristak, L., Antov, P., Peđzik, M., ... & Pizzi, A., Particleboard from agricultural biomass and recycled wood waste: A review. *Journal of Materials Research and Technology*, 20 (2020) 4630-4658.
- [15] Ndazi, B. S., Nyahumwa, C. W., Tesha, J., Chemical and thermal stability of rice husks against alkali treatment. *BioResources*, 3(4) (2008) 1267-1277.
- [16] Islam, M. S., Hamdan, S., Jusoh, I., Rahman, M. R., Ahmed, A. S., The effect of alkali pretreatment on mechanical and morphological properties of tropical wood polymer composites. *Materials & Design*, 33 (2018) 419-424.
- [17] Beram, A., Yaşar, S., NaOH ile modifiye edilmiş kızılçam (*Pinus brutia* Ten.) yongalarının levha üretimindeki performansı. *Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 9(2) (2018) 187-196.
- [18] Jonoobi, M., Ghorbani, M., Azarhazin, A., Zarea Hosseinabadi, H., Effect of surface modification of fibers on the medium density fiberboard properties. *European Journal of Wood and Wood Products*, 7 (2018) 517-524.
- [19] Beram, A., Yasar, S., Performance of brutian pine (*Pinus brutia* Ten.) fibers modified with low concentration NaOH solutions in fiberboard production. *Fresenius Environmental Bulletin*, 29(1) (2020) 70-78.
- [20] Mohammed, M., Rahman, R., Mohammed, A. M., Adam, T., Betar, B. O., Osman, A. F., Dahham, O. S., Surface treatment to improve water repellence and compatibility of natural fiber with polymer matrix: Recent advancement. *Polymer Testing*, (2022) 107707.
- [21] FAO, (2018). Food and Agriculture Organization of the United Nations. <http://www.fao.org/faostat/en/#data/>
- [22] da Silva, W. R., Vale, L. S. R., Pereira, D., Desempenho de cultivares de bananeira sob as condições edafoclimáticas de Ceres-GO. *Revista de Ciências Agrárias Amazonian Journal of Agricultural and Environmental Sciences*, 62 (2019).
- [23] Mohiuddin, A. K. M., Saha, M. K., Hossian, M. S., Ferdoushi, A., Usefulness of banana (*Musa paradisiaca*) wastes in manufacturing of bio-products: a review. *The Agriculturists*, 12(1) (2014) 148-158.
- [24] Cecci, R. R. R., Passos, A. A., de Aguiar Neto, T. C., Silva, L. A., *Banana pseudostem* fibers characterization and comparison with reported data on jute and sisal fibers. *Sn applied sciences*, 2(1) (2020) 20.
- [25] Padam, B.S., Tin, H.S., Chye, F.Y., Abdullah, M.I., Banana by-products: an under-utilized renewable food biomass with great potential. *J Food Sci Technol* 51 (2014) 3527–3545
- [26] Akinyemi, B. A., Dai, C., Development of banana fibers and wood bottom ash modified cement mortars. *Construction and Building Materials*, 241 (2020) 118041.
- [27] Akinyemi, B. A., Okonkwo, C. E., Alhassan, E. A., Ajiboye, M. Durability and strength properties of particle boards from polystyrene–wood wastes. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 21 (2019) 1541-1549.
- [28] Balda, S., Sharma, A., Capalash, N., Sharma, P., Banana fibre: a natural and sustainable bioresource for eco-friendly applications. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 23 (2021) 1389-1401.
- [29] TS-EN 312, (2012). Particleboards-specifications-part 2: Requirements for general purpose boards for use in dry conditions, Institute of Turkish Standards, Ankara, Turkey.
- [30] TS EN 310, (1999). Wood based panels determination of modulus elasticity in bending and of bending strength. Institute of Turkish Standards, Ankara, Turkey.
- [31] TS-EN 317, (1999). Particleboards and fiberboards determination of swelling in thickness after immersion.
- [32] TS-EN 319, (1999). Particleboards and fibreboards-determination of tensile strength perpendicular to the plane of the board, Institute of Turkish Standards, Ankara, Turkey.
- [33] DIN- 4768, (1990). Determination of values of surface roughness parameters, Ra, Rz, Rmax, using electrical contact (stylus) instruments. Concepts and Measuring Conditions. Deutsches Institut für Norming: Berlin, Germany.
- [34] GB/T 30693, (2014). Measurement of water-contact angle of plastic films. Guangzhou City Quality Supervision and Testing Academy: Guangzhou, China.
- [35] Beram, A., Enhancing surface characteristics and combustion behavior of black poplar wood through varied impregnation techniques. *Applied Sciences*, 13(20) (2023) 11482.
- [36] Fengel, D., Wegener, G., (1984). Wood chemistry, ultrastructure, Reactions. Walter de Gruyter, Berlin.
- [37] Joseleau, J. P., Imai, T., Kuroda, K., Ruel, K., Detection in situ and characterization of lignin in the G-layer of tension wood fibres of *Populus deltoides*. *Planta*, 219 (2004) 338-345.

- [38] Yasar, S., İçel, B., Alkali modification of cotton (*Gossypium hirsutum* L.) stalks and its effect on properties of produced particleboards. *BioResources*, 11(3) (2016) 7191-7204.
- [39] Mukherjee, A., Ganguly, P. K., Sur, D., Structural mechanics of jute: The effects of hemicellulose or lignin removal," *The Journal of The Textile Institute* 84(3) (1993) 348-353. DOI: 10.1080/00405009308658967.
- [40] Khedari, J., Nankongnab, N., Hirunlabh, J., Teekasap, S., New low-cost insulation particleboards from mixture of durian peel and coconut coir. *Building and environment*, 39(1) (2004) 59-65.
- [41] Hiziroglu, S., Suzuki, S., Evaluation of surface roughness of commercially manufactured particleboard and medium density fiberboard in Japan. *Journal of Materials Processing Technology*, 184(1-3) (2007) 436-440.
- [42] Aydin, I., Colakoglu, G., Effects of surface inactivation, high temperature drying and preservative treatment on surface roughness and colour of alder and beech wood. *Applied Surface Science*, 252(2) (2005) 430-440.
- [43] Yaşar, S., Aytaç, U. Z., Beram, A., Isıl işlem görmüş kızılçam (*Pinus brutia* Ten.) yongalarından üretilen levhaların bazı özellikleri. *Bilge International Journal of Science and Technology Research*, 4(1) (2020) 14-20.
- [44] Žigon, J., Kovač, J., Petrič, M., The influence of mechanical, physical and chemical pre-treatment processes of wood surface on the relationships of wood with a waterborne opaque coating. *Progress in Organic Coatings*, 162 (2022) 106574.
- [45] Li, X., Tabil, L. G., Panigrahi, S., 2007. Chemical treatments of natural fiber for use in natural fiber-reinforced composites: a review. *Journal of Polymers and the Environment*, 15, 25-33.
- [46] Wang, B., Panigrahi, S., Tabil, L., Crerar, W., Pre-treatment of Flax Fibers for use in Rotationally Molded Biocomposites. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 26(5) (2007) 447-463. doi:10.1177/0731684406072526
- [47] Jannah, M., Mariatti, M., Abu Bakar, A., Abdul Khalil, H. P. S., Effect of chemical surface modifications on the properties of woven banana-reinforced unsaturated polyester composites. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 28(12) (2009) 1519-1532.
- [48] Zheng, Y., Pan, Z., Zhang, R., Jenkins, B. M., Blunk, S., Particleboard quality characteristics of saline jost tall wheatgrass and chemical treatment effect. *Bioresource technology*, 98(6) (2007) 1304-1310.
- [49] Juliana, A. H., Paridah, M. T., Evaluation of basic properties of kenaf (*Hibiscus cannabinus* L.) particles as raw material for particleboard. In *18th International Conference on Composite Materials*, 36 (2011) 1-6.
- [50] Liu, B., Wang, F., Zhu, X., Jiao, A., Enhanced surface wettability of rice straw with alkaline pretreatment. *The Open Materials Science Journal*, 5(1) (2011) 109-117.
- [51] Chen, H., Zhang, W., Wang, X., Wang, H., Wu, Y., Zhong, T., Fei, B., Effect of alkali treatment on wettability and thermal stability of individual bamboo fibers. *Journal of Wood Science*, 64 (2018) 398-405. <https://doi.org/10.1007/s10086-018-1713-0>

Optimizing Truss Dynamics: A Multi-Objective Approach to Modify Natural Frequencies and Mode Shapes with Geometric Constraints

Can Ulaş DOĞRUER¹ , Can Barış TOPRAK^{1,2*} , Bora YILDIRIM¹ 

¹ Department of Mechanical Engineering, Hacettepe University, Ankara 06800, Türkiye,

² Additive Manufacturing Technologies Application and Research Center (EKTAM), Gazi University, 06560, Ankara, Türkiye

Article Info

Research article

Received: 16/05/2023

Revision: 28/02/2024

Accepted: 14/03/2024

Keywords

Inverse modal analysis

Modal analysis

Optimization

Truss structure

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi

Başvuru: 16/05/2023

Düzeltilme: 28/02/2024

Kabul: 14/03/2024

Anahtar Kelimeler

Ters Modal Analiz

Modal Analiz

Optimizasyon

Kafes Yapılar

Graphical/Tabular Abstract (Grafik Özet)

In this article, a truss structure was studied. This truss structure was redesigned and optimized in terms of its dynamics without compromising structural integrity. To this end, an optimization problem was proposed and the objective is to move a subset of its eigenvalues to particular locations in the complex plane. / Bu makalede kafes yapısı incelenmiştir. Bu kafes yapı, yapısal bütünlükten ödün vermeden dinamik yönden yeniden tasarlanıp optimize edilmiştir. Bu amaçla, bir optimizasyon problemi önerilmiş olup amacı, yapının özdeğerlerinin bir alt kümesini karmaşık düzlemdeki belirli konumlara taşımaktır.

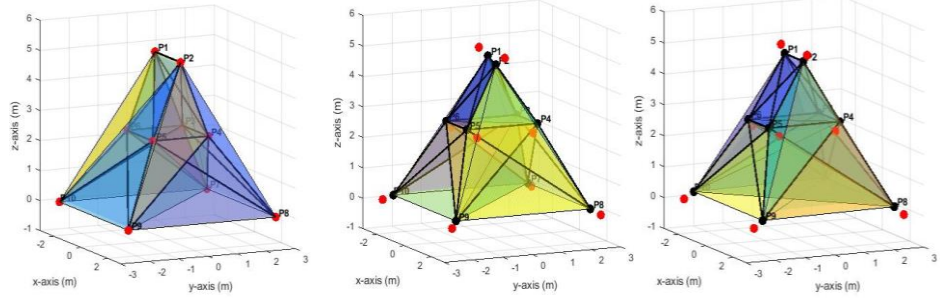


Figure A: Optimized truss structures at different iteration steps: iteration step-II; iteration step-V; iteration step-X for optimization parameter set-I / **Şekil A:** (Farklı yineleme adlarıyla optimize edilmiş kafes yapılar: yineleme adımı-II; yineleme adımı-V; optimizasyon parametre seti-I için yineleme adımı-X

Highlights (Önemli noktalar)

- The research advances the understanding of truss dynamics in addition to that provides a framework for approaching similar optimization challenges in mechanical engineering. / Araştırma kafes dinamiklerinin anlaşılmasında ve buna ek olarak makine mühendisliğindeki benzer optimizasyon zorluklarına yaklaşımda rehberlik sağlıyor.
- The study contributes optimizing multiple objective dynamic structures without compromising their geometric integrity. / Çalışma, çok amaçlı dinamik yapıların geometrik bütünlüğünden ödün vermeden optimize edilmesine katkıda bulunmaktadır.
- The core challenge of inverse modal analysis was addressed through the formulation. / Ters modal analizin temel zorlukları, analitik denklemler aracılığıyla ele alındı.

Aim (Amaç): Main aim of the study is improving dynamic behavior of truss structures, where the cost function is tailored to dynamically modify the structure while preserving specified geometric conditions. / Çalışmanın amacı geometrik kısıtı bulunan kafes yapılarında dinamik davranışının iyileştirilmesi ve bunu yaparken belirtilen geometrik koşulları korunmasının sağlanmasıdır.

Originality (Özgünlük): The study navigates the delicate balance between optimizing the dynamic aspects of the truss structure and respecting the essential geometry. / Çalışma, kafes giriş yapısının dinamik yönlerini optimize etmek ile temel geometriye saygı duymak arasındaki hassas dengeyi sağlıyor.

Results (Bulgular): Numerical results have shown that, both analysis in Abaqus and Matlab softwares yield compatible natural frequency results. / Sayısal sonuçlar, hem Abaqus hem de Matlab yazılımlarındaki analizlerin uyumlu doğal frekans sonuçları verdiğini göstermiştir.

Conclusion (Sonuç): Across all optimization parameter sets and within the defined constraints, the primary objective of optimization was achieved. Notably, the preservation of truss structure topology to meet equality constraints underscores the success of the engineering redesign. / Tüm optimizasyon parametre setlerinde ve tanımlanan kısıtlamalar dahilinde optimizasyonun temel amacına ulaşıldı. Özellikle, eşitlik kısıtlamalarını karşılamak için kafes yapı topolojisinin korunması, mühendislik yeniden tasarımının başarısının altını çiziyor



Optimizing Truss Dynamics: A Multi-Objective Approach to Modify Natural Frequencies and Mode Shapes with Geometric Constraints

Can Ulaş DOĞRUER¹, Can Barış TOPRAK^{1,2*}, Bora YILDIRIM¹

¹ Department of Mechanical Engineering, Hacettepe University, Ankara 06800, Türkiye,

² Additive Manufacturing Technologies Application and Research Center (EKTAM), Gazi University, 06560, Ankara, Türkiye

Article Info

Research article
Received: 16/05/2023
Revision: 28/02/2024
Accepted: 14/03/2024

Keywords

Inverse modal analysis
Modal analysis
Optimization
Truss structure

Abstract

This article presents a comprehensive optimization approach to dynamically enhance a truss structure. The optimization problem addresses the systematic modification of the truss dynamics, focusing on achieving a specific set of natural frequencies without compromising the geometrical integrity. The truss structure is redesigned through the exploration of diverse cost functions, considering both minimization and maximization strategies for targeted subsets of natural frequencies and mode shape elements but also preserving essential geometric properties including dimensional intervals, symmetry conditions, and adherence to topological constraints. A dual-objective optimization paradigm is adopted; concurrently pursuing the minimization and maximization objectives together with various constraints are introduced to enforce geometric limits on each truss member, providing a holistic solution for effectively tailoring the dynamic characteristics of the truss structure. This study represents a nuanced understanding of dynamic optimization in truss design. The article's main contribution is improving balance between optimizing the dynamic requirements of the truss structure and considering the essential geometry constraints that ensures its practical utility. By doing so, the research not only advances the understanding of truss dynamics but also provides a framework for approaching similar optimization challenges in mechanical engineering.

Kafes Yapılarının Dinamik Optimizasyonu: Geometrik Kısıtlamalara Bağlı Olarak Doğal Frekansların ve Mod Şekillerinin Modifikasyonunda Çok Amaçlı Bir Yaklaşım

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 16/05/2023
Düzeltilme: 28/02/2024
Kabul: 14/03/2024

Anahtar Kelimeler

Ters Modal Analiz
Modal Analiz
Optimizasyon
Kafes Yapılar

Öz

Bu makale, bir kafes kiriş yapısını dinamik olarak geliştirmek için kapsamlı bir optimizasyon yaklaşımı sunmaktadır. Optimizasyon problemi, geometrik bütünlükten ödün vermeden belirli bir dizi doğal frekans elde etmeye odaklanarak kafes kiriş dinamiklerinin sistematik modifikasyonunu ele almaktadır. Kafes yapı, doğal frekansların ve mod şekli elemanlarının hedeflenen alt kümeleri dikkate alınarak, aynı zamanda boyut aralıkları, simetri koşulları ve topolojik kısıtlamalara bağlılık dahil olmak üzere temel geometrik özellikleri koruyarak çeşitli maliyet fonksiyonlarının araştırılması yoluyla yeniden tasarlanmıştır. Çift amaçlı bir optimizasyon paradigması benimsenmiştir; Minimize ve maksimize hedeflerini eşzamanlı olarak takip eden çeşitli kısıtlamalar, her bir kafes kiriş elemanı üzerinde geometrik sınırlamalar uygulamak için tanıtılmış ve kafes kiriş yapısının dinamik özelliklerini etkili bir şekilde uyarlamak için bütünsel bir çözüm sağlanmıştır. Makalenin ana katkısı, kafes yapılarının dinamik gereksinimlerinin optimize edilmesi ile pratik kullanımını sağlamak için temel geometri kısıtlamalarının dikkate alınmasını sağlamaktır. Bunu yaparak, araştırma sadece kafes dinamiklerinin anlaşılmasını geliştirmekle kalmıyor, aynı zamanda makine mühendisliğindeki benzer optimizasyon zorluklarına yaklaşmak için bir çerçeve oluşturmaktadır.

1. INTRODUCTION (GİRİŞ)

Mechanical components e.g. truss structures adhere to a predefined topology during their design, dictated by inherent geometric limitations that

impact their functionality. Moreover, these components must conform to constraints imposed by neighbouring components, ensuring proper collaboration when assembled. Specifically, truss structures face the intricate task of not only

withstanding dynamic forces but also preserving essential geometric properties. These properties include dimensional intervals, symmetry conditions, and adherence to topological constraints. Failure to uphold these requirements renders any optimization attempt futile, as the resulting truss structures would be physically impractical. Therefore, the presented article focuses on addressing the optimization of truss dynamics, distinguishing itself from previous studies by delving into the specific challenges associated with the design and performance of mechanical parts. The article also emphasizes the critical interplay of geometry, physical attributes, and dynamic constraints, highlighting their collective influence on the functionality of assembled mechanical structures.

The core of the research problem is formulated as a constraint optimization challenge, where the cost function is tailored to dynamically modify the structure while preserving specified geometric conditions. The article's main contribution lies in navigating the delicate balance between optimizing the dynamic aspects of the truss structure and respecting the essential geometry that ensures its practical utility. This study, therefore, contributes significantly to the broader field by offering insights and methodologies for optimizing dynamic structures without compromising their geometric integrity. Additionally, a set of geometric constraints tailored for truss-like structures is defined, presenting a comprehensive framework for the inverse modal analysis of truss structures.

As for methodology, we establish a general framework for the constrained optimization problem and outline a procedure for inverse modal analysis. Subsequently, we apply this methodology to a specific space truss structure examining a 25-bar space truss structure to illustrate the key concepts and solution steps of the constrained optimization problem. The remainder of the paper unfolds as follows: Section two provides a review of related works which is highlighting the distinctive contributions of this study. Section three delves into the theoretical foundation, commencing with background material necessary for setting up the constrained optimization problem. Following this, the mathematical formulation of the constrained optimization problem is presented. Section four showcases numerical results and various case studies, including the redesign of a 25-bar truss structure. Finally, section five concludes the paper with a summary and discussions on the implications of the findings.

2. RELATED WORKS (KONUYLE İLGİLİ ÇALIŞMALAR)

Engineering structural optimization encompasses three primary categories: size, shape, and topology optimization. Size optimization seeks to determine the optimal size parameters of components, while shape optimization assumes a fixed topology. Topology optimization, on the other hand, aims to find the optimal layout of a structure within a defined design domain. Typically, the design objective is formulated as a minimization problem, optimizing structural mass with multiple frequency constraints using various design variables, such as topology, sizing, and a combination of shape and size [1]. The design of truss structures poses a unique challenge due to the non-convex nature of the feasible designs, situated within highly non-linear boundaries. Meta-heuristic algorithms have emerged as effective tools for optimizing truss-like structures, often employing a population of design solutions to search for optima. Operators are strategically created and employed to achieve intensification and diversification during the search process [2].

Truss optimization problems commonly involve minimizing the structure's weight while adhering to a set of static constraints. Numerous meta-heuristic algorithms have been applied to address such problems, including artificial bee colony [3], differential evolution [4,5], firefly method [6], genetic algorithm [7], particle swarm optimization [8], and simulated annealing [9].

In addition to static constraints, researchers have explored dynamic constraints in truss optimization, particularly in handling frequency constraints. The penalty function approach has been commonly used to transform constrained optimization problems into unconstrained ones. Various meta-heuristic optimization methods have been employed for truss structures with frequency constraints, including charged system search [10], differential evolution method [11,12], firefly algorithm [13], harmony search [14], genetic algorithm [15,16,17], particle swarm optimization [18,19], colliding bodies method [18], ray optimization [19], simulated annealing [20], and teaching-learning based optimization method [21]. This extensive body of research reflects the ongoing exploration and refinement of optimization techniques for addressing the complexities associated with truss structures under diverse constraints. Recent studies have also shown that natural frequencies and mode shapes of a truss based structures can be optimized in terms of design parameters such as truss shape,

length, thickness etc [22,23]. And yet, most of the studies are implementing different heuristic optimization algorithms to be able to improve the truss structures for a single objective [24-27]. Main contribution of the proposed study is offering insights to the reader for considering of multiple objectives and achieving structural behavior of truss structures by inverse modal analysis under geometric constraints.

3.PROBLEM FORMULATION (PROBLEM TANIMI)

The research problem addressed in this article revolves around the optimization of truss dynamics, specifically focusing on the modification of a 25-bar structure's frequency spectrum. Unlike previous studies, this research distinguishes itself by delving deep into the intricate challenges associated with the design and performance of mechanical parts, emphasizing the delicate interplay of geometry, physical attributes, and dynamic constraints.

To tackle the research problem, applied methodology is a constrained optimization approach. The cost function is tailored to dynamically modify the structure, seeking an optimized spectrum of natural frequencies. The preservation of topology is enforced through a set of constraints, which encapsulate symmetry conditions and special geometric considerations like square topology. The complexity of the problem necessitates a sophisticated optimization technique, and the Sequential Quadratic Programming (SQP) method is chosen as the solution approach. SQP is a powerful optimization algorithm that iteratively solves a sequence of quadratic subproblems, adjusting the decision variables to minimize the objective function while satisfying the constraints. In proposing a roadmap for solving the constrained optimization problem with SQP, the research can outline key steps. These may include formulating the mathematical model for the cost function and constraints, initializing the optimization process, iteratively solving subproblems using SQP, and validating the optimized solution against specified geometric conditions

3.1 Topology Optimization of Structural System with Mechanical and Dynamical Constraints

(Mekanik Ve Dinamik Kısıtlamalarla Yapısal Sistemin Topoloji Optimizasyonu)

$$\begin{aligned} P1 &= [-95.25 \ 0 \ 508] && ; \\ P3 &= [-95.25 \ 95.25 \ 254] && ; \\ P5 &= [+95.25 \ -95.25 \ 254] && ; \\ P7 &= [-254 \ +254 \ 0] && ; \\ P9 &= [+254 \ -254 \ 0] && ; \end{aligned}$$

In engineering design, topology optimisation has become potential tool that can be used to optimise material distribution within specified region of parts in order to achieve better structural performance. Static mechanical restrictions were the main focus of topology optimisation in the past in order to reduce material consumption and preserve structural integrity. However, more recent developments have expanded this method to include dynamic constraints, making it possible to optimise structural systems in a variety of dynamic settings and loading conditions [28].

The main goal of mechanical constraints in topology optimisation is to guarantee structural integrity under static loading scenarios. Techniques like finite element analysis (FEA) and mathematical optimisation algorithms like gradient-based approaches, meta-heuristic algorithms or evolutionary algorithms are frequently used in this procedure [29]. Integrating dynamical constraints into topology optimization expands the scope of design considerations beyond static loading scenarios. In dynamic environments, parts are subjected to time-varying loads, vibrations, and resonance phenomena, which can significantly affect their performance and durability [30]. The integration of mechanical and dynamical constraints in topology optimization has broad applications across various industries, including aerospace, automotive, civil engineering, and biomechanics. From our proposed study perspective, optimizing the shape of a truss structure involves finding the configuration that minimizes weight while satisfying certain geometric constraints such as structural integrity, symmetry conditions, stability etc. under static and dynamic conditions.

3.2. General Remarks (Genel Açıklamalar)

In this article, a truss structure was studied. This truss structure was redesigned and optimized in terms of its dynamics without compromising the structural integrity. The initial and final optimal design of the truss structure, is illustrated in Figure 1. To this end, an optimization problem was proposed where the design parameters are the geometry of the truss elements and the objective is to move a subset of its eigenvalues to particular locations in the complex plane. The coordinates of nodes are given below:

$$\begin{aligned} P2 &= [+95.25 \ 0 \ 508] && ; \\ P4 &= [+95.25 \ 95.25 \ 254] && ; \\ P6 &= [-95.25 \ -95.25 \ 254] && ; \\ P8 &= [+254 \ +254 \ 0] && ; \\ P10 &= [-254 \ -254 \ 0] && ; \end{aligned}$$

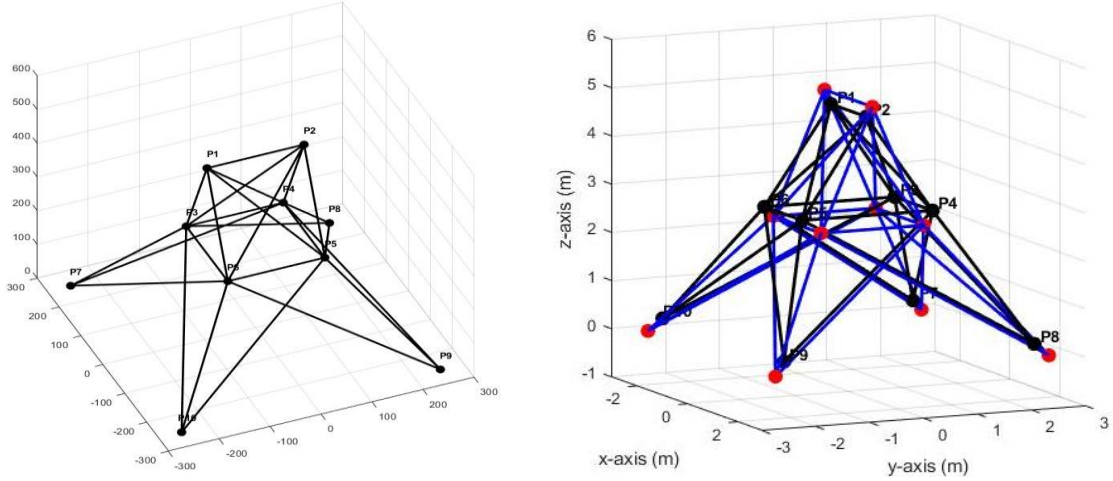


Figure 1. Final topology of the optimally designed 25 bar space truss structure for optimization parameter set-I: red dots and blue lines show the original truss structure nodal points and truss members, respectively; black dots and lines show the final truss structure design nodal points and truss members, respectively (Optimizasyon parametre seti-I için optimal olarak tasarlanmış 25 bar uzaylı kafes yapının son topolojisi: kırmızı noktalar ve mavi çizgiler sırasıyla orijinal kafes kiriş yapısının düğüm noktalarını ve kafes elemanlarını gösterir; siyah noktalar ve çizgiler sırasıyla son kafes yapı tasarımı düğüm noktalarını ve kafes kiriş elemanlarını gösterir.)

A typical element of connectivity matrix i.e. $LC_{pr} = [a \ b]$; implies that there is a truss element connecting nodal point a and nodal point b . Connectivity matrix of the truss structure is given below.

- LC01 = [1 2]; LC02 = [1 4]; LC03 = [2 3];
- LC04 = [1 5]; LC05 = [2 6]; LC06 = [2 4];
- LC07 = [2 5]; LC08 = [1 3]; LC09 = [1 6];
- LC10 = [6 3]; LC11 = [4 5]; LC12 = [3 4];
- LC13 = [5 6]; LC14 = [10 3]; LC15 = [7 6];
- LC16 = [9 4]; LC17 = [8 5]; LC18 = [7 4];
- LC19 = [8 3]; LC20 = [10 5]; LC21 = [9 6];
- LC22 = [10 6]; LC23 = [7 3]; LC24 = [8 4];
- LC25 = [9 5] ;

Considering the above constraints and objective, a constrained optimization was defined and solved to design a truss structure having optimal properties: Here, Θ is the set of design parameters, J is the cost function to be minimized. This cost function is subject to equality and inequality constraints.

A quick description of the optimal design of a mechanical system can be best made by the following minimization problem:

$$\min_{\Theta} J$$

s.t.

Geometric – constraints

3.3 Geometric Constraints for Structural Systems (Yapısal Sistemlerin Geometrik Kısıtları)

The final shape of the structural system is optimized to meet certain dynamical design requirements. Each truss member's length may be confined to a range by the following inequality constraints Eq. (1) and Eq. (2).

$$\|P_i - P_j\| < L_{e,ij}^{max} \quad \forall ij \in N_{eL}^{max} \quad (1)$$

$$\|P_i - P_j\| \geq L_{e,ij}^{min} \quad \forall ij \in N_{eL}^{min} \quad (2)$$

3.4 Typical Cost Functions for Structural Systems (Yapısal Sistemlerin Tipik Maliyet Fonksiyonları)

Some typical cost functions were proposed as follows. The cost function in Eq. (3) aims to minimize a subset of natural frequencies.

$$J_{\omega}^1 = \sum_{j \in J_1} (\omega_j - \omega_j^x \cdot \omega_{n_j}^x)^{2 \cdot \omega_{n_j}^e} \quad (3)$$

J_w^1 is the indices of the subset of natural frequencies to be minimized. $\omega_{n_j}^x$ is multiplier constant that shifts the corresponding natural frequency by some fixed ratio. $\omega_{n_j}^e$ defines how important the associated natural frequency. If $\omega_{n_j}^e$ is set to $\omega_{n_j}^e$ then it implies that that natural frequency is removed from the cost function. In the cost function in Eq. (4), the target natural frequencies can be set explicitly:

$$J_w^1 = \sum_{j \in J_1} (\omega_j - \omega_{n_j}^{\oplus})^{2 \cdot \omega_{n_j}^e} \quad (4)$$

The following cost function aims to maximize a subset of natural frequencies in Eq. (5):

$$J_w^2 = \sum_{j \in J_2} \frac{1}{(\omega_j - \omega_j \cdot \omega_{n_j}^x)^{2 \cdot \omega_{n_j}^e}} \quad (5)$$

J_w^2 is the indices of the subset of natural frequencies to be maximized. These type of cost functions will try to move the natural frequencies from the target natural frequencies as described by either $\omega_j \cdot \omega_{n_j}^x$ or $\omega_{n_j}^{\oplus}$. Cost functions can be obtained by combining the first and second cost function as shown in Eq.(6).

$$J_w^{1,2} = J_w^1 + J_w^2 \quad (6)$$

3.5 Verification of Matlab Fem Model by Abaqus Software (Matlab Sonlu Elemanlar Modelinin Abaqus Yazılımı ile Doğrulanması)

The accuracy and reliability of the finite element model used in this study were rigorously validated through verification in Abaqus software. Both the Matlab code and Abaqus software employed a lumped mass model for the truss element, with a stiffness matrix derived from a linear interpolating function. To ensure the robustness of the model, a comparison of natural frequencies calculated by Abaqus and the Matlab code was conducted, as presented in Table 1, revealing negligible differences that can be safely disregarded. The frequency analysis results for the first three modes, obtained through Abaqus, are depicted in Figures 2-4.

Table 1. Comparison of natural frequencies calculated by Abaqus software and code running on Matlab. (Abaqus yazılımı ve Matlab'da çalışan kod tarafından hesaplanan doğal frekansların karşılaştırılması.)

ω_n^a	ω_n^m	$\Delta\omega_n$ (%)	ω_n^f	ω_n^m	$\Delta\omega_n$ (%)
58.991	58.9912	+0.0001	231.34	231.34	+0.002
62.432	62.432	+0.0001	232.21	232.21	+0.003
76.385	76.385	+0.0002	248.87	248.87	-0.000
100.70	100.70	-0.0003	274.420	274.425	+0.002
102.43	102.43	-0.0001	284.77	284.77	+0.002
105.45	105.45	+0.0003	286.77	286.77	+0.000
110.56	110.56	-0.0001	307.35	307.35	+0.001
144.95	144.95	+0.0001	321.46	321.46	+0.002
219.64	219.64	+0.0002	395.40	395.40	+0.0003

4. NUMERICAL RESULTS FOR 25-BAR TRUSS STRUCTURE (25 BARLIK KAFES YAPISININ SAYISAL SONUÇLARI)

Numerical results for 25-bar truss structures can be seen in this section. The evolution of natural frequencies is depicted in Figure 5, which also showcases the time history of the cost function. Figure 6 provides insight into the truss structure's evolution at different iteration steps. Mode shapes of the final optimized truss structure are visualized in Figures 7-8. In total, three optimization simulations were executed. In simulations one and two, the first six natural frequencies excluded from the cost function, while the other higher frequencies were undergoing a constant positive and negative scale shift. Figure 9 and 10 shows natural frequency spectrum of the original and optimized truss structure for simulation one and two, respectively. In simulation three, the first six natural frequencies were constrained to approach 100 Hz, driving first six natural frequencies into a region with a minimum frequency of 100 Hz. Higher natural frequencies which are close to 300 Hz will tend to keep in the level. Figure 11 shows natural frequency spectrum of the original and optimized truss structure for simulation three.

\mathbf{P}_i and \mathbf{P}_j are nodal points attached to the end of a truss element. \mathbf{N}_{eL}^{max} is two dimensional set holding pairs of nodes, maximum length constraint is imposed between the pairs of these nodes. \mathbf{N}_{eL}^{min} is two-dimensional set holding pairs of nodes, minimum length constraint is imposed between the pairs of these nodes.

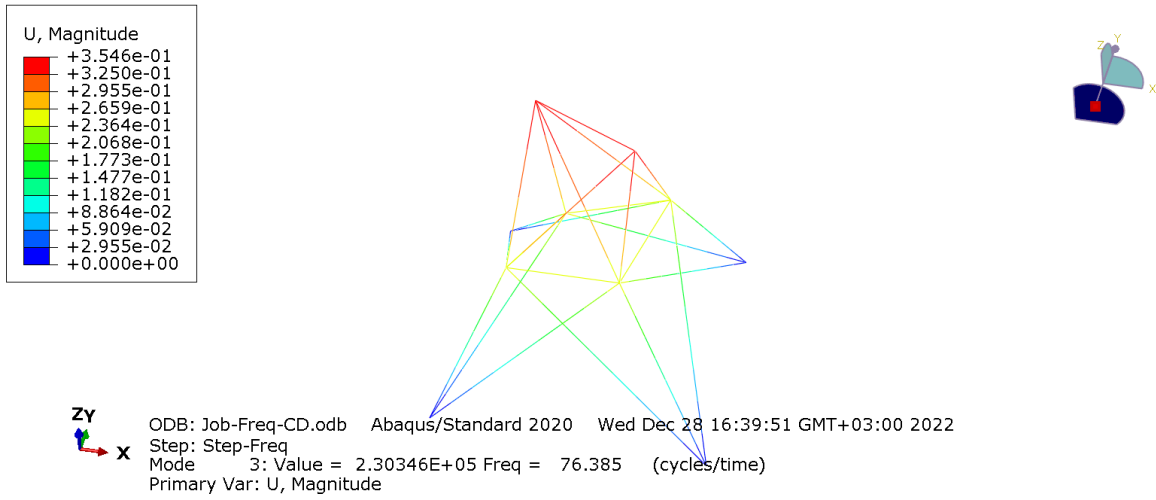


Figure 2. Abaqus frequency analysis results: Mode shape-I. (Abaqus frekans analizi sonuçları: Mod şekli-I.)

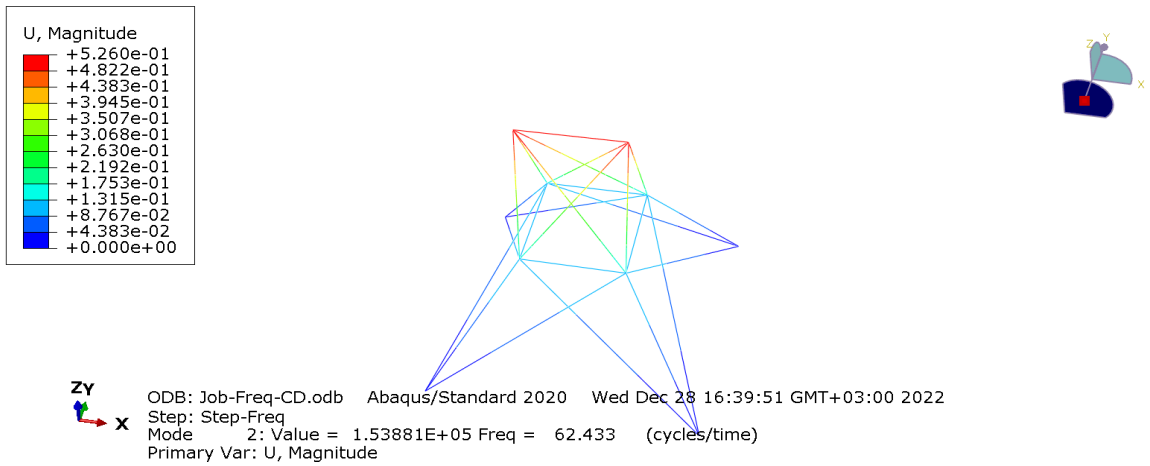


Figure 3. Abaqus frequency analysis results: Mode shape- II. (Abaqus frekans analizi sonuçları: Mod şekli-II.)

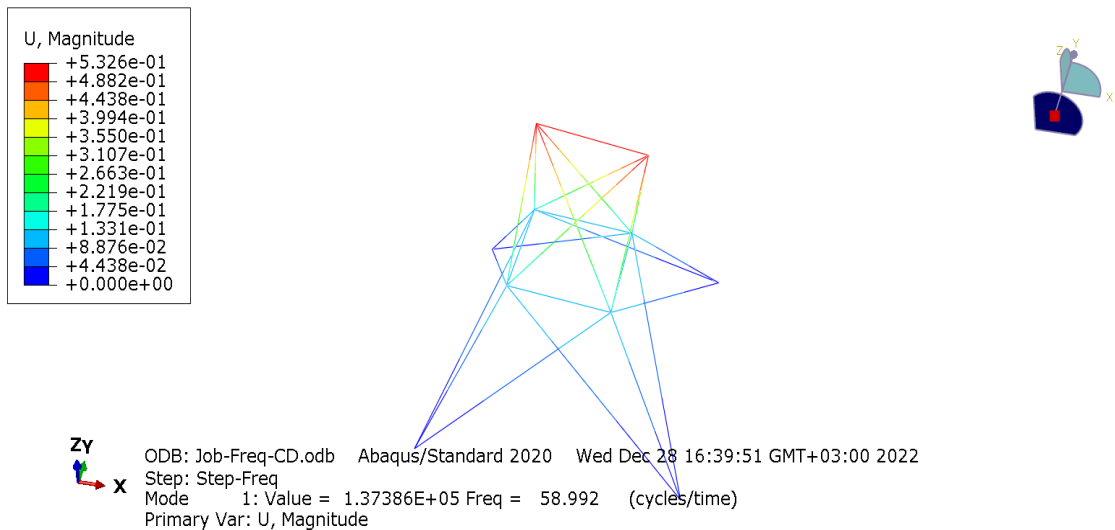


Figure 4. Abaqus frequency analysis results: Mode shape-III.(Abaqus frekans analizi sonuçları: Mod şekli-III.)

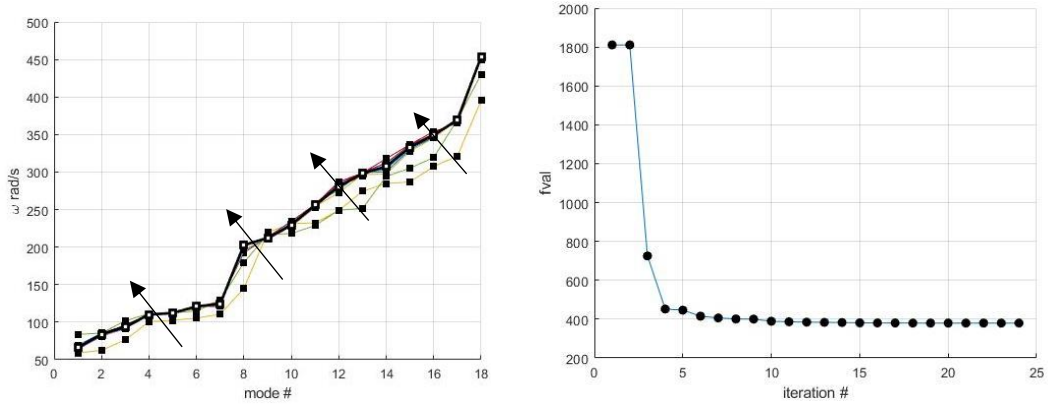


Figure 5. Evolution of the spectrum of natural frequencies of the 25 bar space truss structure. Final frequency spectrum is shown with a thick line. Time history of cost function for simulation made using optimization parameter set-I. (25 bar uzay kafes yapısının doğal frekans spektrumunun gelişimi. Son frekans spektrumunu kalın çizgiyle gösterilmiştir. Optimizasyon parametre seti-I kullanılarak yapılan simülasyon için maliyet fonksiyonunun zaman geçmişi.)

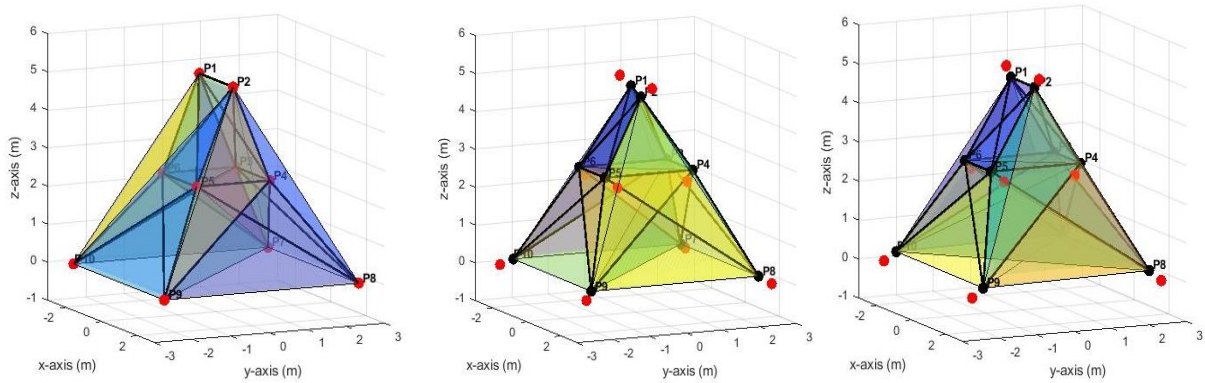


Figure 6. Optimized truss structures at different iteration steps: iteration step-II; iteration step-V; iteration step-X for optimization parameter set-I; red dots and blue lines show the original truss structure nodal points and truss members, respectively; black dots and lines show the final truss structure design nodal points and truss members, respectively. (Farklı yineleme adımlarıyla optimize edilmiş kafes yapılar: yineleme adımı-II; yineleme adımı-V; optimizasyon parametre seti-I için yineleme adımı-X; kırmızı noktalar ve mavi çizgiler sırasıyla orijinal kafes giriş yapısının düğüm noktalarını ve kafes kiriş elemanlarını gösterir; siyah noktalar ve çizgiler sırasıyla son kafes yapı tasarımı düğüm noktalarını ve kafes kiriş elemanlarını gösterir.)

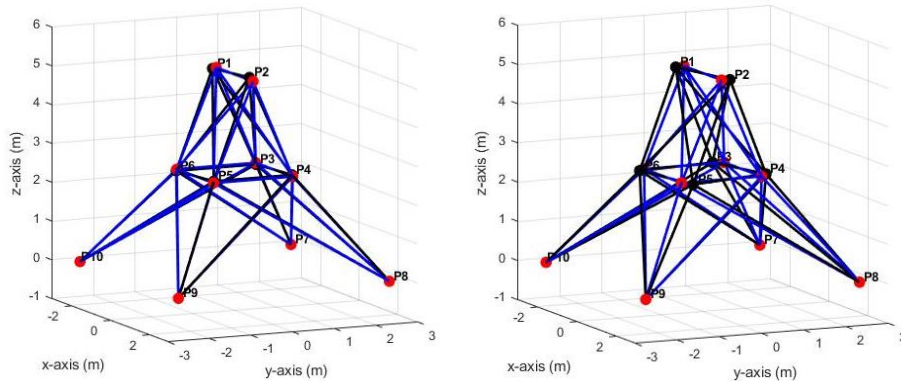


Figure 7. Mode shapes of truss structure for simulation made using optimization parameter set-I. Mode shape-I; Mode shape-III; red dots and blue lines show the original truss structure nodal points and truss members, respectively; black dots and blue lines show the final truss structure design nodal points and truss members, respectively. (Optimizasyon parametre seti-I kullanılarak yapılan benzetim için kafes yapısının mod şekilleri. Mod şekli-I; Mod şekli-III; kırmızı noktalar ve mavi çizgiler sırasıyla orijinal kafes giriş yapısının düğüm noktalarını ve kafes kiriş elemanlarını gösterir; siyah noktalar ve mavi çizgiler sırasıyla son kafes yapı tasarımı düğüm noktalarını ve kafes kiriş elemanlarını gösterir.)

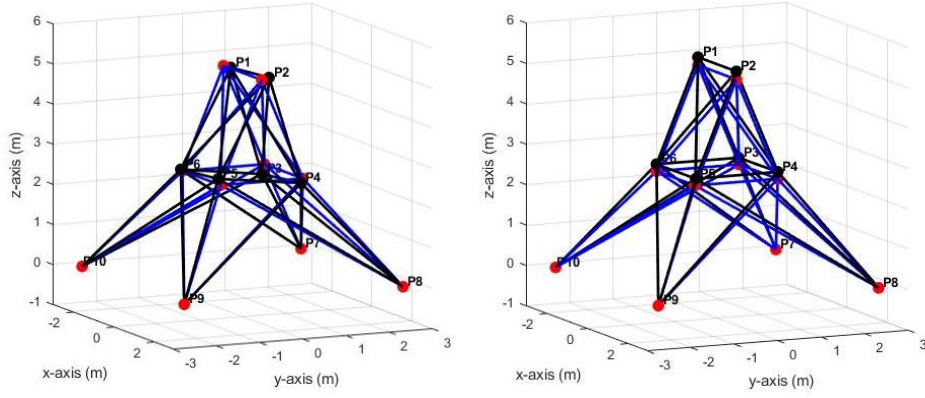


Figure 8. Mode shapes of truss structure for simulation made using optimization parameter set-I. Mode shape-V; Mode shape-VII; red dots and blue lines show the original truss structure nodal points and truss members, respectively; black dots and blue lines show the final truss structure design nodal points and truss members, respectively. (Optimizasyon parametre seti-I kullanılarak yapılan benzetim için kafes yapının mod şekilleri. Mod şekli-V; Mod şekli-VII; kırmızı noktalar ve mavi çizgiler sırasıyla orijinal kafes kiriş yapısının düğüm noktalarını ve kafes kiriş elemanlarını gösterir; siyah noktalar ve mavi çizgiler sırasıyla son kafes yapı tasarımını düğüm noktalarını ve kafes kiriş elemanlarını gösterir.)

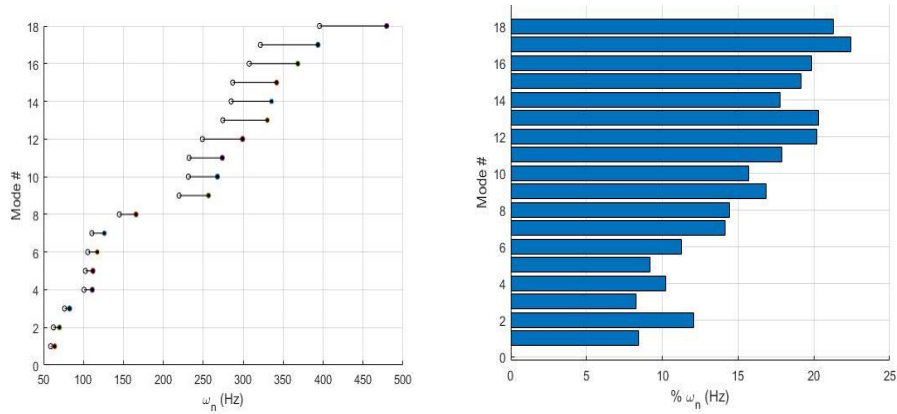


Figure 9. Natural frequency spectrum of the original and optimized truss structure. Circles and full circles show the original and the optimized natural frequencies of the truss structure, respectively for optimization parameter set-I. Percentage changes in the natural frequencies are also shown in the figure. (Orijinal ve optimize edilmiş kafes yapının doğal frekans spektrumu. Daireler ve içi dolu daireler, optimizasyon parametre seti-I için sırasıyla kafes yapının orijinal ve optimize edilmiş doğal frekanslarını gösterir. Doğal frekanslardaki yüzdesel değişimler de şekilde gösterilmiştir.)

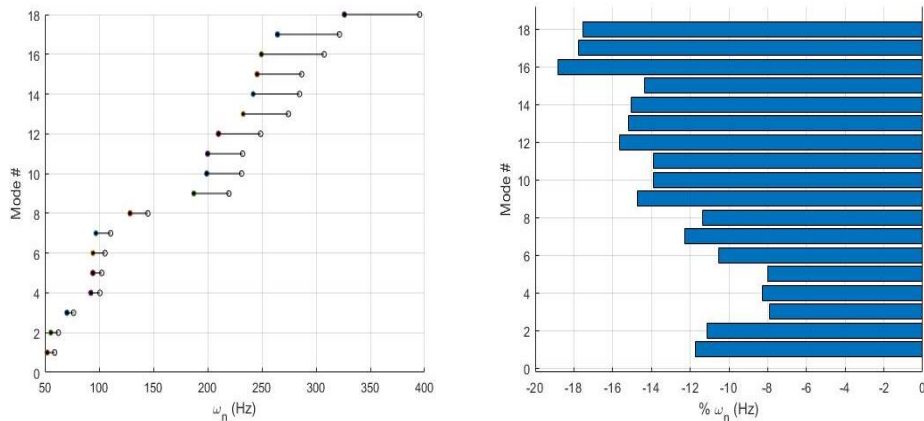


Figure 10. Natural frequency spectrum of the original and optimized truss structure. Circles and full circles show the original and the optimized natural frequencies of the truss structure, respectively for optimization parameter set-II. Percentage changes in the natural frequencies are also shown in the figure. (Orijinal ve optimize edilmiş kafes yapının doğal frekans spektrumu. Daireler ve içi dolu daireler, optimizasyon parametre seti-II için sırasıyla kafes yapının orijinal ve optimize edilmiş doğal frekanslarını gösterir. Doğal frekanslardaki yüzdesel değişimler de şekilde gösterilmiştir.)

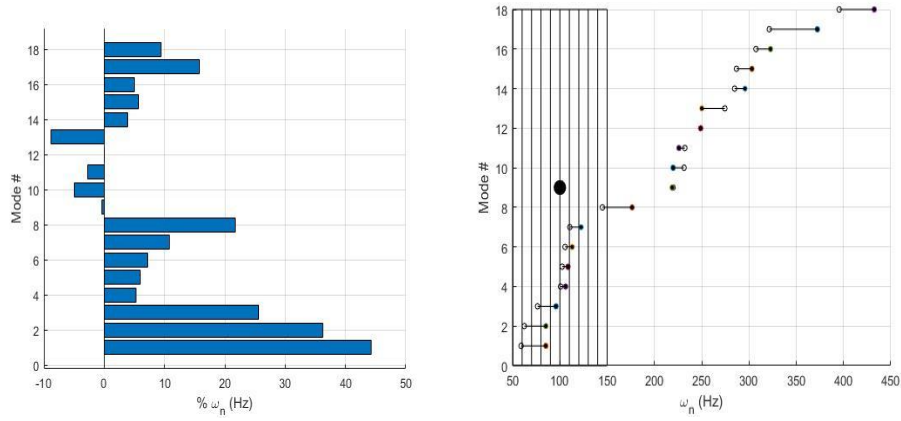


Figure 11. Natural frequency spectrum of the original and optimized truss structure. Circles and full circles show the original and the optimized natural frequencies of the truss structure, respectively for optimization parameter set-III. Percentage changes in the natural frequencies are also shown in the figure. (Orijinal ve optimize edilmiş kafes yapının doğal frekans spektrumu. Daireler ve içi dolu daireler, optimizasyon parametre seti-III için sırasıyla kafes yapının orijinal ve optimize edilmiş doğal frekanslarını gösterir. Doğal frekanslardaki yüzdesel değişimler de şekilde gösterilmiştir.)

Some geometric constraints are imposed on the coordinates of nodal points to preserve the topology of the truss structure. These geometric constraints are given below:

$$\begin{aligned}
 \text{Ceq (1)} &= \text{Pim}(1,3) - \text{Pim}(2,3); \\
 \text{Ceq (2)} &= \text{Pim}(3,3) - \text{Pim}(4,3); \\
 \text{Ceq (3)} &= \text{Pim}(4,3) - \text{Pim}(5,3); \\
 \text{Ceq (4)} &= \text{Pim}(5,3) - \text{Pim}(6,3); \\
 \text{Ceq (5)} &= \text{Pim}(6,3) - \text{Pim}(3,3); \\
 \text{Ceq (6)} &= \text{Pim}(7,3) - \text{Pim}(8,3); \\
 \text{Ceq (7)} &= \text{Pim}(8,3) - \text{Pim}(9,3); \\
 \text{Ceq (8)} &= \text{Pim}(9,3) - \text{Pim}(10,3); \\
 \text{Ceq (9)} &= \text{Pim}(10,3) - \text{Pim}(7,3); \\
 \text{Ceq (10)} &= \text{Pim}(1,1) + \text{Pim}(2,1); \\
 \text{Ceq (11)} &= \text{Pim}(1,2) + \text{Pim}(2,2); \\
 \text{Ceq (12)} &= \text{Pim}(3,1) + \text{Pim}(5,1); \\
 \text{Ceq (13)} &= \text{Pim}(3,2) + \text{Pim}(5,2); \\
 \text{Ceq (14)} &= \text{Pim}(4,1) + \text{Pim}(6,1); \\
 \text{Ceq (15)} &= \text{Pim}(4,2) + \text{Pim}(6,2); \\
 \text{Ceq (16)} &= \text{Pim}(7,1) + \text{Pim}(9,1); \\
 \text{Ceq (17)} &= \text{Pim}(7,2) + \text{Pim}(9,2); \\
 \text{Ceq (18)} &= \text{Pim}(8,1) + \text{Pim}(10,1); \\
 \text{Ceq (19)} &= \text{Pim}(8,2) + \text{Pim}(10,2);
 \end{aligned}$$

These type of equality constraints are defined in terms of **Pim**; **Pim** is a matrix of dimension 10×3 holding the coordinates of nodal points. **Ceq** is a vector of dimension N_e where N_e denotes the number of equality constraints. These **Ceq** constraints are imposed on the constrained optimization problem to preserve the symmetry original topology of truss structure so that final optimized truss structure will be a useful engineering design.

The pseudo-Matlab m-file code is explained and major points are discussed. g and h are vector functions representing all inequality and equality constraints respectively (meaning bound, linear, and nonlinear constraints), so the minimization problem can be shown as in Eq. (7).

$$\begin{aligned}
 &\min_{\Theta} f(\Theta) \\
 &\text{subject to} \\
 &g(\Theta) < 0 \\
 &h(\Theta) = 0
 \end{aligned} \tag{7}$$

5. CONCLUSIONS AND DISCUSSION (SONUÇLAR VE TARTIŞMA)

In conclusion, this article has delved into the realm of inverse modal analysis applied to truss structures, demonstrating the capability to strategically alter modal parameters to meet specific design criteria. The core challenge of inverse modal analysis was addressed through the formulation and solution of a constrained optimization problem. Leveraging the sensitivity of modal parameters to system characteristics and finite element modeling, we successfully configured the constrained optimization problem. The optimal incremental changes in the optimization parameters were computed, laying the foundation for a systematic and effective solution to the inverse modal analysis problem. Illustrating the methodology through the examination of a 25-bar truss structure, our findings substantiate the viability and efficacy of the proposed constrained optimization approach in the redesign of truss structures. By elucidating the

sensitivity-driven optimization process, we provide valuable insights into the intricacies of truss structure dynamics and offer a robust framework for achieving desired modal characteristics.

Numerical results have shown that, both analysis in Abaqus and Matlab softwares yield compatible natural frequency results. Due to space constraints, detailed discussions focus on the results of the first optimization simulation set. Simulation results are presented in Figures 9-11, where circles represent the frequencies of the original truss structure and solid full circles indicate the natural frequencies of the final optimized truss structure. Across all optimization parameter sets and within the defined constraints, the primary objective of optimization was achieved. Notably, the preservation of truss structure topology to meet equality constraints underscores the success of the engineering redesign, affirming the feasibility of a purposeful and effective truss structure optimization.

This work contributes not only to the understanding of inverse modal analysis for truss structures but also highlights its practical application as a powerful tool for structural redesign. The success demonstrated in the illustrative example underscores the versatility of the proposed constrained optimization problem in addressing the complexities inherent in truss structures. As we navigate the intricate interplay between modal parameters and system characteristics, this study lays the groundwork for further advancements in the optimization-driven redesign of truss structures, fostering innovation and efficiency in structural engineering practices. As of future work, proposed study would be a candidate method to determine the dynamic integrity of truss based structures specifically for the big multiple objective industrial designs with preserving required pre-defined constraints. On the other hand, inverse modal analysis method would be applied to other geometric structures to compare the performance with meta-heuristic algorithms which can lead to handle design problems efficiently.

DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS (ETİK STANDARTLARIN BEYANI)

The author of this article declares that the materials and methods they use in their work do not require ethical committee approval and/or legal-specific permission.

Bu makalenin yazarı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

AUTHORS' CONTRIBUTIONS (YAZARLARIN KATKILARI)

Can Ulaş DOĞRUER: He introduced the general concept of article, created optimization model with geometric constraints and implemented into Matlab FEM Model.

Makalenin genel fikrini ortaya koydu, geometrik kısıtlamalarla optimizasyon modeli oluşturdu ve Matlab FEM Modeline uygulamasını gerçekleştirdi.

Can Barış TOPRAK: He contributed to literature survey of article and supported FEM model in Matlab software.

Makalenin literatür taramasına katkı sağladı ve Matlab yazılımında FEM modellemesine destek verdi.

Bora YILDIRIM: He carried out Abaqus simulations and verified numerical results.

Abaqus benzetim çalışmalarını gerçekleştirdi ve sayısal sonuçları doğruladı.

CONFLICT OF INTEREST (ÇIKAR ÇATIŞMASI)

There is no conflict of interest in this study.

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

REFERENCES (KAYNAKLAR)

- [1] Zargham, S., Ward, T. A., Ramli, R., and Badruddin, I. A.: Topology optimization: a review for structural designs under vibration problems, *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 53, 1157–1177, 2016. (Article)
- [2] Pholdee, N. and Bureerat, S.: Comparative performance of meta-heuristic algorithms for mass minimisation of trusses with dynamic constraints, *Advances in Engineering Software*, 75, 1–13, 2014. (Article)
- [3] Serra, M. and Venini, P.: On some applications of ant colony optimization metaheuristic to plane truss optimization, *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 32, 499–506, 2006. (Article)
- [4] Ho-Huu, V., Nguyen-Thoi, T., Nguyen-Thoi, M., and Le-Anh, L.: An improved constrained differential evolution using discrete variables (D-ICDE) for layout optimization of truss structures, *Expert Systems with Applications*, 42, 7057–7069, 2015. (Article)
- [5] Ho-Huu, V., Nguyen-Thoi, T., Le-Anh, L., and Nguyen-Trang, T.: An effective reliability-based

- improved constrained differential evolution for reliability-based design optimization of truss structures, *Advances in Engineering Software*, 92, 48–56, 2016. (Article)
- [6] Miguel, L. F. F., Lopez, R. H., and Miguel, L. F. F.: Multimodal size, shape, and topology optimisation of truss structures using the Firefly algorithm, *Advances in Engineering Software*, 56, 23–37, 2013. (Article)
- [7] Xu, T., Zuo, W., Xu, T., Song, G., and Li, R.: An adaptive reanalysis method for genetic algorithm with application to fast truss optimization, *Acta Mechanica Sinica*, 26, 225–234, 2010. (Article)
- [8] Kaveh, A. and Talatahari, S.: A particle swarm ant colony optimization for truss structures with discrete variables, *Journal of Constructional Steel Research*, 65, 1558–1568, 2009. (Article)
- [9] Lamberti, L.: An efficient simulated annealing algorithm for design optimization of truss structures, *Computers & Structures*, 86, 1936–1953, 2008. (Article)
- [10] Jalili, S. and Talatahari, S.: Optimum design of truss structures under frequency constraints using hybrid CSS-MBLS algorithm, *KSCE Journal of Civil Engineering*, 22, 1840–1853, 2018. (Article)
- [11] Ho-Huu, V., Nguyen-Thoi, T., Truong-Khac, T., Le-Anh, L., and Vo-Duy, T.: An improved differential evolution based on roulette wheel selection for shape and size optimization of truss structures with frequency constraints, *Neural computing and applications*, 29, 167–185, 2018. (Article)
- [12] Jalili, S. and Hosseinzadeh, Y.: Combining migration and differential evolution strategies for optimum design of truss structures with dynamic constraints, *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 43, 289–312, 2019. (Article)
- [13] Lieu, Q. X., Do, D. T., and Lee, J.: An adaptive hybrid evolutionary firefly algorithm for shape and size optimization of truss structures with frequency constraints, *Computers & Structures*, 195, 99–112, 2018. (Article)
- [14] Miguel, L. F. F. and Miguel, L. F. F.: Shape and size optimization of truss structures considering dynamic constraints through modern metaheuristic algorithms, *Expert Systems with Applications*, 39, 9458–9467, 2012. (Article)
- [15] Assimi, H. 185 and Jamali, A.: A hybrid algorithm coupling genetic programming and Nelder–Mead for topology and size optimization of trusses with static and dynamic constraints, *Expert Systems with Applications*, 95, 127–141, 2018. (Article)
- [16] Zuo, W., Xu, T., Zhang, H., and Xu, T.: Fast structural optimization with frequency constraints by genetic algorithm using adaptive eigenvalue reanalysis methods, *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 43, 799–810, 2011. (Article)
- [17] Gholizadeh, S., Salajegheh, E., and Torkzadeh, P.: Structural optimization with frequency constraints by genetic algorithm using wavelet radial basis function neural network, *Journal of Sound and Vibration*, 312, 316–331, 2008. (Article)
- [18] Kaveh, A. and Mahdavi, V.: A hybrid CBO–PSO algorithm for optimal design of truss structures with dynamic constraints, *Applied Soft Computing*, 34, 260–273, 2015. (Article)
- [19] Kaveh, A. and Zolghadr, A.: A new PSRO algorithm for frequency constraint truss shape and size optimization, *Struct Eng Mech*, 52, 445–468, 2014. (Article)
- [20] Tejani, G. G., Savsani, V. J., and Patel, V. K.: Modified sub-population teaching-learning-based optimization for design of truss structures with natural frequency constraints, *Mechanics Based Design of Structures and Machines*, 44, 495–513, 2016. (Article)
- [21] Tejani, G. G., Savsani, V. J., Bureerat, S., Patel, V. K., and Savsani, P.: Topology optimization of truss subjected to static and dynamic constraints by integrating simulated annealing into passing vehicle search algorithms, *Engineering with Computers*, 35, 499–517, 2019. (Article)
- [22] Salt, S. J., et al. "Layout optimization of pin-jointed truss structures with minimum frequency constraints." *Engineering Optimization* 55.8 (2023): 1403-1421.
- [23] Sheng-Xue, He. "Truss optimization with frequency constraints using the medalist learning algorithm." *Structures*. Vol. 55. Elsevier, 2023.
- [24] Millan-Paramo, Carlos, and João Elias Abdalla Filho. "Size and shape optimization of truss structures with natural frequency constraints using modified simulated annealing algorithm." *Arabian Journal for Science and Engineering* 45.5 (2020): 3511-3525.
- [25] Lemonge, Afonso CC, et al. "Multi-objective truss structural optimization considering natural frequencies of vibration and global stability." *Expert Systems with Applications* 165 (2021): 113777.
- [26] Carvalho, Érica CR, et al. "Solving multi-objective truss structural optimization problems considering natural frequencies of vibration and automatic member grouping." *Evolutionary Intelligence* (2022): 1-26.
- [27] Khodadadi, Nima, and Seyedali Mirjalili. "Truss optimization with natural frequency constraints using generalized normal distribution

- optimization." *Applied Intelligence* 52.9 (2022): 10384-10397.
- [28] Fu, Yun-Fei, et al. "Smooth Topological Design of 3D Continuum Structures Using Elemental Volume Fractions." *Computers & Structures*, 2020.
- [29] Zhu, Jihong, and Tong Gao. *Topology optimization in engineering structure design*. Elsevier, 2016.
- [30] Li, Jianhongyu, Shenyang Chen, and Hai Huang. "Topology optimization of continuum structure with dynamic constraints using mode identification." *Journal of Mechanical Science and Technology* 29 (2015): 1407-1412.

A Software for Optimum Design of Laterally Loaded Bolted Joints

Kadir SARI^{1*}, Hakan DİLİPAK²

¹Gazi University, Graduate School of Natural and Applied Sciences, Department of Manufacturing Engineering, Ankara, Turkey

²Gazi University, Faculty of Technology, Department of Manufacturing Engineering, Ankara, Turkey

Article Info

Research article
Received: 02/11/2023
Revision: 03/02/2024
Accepted: 02/03/2024

Keywords

Bolted Joint
Design and Optimization
Analysis
Lateral Load
C#

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 02/11/2023
Düzeltilme: 03/02/2024
Kabul: 02/03/2024

Anahtar Kelimeler

Cıvatalı Bağlantı
Tasarım ve Optimizasyon
Analiz
Yanal Yük
C#

Graphical/Tabular Abstract (Grafik Özet)

For the design and optimization of laterally loaded bolted joints, a software with a graphical user interface was developed with C# programming language in Visual Studio environment. / Yanal yüklemeli cıvatalı bağlantıların tasarımı ve optimizasyonu için Visual Studio ortamında C# programlama dili ile grafik kullanıcı arayüzüne sahip bir yazılım geliştirilmiştir.

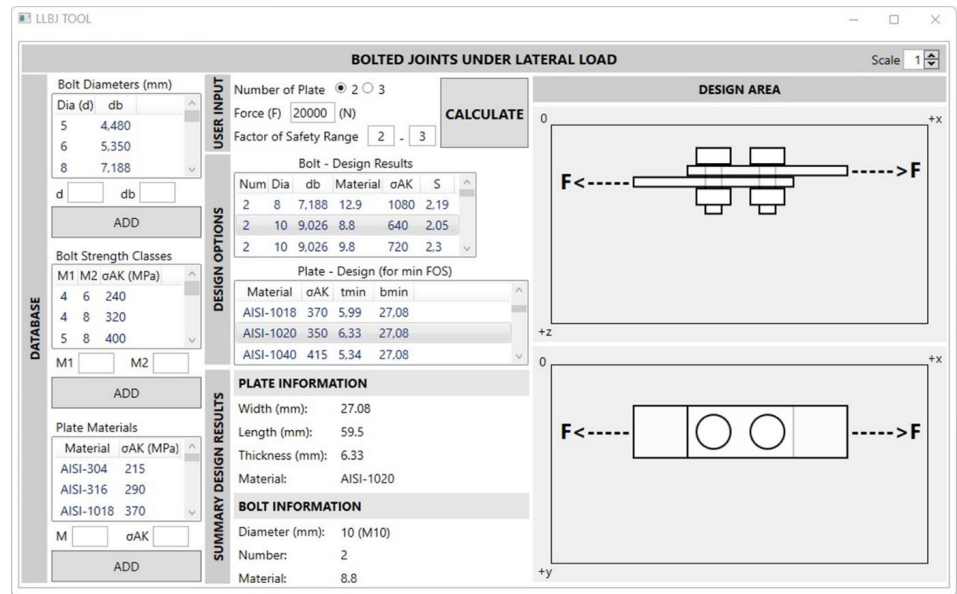


Figure A: Developed software / Şekil A: Geliştirilen yazılım

Highlights (Önemli noktalar)

- Laterally loaded bolted joints. / Yanal yüklü cıvatalı bağlantılar.
- Design, analysis and optimization. / Tasarım, analiz ve optimizasyon.
- Software and graphical user interface (GUI). / Yazılım ve grafik kullanıcı arayüzü.

Aim (Amaç): Optimal designs of bolted joints for minimum user input were determined to save workload, time and cost. / Minimum kullanıcı girdisi için cıvatalı bağlantıların optimum tasarımları belirlenerek iş yükü, zaman ve maliyet tasarrufu amaçlanmıştır.

Originality (Özgünlük): Compared to the literature, different joint designs and optimizations were performed for the target conditions in one go. Graphical user interface (GUI) was designed for visualization and usability. / Literatüre kıyasla hedef şartlar için tek seferde farklı bağlantı tasarımları ve optimizasyonlar gerçekleştirilmiştir. Az rastlanan grafik kullanıcı arayüzü tasarlanarak görsellik ve kullanılabilirlik sağlanmıştır.

Results (Bulgular): Optimal bolted joint designs were output for minimal user input and the process was automated. The software results were validated by comparing them with theoretical solutions. / Minimum kullanıcı girdisi için optimum cıvatalı bağlantı tasarımları çıktı alınmıştır ve süreç otomatikleştirilmiştir. Yazılım sonuçları, teorik çözümler ile karşılaştırılarak doğrulanmıştır.

Conclusion (Sonuç): With the developed software, the design-analysis cycle was avoided by automatically reaching the optimum bolted joint designs instantly in one go for the targeted conditions according to the minimum user input. Thanks to the graphical user interface (GUI), a visual, easy and interactive use was provided. Efficiency and productivity were increased by reducing workload and time. / Geliştirilen yazılım ile minimum kullanıcı girdisine göre hedef şartlar için otomatik olarak tek seferde anında optimum cıvatalı bağlantı tasarımlarına ulaşarak tasarım-analiz döngüsü önlenmiştir. Grafik kullanıcı arayüzü sayesinde görsel, kolay ve etkileşimli bir kullanım sağlanmıştır. İş yükü ve zaman azaltılarak etkinlik ve verim yükseltilmiştir.



A Software for Optimum Design of Laterally Loaded Bolted Joints

Kadir SARI^{1*} , Hakan DİLİPAK²

¹Gazi University, Graduate School of Natural and Applied Sciences, Department of Manufacturing Engineering, Ankara, Turkey

²Gazi University, Faculty of Technology, Department of Manufacturing Engineering, Ankara, Turkey

Article Info

Research article
Received: 02/11/2023
Revision: 03/02/2024
Accepted: 02/03/2024

Keywords

Bolted Joint
Design And Optimization
Analysis
Lateral Load
C#

Abstract

Bolted joints, which are one of the detachable joining methods, are used extensively. The reliability of bolted joints is extremely important for the strength and life of the system. The determination of the number of bolts to be used in a system, the position and other data of the bolt requires very serious design and engineering studies. In this study, the design and optimization of bolted joints subjected to lateral forces are performed. For this purpose, a software has been developed in C# programming language. The software visually guides the user and asks a minimum number of questions to the designer and all other parameters are calculated by the program. The visual design of the program was done in Visual Studio environment. The graphic designs used in the software help the user to enter correct data. When the program is run for bolted joint under lateral loading, the user only enters the number of plates and force as input. Although the program performs its calculations between 1.5-2 factor of safety, it is possible to change it according to the characteristics of the design. The program developed in the light of these inputs calculates the appropriate bolt diameter, number, material and dimensions of the plates for the designed joint according to the optimum design options. The design options determined by the program are also presented to the designer visually. With the developed software, the user workload is minimized by determining the optimum options of bolted joints according to the minimum amount of user input. This resulted in significant savings in the time spent in design and engineering calculations. The user-friendly interface provides an easy and visual use. The results obtained by the program were also solved manually to check the reliability of the program.

Yanal Yüklemeli Cıvatalı Bağlantıların Optimum Tasarımı için Bir Yazılım

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 02/11/2023
Düzeltilme: 03/02/2024
Kabul: 02/03/2024

Anahtar Kelimeler

Cıvatalı Bağlantı
Tasarım Ve Optimizasyon
Analiz
Yanal Yük
C#

Öz

Sökülebilir birleştirme yöntemlerinden olan cıvatalı bağlantılar çok yoğun bir şekilde kullanılmaktadır. Cıvatalı bağlantıların güvenilirliği, sistemin dayanımı ve ömrü açısından son derece önemlidir. Bir sistemde kullanılacak cıvata sayısı, konumu ve cıvataya ait diğer verilerin belirlenmesi çok ciddi tasarım ve mühendislik çalışmalarını gerektirmektedir. Bu çalışmada, yanal kuvvete maruz kalan cıvatalı birleştirmelerin, tasarımı ve optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla C# programlama dilinde bir yazılım geliştirilmiştir. Yazılım görsel olarak kullanıcıyı yönlendirmekle birlikte tasarımcıya minimum miktarda soru sormakta ve diğer bütün parametreler program tarafından hesaplanmaktadır. Programın görsel tasarımı Visual Studio ortamında yapılmıştır. Gerçekleştirilen yazılımda kullanılan grafik tasarımlar kullanıcının doğru veriler girmesine yardımcı olmaktadır. Yanal yüklem altında cıvatalı birleştirme yapılması amacıyla program çalıştırıldığında, kullanıcı, sadece plaka sayısını ve kuvveti girdi olarak programa yazmaktadır. Program 1,5-2 emniyet katsayısı arasında hesaplamalarını yapmasına rağmen bunu yine tasarımın özelliğine göre değiştirebilme imkânı sunulmuştur. Bu girdiler ışığında geliştirilen program tasarlanan birleştirme için, uygun cıvata çapı, sayısı, malzemesi ve plakaların ebatlarını optimum tasarım seçeneklerine göre hesaplamaktadır. Program tarafından belirlenen tasarım seçenekleri yine tasarımcıya görsel olarak sunulmaktadır. Geliştirilen yazılım ile minimum miktarda kullanıcı girdisine göre cıvatalı bağlantıların optimum seçenekleri belirlenerek kullanıcı iş yükü en aza indirilmiştir. Bu sonuç tasarımı ve mühendislik hesaplamalarda harcanan zamanda çok ciddi tasarruf sağlamıştır. Kullanıcı dostu arayüz kolay ve görsel bir kullanım sağlamıştır. Program tarafından elde edilen sonuçlar manuel olarak da çözdürülerek programın güvenilirliği kontrol edilmiştir.

1. INTRODUCTION (GİRİŞ)

Today, there are many joining methods for fixing parts to each other. One of these joining methods is bolted joints. Bolted joints are one of the commonly used joining methods in engineering applications. However, the design and optimization of these joints has a very complex process and requires the consideration of many factors. These factors include material properties, geometrical parameters, joint loads and assembly methods. Incorrect design of bolted joints can cause serious problems and even

jeopardize life safety. Therefore, the correct design and optimization of bolted joints is an important issue for engineers.

Bolts are removable fasteners widely used in machinery, aviation, construction, etc. They are usually used together with additional components such as nuts or washers. Bolted joints are systems formed by joining two or more parts with bolts and additional components. These joints with soluble structure provide easy assembly and disassembly.

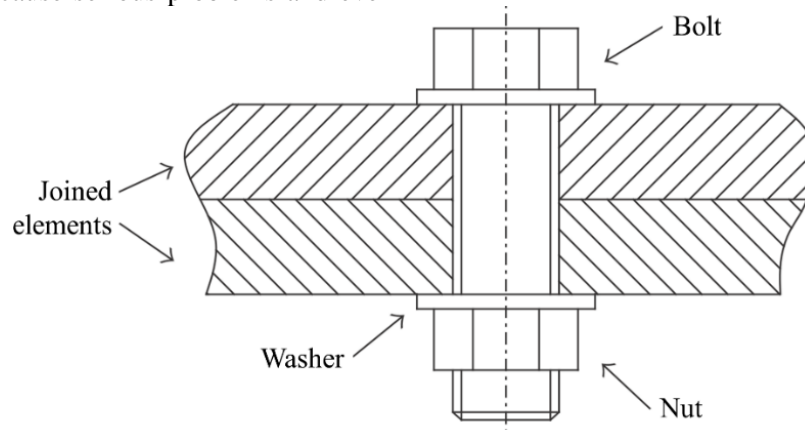


Figure 1. Bolted joint (Cıvatalı bağlantı) [1]

Optimization is the act of obtaining the best result under given conditions. In the design, construction and maintenance of any engineering system, many decisions are made at various stages. The ultimate goal of all such decisions is either to minimize the effort required or to maximize the desired benefit. Since the required effort or the desired benefit in any practical situation can be expressed as a function of certain decision variables, optimization can be defined as the process of finding conditions that give the maximum or minimum value of a function [2].

A literature survey on the design and optimization of bolted joints was carried out and the researches and methods in this field were examined. In the design process of bolted joints, equations were derived by calculating the compliance and load factors for the strength cases [3]. In order to facilitate the modelling of composite bolted joints, a tool called BOLJAT was developed using the finite element analysis method and integrated into the MSC.Patran analysis program [4]. In order to quickly calculate the strength of the joined elements in bolted joints, a software with a user interface in Visual Basic based on finite element analysis (ANSYS) and artificial neural network was developed [5]. A software was developed for the design and analysis of riveted and bolted joints under compound load [6]. A model was developed

for the analysis of the effects of load distributions on bolts and laminates in composite bolted joints by finite element method [7]. The behavior of the distance between bolt holes and hole diameter under tensile load in a bolted and nutted joint made of MIL-A-46100 high alloy armor steel plates was investigated [8]. A multi-objective optimization method for bolted joints under multiple loads was developed and integrated into the Nastran finite element program in order to obtain uniform load distribution on the bolts in multiple load cases [9]. An analysis tool was developed using ANN technique for the design of bolted flange joints under axial, shear and moment loading. [10]. A study was carried out to predict the loosening rate of bolted joints under vibration using MATLAB and ANN [11]. A program was developed for strength calculation and design of connecting rod bolts in internal combustion engines using MS Excel program [12]. The behavior of bolted sandwich composites under tensile loading was investigated [13]. A compound topology optimization approach was developed for simultaneous optimization of the shape, topology, bolt location and number of bolted joints [14]. An accurate and reliable damage prediction approach for the design of high-strength steel bolted joints based on machine learning was presented [15]. The bearing capacity of critical joints in single lap and single bolted shear conditions was investigated numerically [16]. An

expert system was developed for the selection of bolt head shape type in the design of bolted joints [17].

Previous studies include theoretical, computational and experimental work on the design and optimization of bolted joints. The joints were studied on limited types as a design. There are very few studies on the automatic optimization of the design in one go according to the targeted conditions. Graphical user interface feature was not encountered much.

In this study, the focus is on the design and optimization of laterally loaded bolted joints. For this purpose, a software was developed in Visual Studio environment with C# programming language and a graphical user interface was created for visuality and convenience. The software developed

was named "LLBJ TOOL". With the software, optimum designs are produced instantaneously with a minimum amount of input. In this way, it is aimed to facilitate the process by minimizing the workforce and time spent.

2. BOLTED JOINTS UNDER LATERAL LOAD (YANAL YÜK ALTINDAKİ CIVATALI BAĞLANTILAR)

In laterally loaded joints, the applied load is perpendicular to the direction of the bolt axis and passes through the center of gravity of the bolt group. Under the influence of the lateral force, shear stresses occur in the bolts and bearing and tensile stresses occur in the plates. An example visualization for this type of joint and the formulation for the calculation of the resulting stresses are given below [18].

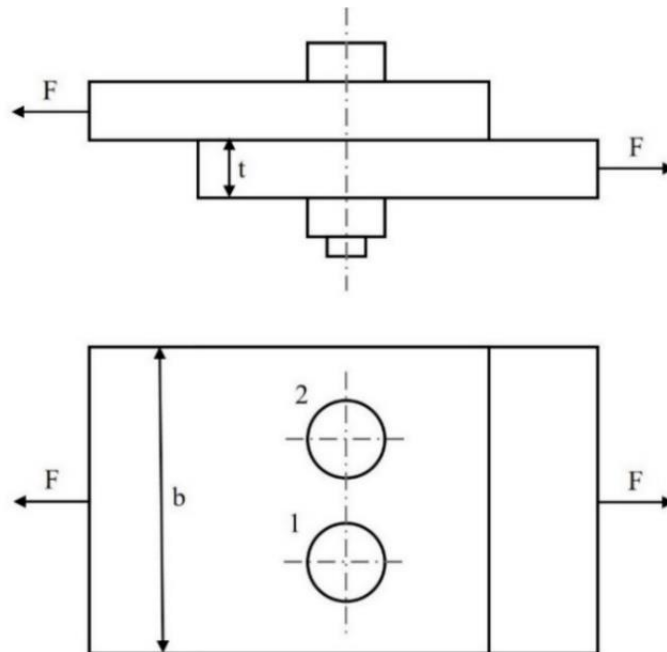


Figure 2. Bolted joint under lateral load (Yanal yük altında civatalı bağlantı)

Shear stress (τ) and safety situation

$$\tau = F/A$$

$$\tau = F/\sum A_b$$

$$\tau = F/(n * A_b * z)$$

$$\tau = F/(n * ((\pi * d_b^2)/4) * z)$$

$$S_\tau = \sigma_{yield} * 0,5/\tau$$

Where:

- τ : Shear stress (N/mm²)
- F : Force (N), A : Area (mm²)
- $\sum A_b$: Total bolt area (mm²)
- n : Number of bolts
- A_b : Bolt area (mm²)

- z : Number of shear plane
- π : pi
- (1) d_b : Bolt pitch circle diameter (mm)
- (2) S_τ : Factor of safety for shear
- (3) σ_{yield} : Material yield strength (MPa)
- (4)
- (5) *Real time status*

As a result of the lateral load, the bolts are subjected to shearing by the plates through the cross-sections on the mating surface of the plates and shear stress occurs. If the shear stress exceeds the stress that the material can bear, a failure mode occurs in the bolt. Below is a shear failure event that occurred in real time showing this situation.

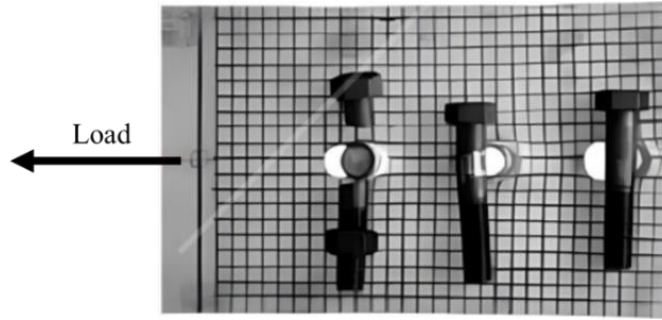


Figure 3. Shear failure of the bolts (Cıvatada kesme hasarı) [19]

Bearing stress (σ_c) and safety situation

$$\sigma_c = F/A \quad (6)$$

$$\sigma_c = F/(n * A_c) \quad (7)$$

$$\sigma_c = F/(n * (d_b * t)) \quad (8)$$

$$S_c = \sigma_{yield}/\sigma_c \quad (9)$$

Where:

σ_c : Bearing stress (N/mm²)

F : Force (N)

A : Area (mm²)

A_c : Bearing area (mm²)

n : Number of bolts

d_b : Bolt pitch circle diameter (mm)

t : Plate thickness (mm)

S_c : Factor of safety for bearing

σ_{yield} : Material yield strength (MPa)

Real time status

The plates are subjected to compression by the body of the bolts as a result of the lateral load and bearing stress is generated. If the bearing stress exceeds the stress that the material can bear, a failure mode occurs in the plate. The following figure shows a bearing failure event that occurred in real time.

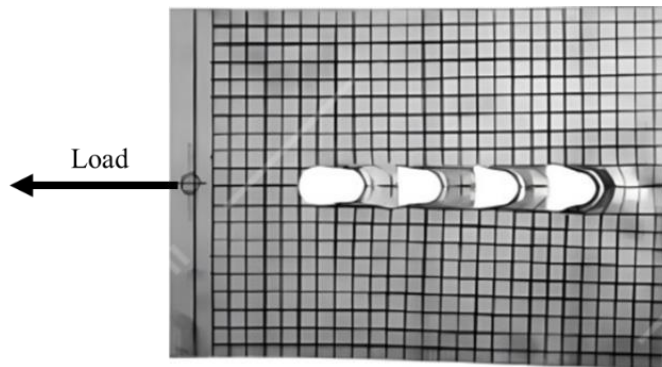


Figure 4. Bearing failure of the plate (Plakada basma hasarı) [19]

Tensile stress (σ_t) and safety situation

$$\sigma_t = F/A \quad (10)$$

$$\sigma_t = F/A_t \quad (11)$$

$$\sigma_t = F/((b - n * d_b) * t) \quad (12)$$

$$S_t = \sigma_{yield}/\sigma_t \quad (13)$$

Where:

σ_t : Tensile stress (N/mm²)

F : Force (N)

A : Area (mm²)

A_t : Tensile area (mm²)

b : Plate width (mm)

n : Number of bolts in cross section

d_b : Bolt pitch circle diameter (mm)

t : Plate thickness (mm)

S_t : Factor of safety for tensile

σ_{yield} : Material yield strength (MPa)

Real time status

As a result of the lateral load, the plates are subjected to pulling from the sections of the bolts perpendicular to the force and parallel to the upper surface of the plate and tensile stress occurs. If the tensile stress exceeds the stress that the material can bear, a failure mode occurs in the plate. The image below shows a tensile failure event that occurred in real time.

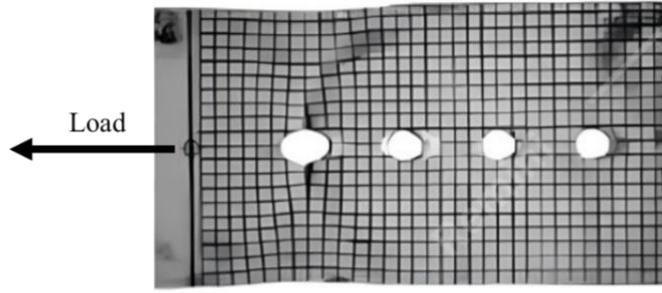


Figure 5. Tensile failure of the plates (Plakada çekme hasarı) [19]

Safety situation

The factor with the lowest value among the factors of safety calculated for each stress state is the factor of safety of the system (Eq. 14).

$$S_{sys} = S_{min} \quad (14)$$

3. PLACEMENT OF BOLTS (CIVATALARIN YERLEŞİMİ)

In bolted joints, the distances between bolts are determined according to the intervals specified in the standards. In the following, a sample arrangement for the placement of bolt holes is given in Figure 6 and the equations (Eqs. 15 – 20) for the relevant parameters on the figure are given in accordance with the TS648 standard [20].

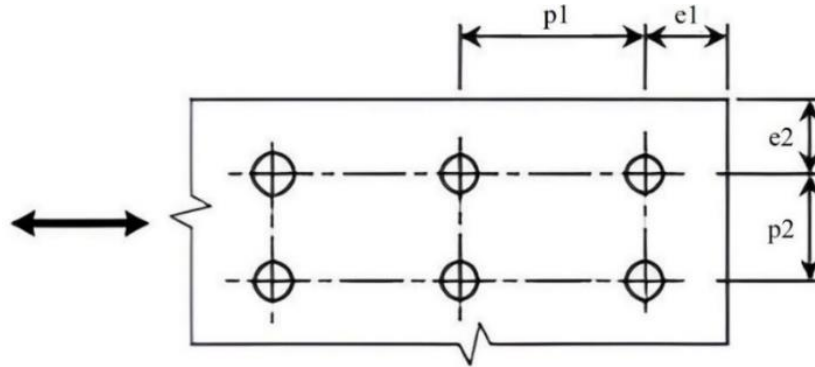


Figure 6. Placement of bolt holes (Cıvata deliklerinin yerleşimi) [21]

$$p1_{min} = p2_{min} = 3 * D \quad (15)$$

$$p1_{max} = p2_{max} = 8 * D \quad (16)$$

$$e1_{min} = 2 * D \quad (17)$$

$$e1_{max} = 3 * D \quad (18)$$

$$e2_{min} = 1,5 * D \quad (19)$$

$$e2_{max} = 3 * D \quad (20)$$

Where,

D : Hole diameter (mm)

$p1, p2$: Distance between two bolt holes (mm)

$e1$: Distance from edges in the direction of force (mm)

$e2$: Distance from edges perpendicular to the force (mm)

Real time status

When the bolts are not correctly positioned, the plates may not be able to carry the applied lateral load and as a result, tearing and splitting failure modes may occur in the plates. A real time splitting failure event is given below.

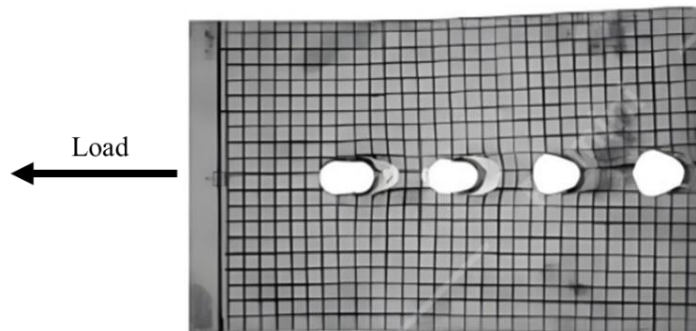


Figure 7. Splitting failure of the plate (Plakada yarıлма hasarı) [19]

4. DEVELOPED SOFTWARE (GELİŞTİRİLEN YAZILIM)

A software named "LLBJ TOOL" was developed in Visual Studio environment with C# programming language for the design and optimization of bolted joints under lateral load. C# programming language was preferred because it has a structure suitable for graphical operations and is widely used. A user interface was created for visual and easy use.

Users can easily give their inputs through the interface and see the results. In the developed software, shear (for bolts), bearing (for plates) and tensile (for plates) stresses in the joint are calculated based on user inputs. For bolted joint, parameter properties such as dimensions, material properties,

load information, etc. are taken into account. By taking into account the mechanical properties of different materials in the database, the design options that provide the most suitable situation according to user preferences are given as drawings and tables.

With this software, it is aimed to facilitate the design and optimization work of technical staff for bolted joints. Users can quickly and accurately determine the dimensions, materials and other properties of bolted joints. Optional design results are listed and the most accurate design is preferred.

The flowchart of the developed software is given below.

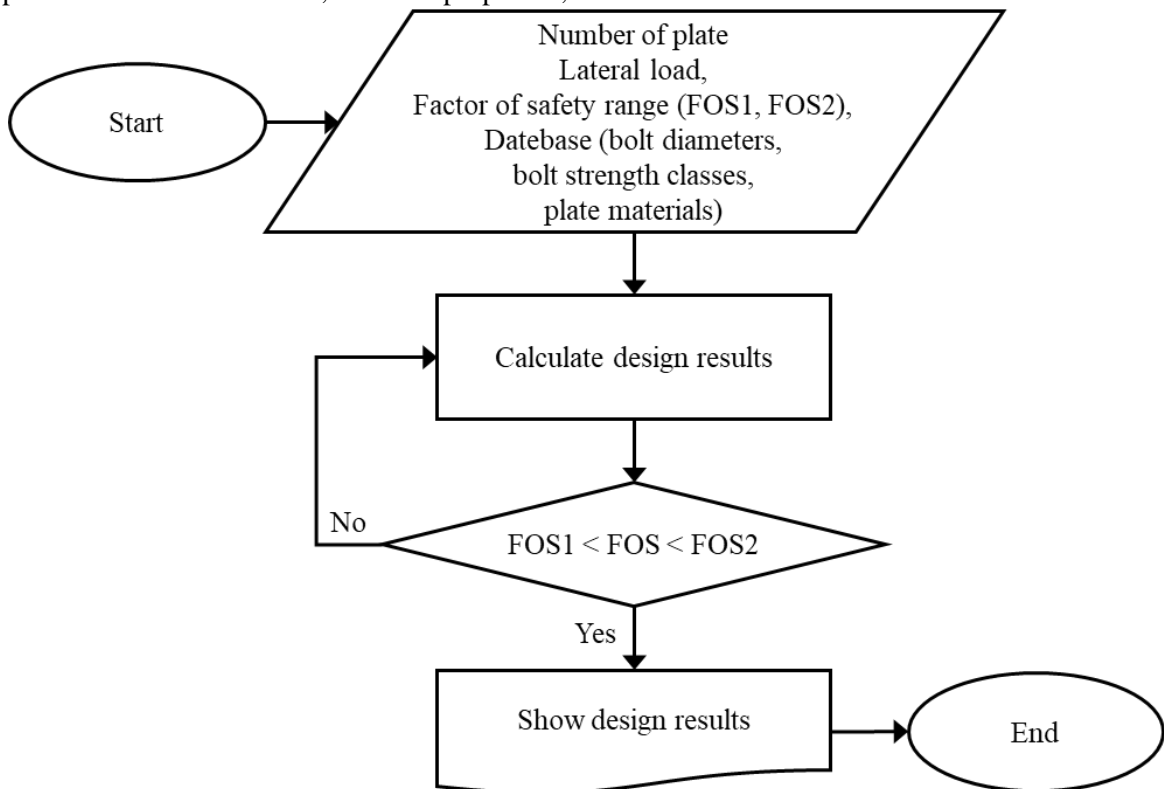


Figure 8. Software flowchart (Yazılım akış şeması)

4.1. Database (Veri Tabanı)

The database used in the developed software contains bolt information, bolt strength classes and plate material information. The database was integrated into the software interface and the user can interact with the database. The user can also add his own information and data to this database.

The information and data used in the database in the following tables include bolt diameter information, bolt strength classes and plate material information and are given in tables below.

For bolt diameter information, catalogues were examined and commonly available bolts were taken as basis. These data are covered by the ISO 724 standard titled “ISO general-purpose metric screw threads - Basic dimensions”.

Table 1. Diameter information for bolts (Cıvatalar için çap bilgileri)

Nominal Diameter (mm)	Pitch Circle Diameter (mm)
5	4,480
6	5,350
8	7,188
10	9,026
12	10,863
14	12,701
16	14,701
18	16,376
20	18,376

Bolt strength classes and properties were based on the data specified in the standard with the name and subject "ISO 898-1: Mechanical properties of fasteners". It is given in the table below [22].

Table 2. Bolt strength classes (Cıvata dayanım sınıfları)

Bolt Strength Class	Yield Strength (MPa)
4.6	240
4.8	320
5.8	400
8.8	640
9.8	720
10.9	900
12.9	1080

Material properties for the plates were prepared in accordance with catalogues and materials commonly used in the industry. ASTM A240, ASTM A108, ASTM A519, ASTM A29 and ASTM B209 standards were used for these materials.

Table 3. Material properties for plates (Plakalar için malzeme özellikleri)

Material	Yield Strength (MPa)	Standard
AISI-304	215	ASTM A240
AISI-316	290	ASTM A240
AISI-1018	370	ASTM A108
AISI-1020	350	ASTM A519
AISI-1040	415	ASTM A29
AISI-1045	310	ASTM A29
AISI-4140	415	ASTM A29
AISI-4340	470	ASTM A29
Al-2024	324	ASTM B209
Al-5083	228	ASTM B209
Al-6061	276	ASTM B209
Al-6063	214	ASTM B209
Al-7075	503	ASTM B209

4.2. Presentation and Use (Tanıtım ve Kullanım)

The interface designed for the developed software consists of design area, user input, result and database sections. The section where the design for bolted joints is made is the design area. The parameters related to the bolted joint and its design

are entered by the user in the user input section. The section where optional design results are given in line with user inputs is the result area. After the user's choice among the optimum design results, the bolted joint is drawn in the design area and the final design parameters are given in the summary design results section.

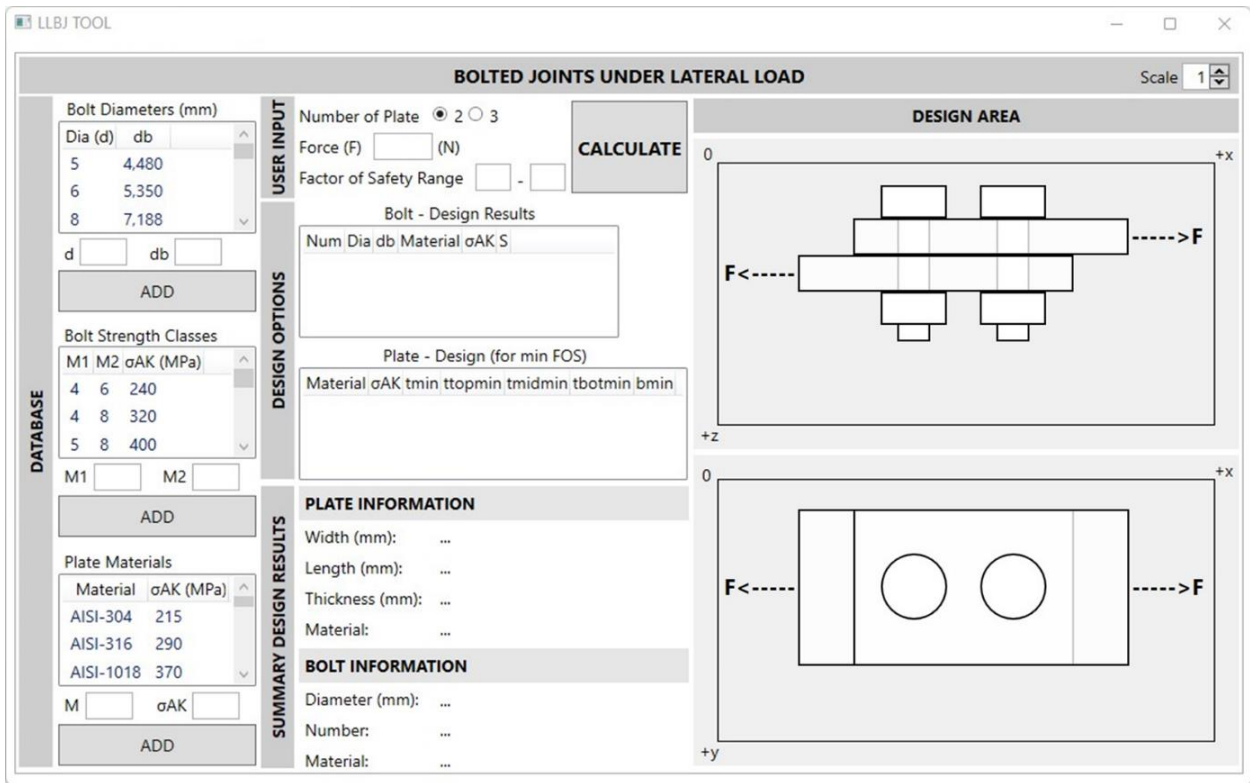


Figure 9. Interface (Arayüz)

The database section contains bolt information, strength classes and plate material information. This data is reflected in the interface with the listing tool. Text boxes and buttons are placed at the bottom of

the database lists. Users can enter their own data in these text boxes and expand the database by using the add button.

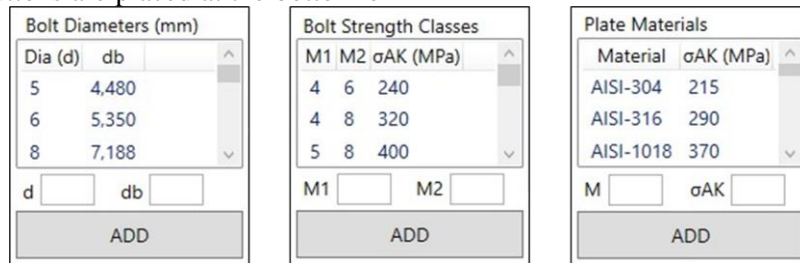


Figure 10. Database (Veri tabanı)

In the user input section, the number of plates, load and safety factor range information for bolted joint are entered by the user in the relevant fields. The number of plates that can be used in bolted joint can be selected as 2 or 3. The amount of lateral load that the joint is subjected to is entered in the form of N units. This lateral load is perpendicular to the bolt axis and passes through the center of gravity of the

bolt group. Forces of the magnitude desired by the user can be applied by entering this field. In order to create a range for the factor of safety, two values as minimum and maximum are taken from the user. In line with these inputs, the "CALCULATE" button is pressed and automatic calculations are made for the bolted joint.

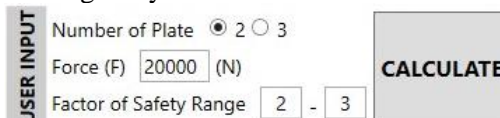


Figure 11. User input area (Kullanıcı girişi alanı)

In this calculation process, shear stress was taken as basis and the related formulation was used. Based on user inputs, calculations are run for bolt numbers between 1 and 20 according to the diameter and strength classes of the bolts in the database.

Different design results are calculated for these data and the results within the safety factor range are filtered and sorted in the listing tool on the interface. Accordingly, the user is given design options in the result section. Design options consist of two

sections and these are bolt design results and plate design results. The process was structured with the objective of finding the minimum feasible outcomes. The aim is to design bolted joints that are feasible for minimum workload, time and cost.

Primary design options include bolt results and these are number of bolts, nominal diameter,

strength class, yield strength and safety factor parameters for these data. The user makes a choice among these options and according to this choice, secondary design options for plates are calculated. Secondary design results include the results for the plates and include minimum thickness, width and material data that can be used. Design options are given as results in the listing tools.

Bolt - Design Results						
Num	Dia	db	Material	σ_{AK}	S	
2	8	7,188	12.9	1080	2,19	
2	10	9,026	8.8	640	2,05	
2	10	9,026	9.8	720	2,3	

Plate - Design (for min FOS)				
Material	σ_{AK}	tmin	bmin	
AISI-1018	370	5,99	27,08	
AISI-1020	350	6,33	27,08	
AISI-1040	415	5,34	27,08	

Figure 12. Primary and secondary design options (Birincil ve ikincil tasarım seçenekleri)

The user chooses between primary and secondary design options and the optimum bolted joint for the data in their preferences is automatically drawn in the design area. The design area where the design of bolted joints is realized consists of 2 sections as front view and top view. In this way, the bolted joint design was reflected from different angles in the form of two views, providing visuality and

comprehensibility. As an example, for the layout of the bolts, balanced and symmetrical arrangements are given on the design as a suggestion. In addition, there is also the minimum length of the plates in line with the recommended arrangement using the formulations found in the bolt placement standards given in section 3.

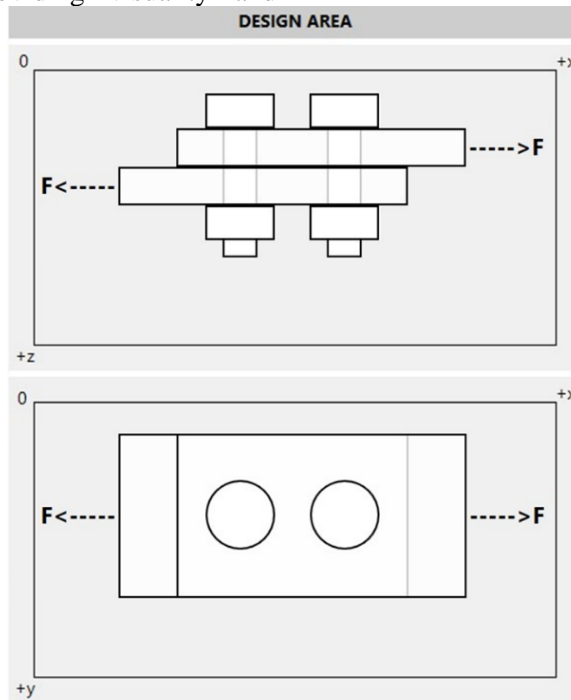


Figure 13. Design area (Tasarım alanı)

In the "Summary Design Results" section of the interface, the relevant parameters for the designed bolted joint are transferred as the final result. Summary design results consists of two sub-headings as plate information and bolt information. Under the plate information heading, there are

width, length, thickness and material parameters, and under the bolt information heading, there are nominal diameter, number and strength class parameters. Thus, the user sees the final design results for the bolted joint together in a single area.

SUMMARY DESIGN RESULTS	PLATE INFORMATION	
	Width (mm):	27.08
	Length (mm):	59.5
	Thickness (mm):	6.33
	Material:	AISI-1020
	BOLT INFORMATION	
	Diameter (mm):	10 (M10)
	Number:	2
	Material:	8.8

Figure 14. Summary design results (Özet tasarım sonuçları)

4.3. Example Study (Örnek Çalışma)

In this section, a sample study was carried out on the developed software. Comparisons were made with the theoretical solutions for the software outputs and the accuracy of the developed software was ensured.

In the verification process, the bolted joint problem was used as an example. The number of bolts used in the bolted joint under lateral load is 2 and the number of plates is 2. Since the number of plates is 2, it has a single shear plane. The material of the plates is AISI 1020 with a yield strength of 350 MPa. The plates were joined using 2 M10 bolts with strength class 8.8 and yield strength 640 MPa. The pitch circle diameter of the M10 bolt is 9,026 mm. The joint is subjected to a lateral force of 20 000 N. The acting lateral load creates shear stress in the bolts. Accordingly, the resulting shear stress and the safety case were calculated and given below (Eqs. 21 – 25).

Shear stress (τ)

$$\tau = F / (n * ((\pi * d_b^2) / 4) * z) \quad (21)$$

$$\tau = 20\,000 / (2 * ((\pi * 9,026^2) / 4) * 1) \quad (22)$$

$$\tau = 156,286 \quad (23)$$

Factor of safety (S)

$$S = \sigma_{yield} * 0,5 / \tau \quad (24)$$

$$S = 640 * 0,5 / 156,286 = 2,05 \quad (25)$$

As a result of the calculations, the shear stress in each bolt was found to be 156,286 N/mm². The yield strength of the bolt material is 640 MPa. Bolt safety factor was calculated as 2,05 for the shear stress and yield strength.

As a result of the applied lateral loading, bearing and tensile stresses occur in the plates. In this direction, it was requested to calculate the width (b) and thickness (t) values of the plates in the bolted joint according to the safety factor value of 2 in the plates.

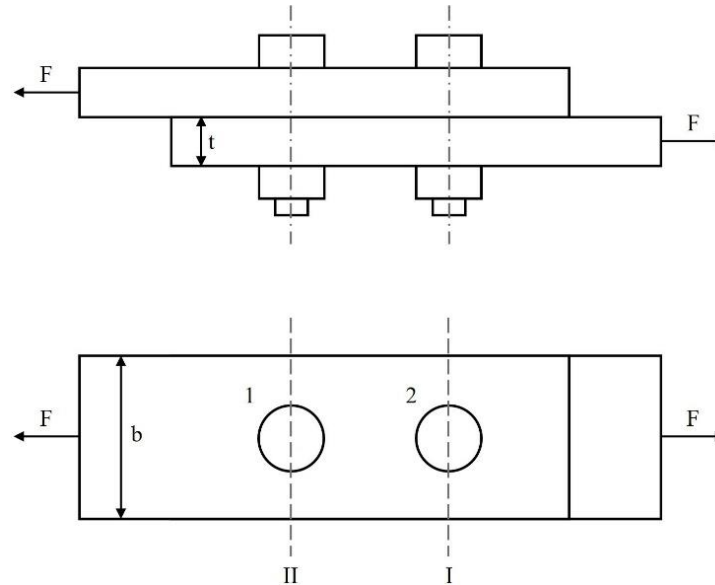


Figure 15. Example of bolted joints problem under lateral load (Örnek yanal yük altında civatalı bağlantı problemi)

According to these data, the plate thickness (t) value was calculated using the bearing stress formulation

(Eqs. 26 – 29). The plate width (b) value was found using the formulation used for tensile stress (Eqs. 30

– 33). The t and b values were calculated by writing the values given in the sample problem in their respective places in the formulas.

In the bearing stress formulation, the plate thickness (t) is drawn.

$$\sigma_c = F / (n * (d_b * t)) \quad (26)$$

$$t = F / (n * d_b * \sigma_c) \quad (27)$$

The yield strength of the material was divided by the factor of safety and the bearing stress was calculated.

$$\sigma_c = \sigma_{yield} / S = 350 / 2 = 175 \text{ MPa} \quad (28)$$

Plate thickness (t) was found for all these data.

$$t = 20000 / (2 * 9,026 * 175) = 6,33 \text{ mm} \quad (29)$$

Then the plate width (b) is drawn in the tensile stress formulation.

$$\sigma_t = F / ((b - n * d_b) * t) \quad (30)$$

$$b = (F / (t * \sigma_t)) + (n * d_b) \quad (31)$$

n : Number of bolts in section I

The maximum tensile stress (σ_t) was calculated.

$$\sigma_t = \sigma_{yield} / S = 350 / 2 = 175 \text{ MPa} \quad (32)$$

According to the values found, the plate width parameter (b) was found.

$$b = (20000 / (6,33 * 175)) + (1 * 9,026) \\ b = 27,08 \text{ mm} \quad (33)$$

Then the plate length (l) was calculated based on the placement of the bolts. Firstly, the hole diameter was found.

$$D = d * 0,85 = 10 * 0,85 = 8,5 \text{ mm} \quad (34)$$

$$l = (2 * (2 * 8,5)) + (1 * (3 * 8,5)) \\ l = 59,5 \text{ mm} \quad (35)$$

As a result of the processes, the minimum plate thickness (t) was found to be 6,33 mm, the plate width (b) 27,08 mm and the plate length (l) 59,5 mm.

The sample problem was also applied to the developed software and verified by comparison. In the user input field in the software interface, the number of plates was entered as 2 and the lateral force was entered as 20 000 N. In the example problem solution, the safety factor value for the bolts was calculated as 2.05. For this reason, the safety factor range was written as 2 and 3 to cover the safety factor of 2.05 so that the software can output the sample solution as a result. Since the minimum dimensioning of the plates is carried out in line with the minimum value of the factor of safety range entered, it also meets the condition that the factor of safety value for the plates is 2. The calculation process was carried out automatically by pressing the "CALCULATE" button.

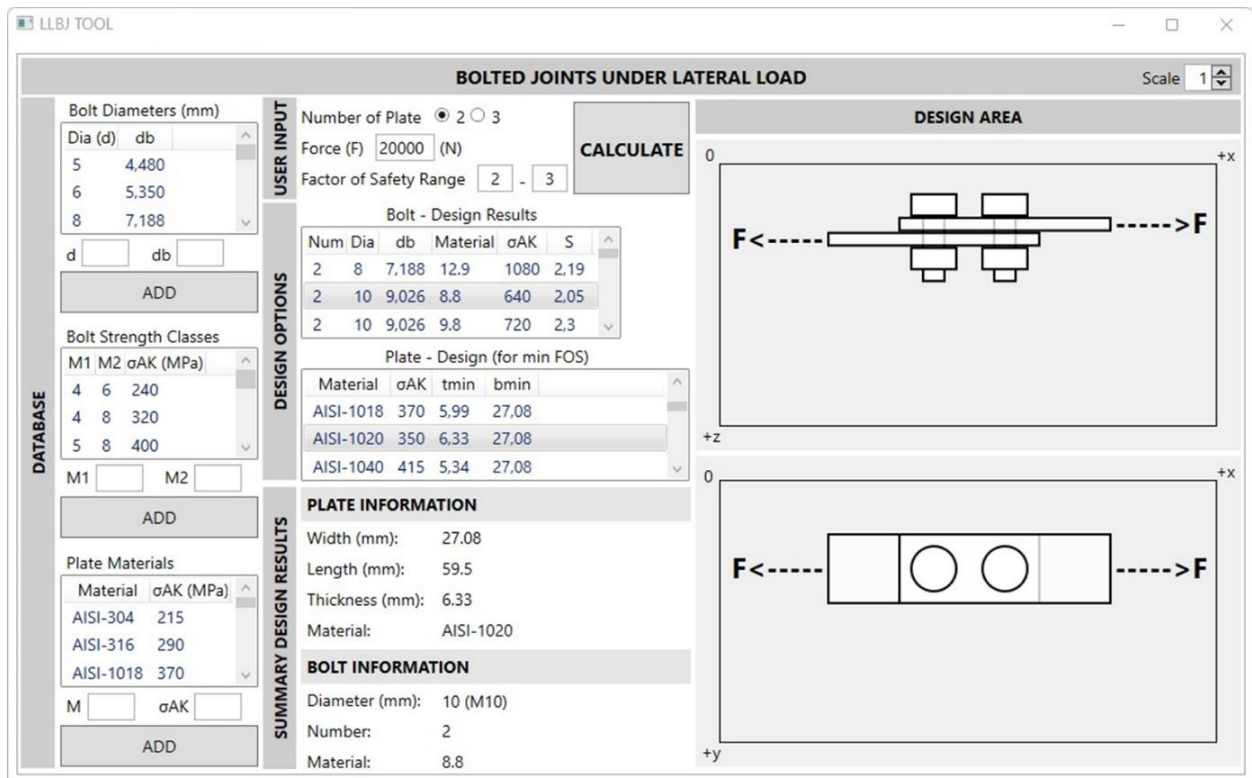


Figure 16. Sample application on software (Yazılım üzerinde örnek uygulama)

In the result section, the joint option with 2 M10 bolts and 8.8 strength class was selected among the primary design options. According to this selection, the design option containing AISI 1020 material feature was found and selected among the secondary design options. In this option, the plate

thickness value (t) was calculated as 6,33 mm and the plate width value (b) as 27,08 mm. The plate length was found to be 59.5. The developed software outputs and the theoretical solutions were compared and found to be compatible with each other.

Table 4. Comparison of design parameters (Tasarım parametrelerinin karşılaştırılması)

	Design Parameters		
	Parameter	Analytics	Software
Plate	Width (mm)	27,08	27,08
	Length (mm)	90	90
	Thickness (mm)	6,33	6,33
	Material	AISI-1020	AISI-1020
Bolt	Diameter (mm)	10 (M10)	10 (M10)
	Number	2	2
	Material	8.8	8.8

5. CONCLUSIONS AND SUGGESTIONS (SONUÇ VE ÖNERİLER)

In this study, the design and optimization process of bolted joints under lateral loading is automated with the developed software. Optimum bolted joint design options are given as output based on minimum user inputs. The results obtained with the software were compared with the theoretical solutions and the results were found to be compatible.

Today, the existing design and analysis processes cause a high amount of labor and time losses. With the software developed, the design-analysis cycle was prevented by automatically reaching the optimum bolted joint designs in one go according to the targeted conditions. Designs and analyses were performed and immediate results were produced and implemented. Less user input was received. A wide range of designs was offered to users by producing different design results at once, without being tied to one type of design. The software focusing on bolted joints was a more targeted study. A graphical user interface, which is not very common in the literature, was created and a visual and easy use was provided to the user. Users were given the opportunity to add their own data by interacting with the database system. According to these results, the workload was saved and the results were reached more quickly and time was saved. The developed software effectively performs the design and optimization of various types of bolted joints under different loading types and increases productivity.

Based on this study, the scope of the study can be expanded in various subjects in the future. Different

loading types can be included. Friction can be taken into account. Pre-tensioned and non-pretensioned joints can be studied. In addition to bolted joints, riveted, welded, etc. different joint methods can be applied.

DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS (ETİK STANDARTLARIN BEYANI)

The author of this article declares that the materials and methods they use in their work do not require ethical committee approval and/or legal-specific permission.

Bu makalenin yazarı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

AUTHORS' CONTRIBUTIONS (YAZARLARIN KATKILARI)

Kadir SARI: He created the idea, developed the software, carried out the design, literature review, analysis of the results and writing of the article.

Fikri oluşturmuş, yazılımı geliştirmiş, tasarımı, literatür taramasını, sonuçların analizini ve makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

Hakan DİLİPAK: He contributed to the process management, evaluation of the results obtained and content control of the article.

Süreç yönetimine, elde edilen sonuçların değerlendirilmesine ve makalenin içerik açısından kontrolüne katkıda bulunmuştur.

CONFLICT OF INTEREST (ÇIKAR ÇATIŞMASI)

There is no conflict of interest in this study.

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

REFERENCES (KAYNAKLAR)

- [1] Chen Y., Qiang G., Zhenqun G., Self-Loosening Failure Analysis of Bolt Joints under Vibration considering the Tightening Process, Shock and Vibration, 2017, Article ID 2038421, 2017.
- [2] Rao S. S., Engineering optimization: theory and practice, John Wiley & Sons, New York, ABD, 2019.
- [3] Nakagome M., Suzukı I., Yasuda K., Mizuno M., On the compliance and the load factor of bolted connections subjected to eccentric loading, JSME international journal. Ser. 1, Solid mechanics, strength of materials, 32(1), 61-66, 1989.
- [4] Padhi G. S., McCarthy M. A., McCarthy C. T., BOLJAT: a tool for designing composite bolted joints using three-dimensional finite element analysis, Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 33(11), 1573-1584, 2002.
- [5] Özkan M. T., Cıvatalı bağlantılarda birleştirilen elemanların direngenliğinin sonlu elemanlar yöntemi ve yapay sinir ağları sistemi ile belirlenmesi ve cıvata tasarımı, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2003.
- [6] Bogis H. A., Abou Ezz A., Aljinaidi A. A., Akyurt M., Computer-Aided Design of Riveted and Bolted Joints Under Compound Loading, The KFA XVII of Computer, Medina-Saudi Arabia, 309-321, 5-6 Nisan, 2004.
- [7] Gray P. J., McCarthy C. T., A global bolted joint model for finite element analysis of load distributions in multi-bolt composite joints, Composites Part B: Engineering, 41(4), 317-325, 2010.
- [8] Küçükaltay G. D., Cıvata-Somun Bağlantılı Elemanlarda Delikler Arası Mesafenin ve Delik Çapının Çekme Mukavemetine Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Başkent Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2010.
- [9] Zhang B., Brown D., Pierre J. S., Tao X., Williams I., Whitehead G., Pillutla R., Multi-Objectives Optimization of Fastener Location in a Bolted Joint, SAE 2013 World Congress & Exhibition, Michigan-United States, (No. 2013-01-0966), 16-18 Nisan, 2013.
- [10] Sanlı T. V., Development of artificial neural network based design tool for aircraft engine bolted flange connection subject to combined axial and moment load, Yüksek Lisans Tezi, Middle East Technical University, Department of Aerospace Engineering, Ankara, 2018.
- [11] Özüğurlu D. C., Yapay sinir ağları yardımıyla titreşim altındaki cıvataların gevşeme tahmini, Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 2019.
- [12] Turgaç A. T., İçten yanmalı motorlarda biyel kolu cıvatalarının hesabına ve tasarımına yönelik yazılım geliştirme, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2020.
- [13] Topkaya, T., Cıvata ile Birleştirilmiş Sandviç Kompozitlerin Bağlantı Mukavemetinin Karbon Fiber Takviye Kullanılarak Arttırılması, Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology, 8 (4), 996-1004, 2020, DOI: 10.29109/gujsc.804147.
- [14] Rakotondrainibe L., Desai J., Orval P., Allaire G., Coupled topology optimization of structure and connections for bolted mechanical systems, European Journal of Mechanics-A/Solids, 93, 104499, 2022.
- [15] Jiang K., Liang Y., Zhao O., Machine-learning-based design of high strength steel bolted connections, Thin-Walled Structures, 179, 109575, 2022.
- [16] Sevinç S., Taşkın M., Numerical Analysis of Single Lap Pretension Bolted Joint, International Journal of Engineering and Applied Sciences, 14 (3), 77-90, 2023.
- [17] Sarı K., Kayır Y., Dilipak H., An Expert System for Bolt Selection, Bilişim Teknolojileri Dergisi, 16 (2), 83-94, 2023.
- [18] Bickford J. H., An introduction to the design and behavior of bolted joints, Revised and expanded (Üçüncü Baskı), CRC Press, New York, ABD, 857-861, 2018.
- [19] Li G., Lyu Y., Wang Y., State-of-the-art on resistance of bearing-type bolted connections in high strength steel. Frontiers of Structural and Civil Engineering, 14, 569-585, 2020.
- [20] Türk Standartları Enstitüsü, TS648: Çelik Yapıların Hesap ve Tasarım Kuralları, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, Türkiye, 43, 1980.
- [21] Öztekin E. Ö., Investigation of Reliabilities of Bolt Distances for Bolted Structural Steel Connections by Monte Carlo Simulation Method, Pamukkale University Journal of Engineering Sciences, 21 (6), 213-223, 2016.
- [22] ISO. ISO 898-1: Mechanical properties of fasteners made of carbon steel and alloy steel, <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:898:-1:ed-5:v1:en>. Erişim Tarihi: Ağustos 17, 2023.

Yapısal Döküm Parçaların Yorulma Ömrünü Etkileyen Ana Faktörlerin Ağır Ticari Araç Fren Sistemlerinde İncelenmesi

Özgün Cem YILMAZ^{1*} , Bora GÜNTAY¹ , İbrahim Can GÜLERYÜZ¹ 

¹ Ege Fren Sanayii ve Ticaret A.Ş., 35060 Kemalpaşa Mah. 7405/2 Sokak No:4 Pınarbaşı Bornova/İZMİR

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 02/10/2023
Düzeltilme: 27/12/2023
Kabul: 09/02/2024

Anahtar Kelimeler

Ağır Ticari Araç
Fren Sistemi
Yapısal Döküm Parça
Yorulma Testi
Tekrarlı Yükleme
Sonlu Elemanlar Analizi

Article Info

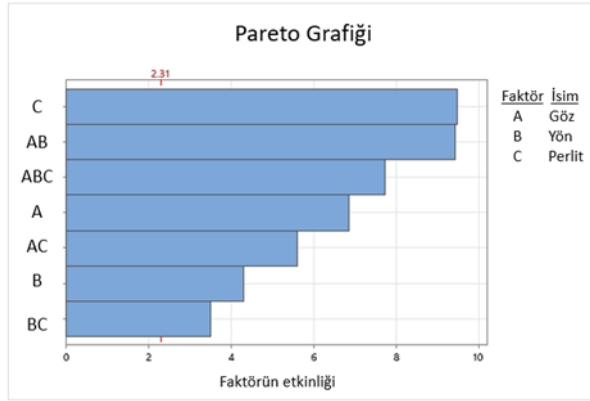
Research article
Received: 02/10/2023
Revision: 27/12/2023
Accepted: 09/02/2024

Keywords

Heavy Commercial Vehicle
Brake System
Structural Casting
Component
Fatigue Test
Cycling Loading Test
Finite Element Analysis

Grafik Özet (Graphical/Tabular Abstract)

Deney tasarımı metodu kullanılarak köprü parçasının yorulma ömrüne etki eden faktörler incelenmiştir. / The factors influencing the fatigue life of the bridge component were investigated using the design of experiment method.



Şekil A: Pareto grafiği / Figure A: Pareto graph

Önemli noktalar (Highlights)

- Sayısal gerilme analizi ile fiziksel testlerde görülen hasarların karşılaştırılması. / Comparison of damage observed in physical experiments with numerical stress analysis.
- Malzeme mikroyapısının yorulma ömrüne etkisi. / The influence of material microstructure on fatigue life.
- Döküm parçalarının imalat kalıbı içindeki yerleşiminin yorulma ömrüne etkisi. / The impact of casting figure orientation on fatigue life.

Amaç (Aim): Çalışmanın amacı, fren ana komponentlerin yorulma ömrünü belirleyen faktörleri araştırmak ve bu faktörleri laboratuvar testleri aracılığıyla incelemektir. / The aim of this study is to investigate the key factors determining the fatigue life of main components in brake systems and investigate these factors through laboratory experiments.

Özgünlük (Originality): Yorulma testlerinin basitleştirilmiş numuneler yerine gerçek fren parçaları üzerinde yapılması ve buna karşın sınır şartlarının stabil olarak kontrol altında tutulması çalışmanın özgün yönüdür. / The original contribution of this study lies in conducting fatigue tests on actual brake components rather than simplified samples, while simultaneously maintaining stable control over boundary conditions.

Bulgular (Results): Sonlu elemanlar analizi ile parça üzerinde çatlak görülen bölgenin uyumlu olduğu görülmüştür. Yorulmaya en fazla etki eden faktörlerin perlit oranı ve kaliper yönü ile köprü döküm gözünün kombinasyonu olarak bulunmuştur. / The finite element analysis and experimental results are compatible with each other. The factors that have the greatest impact on the bridge fatigue life have been found to be the pearlite ratio and the orientation of the caliper combined with the bridge casting cavity.

Sonuç (Conclusion): Çalışmada frenlerde kullanılan bir yapısal döküm parçanın yorulma ömrüne etki eden ana parametreler sıralanmıştır. / The main parameters affecting the fatigue life of a structural cast part used in brakes was inspected in the study.



Yapısal Döküm Parçaların Yorulma Ömrünü Etkileyen Ana Faktörlerin Ağır Ticari Araç Fren Sistemlerinde İncelenmesi

Özgün Cem YILMAZ^{1*}, Bora GÜNTAY¹, İbrahim Can GÜLERYÜZ¹

¹ Ege Fren Sanayii ve Ticaret A.Ş., 35060 Kemalpaşa Mah. 7405/2 Sokak No: 4 Pınarbaşı Bornova/İZMİR

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 02/10/2023
Düzeltilme: 27/12/2023
Kabul: 09/02/2024

Anahtar Kelimeler

Ağır Ticari Araç
Fren Sistemi
Yapısal Döküm Parça
Yorulma Testi
Tekrarlı Yükleme
Sonlu Elemanlar Analizi

Öz

Çalışmada, ağır ticari araçlarda kullanılan havalı disk frenin ana döküm parçalarından biri olan köprünün servis ömrünün artırılabilmesi için yorulma ömrüne etkileyen faktörler incelenmiştir. Fren parçasına, gerçek çalışma koşullarında etki eden tüm sınır koşulları göz önüne alınarak, yorulma ömrüne en çok etki edeceği öngörülen üç faktör için iki kademeli faktöriyel deney tasarımı yöntemi kullanılmış ve her bir faktör için iki farklı seviye belirlenerek numune üretimleri gerçekleştirilmiştir. Parça üzerindeki gerilmelerin yüksek olduğu kritik bölgelerin belirlenmesi amacıyla sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak yapısal analizler gerçekleştirilmiştir. Testlerde, çatlakların ilk oluştuğu anda yakalanması için sayısal yöntem ile belirlenen, gerilmenin yüksek olduğu ve parçaların kırılması beklenen bölgelere tuzak teli uygulanmıştır. Hazırlanan test numuneleri mekanik hasar meydana gele kadar yorulma testine tabi tutulmuş ve çatlak oluşan çevrimler detaylı analiz edilmiştir. Analiz sonucunda köprü parçasının yorulma ömrüne en fazla etki eden iki faktör sırası ile "perlit oranı" ve "kaliper yönü ile köprü döküm gözü'nün kombinasyonu" olarak bulunmuştur. Perlit oranı yüksek olan köprü numunelerinin yorulma ömürlerinin, düşük olan numunelere göre 3,1 kata kadar; uygun kaliper yönü ve köprü döküm gözü kombinasyonu seçildiği durumda ise 3,4 kata kadar arttığı tespit edilmiştir.

Investigation of the Main Factors Affecting the Fatigue Life of Structural Casting Parts in Heavy Commercial Vehicle Brake Systems

Article Info

Research article
Received: 02/10/2023
Revision: 27/12/2023
Accepted: 09/02/2024

Keywords

Heavy Commercial
Vehicle
Brake System
Structural Casting
Component
Fatigue Test
Cycling Loading Test
Finite Element Analysis

Abstract

In the study, factors affecting the fatigue life of the bridge, which is one of the main casting components of an air disc brake used in heavy commercial vehicles, were investigated to enhance its service life. Considering all the boundary conditions affecting the brake under real operating conditions, a two-level factorial experimental design method was used for the three factors predicted to have the most effect on fatigue life and two different levels were determined for each factor and specimens were produced. Structural analyses were conducted using the finite element method to identify critical regions with high stresses on the part. In the tests, to capture the moment of crack initiation, a tripwire was applied to the areas where the stress was high and the part failure was expected, as determined by numerical methods. Prepared test samples were subjected to fatigue testing until mechanical damage occurred and cycles where cracks formed were analysed in detail. As a result of the analysis, the two factors found to have the greatest impact on the fatigue life of the bridge were identified as "pearlite ratio" and the "combination of caliper orientation and bridge casting cavity". It was observed that the fatigue life of bridge samples with a high pearlite ratio increased up to 3.1 times compared to low-pearlite samples and when an appropriate combination of caliper orientation and bridge casting cavity was selected, it increased up to 3.4 times.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Ağır ticari araçlar üzerinde kullanılan fren sistemleri bu araçların yüksek hızda seyretme yetenekleri ve yüksek tonajları nedeniyle emniyet açısından hayati bir öneme sahiptir. Frenlerin yüksek tork gereksinimini araç ömrü boyunca

sağlayabilmesi için yapısal olarak bütünlüğünü koruyabilmesi gerekmektedir [1, 2]. Bu şartları sağlayabilmek için yüksek sıcaklıklarda kullanıma daha uygun olan disk tipi frenler binek araçlarda, hafif ve ağır ticari yol araçlarında tercih edilmektedir [3].

Frenlerin hasar görmesi halinde araçta sağa veya sola çekme, şerit dışına taşma, gerekli frenleme ivmesini oluşturamama gibi sorunlar görülebilmektedir. Normal kullanımda frenler arasında oluşabilecek fren kuvvetleri düşük olduğundan sürücünün bunu direksiyon girdisi ile bertaraf etmesi beklenirken, ani kırılma ve fren kaybı durumunda kaza ihtimali artmaktadır [4].

Frenlerde en çok yapısal hasarlara yol açan koşul, tekrarlı yükler altında çatlak oluşumu ve bu çatlağın ilerlemesi ile kesitlerin zayıflayarak ani kırılma meydana gelmesidir [5, 6].

P. Canzar ve ark. (2012), malzeme içerisindeki Mn, Ni ve Mg içeriğini değiştirerek dört farklı, küresel grafitli dökme demir numune grubu hazırlamış ve numunelere uyguladıkları yorulma testlerinde, perlit oranının %10 ve üzerinde olması halinde yorulma ömründe azalma olduğunu görmüşlerdir. Çalışmada ayrıca grafitlerde küreselleşme oranı arttıkça, yorulma mukavemetinde iyileşme olduğu ortaya konmuştur. Çatlakların genel olarak ferrit fazı ve içerisindeki grafitlerin sınırlarından başladığı, ferrit fazı içerisinde kırık çizgiler halinde ilerlediği, perlit fazında ise düz çizgiler halinde ilerlediği gözlemlenmiştir.[7].

D'Agustino ve ark. (2016) küresel grafitli dökme demir malzeme üzerinde yaptıkları çalışmalarında, perlit ve ferrit oranının çatlak ilerlemesi üzerine etkilerini incelemişlerdir. Çalışmada GJS 350-22 (ferritik), GJS 500-7 (ferritik-perlitik) ve GJS 700-2 (perlitik) olmak üzere üç malzeme karşılaştırılmış; ferrit oranı yükseldikçe çatlak ucu körelmesinin arttığı ve çatlak ilerlemesinin azaldığı gözlemlenmiştir. [8].

M. Benedetti ve ark. (2019) çalışmalarında GJS-400 tipi malzemenin katılma süresi, Cu ve Mg oranlarını değiştirerek dört farklı numune hazırlamış, bu faktörlerin faz dağılımı ve grafit nodül yapısına etkilerini incelemiştir. Numuneleri karşılaştırmak için çekme, burulma yorulması ve tokluk testleri gerçekleştirilmiştir. Ferritik yapının sünekliği arttırmasına karşın çekme ve yorulma dayanımlarını düşürdüğünü tespit etmişlerdir. Ayrıca, malzemenin kimyasal kompozisyonu ve kalıpta katılma rejiminin mikroyapıdaki ferrit fazı oranını etkilediğini vurgulamışlardır [9].

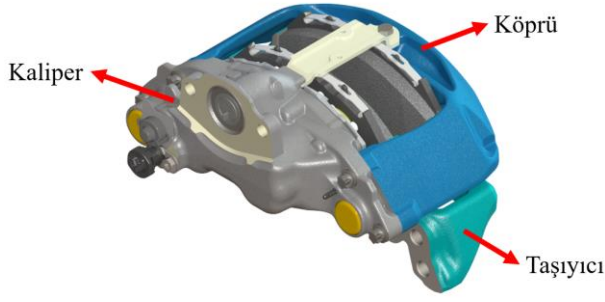
Vandadori ve ark. (2021) GJS 400-18 (ferritik) ve GJS 700-2 (perlitik) küresel grafitli dökme demir numuneler ile tek ve çok eksenli yorulma testleri gerçekleştirmiş ve tüm yükleme koşullarında yüksek perlit fazı oranına sahip numunenin daha uzun yorulma ömrüne sahip olduğu sonucuna

varmıştır. Vandadori ve ark. ayrıca kendi literatür araştırmalarında buldukları çelişkili sonuçlara değinmiş; malzeme fazı ve grafit morfolojisinin, malzeme yorulması ve çatlak ilerlemesine etkisi konusunun araştırılmaya değer olduğunu vurgulamışlardır [10].

Literatür araştırmasından görüldüğü üzere perlit oranının yorulma ömrü, çatlak oluşumu ve ilerlemesi üzerindeki etkisi birçok araştırmacı tarafından incelenmiştir. Bu çalışmada, ağır ticari araçlarda kullanılan havalı disk frenin ana döküm parçalarından biri olan köprünün servis ömrünün arttırılabilmesi için yorulma ömrüne etkiyen faktörler incelenmiştir. Yorulma ömrüne etki eden faktörlerden malzeme mikroyapısı ve parçaların döküm kalıbındaki yerleşimi göz önünde bulundurulmuştur. Literatür araştırmasındaki çalışmalardan farklı olarak, basit şekilli test numuneleri yerine doğrudan 22,5" jant ölçüsü ile uyumlu olan disk fren kompleksi üzerinde çalışılmış ve gerçek yükleme koşullarına yakın bir test tasarımı kullanılmıştır.

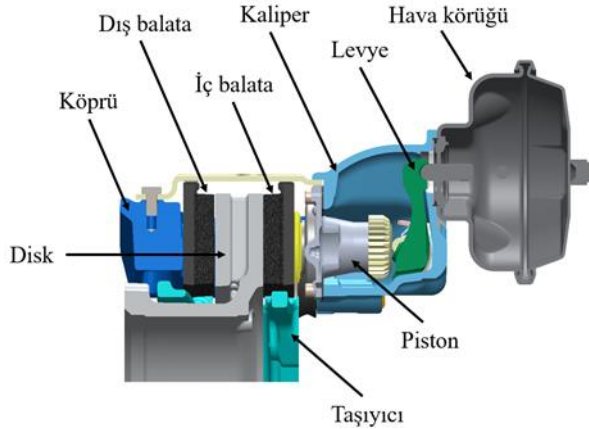
Çalışmanın genel düzeni şu şekildedir: Bölüm 2'de öncelikli olarak parça üzerindeki gerilmelerin yüksek olduğu kritik bölgelerin belirlenebilmesi amacıyla sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak yapısal analizler gerçekleştirilmiştir. Köprü parçası üzerindeki kritik gerilme bölgelerine tuzak teli uygulanarak iki kademeli faktöriyel deney tasarımı yöntemiyle belirlenen faktörler göz önünde bulundurulmuş yorulma testleri yapılmıştır. Bölüm 3'te sayısal ve test sonuçları detaylı bir şekilde analiz edilerek faktörlerin etkinliği sıralanmıştır. Bölüm 4 çalışmanın genel sonucunu içermektedir.

İnceleme konusu olarak kayar kaliperli havalı disk frenin yapısal parçalarından birisi olan köprü parçası seçilmiştir. Köprü, frenin yapısal çerçevesini oluşturan üç ana parçadan birisidir. Köprü, kalipere montajlanarak dış balatayı yerinde tutmakta ve fren uygulandığında dış balatayı tahrik ederek disk yüzeyine basmasını sağlamaktadır. Kaliper, frenin ayar mekanizmasını ve pistonlarını barındırmaktadır. Taşıyıcı ise kaliper ve köprünün araç dingiline montajlanmasını sağlamaktadır. Disk freni oluşturan kaliper, köprü ve taşıyıcı kısımları Şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1. Disk fren (Disc brake)

Fren üzerinde bulunan hava körüğüne basınçlı hava dolduğunda, itici pim ile levreyi ileri doğru hareket ettirmektedir. Pistonlar iç balatayı diske doğru bastırmakta ve fren, kılavuz pimler üzerinde kayarak dış balatayı diske bastırarak aracın durmasını sağlamaktadır [11]. Frenin kesit görünüşü Şekil 2’de verilmiştir. Frenleme esnasında köprü parçasına piston ekseninde doğrusal yük ve disk dönme ekseninde frenleme torku etki etmektedir. Frenleme torkunun büyük kısmı balatalar aracılığı ile taşıyıcı parçasına aktarıldığı için, çalışma sadece piston eksenindeki yüklere odaklanılarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 2. Havalı disk fren kesiti (Cross-section of an air disc brake)

2. MATERYAL VE METOD (MATERIALS AND METHODS)

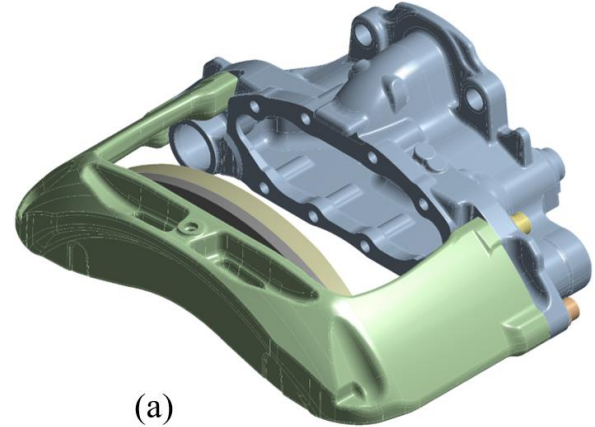
2.1 Sayısal Çalışma (Numerical Study)

Güleriyüz ve Yılmaz (2019) tarafından 22.5” havalı disk fren kaliper yuvası ve köprüsü üzerindeki kritik gerilme bölgelerinin belirlenebilmesi amacıyla parçanın azami yük altındaki sınır koşulları göz önünde bulundurularak sonlu elemanlar (SE) analizleri gerçekleştirilmiştir [12]. Köprü parçası üzerindeki kritik gerilme bölgelerinin tespit edilebilmesi amacıyla SE analizleri Ansys Mechanical 19.2 yazılımı ile gerçekleştirilmiş olup, analiz tipi olarak yapısal analiz seçilmiştir.

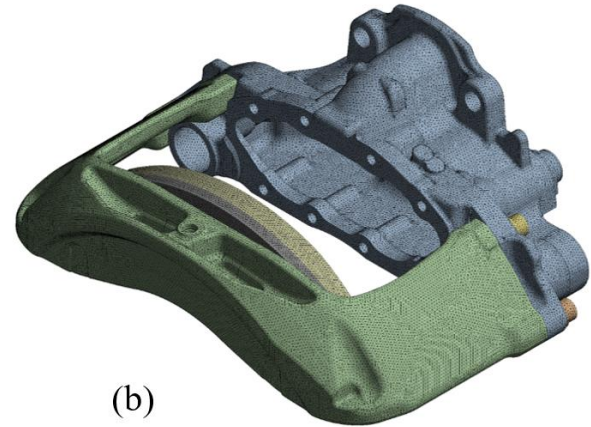
Literatürdeki benzer çalışmalarda da binek ve ağır hizmet araçlarında kullanılan havalı disk fren kaliperinin ve kampanalı frenlerdeki fren tablasının SE analizlerinde analiz tipi olarak yapısal analiz yöntemi tercih edilmektedir [12 - 17].

SE analiz modeline montaj ve hizmet koşulları göz önünde bulundurularak köprü, kaliper yuvası, köprü ile kaliper yuvasını birbirine iliştiren bağlantı cıvataları, dış balata dahil edilmiştir. Şekil 3-a’da yer alan üç boyutlu model Ansys Mechanical 19.2 yazılımına aktarılmıştır. 1.300.000 düğüm noktası ve 800.000 elamandan oluşan tetrahedral yapıdaki sonlu elemanlar ağı Şekil 3-b’de verilmektedir.

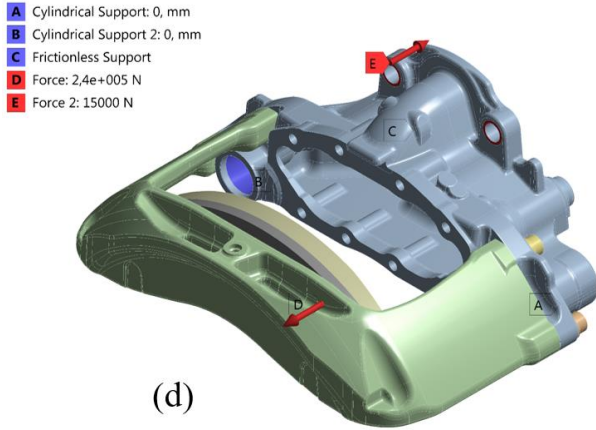
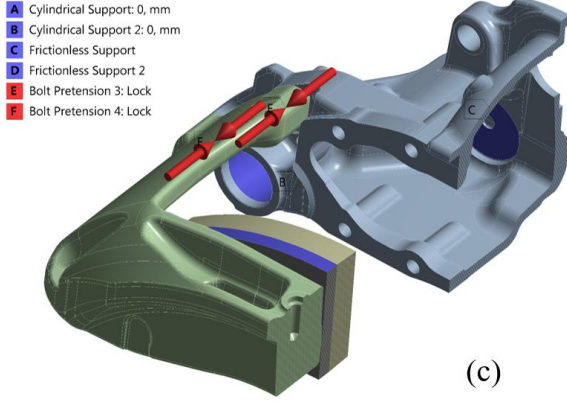
Kaliper yuvası ve köprü malzemesi olarak EN-GJS-500 küresel grafitli dökme demir; balata sırt sacı ve bağlantı cıvataları malzemesi olarak yapısal çelik malzeme modeli seçilmiştir. Seçilen malzemeler ait elastisite modülü (E) ve poisson oranı (ν) değerleri Tablo 1’de verilmektedir. Döküm parçalardan çıkarılan çekme deneyi gerilme – plastik şekil değiştirme eğrisinden faydalanılarak köprü ve kaliper yuvası için doğrusal olmayan EN-GJS-500-7 malzeme modeli oluşturulmuştur (Şekil 4).



(a)



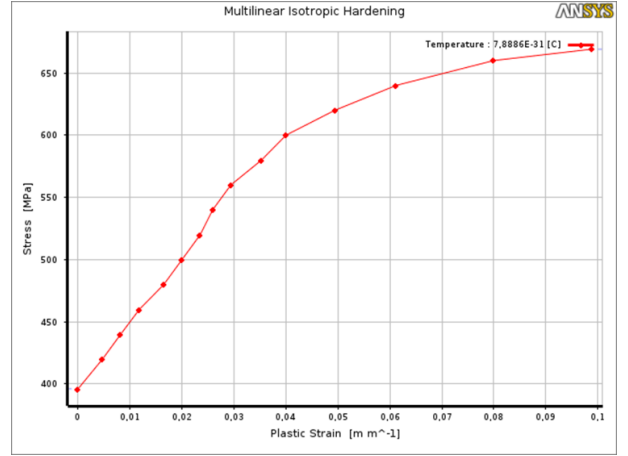
(b)



Şekil 3. (a) SE modeli, (b) SE ağ yapısı, sınır koşulları (c) 1. analiz adımı, (d) 2. analiz adımı. ((a) FE model, (b) mesh, boundry conditions (c) 1st step of analysis, (d) 2nd step of analysis)

Tablo 1. Malzeme özellikleri [12] (Material properties)

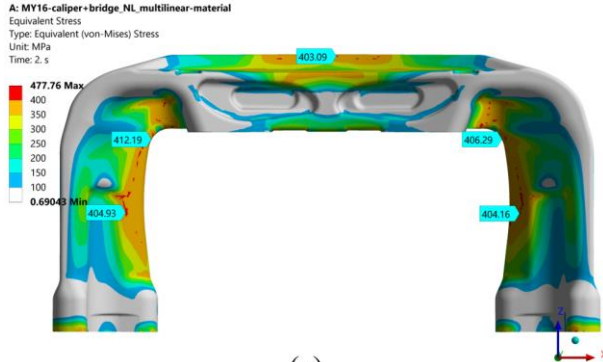
Malzeme	E (Gpa)	v (-)
EN-GJS-500-7	170	0.29
Yapısal çelik	200	0.30
Balata malzemesi	0.998	0.29



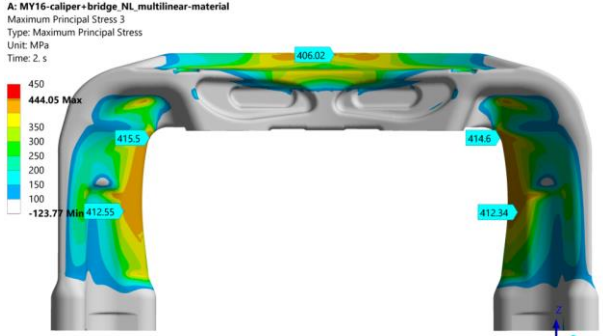
Şekil 4. EN-GJS-500-7 gerilme – plastik şekil değiştirme grafiği [12]. (EN-GJS-500-7 stress-strain curve)

SE analizi iki adımda gerçekleştirilmiştir. İlk adımda köprü – kaliper yuvası bağlantı civatalarının sıkma torklarının oluşturduğu cıvata ön gerilme kuvvetleri, ikinci adımda ise disk fren mekanizmasının ürettiği sıkıştırma kuvveti ve fren körüğü girdi kuvvetinin kaliper yuvası üzerindeki reaksiyon kuvveti uygulanmıştır. Disk fren deneysel kuvvet ölçümlerinde 15 kN girdi körük kuvvetine karşılık fren mekanizması tarafından balatalara 240 kN büyüklüğünde sıkıştırma kuvveti uygulandığı görülmüştür. Bu nedenle, ikinci analiz adımında dış balata yüzeyine dik doğrultuda 240 kN büyüklüğünde ve körük bağlantı somunlarının kaliper yuvasına bastığı yüzeylerden 15 kN büyüklüğünde kuvvet uygulanmıştır. Kılavuz pimlerin kaliper yuvası üzerinde yatakladığı yüzeylere silindirik mesnet; levyenin kaliper yuvasına yatakladığı yüzeylerden sürtünmesiz mesnet tanımlaması ile parçalar sınırlandırılmıştır. Balata sırt sacının yan yüzeylerine sürtünmesiz mesnet tanımlanması yapılarak, dış balata sıkıştırma yönünde kılavuzlanmıştır. SE analizlerine ait sınır koşulları Şekil 3-c ve 3-d’de özetlenmektedir. Diğer SE analiz detayları [12]’de verilmektedir.

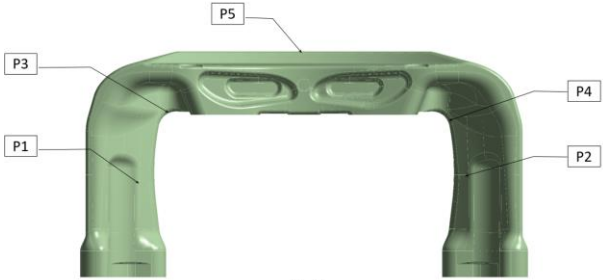
SE analizleri sonucunda köprü parçası üzerindeki von-Mises ve maksimum asal gerilme dağılımları elde edilmiştir (Şekil 5). Mekanik olarak zorlanan parçalarda yapısal hasara çeki gerilmelerinin yüksek olduğu bölgelerde rastlanmaktadır. Bu nedenle von-Mises gerilmelerinin yüksek olup, aynı yerde maksimum asal gerilmelerin düşük olduğu lokasyonlarda (bası durumu) mekanik hasar oluşma olasılığı düşük olarak değerlendirilmektedir. Yorulma testlerinde köprü üzerindeki mekanik hasarın P1-P5 ile ifade edilen kritik gerilme bölgelerde meydana gelmesi beklenmektedir (Şekil 5-c).



(a)



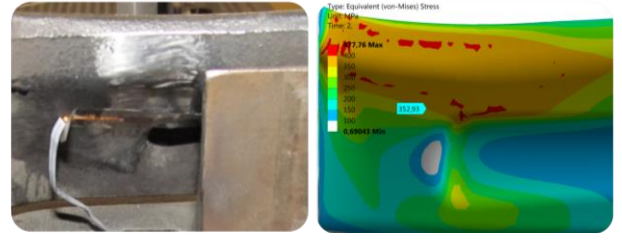
(b)



(c)

Şekil 5. Köprü üzerindeki, (a) von-Mises, (b) maksimum asal gerilme dağılımları, (c) kritik gerilme bölgeleri (On bridge, (a) von-Mises, (b) maximum principle stress distribution (c) critical stress regions)

Gerilim ölçer uygulanan kritik bir bölgedeki gerçek gerilme değerinin, yapısal analiz sonuçları ile karşılaştırılabilmesi için ilk olarak; Şekil 6'da gösterildiği gibi köprü üzerinde gerilim ölçer uygulaması için seçilen noktalar ile aynı pozisyonda düğüm noktaları seçilerek bu noktalardaki von-Mises gerilme değeri SE yazılımına hesaplatılmıştır. Gerilim ölçer yerleştirilen bölgelerden 30'ar çevrim için elde edilen gerilme değerlerinin ortalaması alınarak; SE analiz sonucu ile karşılaştırılmak üzere Tablo 2'de verilmiştir. Sayısal ve test sonuçları arasındaki maksimum fark %3,4 olarak elde edilmiştir. Bu sonuçlar ışığında, sayısal analiz modelinin gereken güveni sağladığı görülmektedir.



Şekil 6. Köprü üzerine gerilim ölçer yerleştirilen bölgedeki gerilme sonuçları [12] (The stress results in the region where strain gauges are placed on the bridge)

Tablo 2. Köprü üzerinde gerilim ölçer yerleştirilen bölgedeki sayısal ve test sonuçlarının karşılaştırılması [12] (Comparison of numerical and experimental results in the region where strain gauges are placed on the bridge)

Sayısal sonuç (MPa)	Test sonucu (MPa)	Fark (%)
352,93	365,52	%3,4

2.2 Deneysel Çalışma (Experimental Study)

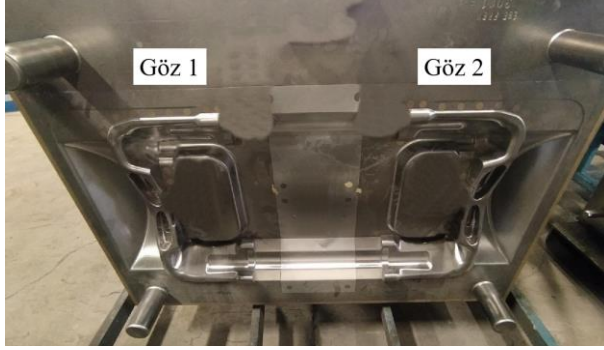
Sonlu elemanlar ile modelleme çalışmalarının ardından deneysel doğrulama çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

Çalışma kapsamında, frenin köprü parçasının ömrü üzerinde üç farklı faktörün etkisi incelenmiştir. Bu faktörler; kaliper yönü, köprü döküm gözü ve perlit oranı olarak belirlenmiştir. Bu seçim yapılırken önceki kampanalı ve disk frenlerde kullanılan döküm parçalarının yorulma testlerinde parça ömürlerine etki ettiğinden şüphelenilen ve kontrol altında tutulabilecek faktörler göz önünde bulundurulmuştur ve faktörlerin etkinliği araştırılmıştır. "iki kademeli faktöriyel deney tasarımı" yöntemi kullanılarak, her bir faktör için Tablo 3'te gösterildiği şekilde 2 farklı değer belirlenmiş ve sonuçlar analiz edilmiştir. Kaliper yönü için sağ ve sol, köprü döküm gözü için göz 1 ve göz 2 seçenekleri kullanılmıştır. Perlit oranı ise %50 perlit ve %90 perlit olarak iki ayrı değer üzerinden incelenmiştir.

Tablo 3. Yorulma ömrüne etki eden faktörler (Factors affecting the fatigue life)

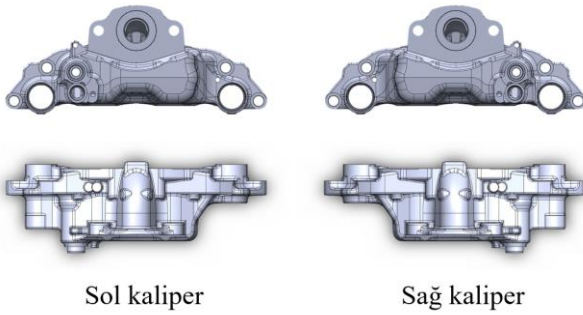
Seviye	Köprü döküm gözü (Faktör - A)	Kaliper yönü (Faktör - B)	Perlit oranı (Faktör - C)
-	Göz 1	Sol	%50
+	Göz 2	Sağ	%90

Döküm kalıbı içerisinde bir kalıpta iki adet köprü parçası üretiliyor olup bunlar göz 1 ve göz 2 olarak isimlendirilmiştir. Kalıbın içerisindeki dolun, besleme, soğuma, katılaşma şartlarındaki değişkenlik nedeniyle hem göz 1 ve göz 2 arasında, hem de parçalarındaki farklı kesitlerde mikroyapı farkları görülebilmektedir (Şekil 7).



Şekil 7. Köprü parçası üretiminde kullanılan döküm kalıbı (The casting mold used in the production of the bridge)

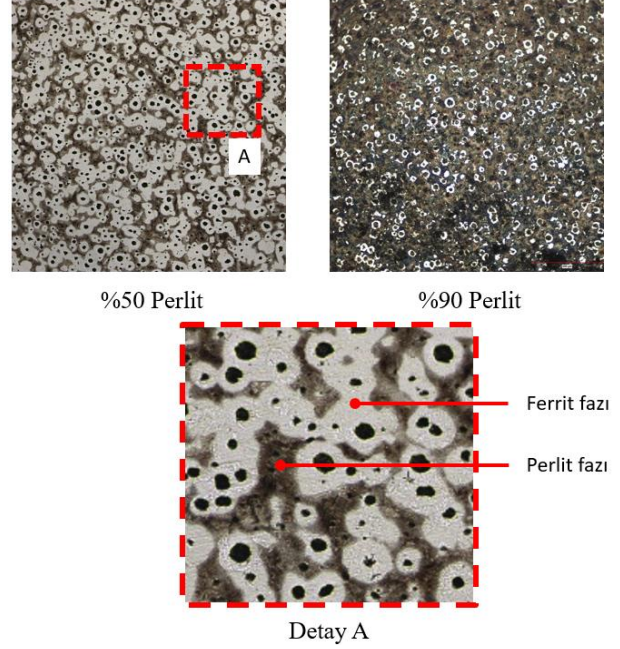
Köprü üzerindeki yorulmaya etki eden gerilmeler, köprünün bağlandığı parça olan kaliperin geometrisi ile değişmektedir. Aynı dingilin sağında ve solunda kullanılan kaliperlerin simetrik olmasına karşın farklı olmasından dolayı köprü üzerinde kırılma noktasına etki edebileceği değerlendirilmiştir (Şekil 8). Parçalar, çalışmanın devamında sağ ve sol kaliper olarak isimlendirilmiştir.



Şekil 8. Kaliper yönü (Caliper orientation)

Köprü mikroyapısında perlit oranının yorulma dayanımına etkisinin incelenmesi için farklı proses parametreleri ile dökümler ISO 945 standartına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Düşük seviyeyi temsil etmesi için, standartta belirtilen minimum perlit oranı olan %50, yüksek seviyeyi temsil etmesi için perlit oranı %90 olan küresel grafitli dökme demir numuneler hazırlanmıştır [18-21] (Şekil 9). Mikroyapı görüntülerinde açık renk ile görülen bölgeler ferrit, koyu renk ile görünen bölgeler perlit fazıdır. İnceleme için Nikon MA100

ters metalografi mikroskobu kullanılmıştır. Mikroyapı numuneleri 15 mm x 15 mm büyüklüğünde kesilip, bakalit malzeme ile kalıplanarak ve 2500 kum zımpara ile parlatılmıştır. Değerlendirmeler ISO 945-1 standardına uygun olarak yapılmıştır.



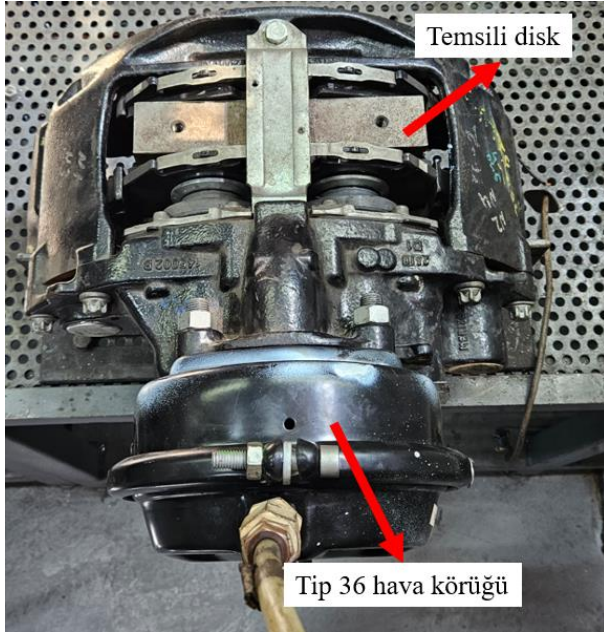
Şekil 9. Mikroyapı örnek görselleri (x100 büyütme) (Sample microstructure images (x100 zoom))

Toplamda 8 kombinasyon, Tablo 4'te verilen rastgele sıra ile gerçekleştirilerek, her bir durum için iki kez test edilmiştir. Bu yöntemle elde edilen veriler, söz konusu faktörlerin köprü parçasının ömrüne olan etkisini detaylı bir şekilde analiz edilmesini sağlamıştır.

Tablo 4. Test sıralaması ve faktörler (Test sequence and factors)

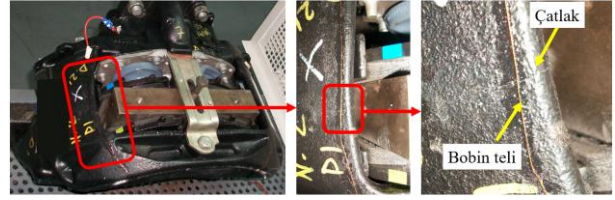
Test sırası	A	B	C
3	-	-	-
6	+	-	-
1	-	+	-
5	+	+	-
2	-	-	+
4	+	-	+
8	-	+	+
7	+	+	+
13	-	-	-
11	+	-	-
15	-	+	-
12	+	+	-
10	-	-	+
16	+	-	+
9	-	+	+
14	+	+	+

Fren üzerine etki eden yükler incelendiğinde, köprü parçasının yorulma ömrüne etki edebilecek iki ana faktör belirlenmiştir. Bunlardan piston eksenindeki doğrusal kuvvetin, dönme eksenindeki fren torkuna göre daha etkin olduğu öngörülmektedir. Bu nedenle testler fren diskinin döndürülmediği, hareketsiz olduğu koşulda yapılmıştır. Fren bir fikstür ile test masasına sabitlenmiştir. Diski temsilen disk ile aynı kalınlıkta üretilmiş bir çelik blok kullanılmıştır. Testlerde yarı aşınmış balatayı temsilen 10 mm balata sürtünme malzemesi kalınlığı olan balatalar kullanılmıştır. Freni tahrik etmek için Tip 36 (36 in² piston alanına sahip) hava körüğü kullanılmıştır (Şekil 10).



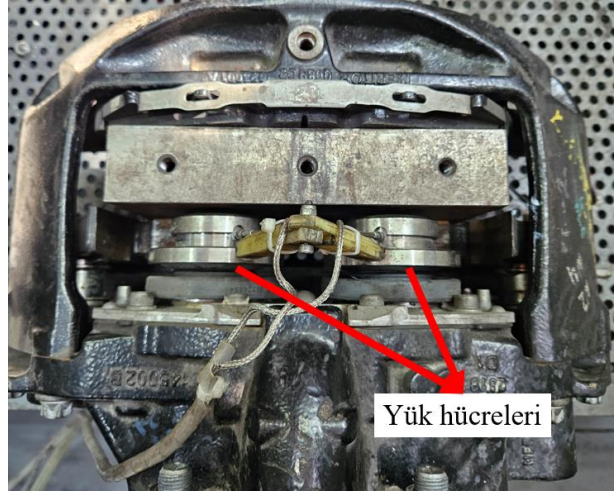
Şekil 10. Test düzeneğinin görünümü (Test setup)

Testler esnasında kırılma çevriminin yakalanabilmesi için kırılma beklenen bölgelere bobin teli yapıştırılarak test cihazına bir girdi olarak bağlanmıştır. Bobin teli üzerinden 24 V gerilim uygulanarak hat boyunca bobin teli bütünlüğü sürekli olarak test cihazı tarafından kontrol edilmektedir. Parça üzerinde kırılma oluştuğu durumda bobin teli koparak 24 V'luk gerilim kesilmekte ve test sistemini durdurmaktadır. Böylelikle kırılma çevrimi hasarın oluştuğu ilk anda belirlenmektedir. Bobin teli uygulaması ve örnek bir çatlakın yakalanması Şekil 11 ile gösterilmiştir.



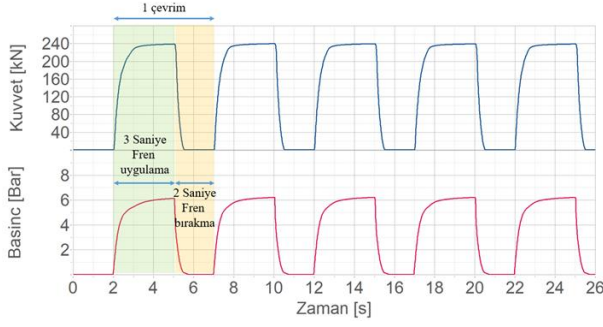
Şekil 11. Bobin teli kullanımı ile çatlakın yakalanması (Detection of cracks with the use of coil wire)

Test, hava basıncı ve uygulama süresi ayarlanabilen özel test cihazı ile sürülmüştür. Çalışmada hedef piston sıkıştırma kuvveti olarak 260 kN belirlenmiştir. Kuvvet, iç balatalar yerinden çıkarılarak Kistler 9061A yük hücrelerinin pistonlar önüne yerleştirilmesiyle ölçülmüştür (Şekil 12). Ölçümlerin ardından yük hücreleri yerine iç balata tekrar takılarak Şekil 10'da gösterildiği gibi yorulma testine devam edilmektedir.



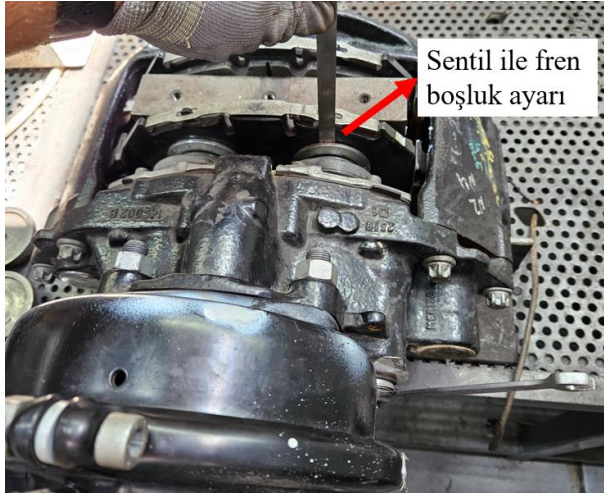
Şekil 12. Yük hücreleri ile kuvvet ölçümü (Force measurement with loadcells)

Ölçümler her 15.000 çevrimde bir kontrol edilerek, toplam kuvvette 5 kN fark görüldüğü durumda hava basıncı tekrar ayarlanmıştır. İki piston arası 25 kN fark görüldüğü durumda, farkı azaltacak yönde uygun pistonun önüne mesafe parçası olarak şim eklenerek kuvvet dengelenmiştir. Test programı, uygulama süresi 3 saniye, bırakma süresi 2 saniye olarak, toplamda bir çevrim 5 saniye sürecek şekilde ayarlanmıştır (Şekil 13). Bu süreler, pistonlar önündeki yük hücreleri yardımıyla kuvvetin maksimum ve sıfır olduğu periyot izlenerek belirlenmiştir.



Şekil 13. Zamana bağlı, parçaya uygulanan basınç değişimleri (Pressure application and release over time)

Uygun hava basıncı ayarlanmasının ardından yük hücreleri çıkarılarak ve iç balata tekrar yerine koyularak test başlatılmaktadır. Test öncesinde ve esnasında yapılan fren boşluk testi referans alınmış ve balata rotor arası boşluk ayarlanmıştır. (Şekil 14).



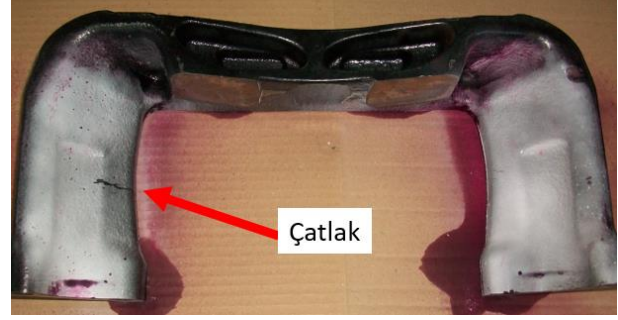
Şekil 14. Fren boşluk ayarı (Brake clearance adjustment)

Deney tasarımı çalışmaları ile belirtilen numunelerin hazırlanmasının ardından testler planlanan sırayla gerçekleştirilmiştir.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSIONS)

Testlerde gerinim ölçer üzerinden alınan gerilme sonuçlarının sayısal gerilme sonuçlarını yüksek güvenilirlikli olarak doğruladığı görülmüştür. Yorulma testlerinde köprü üzerindeki çatlak oluşumunun başladığı bölgeleri tespit edebilmek amacıyla test numuneleri, tahribatsız muayene tekniklerinden biri olan penetrant sıvısı testine tabi tutularak incelenmiştir. Köprü üzerinde çatlak oluşumunun başladığı bölgenin SE analizinde tespit edilen bölge ile uyumlu olduğu görülmüştür (Şekil 15). Bu çatlaklar, tane sınırlarından ve malzeme içerisinde yüzeye yakın inklüzyon, döküm boşluğu

gibi hatalardan başlamaktadır. Test boyunca çatlaklar ilerleyerek malzeme yorulmasına ve belirli bir büyüklüğe geldiğinde ani kırılmaya yol açmaktadır [22].



Şekil 15. Testlerde çatlak görülen bölge (The region where cracks are observed during testing)

Numuneler üzerinde çatlak görülen çevrimler Tablo 5'teki gibi gerçekleşmiştir.

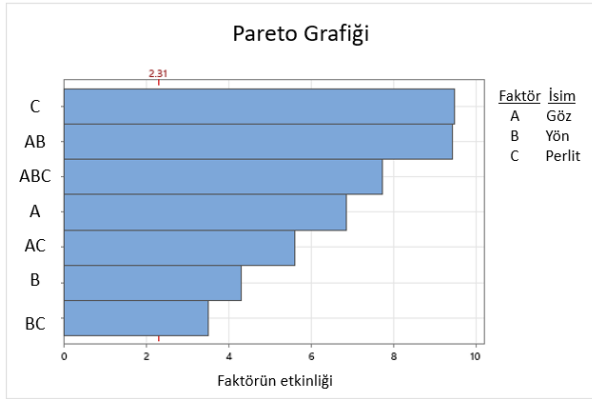
Testler tamamlandıktan sonra sonuçlar Minitab yazılımı ile analiz edilmiştir [23].

Tablo 5. Çatlak başlangıç çevrimleri (Crack propagation cycles)

Test numarası	A	B	C	Çatlak çevrimi sayısı
1	-	-	-	13.807
2	+	-	-	26.215
3	-	+	-	14.235
4	+	+	-	13.124
5	-	-	+	12.534
6	+	-	+	127.188
7	-	+	+	54.934
8	+	+	+	32.013
9	-	-	-	10.984
10	+	-	-	19.978
11	-	+	-	17.053
12	+	+	-	14.935
13	-	-	+	9.742
14	+	-	+	109.652
15	-	+	+	34.974
16	+	+	+	23.893

“A” faktörü köprü döküm gözü, “B” faktörü kaliper yönü, “C” faktörü ise perlit oranı olarak belirlenmiş ve grafiklerde bu isimlendirmeler kullanılmıştır. Pareto grafiği incelendiğinde (Şekil 16), sonuca etki edebilecek faktörlerin büyükten küçüğe sıralaması görülmektedir. Kritik değer olan 2,310 değerinin üzerinde kalan faktörlerin sonuca etkisinin kayda değer olduğu kabul edilmektedir [24]. Sonuca en fazla etki eden iki faktörün perlit oranı (etki değeri:

9,487) ve kaliper yönü & köprü döküm gözü (etki değeri: 9,439) olduğu görülmektedir.



Şekil 16. Pareto grafiği (Pareto graph)

İncelenen çalışmaların bir kısmında perlit oranındaki artışın yorulma ömrüne pozitif etki ettiği görülürken, bazı araştırmalarda ise bu sonucun negatif olabileceği de vurgulanmıştır [7 – 10]. Bu çalışma kapsamında, araçtaki kullanım koşullarına daha yakın sınır şartlarında test edilen numunelerde perlit oranının yükselmesinin parça yorulma ömrünü arttırdığı görülmüştür.

4. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışmada ağır ticari araç frenlerinde kullanılan bir yapısal döküm parçanın yorulma ömrüne etki eden ana parametrelerden malzeme mikroyapısı ve döküm kalıplaması incelenmiştir.

Testlerde gerinim ölçer üzerinden alınan gerilme sonuçları ile sayısal gerilme sonuçları arasındaki maksimum fark %3,4 olarak elde edilmiştir. Bu nedenle sayısal analiz yönteminin gerilme sonuçlarını yüksek güvenilirlikli olarak doğruladığı görülmektedir. Buna ek olarak, yorulma testlerinde köprü üzerindeki çatlak oluşumunun başladığı bölgenin, yapısal analizlerde tespit edilen kritik bölge ile aynı olduğu görülmektedir.

“İki kademeli faktöriyel deney tasarımı” yöntemi ile kurgulanan testlerin sonucu incelendiğinde;

- Perlit oranının yüksek olmasının yorulma ömrünü yükselttiği görülmüştür. Perlit oranı yüksek numunelerin ortalama ömrü 50.616, düşük olan numunelerin ortalama ömrü 16.291 çevrim olarak hesaplanmıştır.
- Köprünün üst kısmına gelen kolunun kaliper üzerinde kalın kesit tarafında montajlanması halinde (göz 1 & sol veya göz 2 & sağ kombinasyonu) yorulma ömrüne negatif etki ettiği görülmüştür. Göz 1 & sol kombinasyonunda ortalama 11.767

çevrim ömrü hesaplanırken, göz 1 & sağ kombinasyonunda ortalama 30.299 çevrim ömrü hesaplanmıştır. Benzer şekilde göz 2 & sağ kombinasyonunda ortalama 20.911 çevrim ömrü hesaplanırken, göz 2 & sol kombinasyonunda ortalama 70.758 çevrim ömrü hesaplanmıştır.

- Kalıplamada üst kısma gelen kol tarafında yorulma mukavemetinin daha düşük olduğu görülmüştür. Yapılan 16 testin 13’ü üst kol tarafından kırılmıştır.

Bu sonuçlar göz önüne alındığında imalat prosesinde, parçanın homojenliğini artırılmasının ve daha yüksek perlit oranını tercih edilmesinin yapısal parçaların yorulma ömrünü yükselteceği görülmüştür.

Çalışma esnasında ayrıca parça kalıp ayırım yüzeylerindeki imalat sonrası taşlama işlemi nedeniyle kalan bozuk yüzeylerin yorulma ömrüne etki edebileceği değerlendirilmiştir. Bu etki ileri bir çalışmada ele alınacaktır.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Yazarlar sağlanan test imkanlarından dolayı Ege Fren San. ve Tic. A.Ş.’ye, numunelerin hazırlanmasındaki desteklerinden dolayı Demişaş Döküm Emaye Mamülleri Sanayi A.Ş.’ye teşekkürlerini sunar.

ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazarı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS’ CONTRIBUTIONS)

Özgün Cem YILMAZ: Testlerin planlanması ve yapılmasında katkı sağlamıştır. Makalenin yazımını gerçekleştirmiştir.

He contributed to planning and conducting the tests. He performed the writing of the article.

Bora GÜNTAY: Testlerin planlanması ve sonuçlarının yorumlanmasında katkı sağlamıştır. Makalenin yazımını gerçekleştirmiştir.

He contributed to the planning of the tests and interpretation of the results. He performed the writing of the article.

İbrahim Can GÜLERİYÜZ: Sonlu elemanlar analizlerini gerçekleştirmiştir. Makalenin yazımını gerçekleştirmiştir.

He conducted finite element analyses. He performed the writing of the article.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

There is no conflict of interest in this study.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Limpert, R. "Brake design and safety Third Edition", SAE; 2011.
- [2] Day, Andrew J., and David Bryant. "Braking of road vehicles". Butterworth-Heinemann, (2022).
- [3] Güleriyüz, İ. C. & Yılmaz B. "Ağır Hizmet Aracı Fren Diski Soğuma Davranışının İncelenmesi." Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology 8.4 (2020): 936-947.
- [4] Tagesson, Kristoffer. "Truck steering system and driver interaction". Chalmers Tekniska Hogskola (Sweden), 2014.
- [5] Seetharamu, S., Thimmarayappa Jagadish, and Ravindra Malagi. "Fatigue, Durability, and Fracture Mechanics Proceedings of Fatigue Durability India 2019." Proceedings of Fatigue Durability India (2019).
- [6] Di Cocco, Vittorio, et al. "Damaging micromechanisms characterization in a ferritic-pearlitic ductile cast iron." Frattura ed Integrità strutturale 8.30 (2014): 62-67.
- [7] Čanžar, Predrag, Zdenko Tonković, and Janoš Kodvanj. "Microstructure influence on fatigue behaviour of nodular cast iron." Materials Science and Engineering: A 556 (2012): 88-99.
- [8] D'Agostino, Laura, Vittorio Di Cocco, and Francesco Iacoviello. "Overload effects on fatigue cracks in ferritic-pearlitic ductile cast irons." Procedia Structural Integrity 2 (2016): 3369-3376.
- [9] Benedetti, M., V. Fontanari, and D. Lusuardi. "Effect of graphite morphology on the fatigue and fracture resistance of ferritic ductile cast iron." Engineering Fracture Mechanics 206 (2019): 427-441.
- [10] Vantadori, Sabrina, et al. "Fatigue behaviour assessment of ductile cast iron smooth specimens." International Journal of Fatigue 152 (2021): 106459.
- [11] "Maintenance Manual no. MM-0350 ELSA 195/225 Reaction Beam Air Disc Brake"; (2009).
- [12] Güleriyüz, İ. C. & Yılmaz B., "Ağır hizmet araçlarında kullanılan disk fren kaliper yuvasının yapısal analizi ve deneysel doğrulaması" 4th International Mediterranean Science and Engineering Congress (IMSEC 2019) Antalya 2019, (2019).
- [13] Tyagi, Parshant. Finite Element Analysis of Innovated Design of Racing Brake Calipers. Diss. Wichita State University, College of Engineering, Department of Mechanical Engineering, 2006.
- [14] Tirovic, M., et al. "Structural analysis of a commercial vehicle disc brake caliper." Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering 226.5 (2012): 613-622.
- [15] Sergeant, Nicolas, Marko Tirovic, and Jeronimas Voveris. "Design optimization of an opposed piston brake caliper." Engineering Optimization 46.11 (2014): 1520-1537.
- [16] Güleriyüz, İbrahim Can. "Lightweight design of a torque plate of Z-cam drum brake for heavy duty vehicles." International Journal of Automotive Science and Technology 3.2 (2019): 42-50.
- [17] Tekbaş, U., Güleriyüz, İ.C., Ağır Hizmet Araçlarında Kullanılan Hidrolik Disk Fren Kaliper Yuvasının Topoloji Optimizasyonu. 3rd International Symposium on Automotive Science and Technology, (2023).
- [18] ISO 945-1, "Microstructure of cast irons — Part 1: Graphite classification by visual analysis", (2018).
- [19] ISO 945-2, "Microstructure of cast irons — Part 2: Graphite classification by image analysis", (2017).
- [20] ISO 945-3, "Microstructure of cast irons — Part 3: Matrix structures", (2018).
- [21] ISO 945-4, "Microstructure of cast irons — Part 4: Test method for evaluating nodularity in spheroidal graphite cast irons", (2019).
- [22] Taylor, D., and J. F. Knott. "Fatigue crack propagation behaviour of short cracks; the effect of microstructure." Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures 4.2 (1981): 147-155.
- [23] Mathews, Paul G. "Design of Experiments with MINITAB". Quality press, (2004).
- [24] Anderson, Virgil L., and Robert A. McLean. Design of experiments: a realistic approach. CRC Press, (2018).

İstanbul Bölgesinde Asit Yağmurlarının Ahşap Yapılarda Renk Tasarımına Etkisi

Nisanur YILDIZ¹ , Beyza Nur KARABAL^{1*} , Cansu ÖZDER¹ , Musa ATAR¹ 

¹Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi, Ağaççileri Endüstri Mühendisliği Bölümü, Yenimahalle/ ANKARA

Article Info

Research article
Received: 22/01/2024
Revision: 16/02/2024
Accepted: 16/02/2024

Keywords

Red color
Industrial area
Sulphuric and nitric acid
Surface design

Makale Bilgisi

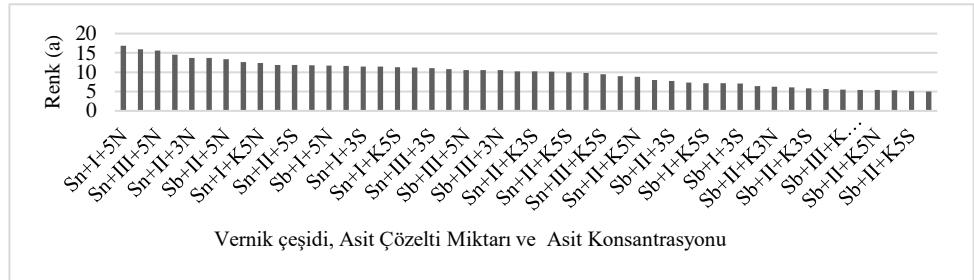
Araştırma makalesi
Başvuru: 22/01/2024
Düzeltilme: 16/02/2024
Kabul: 16/02/2024

Anahtar Kelimeler

Kırmızı renk
Sanayi bölgesi
Sülfürik ve nitrik asit
Üst yüzey tasarımı

Grafik Özet (Graphical Abstract)

Bu çalışmada, vernik, asit çözeltileri ve konsantrasyonları kullanılarak asit yağmurlarına maruz bırakılan bazı ahşap malzemelerin renk testleri yapılmıştır. / In this study, color tests were carried out on some wooden materials exposed to acid rain using varnish, acid solutions and concentrations.



Şekil A: Vernik çeşidi, asit çözelti miktarı ve asit konsantrasyonu etkileşimine göre kırmızı(a) renk değeri etkileşimleri / **Figure A:** Vernik çeşidi, asit çözelti miktarı ve asit konsantrasyonu etkileşimine göre kırmızı(a) renk değeri etkileşimleri

Highlights (Önemli noktalar)

- Farklı konsantrasyon ve farklı miktarlardaki asit çözeltilerinin ahşap yapılarda renk değerine etkisi / The effect of different concentrations and amounts of acid solutions on the color value of wooden structures
- Asit yağmurlarının yoğun olduğu bölgelerde kullanılan ahşap malzemelerin renk yönünden dikkate alınması / Considering the color of wooden materials used in regions where acid rain is intense
- Sonuç olarak; kırmızı renk değeri malzeme çeşidi bakımından en yüksek meşe(10,68), sentetik vernik (11,99), %5N (14,01), 120gr/m² (I), sarı renk en yüksek sarıçam (56,61), sentetik vernik (35,16), %5N'de tespit edilmiştir. / In conclusion; in terms of material type, the red color value is highest in oak (10.68), synthetic varnish (11.99), 5%N (14.01), 120gr/m² (I), yellow color is highest in Scots pine (56.61), synthetic varnish (35.16), detected at 5%N

Aim (Amaç): Bu çalışmanın amacı asit yağmurlarının ağaç malzemelerde kullanılan verniklerin bazı renk değerine etkisini belirlemektir. / The aim of this study is to determine the effect of acid rain on some color values of varnishes used on wood materials.

Originality (Özgünlük): Ahşap malzemenin, farklı konsantrasyon ve miktarlardaki asit çözeltileri ve verniklerde renk değerine etkisi / The effect of wood material on color value in acid solutions and varnishes of different concentrations and amounts

Results (Bulgular): Asit yağmurlarının kırmızı renk tonunda asit konsantrasyonu birinci, vernik çeşidi ikinci ve asit çözelti miktarının üçüncü derece etkili olduğu söylenebilir. / It can be said that the acid concentration is the first, the varnish type is the second and the amount of acid solution is the third in the red color tone of acid rain.

Conclusion (Sonuç): Asit uygulama sonrası nitrik asitin sarı renk değerini artırıcı, sülfürik asitin ise azaltıcı etki gösterdiği tespit edilmiştir. / It has been determined that nitric acid has an increasing effect on the yellow color value and sulfuric acid has a decreasing effect after acid application.



İstanbul Bölgesinde Asit Yağmurlarının Ahşap Yapılarda Renk Tasarımına Etkisi

Nisanur YILDIZ¹ , Beyza Nur KARABAL^{1*} , Cansu ÖZDER¹ , Musa ATAR¹

¹Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi, Ağaççılı Endüstri Mühendisliği Bölümü

Article Info

Research article
Received: 22/01/2024
Revision: 16/02/2024
Accepted: 16/02/2024

Anahtar kelimeler

Kırmızı renk
Sanayi bölgesi
Sülfürik ve nitric asit
Üst yüzey tasarımı

Öz

Bu çalışma, asit yağmurlarının açık hava şartlarındaki ağaç malzemelerde kullanılan verniklerin bazı renk değerine etkilerini belirlemek amacıyla yapılmıştır. Bu maksatla açık hava şartlarında kullanılan sapsız meşe (*Quercus petrae Liebl*) ve sarıçamdan (*Pinus sylvestris Lipsky.*) hazırlanan örnekler, ASTM-D-30232' e göre sentetik ve su bazlı vernik ile verniklendikten sonra yüzeyler farklı konsantrasyon ve miktarlarda sülfürik ve nitrik asit çözeltisi etkilerine maruz bırakılmıştır. Örneklerin renk değişimi, çoklu etkileşimde en yüksek M+Sb+I+%5N'de (17,49), en düşük Sç+Sb+I+%3S'de (6,408) çıkmıştır. Sarı renk değeri, çoklu etkileşimde en yüksek Sç+Sb+I+%3N (46,08)'de, en düşük M+Sb+III+%5S (22,34)'de ölçülmüştür. Özellikle renk değişiminin az olması beklenen alanlarda su bazlı vernik ve sarıçam kullanılması önerilebilir. Diğer faktörlerden elde edilen sonuçların uygulamalarda dikkate alınması avantaj sağlayabilir.

The Effect of Acid Rains on the Color Design in Wooden Buildings in Istanbul Region

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 22/01/2024
Düzeltilme: 16/02/2024
Kabul: 16/02/2024

Key words

Red color
Industrial area
Sulphuric and nitric acid
Surface design

Abstract

This study was conducted to determine the effect of acid rain on some color values of varnishes used on wood materials in outdoor weather conditions. For this purpose, the samples prepared from sessile oak (*Quercus petrae Liebl*) and Scots pine (*Pinus sylvestris L.*), which are used in outdoor conditions, were varnished with synthetic and water-based varnish according to ASTM-D-30232, and then the surfaces were coated with sulfuric and nitric acid in different concentrations and amounts exposed to the effects of the solution. It may be recommended to use water-based varnish and Scots pine, especially in areas where little color change is expected. It may be advantageous to consider the results obtained from other factors in applications.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Ağaç malzemenin işlenip ürün haline getirildikten sonraki üst yüzey tasarımı, albenisi artırma ve görsel algı bakımından renk önemli bir faktördür. Kırmızı, sarı ve tonları, ahşap ürünlerde genellikle alt ve üst değerleri kullanarak doğal, çevreci ve dengeli bir görünüm elde edilmesini sağlar. Bu nedenle, açık havada kullanılan birçok ahşap ürün veya eser, çevre kirlenmesi, havanın oksidasyonu ve iklim şartlarının şiddeti ve değişkenliğine maruz kalması nedeniyle; orijinal renk, görünüş, parlaklık, koku gibi fiziksel karakteristik özelliklerinin yanı sıra mekanik özelliklerinden de kayıplar meydana

gelebilmektedir. Çevre, hava ve iklimsel etkilerin araştırılması ve sonuçlarının ortaya konması, bu etkilere karşı yeni teknik, çözüm ve uygulamaların geliştirilmesi, ülkemiz kent estetiği, çevrenin korunması ve kaynakların daha verimli kullanılmasının geliştirilmesine katkı sağlayabilir.

Öte yandan, kırmızı ve tonları, özellikle kış aylarının çok çetin ve uzun geçtiği şehir ve bölgelerde ahşap ürünlerin sıcaklık hissi vermesi bakımından uygun olacağı düşünülmektedir. Kırmızı renk, enerji, tutku ve dikkat çekme özelliklerine sahip olup ahşap yapılarda canlı bir atmosfer yaratmada etkili olabilmektedir. Ancak,

aşşap ürünlerin aşırı kırmızı renge dönüşmesi görsel olarak yorucu olabilir, bu yüzden dengeli bir renk tasarımı önemli görülmektedir.

İnsanoğlu, ağaç malzemeyi üstün özellikleri nedeniyle, ev, köprü, dış cephe kaplaması, park, bahçe ve yürüyüş yolları, oturaklar, pergola ve bahçe mobilyaları, demiryolu traversleri ve tel direklerinde kullanmayı tercih etmektedir.

Dış hava şartları, ağaç malzemelerin yapısında deformasyonlar meydana getirdiği gibi, endüstriyel atıklar ile oluşan asit yağmurları da vernik katmanının yapısını etkileyerek değişikliklere neden olabilmektedir. Bu nedenle, dış hava şartlarında kullanılan aşşap eserlerin özelliklerine, yağmur asitlerinin etkileri bakımından araştırılması gereken önemli konulardır [1-2].

Asit yağmurları; endüstriyel faaliyetler ve yüksek enerji tüketimi sonucu oluşan hava kirliliği kaynaklı zararlı yağışlardır. Normal yağmurun pH değeri 5.6 iken, pH değeri 5.6'nın altındaki yağışlar asit yağmuru olarak adlandırılır. Bu yağışlar, atmosferden sülfürik asit (H_2SO_4) veya nitrik asit (HNO_3) gibi asidik bileşenlerle birleşerek yeryüzüne çöker. Bu durum, asit yağmurlarının nedeni ve oluşum şeklidir [3]. Asit yağmuru, modern sanayi toplumları tarafından üretilen

kirleticilerin önemli bir sonucudur ve ekolojik sistemlere, yapı malzemelerine ve kültürel eserlere zarar verdiği bilinmektedir [4].

Bir maddenin pH değeri ne kadar düşükse (7'den azsa), o kadar asidiktir ve pH değeri ne kadar yüksekse (7'den fazlaysa) o kadar alkalidir. Asit yağmuru genellikle 4.2 ila 4.4 arasında bir pH değerine sahiptir. Bu değer, daha yüksek asidite seviyelerini yansıtır ve genellikle endüstriyel veya çevresel kirliliğin sonucu olarak oluşabilmektedir [5].

Feist (1987) farklı odunlarda xenon-ark lambasını kullanarak asidin yüzey bozunumu üzerindeki etkisini araştırmıştır. Test örneklerini periyodik aralıklarla hava etkisi cihazında farklı pH derecelerinde sülfürik asit ve nitrik asit çözeltisi ile muamele etmiştir. Kontrol grubu ile yapılan karşılaştırmalarda pH=3 asit ile muamele görenlerde %10 bozunma meydana gelirken, pH=3.5'de %4 bozunma ve pH=4 ile muamele edilenlerde bozunma görülmediğini bildirmiştir [6].

Williams (1991), asitin, boya veya verniğin alkali bileşenleriyle reaksiyonunun, yapıyı büyük miktarda etkileyebilecek nitelikte olduğunu bildirmiştir. Yüksek kirlilik veya asidik birikim

bölgelerde üst yüzey işlemlerinde kullanılacak malzemelerin iyi formüle edilmesi ve uygun materyal seçiminin önemli olduğunu bildirmiştir. Ayrıca kükürt dioksitin oluşturduğu asidik etki sebebiyle aşşap üst yüzey malzeme dayanıklılığında olumsuz yönde büyük oranda riske sahip olduğu bildirilmiştir [7].

Kılıç ve Hafizoğlu (2007), ağaç malzemelerin; ışık, rutubet, rüzgâr ve sıcaklık gibi çeşitli faktörler karşısında, renk değişiklikleriyle başlayarak, fiziksel, kimyasal ve anatomik yapılarında bozulmalara maruz kaldığını ifade etmişlerdir. Açık havada kullanılan ağaç malzemelerin bu nedenle genellikle boya ve verniklerle korunduğunu bildirmişlerdir [8].

Asit yağmurlarının görüldüğü yerlerde bakır vb. metallerin kullanıldığı tarihi eserlerde de yıpranmalar ve zamanla kayıplar gözlenmiş, yüzeylerde renk değişimi, pürüzlülük artışı, çatlaklar, yüzey kalitesinin bozulması ve yağmur suyunun etkisiyle koruyucu kimyasal maddelerin yıkanması, fiziksel erozyonlara örnek olarak verilmiştir [3-9].

Asit yağmurları, metal yüzeyler, vernik ve boya gibi yüzey kaplamaları ve bazı plastikler üzerinde de bozulmalara sebep olabilmektedir [10]. Ağaç malzemenin işlenip son ürün haline geldikten sonra kullanım yerlerinde en zararlı sayılabilecek etkenler, dış hava koşulları olarak nitelendirilen; sıcaklık, nem, güneş ışığının değişik dalga boyları ve UV radyasyonu ve bunların mevsimlere göre değişmesidir [11].

Açık hava koşulları, yüzey işlem katmanıyla birlikte aşşap yüzeyinde fiziksel ve kimyasal değişikliklere neden olarak hasara yol açmaktadır. Bu faktörler arasında yağmur, kar, havadaki nem, güneş ışığı radyasyonu ve yıllar boyunca biriken hava kirliliği nedeniyle zarar gören ozon tabakası yer alır. Zararlı UV ışınları atmosfere ulaşarak sülfür dioksit ve nitrojen dioksit gibi maddeleri ortaya çıkarmaktadır. Bu etkenler aşşap yüzeyin bozulmasına sebep olur ve nem, ışık, asit kalıntıları ve artan sıcaklık gibi faktörlerle ilişkilendirilir [12].

Budakçı ve Karamanoğlu tarafından açık hava iklim şartlarına maruz kalan sarıçam (*Pinus sylvestris* L.), Doğu kayını (*Fagus orientalis* L.), sapsız meşe (*Quercus petraea* L.) ve Anadolu kestanesinden (*Castaneasativa* Mill.) hazırlanan örnekler, 12 ay süre ile açık hava iklim şartlarında bırakılmış, meydana gelen renk değişimleri ASTM D-1641, ASTM D 2240, EN ISO 2813 ve ASTM D 2244'e göre belirlenmiştir. Sonuç olarak, açık hava iklim

şartları deneye tabii ağaç malzemelerin yüzeylerinin renk değerlerini azaltıcı etki yaptığı ve en fazla renk değişimi sarıçamda meydana geldiği tespit edilmiştir [13].

Bu çalışma, sanayinin yoğun olduğu kentlerde asit yağmurlarınca tahrip edildiği veya değişime uğratıldığı düşünülen ahşap eserlerin üst yüzeylerinde kullanılacak koruyucu verniklerin daha doğru seçilmesi bakımından katkı sağlayacağı ve asit yağmurlarının etkilerinin farklı konular için araştırma konusu yapılarak literatüre önemli katkı ve fayda sağlayacağı düşünülmektedir.

2. MATERYAL ve METOT (MATERIAL and METHOD)

2.1. Ağaç malzeme (Wood material)

Çalışmada, sarıçam (*Pinus sylvestris* Lipsky) ve sapsız meşe (*Quercus petraea* Liebl.) odunları deney malzemesi seçilmiştir. Ağaç malzemeler, TS ISO 3129 esaslarına uyularak düzgün lifli, budaksız, mantar ve böcek zararlılarına uğramamış olmalarına özen gösterilerek İstanbul'daki kereste işletmelerinden temin edilmiştir (TS ISO 3129).

2.2. Vernikler (Varnish)

Örneklerin verniklenmesinde sentetik (marine-marine, anti aging) ve su bazlı vernik (anti aging) kullanılmıştır. Vernikler İstanbul'daki satıcı firmalardan temin edilmiştir. Uygulanacak vernik miktarının tespitinde katı madde miktarı ve firma önerileri göz önünde bulundurulmuştur. Sentetik vernik, rutubet dayanıklılığı sebebiyle açık hava şartlarında, suyla temas eden yerlerde ve yüksek rutubetli ortamlarda kullanılmaktadır. Sentetik reçinelerin organik çözücüler içerisindeki eriyiklerinden oluşan ve sentetik tiner ile inceltirilerek kullanılan vernik çeşididir [14]. Su bazlı vernik; alkid, poliester, akrilik ve poliüretana ek olarak daha başka birçok reçineden üretilir [15].

2.3. Kimyasal maddeler (Chemical materials)

Örneklerin yüzeyine İstanbul bölgesindeki asit yağmurlarını temsilen hazırlanan %3 ve %5'lik sülfürik asit ve nitrik asit çözeltileri uygulanmıştır. Sülfürik asit (H_2SO_4) renksiz ve yoğunluğu yüksek güçlü bir mineral asididir. Sülfürik asit çeşitli derişimleri halinde gübre, pigment, boyar madde, patlayıcı madde, ilaçlama, inorganik tuz ve petrol arıtım ve metalürji işlemlerinde kullanılmaktadır. Nitrik asit (HNO_3), oldukça kuvvetli ve aşındırıcı bir inorganik asittir. Kezzap olarak da bilinmektedir. Saf hali renksizdir, ancak uzun süre

bekleyen eski asitler, azot oksitlerin ve suyun etkisiyle sarı renge dönüşebilmektedir [16].

2.4. Deney örneklerinin hazırlanması (Preparation of test samples)

Deney örneklerinin hazırlanmasında ASTM-D 358 esaslarına uyulmuştur [17]. Buna göre; ağaç malzemenin diri odun kısımlarından, yıllık halkalar yüzeye dik gelecek şekilde, 190x140x15 mm ölçülerde kesilen örnekler $20 \pm 2^\circ C$ sıcaklık ve % 65 ± 3 bağıl nem şartlarında %12 rutubete ulaşmaya kadar bekletilmiştir. Daha sonra örnekler 100x100x10 mm ölçülerinde boyutlandırılmıştır. Vernikleme işleminde ASTM-D-3023 esaslarına uyulmuştur [18]. Buna göre; işlem yapılacak yüzeyler, lif kabarmaları giderilecek şekilde, hafifçe zımparalanmış, tozları alındıktan sonra üretici firma önerilerine uyularak vernikleme yapılmıştır. Tabanca örnek yüzeyinden 20 cm yükseklikte ve yatay yönde hareket ettirilmiş 2 kez son kat vernik uygulanmıştır. Vernikleme $20 \pm 2^\circ C$ sıcaklık ve % 65 ± 3 bağıl nem şartlarında gerçekleştirilmiştir. Sentetik vernik uygulamasında, sert kıllı ve yeterli dirence sahip fırça kullanılmıştır. Vernikli örneklerin yüzeylerine Meteoroloji Genel Müdürlüğünün hazırladığı Asit Yağmurları Teknik Raporu'ndaki İstanbul ile ilgili en yoğun değerler dikkate alınarak %3 ve %5'lik sülfürik asit (S) ve nitrik asit (N) çözeltileri hazırlanmıştır [5]. Deney örnek yüzeylerine Meteoroloji Genel Müdürlüğünün az şiddetli, orta şiddetli ve çok şiddetli yağış miktarı temel alınarak 120 (I), 150 (II) ve 180 (III) gr/m² hesabıyla çözeltiler püskürtülmüştür.



Resim 2.1. Asit çözeltisi uygulaması (Acid solution application)

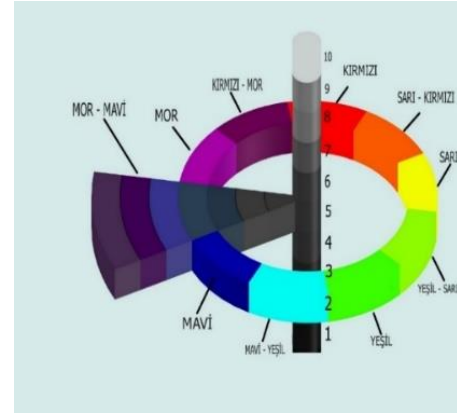
2. 5. Deney metodu (Test method)

Renk ölçümleri, "MINOLTA CR-231" model renk ölçüm cihazı kullanılarak, ASTM D 22442 'ye uygun olarak aynı noktalardan yapılmıştır [19]. Resim 2.2'de renk sistemi esasları (CIEL*a*b*) çerçevesinde işlem yapan "MINOLTA CR-231" renk ölçüm cihazı gösterilmiştir.



Resim 1.2. “MINOLTA CR-231” renk ölçüm cihazı
 (“MINOLTA CR-231” color measuring device)

CIEL ab* renk sisteminde, renk değişiklikleri ve bu değişikliklerin konumları "L*, a*, b*" renk koordinatlarına göre belirlenmektedir. Bu sistemde, "L*" ekseninde siyahtan beyaza doğru bir geçiş (siyah için L* = 0, beyaz için L* = 100) gerçekleşir. "a*" ekseninde kırmızıdan yeşile doğru bir geçiş (pozitif değerler kırmızı, negatif değerler yeşil) mevcuttur. "b*" ekseninde ise sarıdan maviye doğru bir geçiş (pozitif değerler sarı, negatif değerler mavi) bulunmaktadır [21]. CIELab* renk alanı Şekil 2.1'de gösterilmiştir.



Şekil 2.1. CIELAB-76 renk alanı (CIELAB-76 color space) [20]

3. BULGULAR (RESULTS)

Asit yağmurlarını temsilen hazırlanmış olan çözeltilerin pH ölçümlerinde pH skala çubuğu kullanılmıştır. Sonuçlar, nitrik asit (HNO₃)'in %3'lük konsantrasyonunda pH 2, %5'lik konsantrasyonda pH'ı 1, sülfürik asitin (H₂SO₄) %3'lük konsantrasyonunda pH 2, %5'lik konsantrasyonda pH'ı 1 bulunmuştur. Verniklerin katman kalınlıkları, su bazlı vernikte 60, sentetik vernikte 80 mikron ölçülmüştür. Sentetik vernikte kırmızı renk değeri, su bazlı vernikten %36 daha yüksek bulunmuştur. Bu durumun verniklerin yapısal özelliklerinden kaynaklandığı söylenebilir.

3.1. Renk Değişimi (Color change)

Deney örneklerine ait belirlenen kırmızı (a) ve sarı (b) renk değerleri belirlenmiştir.

3.1.1. Kırmızı renk değişimi (a) (Red color change)

Çizelge 3.1. Ağaç türü, vernik çeşidi, asit konsantrasyonu ve asit çözelti miktarına göre kırmızı (a) renk değerleri. (Red (a) color values according to wood type, varnish type, acid concentration and amount of acid solution)

Ağaç türü	\bar{X} (Renk a)	HG*	Asit konsantrasyonu	\bar{X} (Renka)	HG***
Meşe (M)	10,68	A	%5 Na (5N)	14,01	A
Sarıçam (Sç)	8,935	B	%3 Na (3N)	12,34	B
Vernik çeşidi	\bar{X} (Renk a)	HG**	%5 Sa (5S)	9,844	C
Sentetik vernik (Sn)	11,99	A	%3 Sa (3S)	9,293	D
Su bazlı vernik (Sb)	7,63	B	K%3 Na (K3N)	8,469	E
Asit çözelti miktarı	\bar{X} (Renk a)	HG****	K%5 Sa (K5S)	8,223	E
120 g/m ² (I)	10,36	A	K%5 Na (K5N)	8,217	E
150 g/m ² (II)	9,614	B	K%3 Sa (K3S)	8,074	E
180 g/m ² (III)	9,454	B			

LSD*= 0,2328, \bar{X} : Aritmetik ort., HG: Homojenlik grubu, LSD: Önemli En Küçük Fark , LSD**=0,2328, LSD***=0,4657, LSD****= 0,2852

Kırmızı renk değeri, ağaç türüne göre, en yüksek meşede (10,68), en düşük sarıçamda (8,935), vernik çeşidine göre, en yüksek sentetik vernikte (11,99), en düşük su bazlı vernikte (7,63), asit konsantrasyonuna göre en yüksek 5N'de (14,01), en

düşük 3S'de (9,293) ve asit çözelti miktarına göre, en yüksek 120 g/m²(10,36), en düşük 150 ve 180 g/m² de yaklaşık eşit bulunmuştur. Ağaç türleri arasında meydana gelen renk farklılığı ağaçların fiziksel karakteristik özelliklerinden kaynaklanmış

olabilir. Vernikler arasındaki farklılıkların ise yapısal özelliklerinden ileri geldiği düşünülmektedir. Kimyasal maddeler kontrol örneklerine göre kırmızı renk tonunu arttırıcı etki göstermiştir. Bu durum kimyasal maddelerin, vernikteki renk pigmentlerini etkilemesinden kaynaklanabilir [22]. Benzer bir çalışmada sarıçam, Doğu kayını ve kestane odunlarına selülozik, sentetik, poliüretan ve asit katalizörlü vernik uygulanmıştır. Poliüretan verniğin hem sarı hem de

kırmızı renk tonunda artışa sebep olduğu belirtilmektedir [23].

Ağaç türü- vernik çeşidi, ağaç türü-asit çözelti miktarı, vernik çeşidi-asit çözelti miktarı, ağaç türü-asit konsantrasyonu, vernik çeşidi-asit konsantrasyonu, asit çözelti miktarı-asit konsantrasyonu ikili etkileşimlerine ait değerler Çizelge 3.2’de verilmiştir.

Çizelge 3.2. Ağaç türü- vernik çeşidi, ağaç türü-asit çözelti miktarı, vernik çeşidi-asit çözelti miktarı, ağaç türü-asit konsantrasyonu, vernik çeşidi-asit konsantrasyonu, asit çözelti miktarı-asit konsantrasyonu ikili etkileşimlerine ait değerler (Values of the binary interactions of tree species-varnish type, wood species-acid solution amount, varnish type-acid solution amount, wood species-acid concentration, varnish type-acid concentration, acid solution amount-acid concentration)

Ağaç türü ve vernik çeşidi	\bar{X} (Renk a)	HG* LSD*= 0,3293	Ağaç türü ve vernik çeşidi	\bar{X} (Renk a)	HG* LSD*= 0,3293
M+Sn	13,21	A	M+Sb	8,154	C
Sç+Sn	10,76	B	Sç+Sb	7,107	D
Ağaç türü ve asit çözelti miktarı	\bar{X} (Renk a)	HG** LSD**= 0,4033	Ağaç türü ve asit çözelti miktarı	\bar{X} (Renk a)	HG**
M + III	10,91	A	Sç + I	10,18	B
M + II	10,60	AB	Sç + II	8,626	C
M + I	10,53	AB	Sç + III	7,997	D
Vernik çeşidi ve asit çözelti mik.	\bar{X} (Renk a)	HG*** LSD*= 0,4033	Vernik çeşidi ve asit çözelti mik.	\bar{X} (Renk a)	HG***
Sn + I	12,81	A	Sb + I	7,899	C
Sn + III	11,60	B	Sb + II	7,688	CD
Sn + II	11,54	B	Sb + III	7,303	D
Ağaç türü ve asit konsantrasyonu	\bar{X} (Renk a)	HG***** LSD*= 0,6586	Ağaç türü ve asit konsantrasyonu	\bar{X} (Renk a)	HG*****
M + 5N	14,77	A	M + K3N	9,206	EFG
Sç + 5N	13,24	B	Sç + 5S	8,991	FG
M + 3N	12,99	B	M + K3S	8,882	FG
Sç + 3N	11,68	C	Sç + 3S	8,674	G
M + 5S	10,70	D	Sç + K3N	7,733	H
M + 3S	9,913	E	Sç + K3S	7,265	HI
M + K5S	9,559	EF	Sç + K5N	7,008	I
M + K5N	9,427	EF	Sç + K5S	6,887	I
Vernik çeşidi ve asit konsantrasyonu	\bar{X} (Renk a)	HG***** LSD*= 0,6586	Vernik çeşidi ve asit konsantrasyonu	\bar{X} (Renk a)	HG***** LSD*= 0,6586
Sn + 5N	16,13	A	Sb + 3N	10,67	EF
Sn + 3N	14,01	B	Sn + K5S	10,22	F
Sb+ 5N	11,88	C	Sb + 5S	8,11	G
Sn + 5S	11,58	CD	Sb + 3S	7,34	H
Sn + 3S	11,25	CDE	Sb + K5S	6,23	I
Sn + 5N	16,13	A	Sb + 3N	10,67	EF
Sn + K5N	11,00	DE	Sb + K3N	6,00	IJ
Sn + K3N	10,94	DE	Sb + K5N	5,44	J
Sn + K3S	10,76	EF	Sb + K3S	5,38	J
Asit çözelti mikt. ve asit kon.	\bar{X} (Renk a)	HG***** LSD*= 0,8066	Asit çözelti mikt. ve asit konsantrasyonu	\bar{X} (RENK A)	HG***** LSD*= 0,8066
II+5N	14,66	A	I+K5N	8,905	FGHI
I+5N	14,26	A	III+5S	8,784	FGHIJ
I+3N	13,11	B	I+K3N	8,780	FGHIJ
III+5N	13,09	B	III+K5N	8,635	FGHIJK
III+3N	12,13	C	I+K3S	8,467	GHIJK
II+3N	11,77	C	II+K3N	8,397	GHIJKL
I+5S	10,81	D	III+K3N	8,231	HIJKL
II+5S	9,943	E	II+K3S	8,004	IJKLM

II+3S	9,502	EF	III+K5S	7,919	JKLM
I+3S	9,296	EFG	III+K3S	7,750	KLM
I+K5S	9,234	EFG	II+K5S	7,516	LM
III+3S	9,082	EFGH	II+K5N	7,113	M

Kırmızı renk değeri, ağaç türü ve vernik çeşidi etkileşimi bakımından en yüksek M+Sn (13,21), en düşük Sç+Sb (7,107), ağaç türü ve asit çözelti miktarı etkileşimine göre, kırmızı renk değeri en yüksek M+III'de (10,91), en düşük Sç+III'de (7,997), vernik çeşidi ve asit çözelti miktarı etkileşimine göre kırmızı renk değeri en yüksek Sn+I (12,81)'de, en düşük Sb+III (7,303), ağaç türü ve asit konsantrasyonu etkileşimine göre kırmızı renk değeri en yüksek M+5N'de (14,77), en düşük Sç+3S'de (8,674), ağaç türü ve asit çözelti miktarı etkileşimine göre, kırmızı renk değeri en yüksek M+III'de (10,91), en düşük Sç+III'de (7,997) bulunmuştur. Kırmızı renk değerinde ağaç türü birinci derecede, uygulama miktarı ikinci derecede etkili olmuştur. Ayrıca meşede sarıçamdan, kırmızı renk değeri daha fazla çıkmıştır. Asit çözelti miktarı arttıkça meşede kırmızı renk değerinin arttığı söylenebilir. Ancak sarıçamda asit çözelti miktarı arttıkça kırmızı renk değeri

düşmektedir. Nitekim karaağaç odunundan hazırlanan deney örneklerine %25'lik konsantrasyondaki NaOH+H₂O₂ (I. çözelti) ve NaSiO₃+H₂O₂ (II. çözelti) grupları arasında yapılan renk testinde; poliüretan vernikli örneklerde; kırmızı renk tonu değeri en yüksek poliüretan vernikle verniklenmiş natürel örneklerde (12,940), en düşük I. grup çözelti ile işlem görmüş ve poliüretan vernikle verniklenmiş örneklerde (8,970), polyester vernikli örneklerde ise en yüksek polyester vernikle verniklenmiş natürel örneklerde (12,100), en düşük I. grup çözelti ile işlem görmüş ve polyester vernikle verniklenmiş örneklerde (4,260) bulunmuştur [24]. Vernik çeşidi ve asit çözelti miktarı, ağaç türü ve asit konsantrasyonu etkileşimine, vernik çeşidi ve asit konsantrasyonu, asit çözelti miktarı ve asit konsantrasyonuna göre elde edilen kırmızı (a) renk değerleri Çizelge 3.3'de gösterilmiştir.

Çizelge 3.3. Ağaç türü, vernik çeşidi ve asit çözelti miktarı, ağaç türü, vernik çeşidi ve asit konsantrasyonu ağaç türü, asit çözelti miktarı ve asit kon., vernik çeşidi, asit çözelti miktarı ve asit kon., vernik çeşidi, asit çözelti miktarı ve asit konsantrasyonuna ait değerler (Wood species, varnish type and acid solution amount, tree species, varnish type and acid concentration tree species, acid solution amount and acid concentration, varnish type, acid solution amount and acid concentration, varnish type, acid solution amount and acid concentration values)

Ağaç türü, vernik çeşidi ve asit çözelti miktarı	\bar{X} (Renk a)	HG* LSD*= 0,4033	Ağaç türü, vernik çeşidi ve asit çözelti miktarı	\bar{X} (Renk a)	HG*
M+Sn+III	13,59	A	M+Sb+III	8,225	D
M+Sn+I	13,03	AB	M+Sb+II	8,197	D
M+Sn+II	13,01	AB	M+Sb+I	8,039	D
Sç+Sn+I	12,60	B	Sç+Sb+I	7,760	D
Sç+Sn+II	10,07	C	Sç+Sb+II	7,179	E
Sç+Sn+III	9,613	C	Sç+Sb+III	6,382	F
Ağaç türü, vernik çeşidi ve asit kon.	\bar{X} (Renk a)	HG** LSD*= 0,9314	Ağaç türü, vernik çeşidi ve asit kon.	\bar{X} (Renk a)	HG**
M+Sn+5N	17,00	A	Sç+Sn+K3S	9,888	I
Sç+Sn+5N	15,27	B	Sç+Sn+K5N	9,637	I
M+Sn+3N	14,55	B	Sç+Sn+K3N	9,577	I
Sç+Sn+3N	13,46	C	M+Sb+5S	8,287	J
M+Sn+5S	13,11	CD	Sç+Sb+5S	7,934	J
M+Sn+K5S	12,68	CDE	M+Sb+3S	7,802	JK
M+Sb+5N	12,54	CDE	Sç+Sn+K5S	7,755	JK
M+Sn+K5N	12,35	DEF	Sç+Sb+3S	6,874	KL
M+Sn+K3N	12,31	DEF	M+Sb+K5N	6,500	L
M+Sn+3S	12,02	EFG	M+Sb+K5S	6,433	L
M+Sn+K3S	11,64	EFG	M+Sb+K3S	6,125	L
M+Sb+3N	11,44	FGH	M+Sb+K3N	6,103	L
Sç+Sb+5N	11,21	GH	Sç+Sb+K5S	6,020	L
Sç+Sn+3S	10,47	HI	Sç+Sb+K3N	5,888	L

Sç+Sn+5S	10,05	I	Sç+Sb+K3S	4,643	M
Sç+Sb+3N	9,903	I	Sç+Sb+K5N	4,379	M
Ağaç türü, asit çözeltili mikt. ve asit kon.	\bar{X} (Renk a)	HG**** LSD*= 1,141	Ağaç türü, asit çözeltili mikt. ve asit kon.	\bar{X} (Renk a)	HG****
M+III+5N	15,65	A	M+II+K3S	9,249	IJKLMNOPQ
Sç+II+5N	15,07	AB	M+III+K5N	9,245	IJKLMNOPQ
M+I+5N	14,39	BC	M+III+K5S	9,106	JJKLMNOPQ
M+II+5N	14,26	BC	Sç+I+K3N	8,947	KLMNOPQR
Sç+I+5N	14,12	BC	M+III+K3S	8,932	KLMNOPQR
M+III+3N	13,92	BC	M+II+K3N	8,899	KLMNOPQRS
Sç+I+3N	13,54	CD	Sç+II+3S	8,865	LMNOPQRS
M+I+3N	12,68	D	M+II+K5N	8,855	LMNOPQRS
M+II+3N	12,39	DE	Sç+I+K5S	8,648	MNOPQRS
M+II+5S	11,27	EF	Sç+II+5S	8,619	NOPQRS
Sç+II+3N	11,15	FG	M+I+K3N	8,612	NOPQRS
Sç+I+5S	10,81	FGH	Sç+I+K3S	8,468	NOPQRS
M+I+5S	10,80	FGH	M+I+K3S	8,466	NOPQRS
Sç+III+5N	10,54	FGHI	Sç+III+K5N	8,025	OPQRST
Sç+III+3N	10,34	FGHIJ	Sç+II+K3N	7,895	PQRST
M+III+3S	10,29	FGHIJK	Sç+III+3S	7,875	QRST
M+I+K5N	10,18	FGHIJKL	Sç+I+K5N	7,627	RSTU
M+II+3S	10,14	FGHIJKL	Sç+III+5S	7,540	STU
M+III+K3N	10,11	FGHIJKL	Sç+II+K3S	6,759	TU
M+III+5S	10,03	FGHIJKLM	Sç+III+K5S	6,733	TU
M+I+K5S	9,820	GHIJKLMN	Sç+III+K3S	6,569	UV
M+II+K5S	9,750	HIJKLMN	Sç+III+K3N	6,356	UVW
M+I+3S	9,309	IJKLMNOP	Sç+II+K5N	5,371	VW
Sç+I+3S	9,283	IJKLMNOP	Sç+II+K5S	5,281	W
Vernik çeşidi, asit çözeltili mikt. ve asit kon.	\bar{X} (Renk a)	HG**** LSD*= 1,141	Vernik çeşidi, asit çözeltili mikt. ve asitkon.	\bar{X} (Renk a)	HG****
Sn+I+5S	12,64	DEF	Sb+II+5S	8,00	OP
Sn+I+K5N	12,37	EFG	Sb+II+3S	7,76	OP
Sn+I+K3S	11,92	FGH	Sb+III+5S	7,35	PQ
Sn+II+5S	11,88	FGH	Sb+I+K5S	7,20	PQ
Sn+III+K5N	11,78	FGH	Sb+III+3S	7,14	PQ
Sb+I+5N	11,68	FGH	Sb+I+3S	7,11	PQ
Sb+I+3N	11,67	FGH	Sb+III+K5S	6,3	QR
Sn+I+3S	11,48	FGHI	Sb+II+K3N	6,25	QRS
Sn+I+K3N	11,47	FGHI	Sb+I+K3N	6,10	QRS
Sn+I+K5S	11,27	GHIJ	Sb+II+K3S	5,81	RS
Sn+II+3S	11,24	GHIJ	Sb+III+K3N	5,64	RS
Sn+III+3S	11,02	GHIJK	Sb+III+K5N	5,49	RS
Sn+III+K3N	10,82	HIJK	Sb+I+K5N	5,44	RS
Sb+III+5N	10,56	HIJKL	Sb+II+K5N	5,39	RS
Sn+II+K3N	10,54	HIJKL	Sb+III+K3S	5,32	RS
Sb+III+3N	10,54	HIJKL	Sb+II+K5S	5,10	RS
Sn+III+5S	10,22	IJKLM	Sb+I+K3S	5,02	S

Ağaç türü, vernik çeşidi ve asit çözeltili miktarı etkileşimine göre kırmızı renk değeri en yüksek M+Sn+III (13,59), en düşük Sç+Sb+III (6,382), Ağaç türü, vernik çeşidi ve asit konsantrasyonu etkileşimine göre kırmızı renk değeri en yüksek M+Sn+5N'de (17,0), en düşük Sç+Sb+3S'de (6,874), ağaç türü, asit çözeltili miktarı ve asit konsantrasyonu etkileşimine göre kırmızı renk değeri en yüksek M+III+5N (15,65)'de, en düşük Sç+III+5S (7,54), vernik çeşidi, asit çözeltili miktarı ve asit konsantrasyonu etkileşimine göre kırmızı renk değeri en yüksek Sn+I+5N (16,83)'de, en düşük Sb+I+3S (7,11) bulunmuştur. Ağaç türü, vernik çeşidi, asit çözeltili miktarı ve asit konsantrasyonuna göre kırmızı (a) renk değerine ilişkin çoklu varyans analizi Çizelge 3.4'de gösterilmiştir.

Çizelge 3.4. Ağaç türü, vernik çeşidi, asit çözelti miktarı ve asit konsantrasyonunun kırmızı (a) renk değerine ilişkin çoklu varyans analizi (Multiple variance analysis regarding the red (a) color value of wood species, varnish type, amount of acid solution and acid concentration)

Varyans Kaynağı	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Ortalama Kareler	F Hesap	P<0,05
Faktör A	1	365,890	365,890	217,1510	0,0000
Faktör B	1	2276,537	2276,537	1351,0957	0,0000
AB	1	58,673	58,673	34,8219	0,0000
Faktör C	2	74,351	37,175	22,0632	0,0000
AC	2	134,377	67,188	39,8754	0,0000
BC	2	22,839	11,419	6,7772	0,0013
ABC	2	23,895	11,947	7,0906	0,0009
Factor D	7	2047,304	292,472	173,5784	0,0000
AD	7	28,401	4,057	2,4079	0,0201
BD	7	75,149	10,736	6,3714	0,0000
ABD	7	73,380	10,483	6,2214	0,0000
CD	14	92,413	6,601	3,9176	0,0000
ACD	14	154,924	11,066	6,5675	0,0000
BCD	14	70,584	5,042	2,9922	0,0002
ABCD	14	231,889	16,564	9,8302	0,0000
Error	384	647,023	1,685		
Total	479	6377,630			

Ağaç türü, vernik çeşidi, asit çözelti miktarı ve asit konsantrasyonunun kırmızı (a) renk değerine etkisi istatistiksel anlamda ($\alpha=0,05$) önemli çıkmıştır.

Gruplar arasında farklılığı görmek amacıyla yapılan Duncan testi sonuçları Çizelge 3.5'de verilmiştir.

Çizelge 3.5. Duncan testi sonuçları (Duncan test results)

İşlem Çeşidi	X(Kırmızı Renk)	HG	İşlem Çeşidi	X(Kırmızı Renk)	HG
M+Sn+I+5N	17,49	A	Sç+Sb+I+5S	10,02	MNOPQRST
M+Sn+III+5N	16,97	AB	Sç+Sn+II+K3N	9,204	NOPQRSTU
M+Sn+III+3N	16,91	AB	Sç+Sn+I+K5S	9,016	NOPQRSTUV
M+Sn+II+5N	16,53	ABC	Sç+Sn+III+3S	8,932	OPQRSTUV
Sç+Sn+I+3N	16,22	ABC	M+Sb+II+5S	8,91	PQRSTUV
Sç+Sn+I+5N	16,17	ABC	Sç+Sb+II+3N	8,702	QRSTUVW
Sç+Sn+II+5N	15,33	BCD	Sç+Sn+II+K3S	8,438	RSTUVWX
Sç+Sb+II+5N	14,8	CDE	Sç+Sn+III+5S	8,388	STUVWX
M+Sb+III+5N	14,34	DEF	Sç+Sb+I+K5S	8,28	STUVWXYZ
Sç+Sn+III+5N	14,3	DEF	Sç+Sn+III+K3S	8,21	STUVWXYZ
M+Sn+I+K5N	14,16	DEF	M+Sb+II+3S	8,13	TUVWXYZ[
M+Sn+III+K3N	14,16	DEF	M+Sb+III+5S	8,014	UVWXYZ[\
M+Sn+II+3N	13,88	DEFG	M+Sb+I+5S	7,936	UVWXYZ[]
M+Sn+I+5S	13,66	DEFG	M+Sb+I+3S	7,816	UVWXYZ[]^
M+Sn+II+5S	13,62	DEFGH	Sç+Sn+III+K3N	7,486	UVWXYZ[]^_
Sç+Sn+II+3N	13,6	DEFGH	M+Sb+III+3S	7,46	UVWXYZ[]^_
M+Sn+I+K5S	13,52	DEFGH	Sç+Sn+III+K5S	7,416	UVWXYZ[]^_
M+Sn+III+3S	13,12	EFGHI	Sç+Sb+II+3S	7,396	UVWXYZ[]^_

M+Sn+II+K5S	13,04	EFGHI	Sç+Sb+II+5S	7,094	VWXYZ[\]^_`
Sç+Sn+I+K3S	13,02	EFGHI	Sç+Sn+II+K5S	6,832	WXYZ[\]^_`a
M+Sn+I+3N	12,87	EFGHIJ	Sç+Sb+III+3S	6,818	WXYZ[\]^_`a
M+Sb+I+3N	12,48	FGHIJK	Sç+Sb+III+5N	6,774	WXYZ[\]^_`a
Sç+Sn+I+3S	12,16	GHIJKL	M+Sb+III+K5S	6,724	WXYZ[\]^_`a
M+Sn+III+K3S	12,16	GHIJKL	M+Sb+II+K5N	6,724	WXYZ[\]^_`a
M+Sn+II+3S	12,15	GHIJKL	Sç+Sn+II+K5N	6,694	WXYZ[\]^_`a
Sç+Sb+I+5N	12,07	GHIJKL	Sç+Sb+III+5S	6,692	WXYZ[\]^_`a
Sç+Sn+I+K3N	12,04	GHIJKL	Sç+Sb+II+K3N	6,586	XYZ[\]^_`ab
M+Sn+III+5S	12,04	GHIJKL	M+Sb+III+K5N	6,568	XYZ[\]^_`ab
M+Sb+II+5N	12	GHIJKLM	M+Sb+II+K3S	6,55	XYZ[\]^_`ab
M+Sn+II+K3S	11,95	GHIJKLM	M+Sb+II+K5S	6,456	XYZ[\]^_`ab
M+Sn+III+K5N	11,92	GHIJKLM	Sç+Sb+I+3S	6,408	XYZ[\]^_`ab
M+Sn+II+K3N	11,88	GHIJKLM	M+Sb+I+K3N	6,336	YZ[\]^_`abc
Sç+Sn+III+K5N	11,63	HIJKLM	M+Sb+I+K5N	6,208	Z[\]^_`abc
Sç+Sn+I+5S	11,61	HIJKLM	M+Sb+I+K5S	6,12	[\]^_`abc
M+Sn+III+K5S	11,49	IJKLM	M+Sb+I+K3S	6,116	[\]^_`abc
M+Sb+I+5N	11,3	IJKLM	M+Sb+III+K3N	6,058	\]^_`abc
M+Sn+II+K5N	10,99	JLMN	Sç+Sb+III+K5S	6,05	\]^_`abc
M+Sb+III+3N	10,93	JLMN	M+Sb+II+K3N	5,916]^_`abcd
M+Sb+II+3N	10,89	JLMNO	Sç+Sb+I+K3N	5,852	^_`abcd
M+Sn+I+K3N	10,89	JLMNO	M+Sb+III+K3S	5,708	_`abcde
Sç+Sb+I+3N	10,86	JLMNOP	Sç+Sb+III+K3N	5,226	`abcdef
M+Sn+I+K3S	10,82	KLMNOP	Sç+Sb+II+K3S	5,08	`abcdef
M+Sn+I+3S	10,8	KLMNOP	Sç+Sb+III+K3S	4,928	abcdef
Sç+S+I+K5N	10,58	KLMNOPQ	Sç+Sb+I+K5N	4,67	bcdef
Sç+Sn+III+3N	10,54	KLMNOPQ	Sç+Sb+III+K5N	4,418	cdef
Sç+Sn+II+3S	10,33	LMNOPQR	Sç+Sb+II+K5N	4,048	def
Sç+Sb+III+3N	10,15	LMNOPQRS	Sç+Sb+I+K3S	3,92	ef
Sç+Sn+II+5S	10,14	LMNOPQRS	Sç+Sb+II+K5S	3,73	f

Ağaç türü, vernik çeşidi, asit çözelti miktarı ve asit konsantrasyonu dörtlü etkileşimine göre kırmızı renk değeri en yüksek M+Sn+I+5N (17,49)'de, en düşük Sç+Sb+I+3S (6,408)'de bulunmuştur.

Kırmızı renk tonunda vernik çeşidi birinci derecede, ağaç türü ikinci derecede etkili olmuştur.

3.6 Sarı renk değişimi (b) (Yellow color change (b))

Ağaç türü, vernik çeşidi asit konsantrasyonu ve asit çözelti miktarına göre elde edilen sarı (b) renk değerleri Çizelge 3.6'da verilmiştir.

Çizelge 3.6. Ağaç türüne, vernik çeşidi, asit konsantrasyonu, asit çözelti miktarına göre sarı (b) renk değerleri (Yellow (b) color values according to tree species, varnish type, acid concentration, amount of acid solution)

Ağaç türü	\bar{X} (Renk b)	HG*
Sarıçam (Sç)	56,61	A
Meşe (M)	51,97	A
Vernik çeşidi	\bar{X} (Renk b)	HG**
Sentetik Vernik (Sn)	35,16	A
Su bazlı Vernik (Sb)	24,02	B
Asit konsantrasyonu	\bar{X} (Renk b)	HG***
%5 Na (5N)	34,41	A

%3 Na (3N)	34,02	A
%3 Sa (3S)	29,36	B
%5 Sa (5S)	29,18	B
K%3 Na (K3N)	27,87	C
K%5 Na (K5N)	27,63	C
K%3Sa (K3S)	27,30	CD
K%5Sa (K5S)	26,94	D
Asit çözelti miktarı	\bar{X} (Renk b)	HG****
120 (I)	30,13	A
180 (III)	29,42	B
150 (II)	29,22	B
<i>LSD*=28,01, LSD**=0,3099, LSD***=0,6197, LSD****=0,1366</i>		

Ağaç türü bakımından sarı renk değeri en yüksek sarıçamda (56,61)'de, en düşük meşede (51,97), vernik çeşidi bakımından sarı renk değeri en yüksek

Nitekim, başka bir çalışmada vernik çeşidi bakımından sarı renk tonu değeri, en yüksek poliüretan vernikte, en düşük su bazlı vernikte bulunmuştur [25].

Asit çözelti miktarına göre, sarı renk değeri en yüksek I (30,13)'de, en düşük II ve III için yaklaşık eşit çıkmıştır. Buna göre asit çözelti miktarı arttıkça sarı renk değerinin düştüğü söylenebilir. Ağaç türü+vernik çeşidi, ağaç türü+asit çözelti miktarı,

Sn (35,16)'de, en düşük Sb (24,02)'de elde edilmiştir. Buna göre sentetik verniğin, sarı renk değerinde daha etkili olduğu söylenebilir.

Asit konsantrasyonuna göre sarı renk değeri en yüksek 5N (34,41)'de, en düşük 5S (29,18)'de bulunmuştur. Nitrik asitin sarı renk değerini artırıcı etki gösterdiği, sülfürik asitin ise azaltıcı etki gösterdiği söylenebilir.

vernik çeşidi+ asit çözelti miktarı, ağaç türü+asit konsantrasyonu, vernik çeşidi+asit konsantrasyonu, asit çözelti miktarı+asit konsantrasyonuna göre sarı (b) renk değerleri Çizelge 3.7'de verilmiştir.

Çizelge 3.7 Ağaç türü ve vernik çeşidi, ağaç türü ve asit çözelti miktarı, vernik çeşidi ve asit çözelti miktarı, ağaç türü ve asit kon., ağaç türü ve asit kon., vernik çeşidi ve asit kon., asit çözelti mikt.ve asit konsantrasyonu etkileşimine göre sarı (b) renk değeri (According to the interaction of wood type and varnish type, wood type and acid solution amount, varnish type and acid solution amount, wood type and acid concentration, wood type and acid concentration, varnish type and acid concentration, acid solution amount and acid concentration. yellow (b) color value)

Ağaç türü ve vernik Çeşidi	\bar{X} (Renkb)	HG* <i>LSD*=0,3099</i>	Ağaç türü ve vernik çeşidi	\bar{X} (Renk b)	HG*
Sç+Sn	37,35	A	Sç+Sb	24,05	C
M+Sn	32,97	B	M+Sb	23,98	C
Ağaç türü ve asit çözelti miktarı	\bar{X} (Renk b)	HG** <i>LSD*=0,5367</i>	Ağaç türü ve asit çözelti miktarı	\bar{X} (Renk b)	HG**
Sç+I	31,54	A	M+I	28,71	D
Sç+III	30,59	B	M+II	28,46	D
Sç+II	29,97	C	M+III	28,26	D
Vernik çeşidi ve asit çözelti miktarı	\bar{X} (Renk b)	HG*** <i>LSD*=0,5367</i>	Vernik çeşidi ve asit çözelti miktarı	\bar{X} (Renk b)	HG***
Sn+I	36,75	A	Sb+III	24,38	C
Sn+III	34,47	B	Sb+II	24,17	C
Sn+II	34,27	B	Sb+I	23,50	D
Ağaç türü ve asit kon.	\bar{X} (Renk b)	HG**** <i>LSD*=0,8764</i>	Ağaç türü ve asit kon.	\bar{X} (Renk b)	HG****
M+5N	34,89	A	Sç+K3S	29,11	FG
Sç+3N	34,58	AB	M+5S	28,27	GH
Sç+5N	33,93	BC	M+3S	28,13	H

M+3N	33,46	C	Sç+K5S	27,83	H
Sç+3S	30,59	D	M+K5S	26,04	I
Sç+5S	30,09	DE	M+K3N	25,83	I
Sç+K3N	29,92	DEF	M+K5N	25,70	I
Sç+K5N	29,56	EF	M+K3S	25,49	I

Asit çözelti mikt. ve asit kon.	\bar{X} (Renk b)	HG***** LSD*=1,073	Asit çözelti mikt. ve asit kon.	\bar{X} (Renk b)	HG*****
III+5N	36,00	A	III+K5N	28,60	EFG
I+3N	34,95	AB	I+K3S	28,47	FG
II+3N	34,11	BC	II+5S	28,45	FG
I+5N	33,71	C	II+K3N	28,05	G
II+5N	33,52	C	I+K5N	27,83	GH
III+3N	33,01	C	I+K5S	27,72	GHI
I+5S	30,15	D	II+K3S	26,87	HIJ
II+3S	29,77	DE	III+K3N	26,84	HIJ
I+3S	29,47	DEF	III+K5S	26,58	IJ
III+5S	28,94	EFG	III+K3S	26,57	IJ
III+3S	28,85	EFG	II+K5S	26,51	IJ
I+K3N	28,74	EFG	II+K5N	26,45	J
Vernik çeşidi ve asit kon.	\bar{X} (Renk b)	HG***** LSD*=0,8764	Vernik çeşidi ve asit kon.	\bar{X} (Renk b)	HG***** *
Sn+5N	39,80	A	Sb+5N	29,02	E
Sn+3N	39,75	AB	Sb+3N	28,30	E
Sn+3S	34,59	BC	Sb+5S	24,20	F
Sn+5S	34,16	C	Sb+3S	24,13	F
Sn+K3N	33,98	D	Sb+K5N	22,04	G
Sn+K3S	33,52	DE	Sb+K3N	21,77	GH
Sn+K5N	33,22	DEF	Sb+K5S	21,60	GH
Sn+K5S	32,27	EF	Sb+K3S	21,09	H

Ağaç türü ve vernik çeşidi etkileşimine göre, sarı renk değeri en yüksek Sç+Sn (37,35)'de, en düşük M+Sb (23,98), ağaç türü ve asit çözelti miktarı etkileşimi bakımından sarı renk değeri en yüksek Sç+I (31,54)'de, en düşük M+III (28,26), vernik çeşidi ve asit çözelti miktarı etkileşimine göre elde edilen sarı renk değeri en yüksek Sn+I (36,75)'de, en düşük Sb+I (23,5), ağaç türü ve asit konsantrasyonu etkileşimine göre sarı renk değeri en yüksek M+5N'de (34,89), en düşük M+3S'de (28,13), vernik çeşidi ve asit konsantrasyonu

etkileşimine göre sarı renk değeri en yüksek Sn+5N'de (39,80), en düşük Sb+3S'de (24,13), asit çözelti miktarı ve asit konsantrasyonu etkileşimine göre sarı renk değeri en yüksek III+5N (36,0)'de, en düşük II+5S (28,45)'de bulunmuştur. Literatürde, %10'luk sodyum borat ile yapılan emprenye işlemi renk değişiminde, kızılçamın sarı renk tonunda azalma görülürken, Doğu kayını ve Doğu ladininde artış olmuştur [26]. Sarı (b) renk değerleri üçlü etkileşimleri Çizelge 3.8'de verilmiştir

Çizelge 3.8. Üçlü etkileşime göre sarı (b) renk değerleri (Yellow (b) color values according to triple interaction)

Ağaç türü, vernik çeşidi ve asit çözelti mikt.	\bar{X} (Renk b)	HG* LSD*=0,7590	Ağaç türü, vernik çeşidi ve asit çözelti mikt.	\bar{X} (Renk b)	HG*
Sç+Sn+I	39,92	A	Sç+Sb+II	24,61	F
Sç+Sn+III	36,81	B	M+Sb+III	24,39	FG
Sç+Sn+II	35,33	C	Sç+Sb+III	24,37	FG
M+Sn+I	33,59	D	M+Sb+I	23,84	FGH

M+Sn+II	33,20	D	M+Sb+II	23,72	GH
M+Sn+III	32,12	E	Sç+Sb+I	23,17	H
Ağaç türü, vernik çeşidi ve asit konsantrasyonu	\bar{X} (Renk b)	HG** LSD*=-0,8764	Ağaç türü, vernik çeşidi ve asit kons.	\bar{X} (Renk b)	HG**
Sç+Sn+3N	43,59	A	M+Sn+K5N	30,59	H
Sç+Sn+5N	42,30	B	M+Sn+K3S	30,36	H
M+Sn+5N	37,31	C	Sç+Sb+5S	25,65	I
Sç+Sn+K3N	36,85	CD	Sç+Sb+3N	25,57	I
Sç+Sn+K3S	36,68	CD	Sç+Sb+5N	25,57	I
Sç+Sn+3S	35,94	D	Sç+Sb+3S	25,25	I
M+Sn+3N	35,91	D	Sç+Sb+K5N	23,27	J
Sç+Sn+K5N	35,85	D	M+Sb+3S	23,00	J
Sç+Sn+5S	34,54	E	Sç+Sb+K3N	22,98	J
M+Sn+5S	33,79	EF	M+Sb+5S	22,75	JK
M+Sn+3S	33,25	EF	Sç+Sb+K5S	22,57	JK
Sç+Sn+K5S	33,09	F	Sç+Sb+K3S	21,54	KL
M+Sb+5N	32,47	FG	M+Sb+K5N	20,81	L
M+Sn+K5S	31,45	GH	M+Sb+K5S	20,63	L
M+Sn+K3N	31,10	H	M+Sb+K3S	20,63	L
M+Sb+3N	31,02	H	M+Sb+K3N	20,56	L
Vernik çeşidi, asit çözelti mikt. ve asit kon.	\bar{X} (Renk b)	HG***	Vernik çeşidi, asit çözelti mikt. ve asit kon.	\bar{X} (Renk b)	HG***
Sn+I+3N	41,29	A	Sn+II+K5N	30,50	KL
Sn+I+5N	40,82	A	Sb+II+5N	29,15	LM
Sn+III+5N	40,70	A	Sb+I+3N	28,60	M
Sn+II+3N	39,83	A	Sb+II+3N	28,39	M
Sn+III+3N	38,12	B	Sb+III+3N	27,89	MN
Sn+II+5N	37,90	B	Sb+I+5N	26,60	N
Sn+I+K3S	36,02	C	Sb+II+3S	24,98	O
Sn+I+K3N	36,01	C	Sb+I+5S	24,88	O
Sn+I+3S	35,75	CD	Sb+III+3S	24,22	OP
Sn+I+5S	35,42	CDE	Sb+III+5S	23,99	OPQ
Sn+I+K5N	34,88	CDEF	Sb+II+5S	23,72	OPQR
Sn+II+3S	34,56	CDEF	Sb+I+3S	23,19	PQRS
Sn+III+K5N	34,27	DEFG	Sb+III+K5N	22,93	PQRST
Sn+II+K3N	33,94	EFG	Sb+II+K5N	22,41	QRSTU
Sn+III+5S	33,90	EFG	Sb+II+K3N	22,15	RSTU
Sn+I+K5S	33,84	EFG	Sb+III+K5S	21,78	STU
Sn+III+3S	33,48	FGH	Sb+III+K3N	21,70	STU
Sn+II+5S	33,18	FGHI	Sb+I+K5S	21,60	STU
Sn+II+K3S	32,63	GHIJ	Sb+I+K3N	21,46	STU
Sn+III+K3N	31,98	HIJK	Sb+I+K3S	21,42	STU
Sn+III+K3S	31,91	HIJK	Sb+III+K3S	21,24	TU
Sn+II+K5S	31,60	IJK	Sb+II+K3S	21,11	U
Sn+III+K5S	31,38	JK	Sb+I+K3S	20,91	U
Sb+III+5N	31,31	JK	Sb+I+K5N	20,78	U
Ağaç Türü + Asit Çözelti Mikt. + Asit Konsantrasyonu	\bar{X} (Renk b)	HG*	Ağaç Türü + Asit Çözelti Mikt. + Asit Konsantrasyonu	\bar{X} (Renk b)	HG*
M+III+5N	36,57	A	Sç+II+5S	28,59	NOPQ
Sç+I+3N	35,63	AB	M+II+3S	28,56	NOPQ
Sç+III+5N	35,43	AB	M+I+5S	28,49	NOPQ
Sç+II+3N	35,12	ABC	Sç+III+K3S	28,40	NOPQ
M+II+5N	34,66	BCD	M+II+5S	28,31	NOPQ
M+I+3N	34,26	BCD	Sç+II+K3S	28,02	OPQR
Sç+I+5N	33,98	BCDE	M+III+5S	28,00	OPQR
M+I+5N	33,44	CDEF	Sç+III+K3N	27,96	OPQR
M+II+3N	33,10	DEFG	Sç+III+K5S	27,28	PQRS
M+III+3N	33,02	DEFG	Sç+II+K5N	27,24	PQRS
Sç+III+3N	32,99	DEFG	Sç+II+K5S	27,03	QRST
Sç+II+5N	32,39	EFGH	M+III+3S	26,85	QRST
Sç+III+K5N	31,95	FGHI	M+I+K5S	26,25	RSTU
Sç+I+5S	31,80	FGHI	M+I+K5N	26,18	STU
Sç+I+K3N	31,39	GHIJ	M+I+K3N	26,08	STU
Sç+II+3S	30,97	HIJK	M+I+K3S	26,02	STU

Sç+I+K3S	30,91	HIJKL	M+II+K5S	25,99	STU
Sç+III+3S	30,84	HIJKL	M+III+K5S	25,88	STU
Sç+II+K3N	30,40	IJKLM	M+III+K3N	25,72	STU
Sç+I+3S	29,97	JKLMN	M+II+K3S	25,71	STU
Sç+III+5S	29,89	JKLMN	M+II+K3N	25,70	STU
Sç+I+K5N	29,49	KLMNO	M+II+K5N	25,67	STU
Sç+I+K5S	29,18	LMNO	M+III+K5N	25,25	TU
M+I+3S	28,97	MNOP	M+III+K3S	24,75	U
LSD*=1,518					

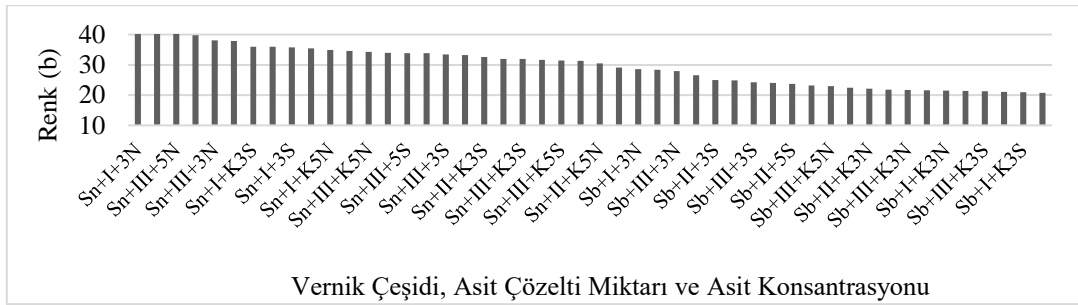
Ağaç türü, vernik çeşidi ve asit çözelti miktarı etkileşimine göre elde edilen sarı renk (b*) en yüksek Sç+Sn+I (39,92), en düşük ise Sç+Sb+I (23,17) de gözlemlenmiştir. Ağaç türü, vernik çeşidi ve asit konsantrasyonu etkileşimine göre sarı renk değeri en yüksek Sç+Sn+3N (43,59)'de, en düşük M+Sb+5S (22,75), Ağaç türü, asit çözelti miktarı ve asit konsantrasyonu etkileşimine göre sarı renk değeri en yüksek M+III+5N (36,57), en düşük M+III+3S (26,85) bulunmuştur.

Vernik çeşidi, asit çözelti miktarı ve asit konsantrasyonu etkileşimine göre sarı renk değeri en yüksek Sn+I+3N (41,29)'de, en düşük Sb+I+3S (23,19)'de bulunmuştur. Sarı renk değerinde asit

konsantrasyonu birinci derecede, vernik çeşidi ikinci derecede, asit çözelti miktarı ise üçüncü derecede etkili olmuştur.

Ağaç türü, asit çözelti miktarı ve asit konsantrasyonu etkileşimine göre sarı renk değeri en yüksek M+III+5N (36,57), en düşük M+III+3S (26,85) bulunmuştur. Sarı renk değerinde asit konsantrasyonu birinci derecede, ağaç türü ikinci derecede, asit çözelti miktarı ise üçüncü derecede etkili olmuştur.

Vernik çeşidi, asit çözelti miktarı ve asit konsantrasyonu etkileşimlerine göre sarı renk değişimlerine ait grafik Şekil 3.1'de gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Vernik çeşidi, asit çözelti miktarı ve asit konsantrasyonuna göre sarı renk değişimi (Yellow color change depending on varnish type, amount of acid solution and acid concentration)

Ağaç türü, vernik çeşidi, asit çözelti miktarı ve asit konsantrasyonunun sarı (b) renk değerine ilişkin çoklu varyans analizi sonuçları Çizelge 3.9'da verilmiştir.

Çizelge 3.9. Ağaç türü, vernik çeşidi, asit çözelti miktarı ve asit konsantrasyonunun sarı (b) renk değerine ilişkin çoklu varyans analizi (Multiple variance analysis regarding the yellow (b) color value of wood species, varnish type, amount of acid solution and acid concentration)

Varyans Kaynağı	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Ortalama Kareler	F Hesap	P<0,05
Faktör A	1	594,097	594,097	199,0943	0,0000
Faktör B	1	14904,320	14904,320	4994,7457	0,0000
AB	1	559,634	559,634	187,5451	0,0000
Faktör C	2	72,978	36,489	12,2283	0,0000
AC	2	35,627	17,813	5,9696	0,0028
BC	2	265,835	132,918	44,5435	0,0000
ABC	2	168,433	84,217	28,2228	0,0000
Faktör D	7	3730,989	532,998	178,6188	0,0000
AD	7	297,675	42,525	14,2510	0,0000
BD	7	76,168	10,881	3,6465	0,0008
ABD	7	815,919	116,560	39,0616	0,0000
CD	14	224,002	16,000	5,3620	0,0000
ACD	14	161,464	11,533	3,8650	0,0000

BCD	14	86,805	6,200	2,0779	0,0123
ABCD	14	164,765	11,769	3,9440	0,0000
Hata	384	1145,856	2,984		
Toplam	479	23304,568			

Ağaç türü, vernik çeşidi, asit çözelti miktarı ve asit konsantrasyonunun renk (b) renk değerine etkisi istatistiksel anlamda ($\alpha=0,05$) önemli çıkmıştır.

Gruplar arasında farklılığı görmek amacıyla yapılan Duncan testi sonuçları Çizelge 3.10'da verilmiştir.

Çizelge 3.10. Duncan testi sonuçları (Duncan test results)

İşlem Çeşidi	X (Sarı Renk)	HG	İşlem Çeşidi	X (Sarı Renk)	HG
Sç+Sn+I+3N	46,08	A	M+Sn+II+K5N	30,63	QRST
Sç+Sn+I+5N	44,76	AB	Sç+Sn+II+K5N	30,37	RST
Sç+Sn+III+5N	44,33	AB	M+Sb+II+3N	30,25	RST
Sç+Sn+II+3N	43,71	B	M+Sb+I+5N	30,02	RST
Sç+Sn+I+K3S	41,05	C	M+Sn+III+K5N	29,37	ST
Sç+Sn+III+3N	40,97	C	M+Sn+III+K3S	29,08	TU
Sç+Sn+I+K3N	40,63	C	Sç+Sb+II+5N	26,98	UV
Sç+Sn+III+K5N	39,16	CD	Sç+Sb+I+5S	26,60	VW
Sç+S+I+K5N	38,00	DE	Sç+Sb+II+3S	26,58	VW
M+Sn+II+5N	38,00	DE	Sç+Sb+II+3N	26,53	VW
Sç+Sn+II+5N	37,80	DEF	Sç+Sb+III+5N	26,53	VW
M+Sn+III+5N	37,06	DEFG	Sç+Sb+III+5S	25,64	VWX
Sç+Sn+I+5S	36,99	DEFG	Sç+Sb+III+3S	25,38	VWXY
M+Sn+I+5N	36,87	DEFG	Sç+Sb+I+3N	25,17	VWXYZ
Sç+Sn+II+K3N	36,76	DEFGH	Sç+Sb+III+3N	25,02	VWXYZ
M+Sn+I+3N	36,49	EFGHI	Sç+Sb+III+K5N	24,73	VWXYZ[
Sç+Sn+III+3S	36,31	EFGHIJ	Sç+Sb+II+5S	24,70	VWXYZ[
Sç+Sn+I+3S	36,14	EFGHIJK	Sç+Sb+II+K5N	24,11	WXYZ[\
M+Sb+III+5N	36,09	EFGHIJK	Sç+Sb+II+K3N	24,03	WXYZ[\
M+Sn+II+3N	35,95	EFGHIJK	Sç+Sb+I+3S	23,79	XYZ[\
Sç+Sn+I+K5S	35,67	EFGHIJKL	M+Sb+II+3S	23,37	XYZ[\]
Sç+Sn+II+3S	35,37	FGHIJKL	Sç+Sb+I+5N	23,19	XYZ[\]^
M+Sn+I+3S	35,36	FGHIJKL	M+Sb+I+5S	23,15	XYZ[\]^
M+Sn+III+3N	35,28	FGHIJKL	M+Sb+III+3S	23,06	XYZ[\]^_
Sç+Sn+III+K3S	34,74	GHIJKLM	Sç+Sb+III+K5S	22,85	YZ[\]^_`
Sç+Sn+II+K3S	34,25	HIJKLMN	Sç+Sb+III+K3N	22,77	YZ[\]^_`
Sç+Sn+III+5S	34,14	IJKLMNOP	M+Sb+II+5S	22,74	Z[\]^_`
M+Sn+II+5S	33,88	JKLMNOP	Sç+Sb+I+K5S	22,69	Z[\]^_`
M+Sn+I+5S	33,84	JKLMNOP	M+Sb+I+3S	22,58	Z[\]^_`
M+Sn+II+3S	33,74	JKLMNOP	M+Sb+III+5S	22,34	[\]^_`
M+Sn+III+5S	33,65	KLMNOP	Sç+Sb+II+K5S	22,15	[\]^_`
Sç+Sn+III+K3N	33,15	LMNOPQ	Sç+Sb+I+K3N	22,14	[\]^_`
Sç+Sn+II+5S	32,48	MNOPQR	Sç+Sb+III+K3S	22,05	[\]^_`
M+Sb+I+3N	32,04	NOPQRS	Sç+Sb+II+K3S	21,80	[\]^_`
M+Sn+I+K5S	32,00	NOPQRS	M+Sb+III+K5N	21,12	[\]^_`
Sç+Sn+II+K5S	31,91	NOPQRS	M+Sb+I+K3S	21,04	[\]^_`
M+Sn+I+K5N	31,76	NOPQRS	Sç+Sb+I+K5N	20,97	[\]^_`
Sç+Sn+III+K5S	31,71	NOPQRST	M+Sb+I+K3N	20,79	[\]^_`
M+Sn+I+K3N	31,38	OPQRST	Sç+Sb+I+K3S	20,78	[\]^_`
M+Sb+II+5N	31,32	OPQRST	M+Sb+III+K5S	20,72	[\]^_`

M+Sn+II+K5S	31,30	OPQRST	M+Sb+II+K5N	20,71	^_`
M+Sn+II+K3N	31,12	PQRST	M+Sb+II+K5S	20,68	^_`
M+Sn+III+K5S	31,06	QRST	M+Sb+III+K3N	20,62	^_`
M+Sn+II+K3S	31,00	QRST	M+Sb+I+K5N	20,59	^_`
M+Sn+I+K3S	31,00	QRST	M+Sb+I+K5S	20,50	^_`
M+Sn+III+K3N	30,81	QRST	M+Sb+III+K3S	20,43	_`
M+Sb+III+3N	30,76	QRST	M+Sb+II+K3S	20,42	_`
M+Sn+III+3S	30,65	QRST	M+Sb+II+K3N	20,27	`

Ağaç türü, vernik çeşidi, asit çözelti miktarı ve asit konsantrasyonu dörtlü etkileşimine göre sarı renk değeri en yüksek Sç+Sn+I+3N (46,08)'de, en düşük

M+Sb+III+5S (22,34)'de bulunmuştur. Sarı renk tonunda vernik çeşidi birinci derecede, ağaç türü ikinci derecede etkili olmuştur.

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Ağaç türüne göre kırmızı renk değeri en yüksek meşede (10,68), en düşük sarıçamda (8,935) bulunmuştur. Meşe odununda kırmızı renk değeri, sarıçamdan %16 daha yüksek çıkmıştır. Vernik çeşidine göre kırmızı renk değeri en yüksek sentetik vernikte (11,99), en düşük su bazlı vernikte (7,63) bulunmuştur. Sentetik vernikte kırmızı renk değeri, su bazlı vernikten %36 daha yüksek olmuştur. Asit konsantrasyonuna göre kırmızı renk değeri en yüksek %5 nitrik asitte (14,01), en düşük %3 sülfürik asitte (9,293) bulunmuştur. Nitrik asit değeri % 34 daha fazla çıkmıştır. Sülfürik asitin kırmızı renk tonunu düşürdüğü söylenebilir. Asit çözelti miktarına göre kırmızı renk değeri en yüksek 120 g/m²(10,36), en düşük 150 ve 180 g/m² de yaklaşık eşit (9,61-9,45) bulunmuştur. Kırmızı renk değerine asit çözelti miktarı için bakıldığında, 120 g/m² de %9 daha fazla bulunmuştur.

Ağaç türü ve vernik çeşidi etkileşimi bakımından kırmızı renk değeri, en yüksek M+Sn (13,21), en düşük Sç+Sb (7,107) bulunmuştur. M+Sn'de %46 daha fazla çıkmıştır. Ağaç türü ve asit çözelti miktarı etkileşimine göre kırmızı renk değeri en yüksek M+III 'de (10,91), en düşük Sç+III'de (7,997) bulunmuştur. Kırmızı renk değeri, M+III'de %27 daha fazla çıkmıştır. Vernik çeşidi ve asit çözelti miktarı etkileşimine göre kırmızı renk değeri en yüksek Sn+I'de (12,81), en düşük Sb+III'de (7,303) bulunmuştur. Kırmızı renk değeri, %43 daha fazla çıkmıştır. Ağaç türü ve asit konsantrasyonu etkileşimine göre kırmızı renk değeri en yüksek M+5N'de (14,77), en düşük Sç+3S'd (8,674) bulunmuştur. Kırmızı renk değerinde M+5N'de %41 daha fazladır. Vernik çeşidi ve asit konsantrasyonu etkileşimine göre kırmızı renk değeri en yüksek Sn+5N'de (16,13), en düşük Sb+3S'de (7,34) bulunmuştur.

Kırmızı renk değeri Sn+5N'de %50 daha yüksek elde edilmiştir. Asit çözelti miktarı ve asit

konsantrasyonu etkileşimine göre kırmızı renk değeri en yüksek II+5N (14,66), en düşük III+5S (8,784) bulunmuştur. II+5N'de kırmızı renk değeri %40 daha fazla çıkmıştır. Ağaç türü, vernik çeşidi ve asit çözelti miktarı etkileşimine göre kırmızı renk değeri en yüksek M+Sn+III (13,59), en düşük Sç+Sb+III (6,382) bulunmuştur. Ağaç türü, asit çözelti miktarı ve asit konsantrasyonu etkileşimine göre kırmızı renk değeri en yüksek M+III+5N (15,65), en düşük Sç+III+3S (7,875) bulunmuştur. M+III+5N'de %66 daha fazla olduğu hesaplanmıştır. Vernik çeşidi, asit çözelti miktarı ve asit konsantrasyonu etkileşimine göre kırmızı renk değeri en yüksek Sn+I+5N (12,64), en düşük Sb+I+3S (7,11) bulunmuştur. Kırmızı renk değeri, Sn+I+5N'de %30 daha fazla çıkmıştır. Ağaç türü, vernik çeşidi, asit çözelti miktarı ve asit konsantrasyonu dörtlü etkileşimine göre kırmızı renk değeri en yüksek M+Sn+I+5N (17,49)'de, en düşük Sç+Sb+I+3S (6,408)'de bulunmuştur. Kırmızı renk değeri, M+Sn+I+5N %63 daha fazla olduğu tespit edilmiştir.

Ağaç türüne göre elde edilen sarı renk değerleri en yüksek sarıçamda (56,61), en düşük meşede (51,97) bulunmuştur. Sarıçamda meşeye göre %8 daha fazla çıkmıştır. Vernik çeşidi bakımından sarı renk değeri en yüksek sentetik vernikte (35,16), en düşük su bazlı vernikte (24,02) elde edilmiştir. Sentetik vernik uygulanan numunenin sarı renk değeri su bazlı verniğe göre %31 daha fazla çıkmıştır. Asit konsantrasyonuna göre sarı renk değeri en yüksek 5N (34,41), en düşük 5S (29,18)'de bulunmuştur. Sarı renk değeri 5N'de %15 daha fazla çıkmıştır. Asit çözelti miktarına göre, sarı renk değeri en yüksek 120 g/m² (30,13), en düşük 180 ve 150 g/m² 'de (29,42-29,22) yaklaşık eşit çıkmıştır. Sarı renk değeri, 120 g/m²'de %4 daha fazla çıkmıştır. Ağaç türü ve vernik çeşidi etkileşimine göre, sarı renk değeri en yüksek Sç+Sn (37,35)'de, en düşük M+Sb (23,98)'de çıkmıştır. Sarı renk değeri, Sç+Sn'de %36 daha fazla olduğu görülmüştür.

Ağaç türü ve asit çözelti miktarı etkileşimi bakımından sarı renk değeri en yüksek Sç+II'de (31,54), en düşük M+III'de (28,26) bulunmuştur. Sç+Sn'de sarı renk değeri, M+III'e göre %10 daha fazla çıkmıştır. Vernik çeşidi ve asit çözelti miktarı etkileşimine göre elde edilen sarı renk değeri en yüksek Sn+I'de (36,75), en düşük Sb+I'de (23,5) elde edilmiştir. Sn+I'in sarı renk değeri %36 daha fazladır. Ağaç türü ve asit konsantrasyonu etkileşimine göre sarı renk değeri en yüksek M+5N'de (34,89), en düşük M+3S'de (28,13) bulunmuştur. M+5N'nin sarı renk değeri, M+3S'ye göre %19 daha fazla bulunmuştur. Vernik çeşidi ve asit konsantrasyonu etkileşimine göre sarı renk değeri en yüksek Sn+5N'de (39,80), en düşük Sb+3S'de (24,13) bulunmuştur. Sarı renk değeri, Sn+5N'de %40 daha fazla çıkmıştır. Asit çözelti miktarı ve asit konsantrasyonu etkileşimine göre sarı renk değeri en yüksek III+5N (36,0), en düşük II+5S (28,45) bulunmuştur. III+5N'de sarı renk değeri, %21 daha yüksektir.

Ağaç türü, vernik çeşidi ve asit çözelti miktarı etkileşimine göre elde edilen sarı renk (b) en yüksek Sç+Sn+I (39,92), en düşük ise Sç+Sb+I (23,17) de gözlemlenmiştir. Sarı renk değerinde Sç+Sn+I için değer %42 daha artmıştır. Ağaç türü, vernik çeşidi ve asit konsantrasyonu etkileşimine göre sarı renk değeri en yüksek Sç+Sn+3N (43,59), en düşük M+Sb+5S (22,75) bulunmuştur. Sç+Sn+3N'de sarı renk değeri, M+Sb+5S'ye göre %53 daha fazla çıkmıştır. Ağaç türü, asit çözelti miktarı ve asit konsantrasyonu etkileşimine göre sarı renk değeri en yüksek M+III+5N (36,57), en düşük M+III+3S (26,85) bulunmuştur. M+III+5N'de %26 daha fazla çıkmıştır. Vernik çeşidi, asit çözelti miktarı ve asit konsantrasyonu etkileşimine göre sarı renk değeri en yüksek Sn+I+3N (41,29)'de, en düşük Sb+I+3S (23,19)'de bulunmuştur. Sarı renk değeri Sn+I+3N'de %44 daha fazla çıkmıştır. Ağaç türü, vernik çeşidi, asit çözelti miktarı ve asit konsantrasyonu dördü etkileşimine göre sarı renk değeri en yüksek Sç+Sn+I+3N (46,08)'de, en düşük M+Sb+III+5S (22,34)'de bulunmuştur. Sarı renk değeri, Sç+Sn+I+3N'de %51 daha fazla çıkmıştır.

Literatürde ve yapılan araştırmadaki paralel sonuçlarda görüldüğü gibi açık hava şartları ağaçların renginde değişikliğe, sararmaya ve bozarmaya sebep olmaktadır.

ACKNOWLEDGMENTS (TEŞEKKÜR)

If the study was supported by a research institution or fund, the name of the supporting institution/organization and the project number

should be written. / Çalışma araştırma kurumu veya fonu tarafından desteklenmiş ise destek sağlayan kurum/kuruluş adı ve proje numarası yazılmalıdır.

DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS (ETİK STANDARTLARIN BEYANI)

Bu makalenin yazarı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler

AUTHORS' CONTRIBUTIONS (YAZARLARIN KATKILARI)

Nisanur YILDIZ: Deneyle yapılmış, sonuçlarını analiz etmiştir.

Beyza Nur KARABAL: Sonuçları analiz etmiş ve makalenin yazımını gerçekleştirmiştir.

Cansu ÖZDER: Sonuçları analiz etmiş, makalenin yazımını gerçekleştirmiştir.

Musa ATAR: Deneyle yapılmış, sonuçlarını analiz etmiştir. Makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

CONFLICT OF INTEREST (ÇIKAR ÇATIŞMASI)

There is no conflict of interest in this study.

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

5. KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Feist, W. C., and Hon, D. N. S. Chemistry of weathering and protection. The Chemistry of Solid Wood. 1984; 207, 401-451.
- [2] Sümer, G. Ç. Hava kirliliği kontrolü: Türkiye'de hava kirliliğini önlemeye yönelik yasal düzenlemelerin ve örgütlenmelerin incelenmesi. Uluslararası İktisadi ve İdari İncelemeler Dergisi, 2014;13, 37-56.
- [3] İnternet:Ankara Açık Ders,Asit Yağışlar. URL: https://acikders.ankara.edu.tr/pluginfile.php/15356/mod_resource/content/0/4.%20hafta
- [4] Hook, J, Jacox, P., and Spence, J. Acid rain effects on the exterior durability of architectural coatings on wood. Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 1994 ;9(5), 500-550.
- [5] İlhan, A., Balta, T., ve Rasar, G. Asit yağmurları teknik raporu. Araştırma Dairesi Başkanlığı Çevre Şube Müdürlüğü, Ankara,2018; 1-27.
- [6] Williams, R., Winandy, J. E. and Feist, W. C. Outdoor wood weathering and protection. Washington DC: American Chemical Society, 1987;263-298.
- [7] Kılıç, A. ve Hafizoğlu, H. Açık hava koşullarının ağaç malzemenin kimyasal

- yapısında meydana getirdiği değişimler ve alınacak önlemler. *Turkish Journal of Forestry*, 2007; 8(2), 175-183.
- [8] Zhang, Y., Li, Q., Zhang, F. and Xie, G. Estimates of economic loss of materials caused by acid deposition in china. *Challenges and Responses To Population Health and Urbanization In The 21st Century*, 2017; 9(4), 488.
- [9] İnternet: The Causes and Effects of Acid Rain, URL: www.hubgages.com
- [10] Feist, W. C. Weathering performance of painted wood pretreated with water-repellent preservative. *Forest Products Journal*, 1990; 40(7-8), 21-26
- [11] Irwin, J.G. and Williams, M.L. Acid rain: chemistry and transport. *Environ Pollution*, 1988; 50(1-2), 29-59.
- [12] Budakçı, M. ve Karamanoğlu, M. Açık hava koşullarının odunun bazı fiziksel özelliklerine etkileri. *Kastamonu University Journal of Forestry Faculty*, 2014; 14(1), 37-47.
- [13] Temiz, A., Gezer, E. D., Çakır, U. and Yıldız, S. Combustion properties of alder (*Alnus glutinosa* L.) Gaertn. Subsp. *Barbata* (C.A. Mey) Yalt.) and southern pine (*Pinus sylvestris* L.) wood treated with boron compound. *Construction and Building Materials*, 2008; 22(11), 2165-2169.
- [14] Sanchez JA, Lopez de Lacalle LN, Lamikiz A, Bravo U. Dimensional accuracy optimisation of multi-stage planetary EDM. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2002; 42: 1643–1648.
- [15] Sönmez, A. ve Budakçı, M. Ağaçışlerinde üstyüzey işlemleri II. (1. Baskı). Ankara: İndeks İletişim, 2004; 14-90.
- [16] Yurtseven, G. Gümüşçülük işletmelerinde maliyetlerin oluşumu ve bir uygulama. Yüksek Lisans Tezi, Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Çanakkale. 2010
- [17] ASTM D 358, “Standard specification for wood to be used as panels in weathering tests of coatings”, ASTM Standards, USA..1988
- [18] ASTM-D3023. Standard practice for determination of resistance of factory-Applied coatings on wood products to stains and reagent. American Society for Testing and Materials, USA.2017
- [19] ASTM–D 2224–2 E1. Standard practice for calculation or color tolerances and color differences from instrumentally measured color coordinate. American Society for Testing and Materials, USA. 2003
- [20] Johansson, D. Strength and colour response of solid wood to heat treatment. Licentiate Thesis, Luleå University of Technology Department of Skellefteå Campus, Division of Wood Technology, 2005; 93, 85.
- [21] Oliver, J. R., Blakeney, A. B. and Allen, H. M. Measurement of flour color in color space parameter. *Journal of Chemical Information and Modeling* 2009; 53(3), 556–581.
- [22] Yalınkılıç, A.C. Verniklerin renklendirilmiş ahşap malzemede sarı ton üzerindeki etkisi. *Turkish Journal of Forestry*, 2021; 22(1): 43-48
- [23] Sönmez, A., Dış Hava Şartlarının Vernikli Yüzeylerdeki Renk Değiştirici Etkisi, G.Ü. Endüstriyel Teknoloji Dergisi, Sayı 2, Ankara 1996
- [24] Özçifçi, A., Atar, M. Bazı kimyasal maddelerin karaağaç (*Ulmus campestris* Spach) odununun renk tonuna etkileri. *Teknoloji*, 2002; Sayı 1-2, 21-28
- [25] Soylamış D., “Su İtici Emprenye Maddelerinin Üstyüzey İşlemlerine Etkisi”, Yüksek lisans tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. 2007
- [26] Söğütlü, C., Döngel, N. Emprenye işleminin ağaç malzeme yüzey pürüzlülüğü ve renk değişimine etkisi. *Politeknik Dergisi*. Cilt:12, 2009; Sayı:3 s.179-184.

Sürtünme Karıştırma Yöntemi ile Al6061/TiB₂/B₄C/GNL Hibrit Yüzey Kompozitlerin Üretimi ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi

Burcu ŞAHİNGÖZ¹ , Halil KARAKOÇ^{2*} , Ramazan ÇITAK³ 

^{1,3}Department of Metallurgy and Materials Eng., Gazi University, 06500 Ankara, Turkey

²Department of Mechanical Program, Hacettepe University, 06930, Ankara, Turkey

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 12/02/2024
Düzeltilme: 14/03/2024
Kabul: 14/03/2024

Anahtar Kelimeler

AL6061, TiB₂, B₄C, grafen nano levha, Hibrit, Sürtünme karıştırma yöntemi, Mikroyapı, Mekanik özellikler, Aşınma.

Article Info

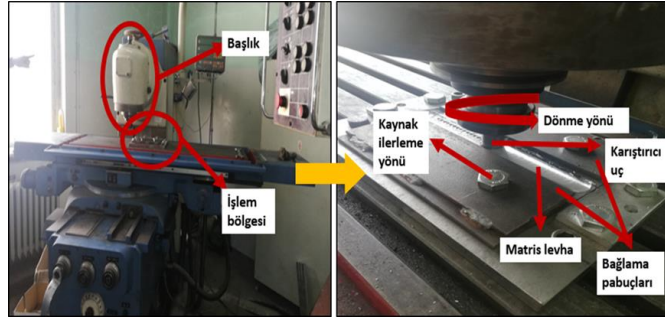
Research article
Received: 12/02/2024
Revision: 14/03/2024
Accepted: 14/03/2024

Keywords

AL6061, TiB₂, B₄C, Graphene nano plated, Hybrid, Friction stir process, Microstructure, Mechanical Properties, Wear.

Grafik Özet (Graphical/Tabular Abstract)

Bu çalışma, sürtünme karıştırma yöntemi (SKY) kullanılarak farklı oranlarda TiB₂/B₄C/ Grafen nano levha/ takviyeli hibrit yüzey kompozitlerinin üretimini ve mekanik özelliklerinin incelenmesini ele almaktadır. /This study focuses on the production and characterization of hybrid surface composites reinforced with varying ratios of TiB₂/B₄C/ Graphene nanoplate/ using the friction stir process (FSP) method.



Şekil A: SKY için kullanılan FU 400x1600 V1 Universal Freze Tezgâhi ve işlem bölgesi / Figure A: FU 400x1600 V1 Universal Milling Machine and processing area used for FSP

Önemli noktalar (Highlights)

- FSP method used to produce surface composites of AL6061 alloy with B₄C, TiB₂, and GNP hybrid particles.
- Tensile strength highest in 49% TiB₂ + 49% B₄C + 2% GNL surface composite.
- Improved wear properties with B₄C and GNL additions, with increased GNL content correlating with decreased volume loss.

Amaç (Aim): Bu çalışmanın ana hedefi, SKY ile üretilen farklı oranlarda TiB₂/B₄C/Grafen nano levha takviyeli AL6061 alaşımının mekanik özelliklerini ve mikroyapısını incelemektir. / The main objective of this study is to investigate the mechanical properties and microstructure of AL6061 aluminum alloy reinforced with different ratios of TiB₂/B₄C/Graphene nano plate using Friction Stir Mixing (FSM) method.

Özgünlük (Originality): Bu çalışmada, AL6061 alüminyum alaşımına sürtünme karıştırma yöntemi (SKY) ile farklı oranlarda TiB₂/Grafen nano levha/B₄C takviyeli hibrit yüzey kompozitleri üretilmiştir. / In this study, hybrid surface composites reinforced with different ratios of TiB₂/graphene nano platelets/B₄C were produced using friction stir mixing (SKY) method on AL6061 aluminum alloy.

Bulgular (Results): Üretilen kompozitlerin mekanik özellikleri ve mikroyapı analizleri incelenmiş, takviyesiz alaşımda en düşük çekme dayanımı elde edilmiştir; B₄C ve GNL ilavesi ile aşınma özellikleri iyileşmiştir. / The mechanical properties and microstructure analyses of the produced composites were examined, revealing the lowest tensile strength in the unreinforced alloy, while the addition of B₄C and GNP improved wear properties.

Sonuç (Conclusion): Bu araştırma, TiB₂/Grafen nano levha/B₄C takviyeli hibrit yüzey kompozitlerinin üretimi ve karakterizasyonunu ele almaktadır. Yapılan deneyler sonucunda, takviyeli kompozitlerin mekanik özelliklerinde artışlar görülmüştür. Ayrıca, aşınma direnci ve sürtünme katsayısı gibi önemli özelliklerde iyileşmeler gözlemlenmiştir. / This study addresses the production and characterization of TiB₂/Graphene nanoplatelet/B₄C hybrid surface composites. Experimental results showed enhancements in the mechanical properties of the reinforced composites. Moreover, improvements in important properties such as wear resistance and friction coefficient were observed.



Sürtünme Karıştırma Yöntemi ile AL6061/TiB₂/B₄C/GNL Hibrit Yüzey Kompozitlerin Üretimi ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi

Burcu ŞAHİNGÖZ¹ , Halil KARAKOÇ^{2*} , Ramazan ÇITAK³

^{1,3}Department of Metallurgy and Materials Eng., Gazi University, 06500 Ankara, Turkey

²Department of Mechanical Program, Hacettepe University, 06930, Ankara, Turkey

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 12/02/2024
Düzeltilme: 14/03/2024
Kabul: 14/03/2024

Anahtar Kelimeler

AL6061, TiB₂, B₄C, grafen nano levha, Hibrit, Sürtünme karıştırma yöntemi, Mikroyapı, Mekanik özellikler, Aşınma.

Öz

Bu çalışmada sürtünme karıştırma yöntemi (SKY) ile AL6061 alüminyum alaşımı ve farklı oranlarda TiB₂/Grafen nano levha/B₄C takviyeli hibrit yüzey kompozitleri üretilmiş ve mekanik özellikleri ile mikroyapı analizleri yapılmıştır. AL6061 altlığı üzerine 2 mm sabit aralıklarla 3 mm çapında ve 1.5 mm derinliğinde delikler açılmış, açılan bu deliklere farklı oranlarda karıştırılmış TiB₂/Grafen nano levha/B₄C tozları doldurulmuştur. Takviye tozları ultrasonik ve mekanik olarak karıştırılmıştır. Sürtünme Karıştırma yöntemi ile 7 farklı takviye oranında yüzey kompoziti aynı profilde karıştırıcı uç kullanılarak sabit hızda üretilmiştir. Üretilen kompozitlerin çekme dayanımları, farklı yüklerdeki aşınma dirençleri ve sertlikleri belirlenmiştir. Ayrıca optik ve SEM mikroskoplar ile mikroyapı, kırık yüzey ve aşınma yüzeyi analizleri ile element haritalaması yapılmıştır. En düşük çekme dayanımı takviyesiz alaşımda elde edilirken TiB₂, nano grafen ve B₄C ilaveli yüzey kompozitlerin dayanımı artmıştır. Mikroyapılarda herhangi bir gözenek ve boşluk tespit edilmemiştir. Kırık yüzeylerde takviye elemanı arttıkça gevrek kırılmaların meydana geldiği görülmüştür. B₄C ve GNL ilavesi ile birlikte aşınma özelliklerinin iyileştiği görülmüştür.

Production and Investigation of Mechanical Properties of AL6061/TiB₂/B₄C/GNP Hybrid Surface Composites with Friction Stir Process

Article Info

Research article
Received: 12/02/2024
Revision: 14/03/2024
Accepted: 14/03/2024

Keywords

AL6061, TiB₂, B₄C, Graphene nano plated, Hybrid, Friction stir process, Microstructure, Mechanical Properties, Wear.

Abstract

In this study, hybrid surface composites reinforced with TiB₂/Nano Graphene/B₄C at different ratios were produced using the friction stir process (FSP) method with AL6061 aluminium alloy, and their mechanical properties and microstructure analyses were conducted. On the AL6061 substrate, holes with a diameter of 3 mm and a depth of 1.5 mm were drilled at fixed intervals of 2 mm, and these holes were filled with TiB₂/Graphene nano plate/B₄C powders mixed at different ratios. The reinforcement powders were mixed ultrasonically and mechanically. Surface composites at 7 different reinforcement ratios were produced at a constant speed using the friction stir mixing method with the same profiled mixing tool. Tensile strengths, wear resistances at different loads, and hardness of the produced composites were determined. Additionally, optical and SEM microscopes were used for microstructure analysis, and element mapping was performed on fractured surfaces and worn surfaces. While the lowest tensile strength was obtained in the unreinforced alloy, the strength of surface composites with TiB₂, Graphene nano plate, and B₄C additions increased. No pores or voids were detected in the microstructures. It was observed that as the reinforcement element increased, brittle fractures occurred on the fractured surfaces. It was observed that the wear properties improved with the addition of B₄C and GNP.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Alüminyum ve alaşımları, hafif, sünek ve iyi korozyon özelliklerinden dolayı özellikle havacılık, otomotiv sektörleri ve askeri alanlarda büyük ölçüde kullanılmaktadır [1-2]. İyi şekil kabiliyetine sahip olan bu Al alaşımlarının aşınma dirençlerini

iyileştirebilmek ve yüksek mukavemet kazandırabilmek için ikincil ve üçüncül seramik parçacık ilaveleri yapılabilmektedir [3-4]. Bu tip malzemelere Al esaslı seramik parçacık ilaveli kompozit malzemeler denilmektedir [5-6]. Al esaslı kompozit malzemelerin (AEKM), başlıca sıvı metalürjisi ve toz metalürjisi (TM) olmak üzere

birbirinden farklı üretim metotları bulunmaktadır [7-8]. Her tarafında homojen dağılımlı bir kompozit malzeme üretmek yerine ticari Al alaşımlarının yüzeyine seramik parçacıklar kaplanarak yüzey özellikleri geliştirilebilirler [9]. Bu tip kaplamalı kompozit malzemelere yüzey kompozitler denilmektedir [10]. Son zamanlarda bilim insanlarının yüzey kompozitler üretmek için sürtünme karıştırma yöntemi (SKY) kullanılmaktadır [11-12]. Bu işlem ile Al alaşımının ana özelliklerini korurken yüzey özelliklerini iyileştirmek mümkündür [13-14]. Böylelikle daha az takviye elemanı ilave edileceğinden düşük maliyetli kompozit malzeme üretimi gerçekleştirilecektir [15]. SKY ile yüzey kompoziti üretiminde ilk olarak ticari Al alaşımı yüzeyine seramik parçacıkların ilavesi için ardışık aralıklar ile delik delinir veya çeşitli geometrilere kanallar açıldıktan sonra kanallara seramik parçacıklar ilave edilir [16]. SKY için pim ve omuzdan meydana gelen aynı zamanda sürtünme karıştırma kaynağında (SKK) kullanılan karıştırma uç takımı kullanılır [17-18]. Pim iş parçasının içine battığında omuzda iş parçasının yüzeyine temas eder [19]. Takım dönme hızı ile birlikte iş parçası ile dönen uç arasında sürtünmeden dolayı ısı oluşur [20]. Isının etkisi ile birlikte A alaşımı yumuşar ve kanal içerisindeki seramik parçacıklar Al alaşımı içerisinde dağıtılır [21]. Böylelikle yüzeyde seramik parçacık dağılımlı yüzey kaplamalı kompozit malzemeler üretilmiş olur [22]. Başta malzeme ve takviye elemanı olmak üzere SKY ile üretilen yüzey kompozitlerin mekanik özelliklerini etkileyen pek çok parametre vardır [23]. SKY ile üretilen yüzey kompozitlere tek tip seramik parçacık ilavesi yapılabildiği gibi birden fazla (hibrit) seramik parçacık ilavesi de yapılabilmektedir [24-25]. Hibrit seramik parçacık

ilaveli kompozit malzemeler birden fazla takviye elemanının farklı özelliklerini bir araya getirdiğinden üstün mekanik ve korozif özellikler sergileyebilmektedir [26-27]. Takviye elemanları arasında titanyum diborür (TiB_2), yüksek sertlikte olması, yüksek erime noktası, iyi termal iletkenlik, kimyasal kararlılık gibi özelliklerinde dolayı son zamanlarda en çok çalışılan takviye elemanları arasında yer almaktadır [28]. Bor karbür (B_4C) dünya genelinde en sert madenlerden biri olması sebebi ile özellikle aşınmaya karşı iyi bir direnç sağlamaktadır [29]. Ayrıca, B_4C 'nin hafifliği, Yüksek sıcaklık dayanımı, kimyasal direnç ve nötron yakalama yeteneği olmasında dolayı en çok çalışılan takviye elemanları arasındadır [29-30]. Grafen nano levhalar (GNL), tek atom kalınlığında olmaları, eşsiz mekanik özelliklere sahip olmalarını sağlar [31]. Ayrıca, GNL yüksek termal iletkenlik, elektriksel iletkenlik, geniş bir kimyasal dayanıklılık ve yağlayıcı gibi özelliklerinden dolayı nano teknolojide oldukça tercih edilmektedir [31-32].

Ticari Al6061 alaşımı hafif, yüksek şekil kabiliyeti ve yüksek korozyon özelliklerine sahip olmasına karşın aşınmaya karşı dirençleri oldukça zayıftır. Bu çalışmada SKY ile ticari Al6061 alaşımının sadece yüzeyine hibrit (TiB_2 - B_4C ve GNL) parçacık ilavesi yapılarak otomotiv sektörü ve savunma sanayinde kullanılabilecek aşınmaya karşı dirençli yeni nesil yüzey kompozit malzeme üretilmiştir.

2. MATERIALS AND METHODS (MATERIAL VE METOD)

Bu çalışmada altlık malzemesi olarak kimyasal bileşimi Çizelge 1'de mekanik özellikleri Çizelge 2 de verilen AL6061 alüminyum alaşımı kullanıldı.

Çizelge 1. Al6061 Kimyasal bileşimi (Chemical composition of Al6061)

Fe	Si	Cu	Mn	Mg	Zn	Cr	Ti	Diğer	Al
0,7	0,4-0,8	0,15-0,4	0,15	0,8-0,12	0,25	0,04-0,35	0,15	0,15	Kalan

Çizelge 2. Al6061 mekanik özellikleri (Al6061 mechanical properties)

Akma Mukavemeti (MPa)	240-270
Çekme Mukavemeti (MPa)	260-310
Uzama (%50)	20
Sertlik (Brinel)	95

Çalışma kapsamında 7 farklı yüzey kompozit malzeme üretildi. Bu malzemelerden biri takviyesiz AL6061 alaşımı diğerleri ise Çizelge 3’de karışım oranları verilen yüzey takviyelerle üretildi. Yapılan çalışmalarda 20 µm parçacık boyutunda B₄C, 10 µm parçacık boyutunda TiB₂ ve nano grafen kullanıldı.

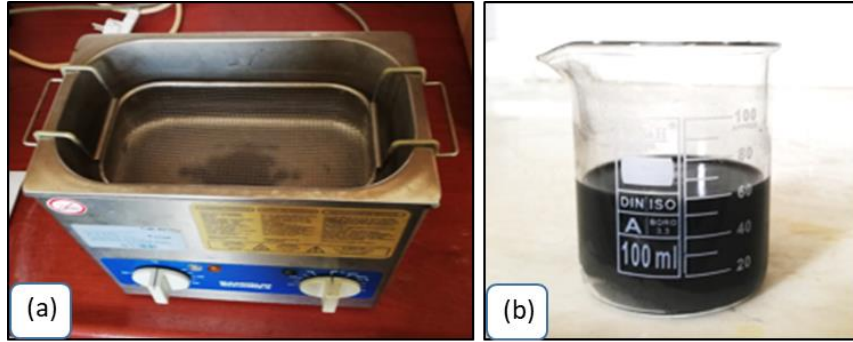
7 farklı yüzey kompozit malzeme üretildi. Bu malzemelerden biri takviyesiz AL6061 alaşımı, diğerleri ise Çizelge 7.3.te karışım oranları verilen yüzey takviyelerle üretilen yüzey kompozit malzemeleridir.

Çizelge 3. Yüzey takviye tozlarının karışım oranları (Mixing ratios of surface reinforcement powders)

Malzeme kodu	Toz karışımı
N1	AL6061 alaşım tozu
N2	100% TiB ₂
N3	50% TiB ₂ + 50% B ₄ C
N4	99.5% TiB ₂ + 0.5% GNL
N5	98% TiB ₂ + 2% GNL
N6	49.75% TiB ₂ + 49.75% B ₄ C + 0.5% GNL
N7	49% TiB ₂ + 49% B ₄ C + 2% GNL

Çizelge 3’de oranları verilen B₄C, TiB₂ ve nano grafen içeren tozlar, nano grafenler levhalar arası çekim kuvvetinden kaynaklı oluşabilecek topraklanmaların önüne geçmek için öncelikle Şekil

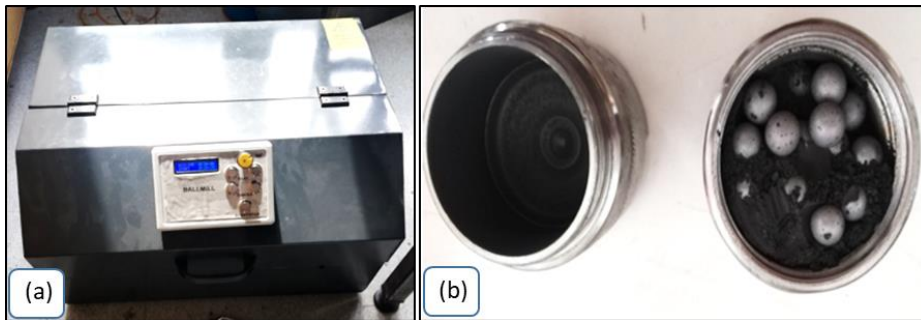
1-a’da verilen Bandelin RK 100H Ultrasonik banyo cihazı ile 30 cc metanol içerisinde 30 dakika süreyle ultrasonik olarak karıştırıldı.



Şekil 1. Bandelin RK 100H marka ultrasonik banyo cihazı a) 30 cc metanol toz karışımı b) (Bandelin RK 100H brand ultrasonic bath device a) 30 cc methanol powder mixture b))

Ultrasonik banyoda karıştırılan tozlar kurutulduktan sonra Gazi Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği bölümünde bulunan bilyeli karıştırıcıda 300 rpm dönme hızında, 30 dakika süreyle karıştırıldı. Karıştırma işleminde Şekil 2-a-b’de verilen toplam toz karışım ağırlığının 5/1 oranında toplam bilye çapı olacak kadar 2344 serisi,

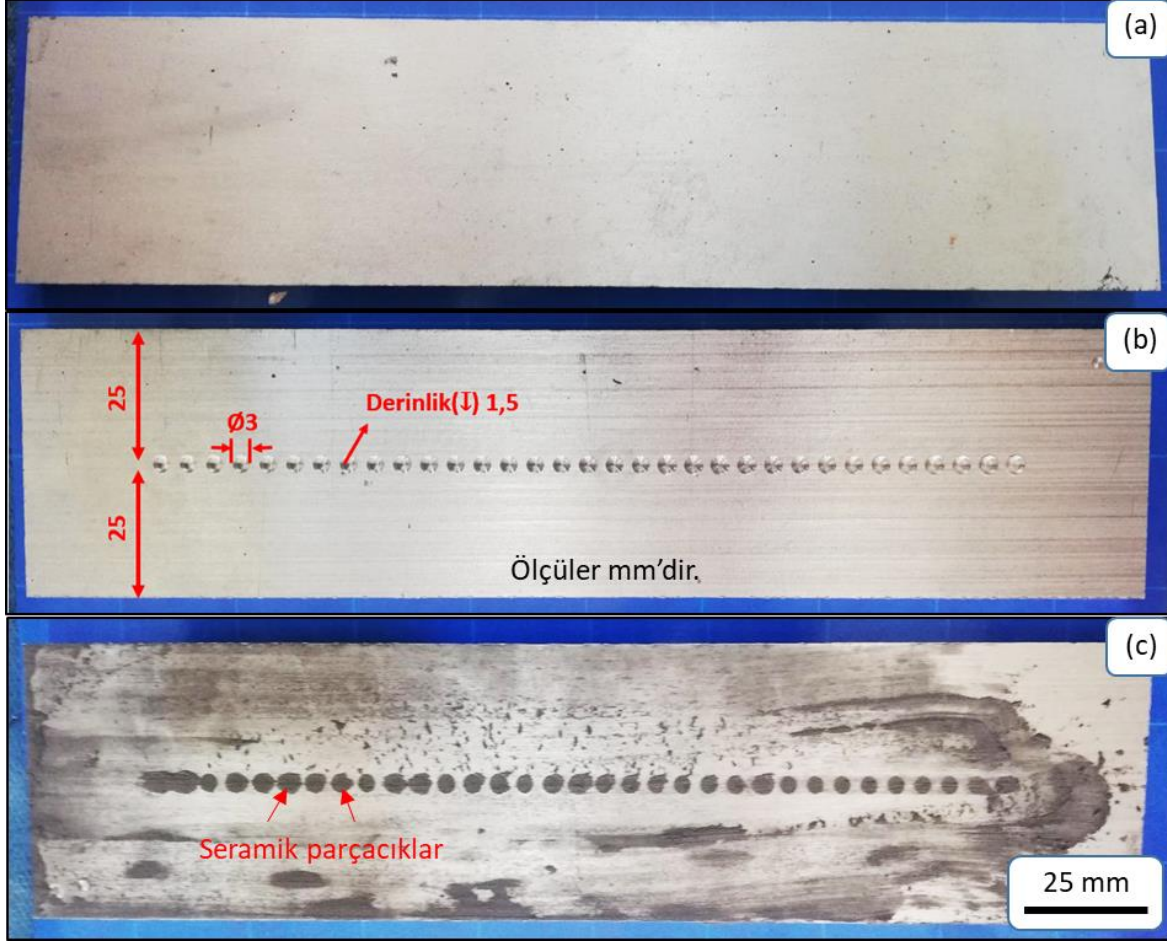
H13 kalitesi, 55 RWC sertliğindeki sıcak iş takım çeliği bilye kullanıldı. Bilyeli karıştırıcıda kullanılacak bilye çapı toplam; toplam toz ağırlığının 5/1 katı olacak şekilde; 20x5=100 mm kadardır. Bu hesaplama göre kullanılan bilye adedi ve çapı; 30 adet 3 mm, 1 adet 10 mm’dir.



Şekil 2. a) Bilyalı karıştırıcı b) sıcak iş takım çeliği bilye (a) Ball mixer b) hot work tool steel ball

Şekil 3-a'da görüntüsü verilen AL6061 altlık malzemesi 210x50x8 mm boyutlarında kesildi. Altlık AL6061 malzemesine Gazi Üniversitesi İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı CNC laboratuvarındaki JOHNFORD VMC-550 marka, bilgisayar denetimli CNC torna tezgâhında Şekil 3-b'de görüntüsü verilen 2 mm aralıklar ile 3 mm

delindi. İlk deliğin merkezi her bir kenara 25 mm uzaklıkta olacak şekilde konumlanıp diğer delikler verilen mesafede sırasıyla delindi. Hazırlanan tozlar her biri farklı altlık levhaya yerleştirilecek şekilde deliklere öncelikle bir çubuk sonrasında ise parmakla bastırarak Şekil 3-c'de verildiği şekilde sıkıştırıldı.



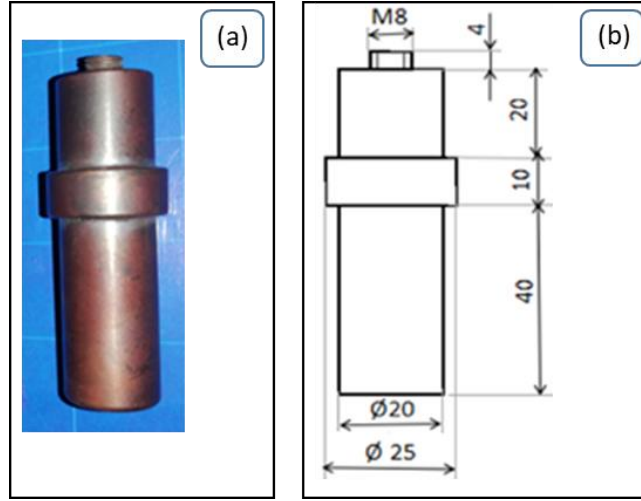
Şekil 3. a) Al6061 altlık malzemesi b) Delikleri açılan AL6061 altlık levha c) Takviye toz doldurulmuş AL6061 altlık (a) Al6061 backing material b) AL6061 backing plate with drilled holes c) AL6061 backing filled with reinforcement powder)

Karıştırma ucu olarak kimyasal kompozisyonu Çizelge 4'de, makro görüntüsü ve boyutları Şekil 4'de verilen 8 mm çapında, 4 mm derinliğinde

Böhler W302 marka 2344 serisi sıcak iş takım çeliği kullanıldı. Karıştırıcı uç bilgisayar denetimli CNC torna tezgâhında işlenerek hazırlandı.

Çizelge 4. 2344 takım çeliği kimyasal kompozisyonu (Chemical composition of 2344 hot work tool steel)

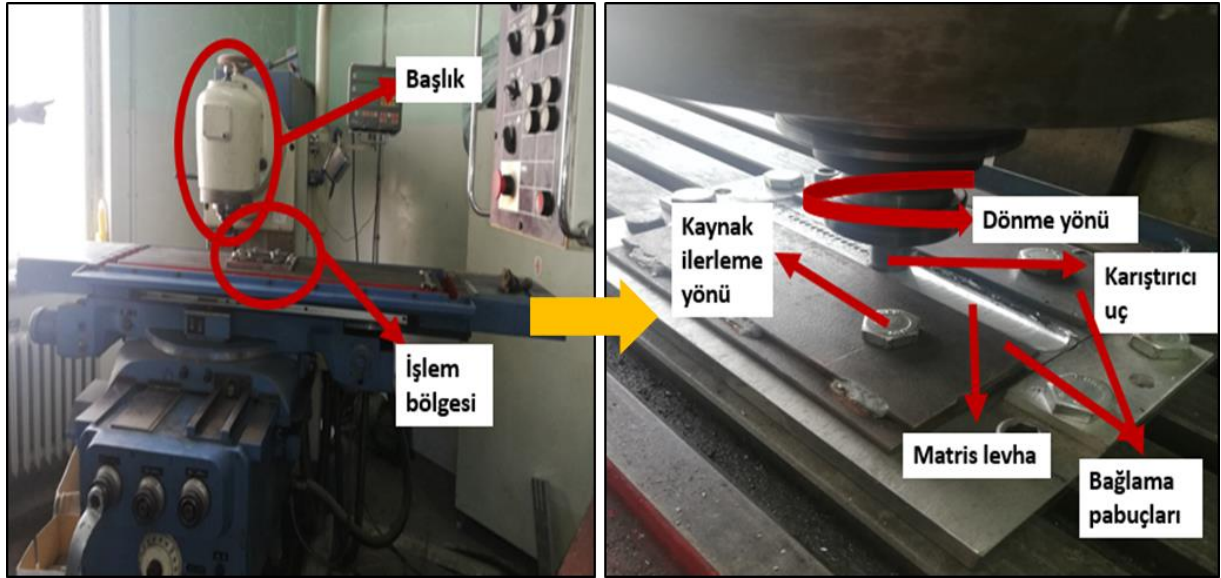
C	Si	Mn	Cr	Mo	V
0,39	1	0,38	5,15	1,3	1



Şekil 4. a) Karıştırıcı uç makro görüntüsü b) teknik resim ölçüleri (a) Mixer tip macro view b) drawing dimensions)

Şekil 5’de verilen Gazi Üniversitesi İmalat Mühendisliği bölümünde bulunan FU 400x1600 V1 Universal Freze Tezgâhında kullanılarak Sürtünme

Karıştırma Kaynak Yöntemi ile hibrit yüzey kompozit üretimi gerçekleştirildi.



Şekil 5. SKY için kullanılan FU 400x1600 V1 Universal Freze Tezgâhı ve işlem bölgesi (FU 400x1600 V1 Universal Milling Machine and processing area used for FSP)

1400 devir/dk, 20 mm/dk ilerleme hızında işlem yapıldı. İlk olarak takım malzemesi SKY uygulanacak alana 1400 devir/dk dönme hızı ile indirilerek sürtünme ısı elde edildi. 3° takım eğim açısı ile levha ve takım omzu arasında boşluk kalmaması amaçlanarak yüzeyden 4,5 mm dalma derinliğine ulaşıldı. Matris malzemesinin yumuşaması için takım ucu levhaya daldırıldıktan sonra 10 saniye bekletilerek ilerleme yapıldı. Elde

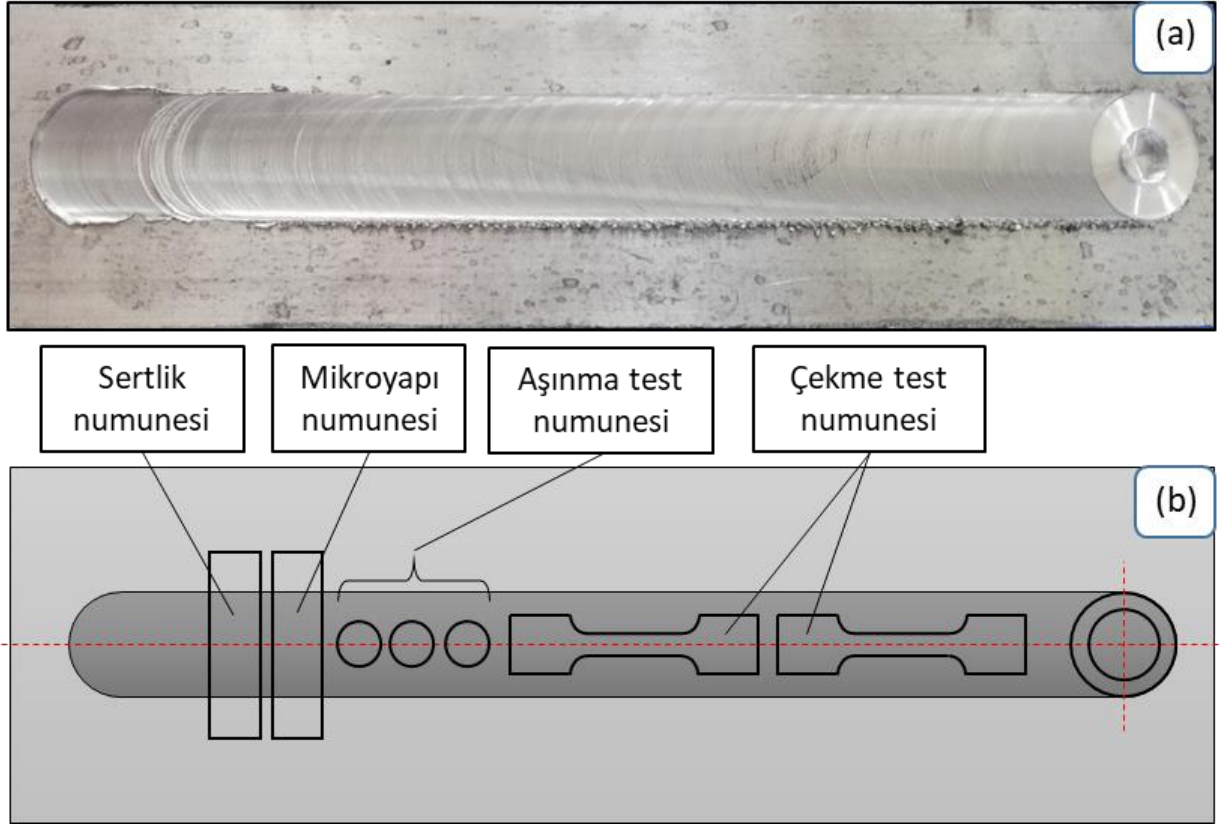
edilen gerekli ısı sonrası freze tezgâhı ayarlanan ilerleme hızıyla hareket ettirildi. Takviyesiz matris malzemesi ve 6 farklı toz karışımıyla toplam 7 adet malzemenin tek paso işlemiyle üretimi tamamlandı. Şekil 6’da SKY sonrası numune üzerinde ilerleme yönü, dönme yönü ve takım çıkış noktası görüntüleri verildi.



Şekil 6. SKY sonrası ilerleme yönü, dönme yönü, takım çıkış noktası gösterimi (Display of feed direction, rotation direction, tool exit point after FSP)

Sürtünme karıştırma kaynağı ile üretilen yüzey kompozit AL6061 levhanın işlem sonrası görüntüsü ve numune yerleri şekil 7.2. da verilmiştir. Yüzey hibrit kompoziti oluşturulan 7 ayrı numuneden resim Şekil 7’de teknik çizimi verilen 2 şer adet

çekme testi numunesi, 3er adet aşınma numunesi ve sertlik numunesi için parçalar kesildi. Test numunelerinin hazırlanmasında Mitsubishi MV1200S Marka CNC Tel Erozyon Makinesi kullanıldı.



Şekil 7. a) Kaynak işlemi sonrasında numune görüntüsü b) Alüminyum plakadan alınan test numunelerinin konumları ve teknik çizimleri (a) Sample image after welding b) Locations and technical drawings of the test samples taken from the aluminum plate)

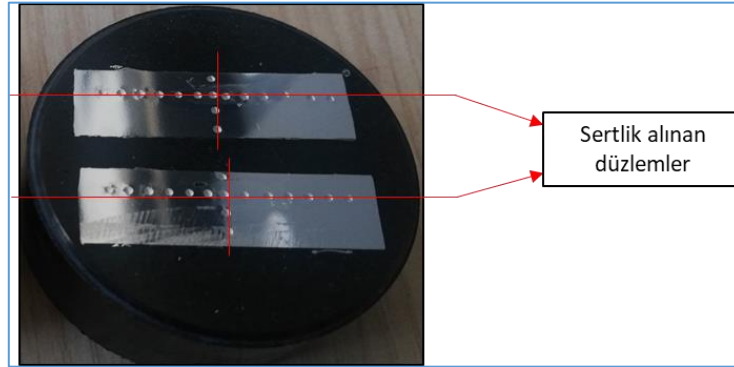
Mikroyapı incelemeleri yapılacak numuneler FSP işleri uygulanan yüzeyleri dışta kalacak şekilde Opal 460 Sıcak Bkalit Alma Cihazında kalıplandı. ATM Saphir 520 Otomatik Zımpara ve Parlatma cihazıyla zımparalama ve parlatma yapıldı. Zımparalama işleminde; ilk olarak 320 mesh aşındırıcı zımpara ile 1 dakika, aynı yönde, 300 rpm devir sayısında, 30 N yük ile yapıldı. İkinci olarak

600 mesh aşındırıcı zımpara ile 1 dakika, aynı yönde, 300 rpm devir sayısında 30 N yük ile yapıldı. Üçüncü olarak ise 1200 mesh aşındırıcı zımpara ile 1 dakika, aynı yönde 300 rpm devir sayısında ve 30 N yük ile yapıldı. Parlatma işlemi ATM Saphir 520 Otomatik Zımpara ve Parlatma Cihazı ile yapıldı. İlk olarak 9 µm elmas suyu parlatma sıvısı ile 6,5 dakika, zıt yönde, 150 rpm devir sayısında,

35 N olarak yapıldı. İkinci işlem olarak 3 µm elmas suyu parlatma sıvısı ile 6,5 dakika, aynı yönde, 150 rpm devir sayısında ve 30 N yükü yapıldı. Final işlemi kollodial silica süspansiyon ile 2,5 dk, zıt yönde, 150 rpm devir sayısında ve 25 N olarak yapıldı. Final işleminin son 30 saniyesinde numuneye su verildi. Parlatılan numuneler 30 ml HCl + 40 ml HNO₃ + 2,5 ml HF + 12 gr CrO₃ + 52,5 ml su kullanılarak hazırlanan çözeltide dağlandı. Dağlama işlemi yaklaşık 30 sn kadar sürdü. Dağlanan numunelerin makro ve mikro görüntüleri LECIA DM 4000M Optik Mikroskop ile çekildi. Mikroyapı görüntüsü alınan her numunenin pim karışım bölgesi, transfer bölgesi, termodinamik olarak etkilenmiş bölge ve ana metal bölgelerinden görüntü alındı. 20 µm, 100µm ve 500µm boyutlarında incelendi. Taramalı Elektron mikroskobu ile çekme testi uygulanan numunelerin kırık yüzeylerinin ve aşınma numunelerinin SEM görüntüsü Jeol JEM 6060 LV Taramalı Elektron

Mikroskobu ile alındı. Mikroyapı için kesilen her numune de farklı büyütme oranlarında görüntü alındı. Çekme testi sonrası kırık yüzeylerden ve aşınma testi sonrası numune yüzeyinden farklı büyütme oranlarında aynı bölgelerden görüntü alındı. Görüntü alınan bölgelerde EDS analizi ve Mapping işlemi yapıldı. Numunelerin XRD analizleri Gazi Üniversitesi/Metalurji ve Malzeme Mühendisliği bölümü bünyesindeki X Işını Difraktometresi ile yapıldı. Açık aralığı (2θ) 20-90°, tarama hızı 0,04 2θ/dk olarak seçildi.

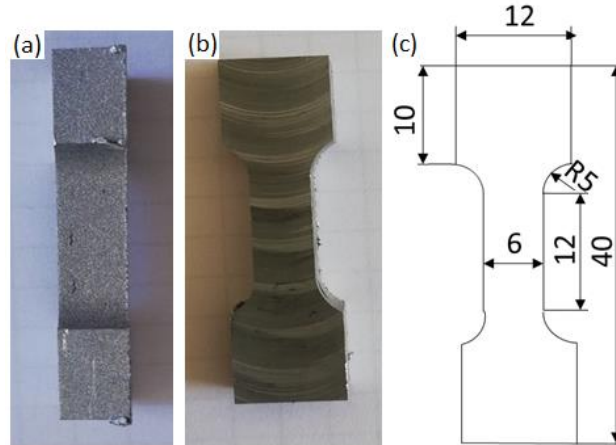
Mikroyapı görüntüsü için kesilen numunelerin mikroyapı görüntüsü alındıktan sonra Duravision 2000 Emco Test Sertlik Cihazında sertlik değerleri ölçüldü. Numunenin karışım bölgesinden geçmek koşuluyla dikey ve yatay doğrultularında test sonrası hali gösterildiği şekilde HBW 2,5/31/25 değeri kullanılarak ve her bir ölçüm arası mesafe 2d olarak belirlenerek testler yapıldı (Şekil 8).



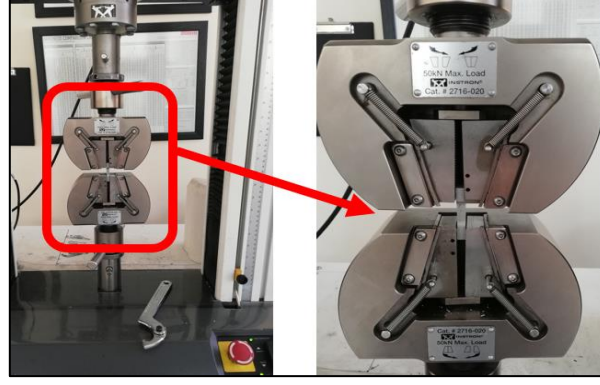
Şekil 8. Sertlik değerleri ölçülen numunenin ölçüm doğrultuları (Measurement directions of the sample with hardness values measured)

Malzemelerin bir yük altındaki davranışlarını incelemek için çekme direnci testi yapıldı. Şekil 9'da verilen test numunesi boyu 12 mm, kalınlığı 6mm, genişliği 5,5 mm olarak hazırlandı.

Numunelere 1mm/dk hızında Şekil 10'da verilen INSTRON 3369 Çekme/Basma Cihazı kullanılarak test yapıldı.



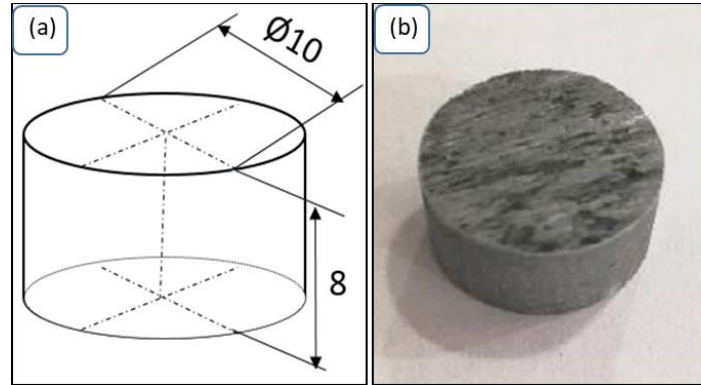
Şekil 9. a-b) Çekme testi numunesi ve c) boyutları (a-b) Tensile test specimen and c) dimensions)



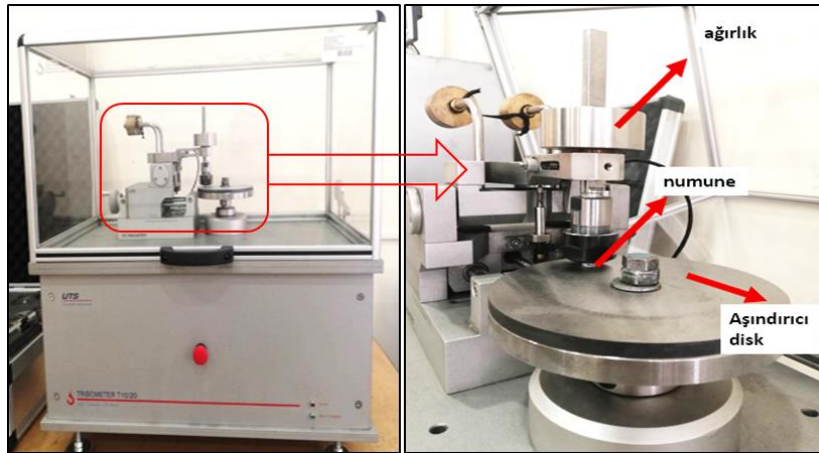
Şekil 10. INSTRON 3369 çekme cihazı Cihazı
(INSTRON 3369 tensile Device)

Aşınma testi için Şekil 11’de makro görüntüsü ve boyutları verilen; çapı 10mm yüksekliği 8 mm olan aşınma test numuneleri kullanıldı. Test için Şekil 12’de kısımları gösterilen UTS Tribometer 10/20 cihazı kullanıldı. Üretilen her farklı toz oranlarındaki yüzey kompozit malzemeden alınan 3 numuneye sırasıyla 5-10-20 Newton yük uygulandı.

Uygulanan her bir yükte 1200 m aşınma mesafesi, 1m/sn aşınma hızı, 191 rpm dönme hızı, 100 mm aşınma mesafesi, Harox 400 aşındırıcı çelik disk ve 20 dakika test süresi sabit tutuldu. Her numunenin test öncesi ve test sonrası ağırlıkları hassas terazi ile ölçüldü ve ağırlık kayıpları hesaplandı.



Şekil 11. a) Aşınma testi numunesi boyutları ve b) makro görüntüsü (a) Wear test specimen dimensions and b) macro image)

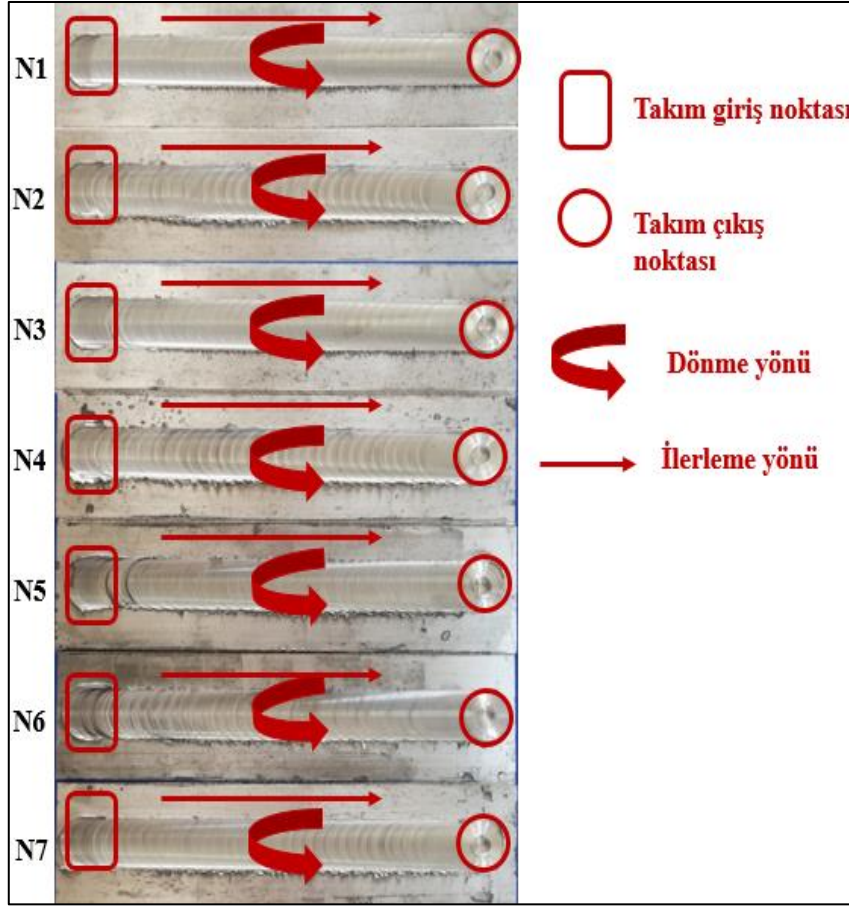


Şekil 12. UTS Tribometer 10/20 cihazı ve kısımları (UTS Tribometer 10/20 device and parts)

3. BULGULAR (RESULTS)

SKY sonrası numunelerde gözle görülür oluşan tek hata Şekil 13'de örnekleri verilen çapak

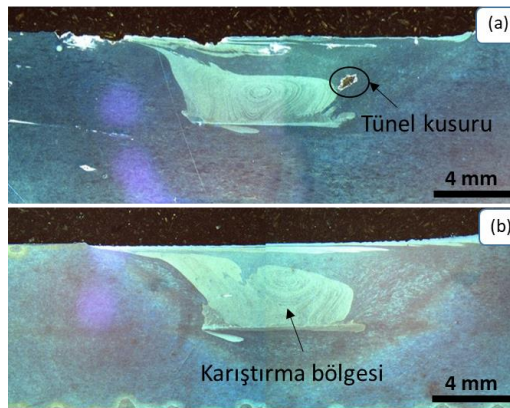
oluşumudur. Bunun dışında gözenek, boşluk veya çatlak gibi kusurlara rastlanmadı. Çapak oluşumu ise işlem sırasında uygulanan yüksek basınç ve ısı sebebiyle yumuşayan malzemenin işlem bölgesinin kenarlarında birikmesiyle oluşmuş bir hatadır [33].



Şekil 13. SKY sonrası çapak oluşumu örnekleri (Examples of burr formation after FSP)

Yüzey kompozitlerin ön deneylerinin yapımında düşük yükler altında yapılan deneylerde yüzeylerde çapak oluşmazken kesit incelendiğinde tünel kusurunun meydana geldiği anlaşılmıştır (Şekil 14-a). Benzer bir çalışmada da yeterli ısı sağlanamadığından düşük yükler altında tünel

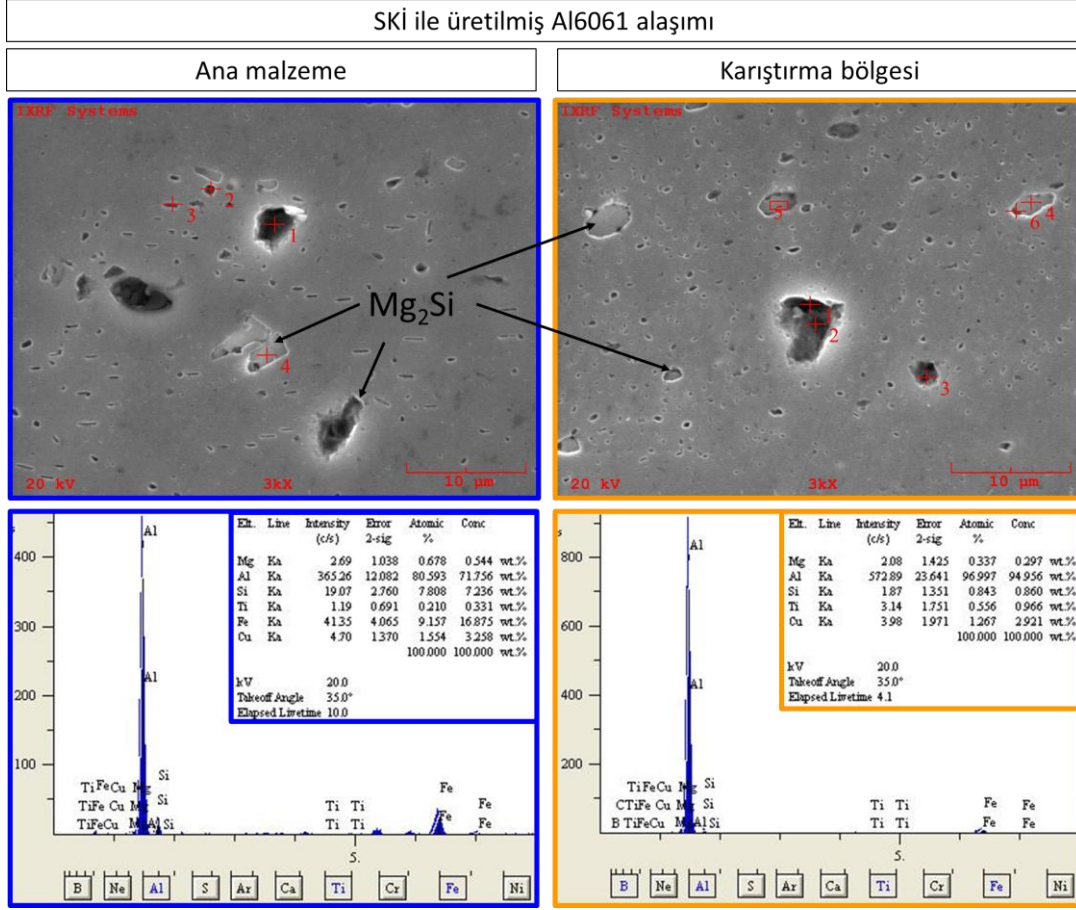
kusuru olduğu görülmüştür [34]. Yüksek yükler altında yapılan deneylerde ise yüzeylerde çapak hattı oluşumunun arttığı aynı zamanda iç kısımda meydana gelen tünel kusurunun azaldığı görülmüştür (Şekil 14-b).



Şekil 14. Al6061 malzemesinin SKY sonrası makro görüntüsü a) düşük yük b) yüksek yük (Macro image of Al6061 material after FSP a) low load b) ideal load)

Al6061 malzemesinin SKY sonrası ana malzeme ve karışım bölgeleri kısımlarından SEM görüntüleri ve EDS analizleri alınmıştır (Şekil 15). Görüntüler incelendiğinde mikro yapıda Al6061 alaşımında meydana gelen Mg_2Si çökeltilerinin olduğu görüldü. Benzer şekilde Arya ve arkadaşları yapmış oldukları çalışmada ana faz olan Al6061 alaşımında

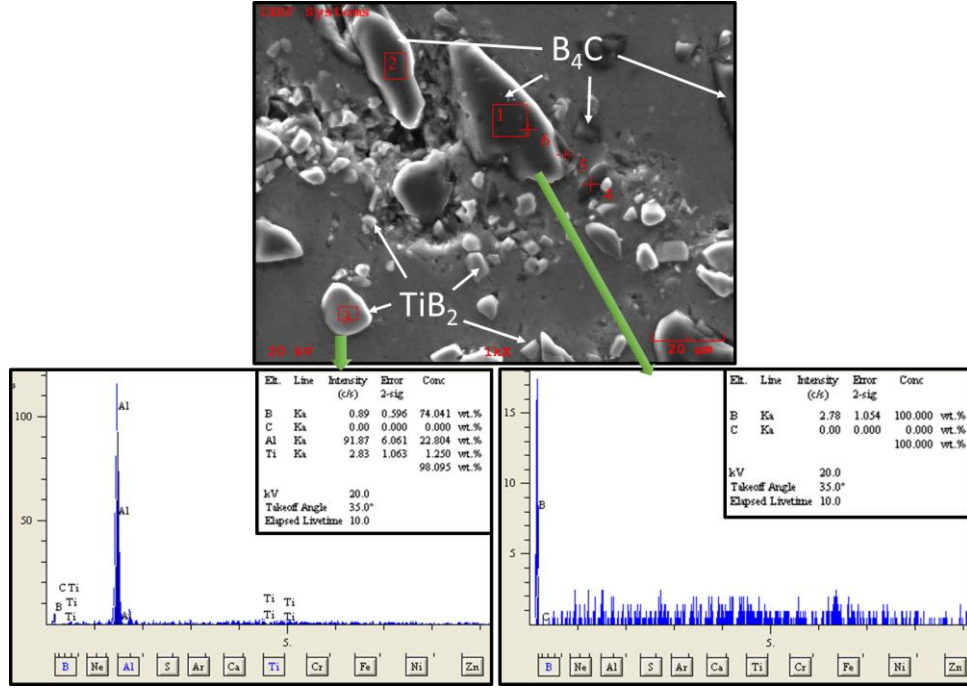
Mg_2Si fazlarının oluştuğunu göstermişlerdir [35]. EDS analizinde oluşan pikler yardımı ile Mg_2Si faz yapıları belirlendi. Ana malzemede meydana gelen yassı halde duran Mg_2Si çökeleklerinin karıştırma bölgesinde daha ince ve küresel hale geldiği görüldü.



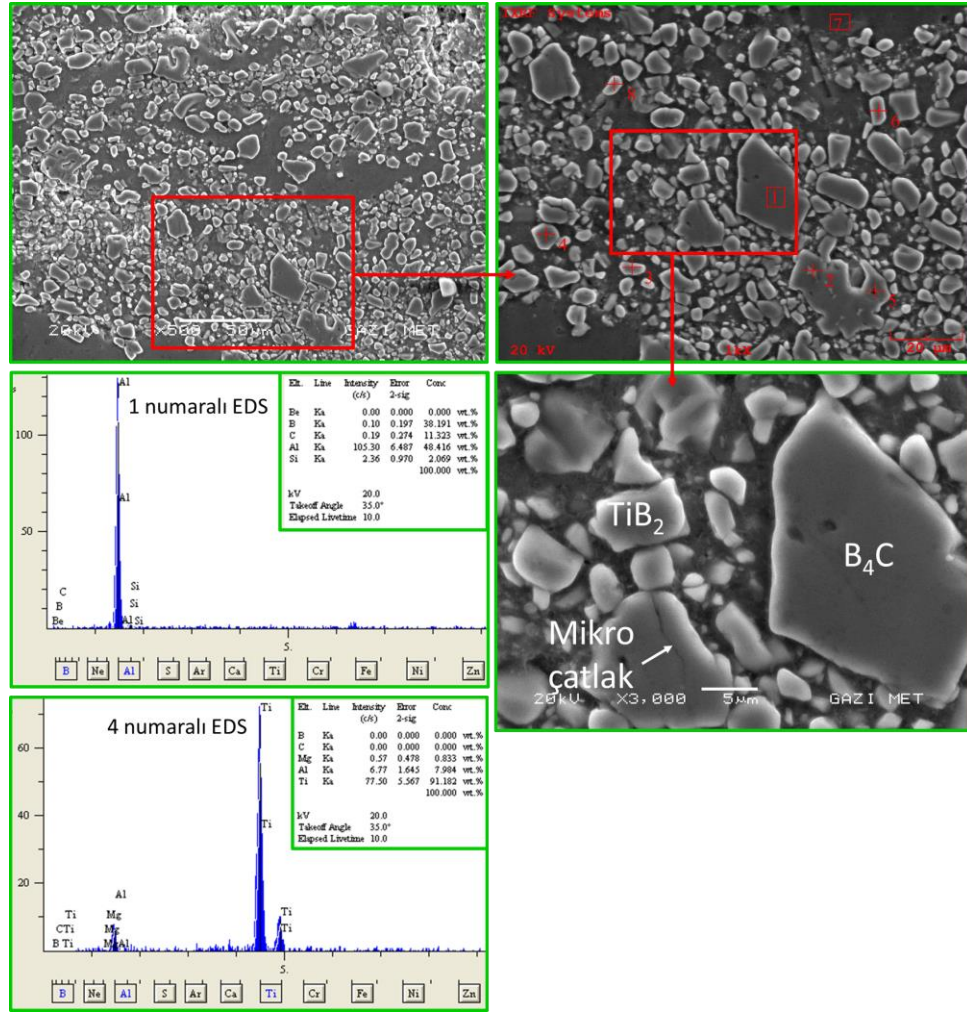
Şekil 15. Al6061 SKY malzemenin iki farklı bölgesinden alınan SEM görüntüleri ve EDS analizleri (SEM images and EDS analyzes taken from two different regions of Al6061 SKI material)

49.75% TiB_2 /49.75% B_4C /0.5%GNL parçacık ilaveli yüzey kompozitin karıştırma bölgesinden alınan SEM görüntüsü ve EDS analiz sonucu Şekil 16'da verilmiştir. Şekil incelendiğinde büyük ve koyu renkli duran parçacıkların B_4C olduğu daha açık renkli parçacıkların ise TiB_2 olduğu anlaşılmıştır. Karıştırma bölgesinde topaklanma ve etraflarında boşluk oluşumlarının meydana geldiği anlaşılmıştır. Yapı içerisinde aynı zamanda küçük ebatlarda grafen nano levhaların dağıldığı görülmüştür. TiB_2 parçacıkların Al alşımı ile çevrelendiği B_4C parçacıkların ise etrafında boşlukların oluştuğu görülmüştür. Bu durum B_4C takviye elemanının ıslatılabilirliğinin az olmasından kaynaklanmasından meydana gelmektedir [36].

49% TiB_2 /49% B_4C /2%GNL parçacık ilaveli yüzey kompozitin karışım bölgesinden alınan farklı büyütmelelerdeki SEM görüntüleri incelendiğinde genel olarak parçacıkların homojen olarak dağıtıldığı tespit edilmiştir. Bu durum sürtünme karıştırma işlemi esnasında takım ile ana malzeme arasında kalan seramik parçacıkların ısı ve sürtünmenin etkisi ile dağıtılmasından kaynaklanmaktadır. Ayrıca takım ile ve birbirleri ile temas eden sert kırılğan fazdaki seramik parçacıklarda çatlak ve kırılmaların meydana geldiği görülmüştür (Şekil 17).



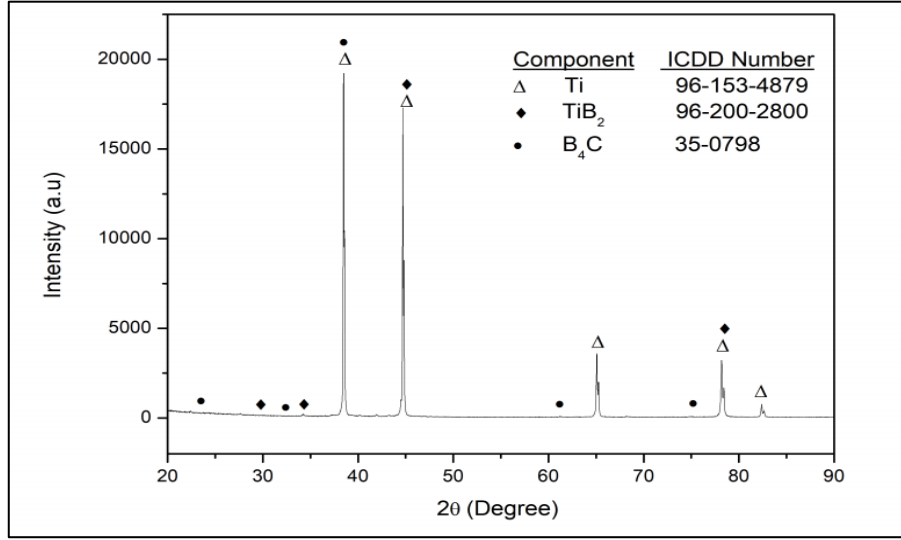
Şekil 16. N6 nolu malzemenin karıştırma bölgesinden alınan SEM görüntüsü ve EDS analizleri (SEM image and EDS analysis taken from the mixing zone of N6 material)



Şekil 17. N7 malzemenin karıştırma bölgesinden alınan SEM görüntüleri ve EDS analizleri (SEM images and EDS analyzes taken from the mixing zone of N7 material)

XRD analizlerindeki fazların varlığı ilave metallerin ana faz içindeki dağılımını kanıtladı. Xrd sonuçları, mikroyapı analizleri için destek sağladı. Yapılan analizler sonucunda Al un ilave metaller içindeki elementlerle tepkime vermesine yetecek bir

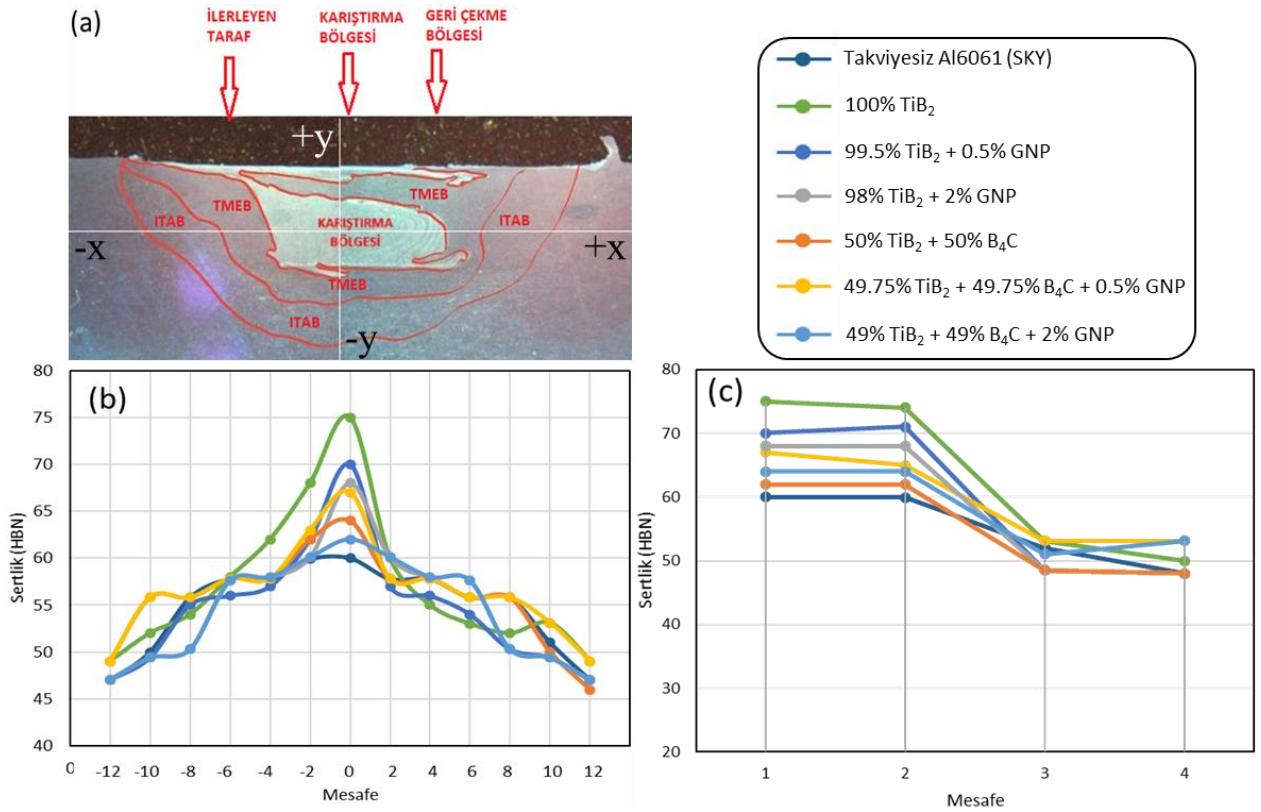
aktivasyon enerji oluşmadığı görüldü. Analizde sadece eklenen ilave metaller tespit edildi (Şekil 18). Amir ve arkadaşları da farklı bir Al alaşımlı matris ve farklı bir ilave metalle yaptığı çalışmada benzer sonuca ulaşmıştır [37].



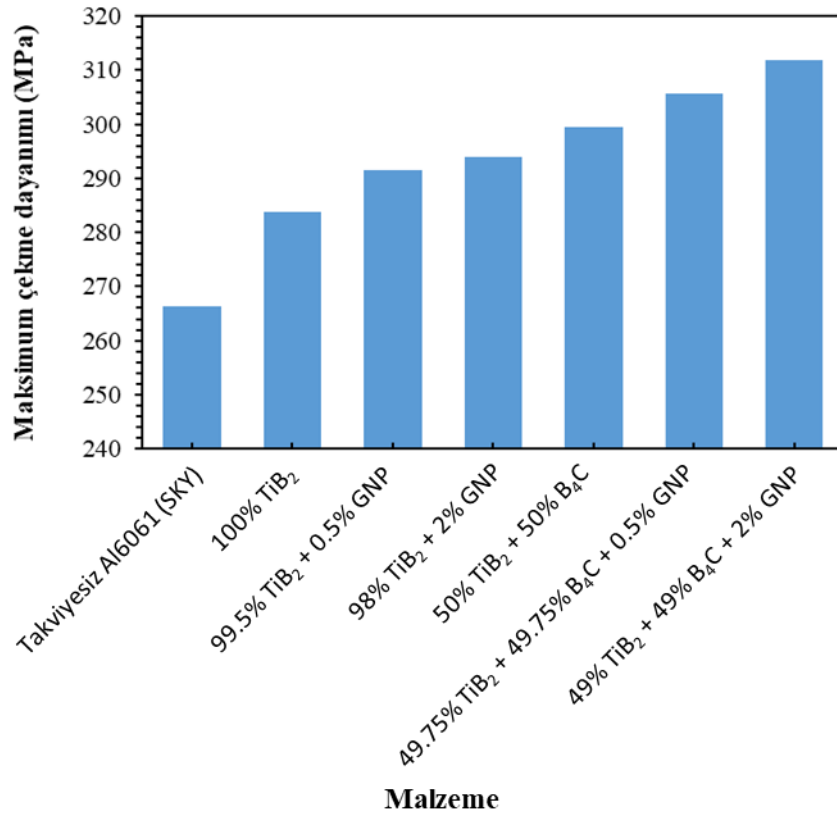
Şekil 18. N7 nolu %49B₄C/%49TiB₂/%2GNL içerek hibrit yüzey kompozitinin XRD analiz sonucu (XRD analysis result of hybrid surface composite number N7 containing 49%B₄C/49%TiB₂/2% GNP)

Sertlik değeri +x/-x ve +y/-y doğrultularında 2d mesafesinde ölçüldü. Üretilen yüzey kompozitlerden ölçülen sertlik değerlerinde en yüksek sonuçlar karışım bölgesinde elde edildi. Karışım bölgesinden ana metale doğru gidildikçe ölçülen sertlik değerinde azalma gözlemlendi. Sertlik testi yapılan numunelerin sonuç grafiği Şekil 19'de verildi. Tüm malzemeler içindeki en yüksek sertlik değerine %100 TiB₂ takviyeli yüzey kompozitinde ulaşılırken en düşük değer takviyesiz AL6061 plakada ölçüldü. Şimşek yaptığı çalışmada Al-grafit matrisine tek çeşit ilave metal ekleyerek benzer sonuçlara ulaşmıştır [38]. Singh ve Pall benzer şekilde yaptığı çalışmada ilave metal ile SKY yoluyla üretilen bir kompozitin sertlik değerinde saf matrise oranla ciddi bir artış gözlemlenmiştir [39]. İlave toz karışımlarla sertlik değerinde elde edilen artışın öncelikli nedeni tane küçülmesi ve dislokasyon yoğunluğudur. Ek olarak takviye parçacıklarının varlığı sebebiyle orowan çevrimi, parçacıklar ve matris arasındaki termal genişleme farkı, parçacıklar ve matris arasındaki gerinim uyumsuzluğundan kaynaklanan deformasyon sertleşmesi mekanizmaları devreye girerek dislokasyon yoğunluğunda artışa sebep olarak sertlik değerlerini arttırır [40]. Çekme

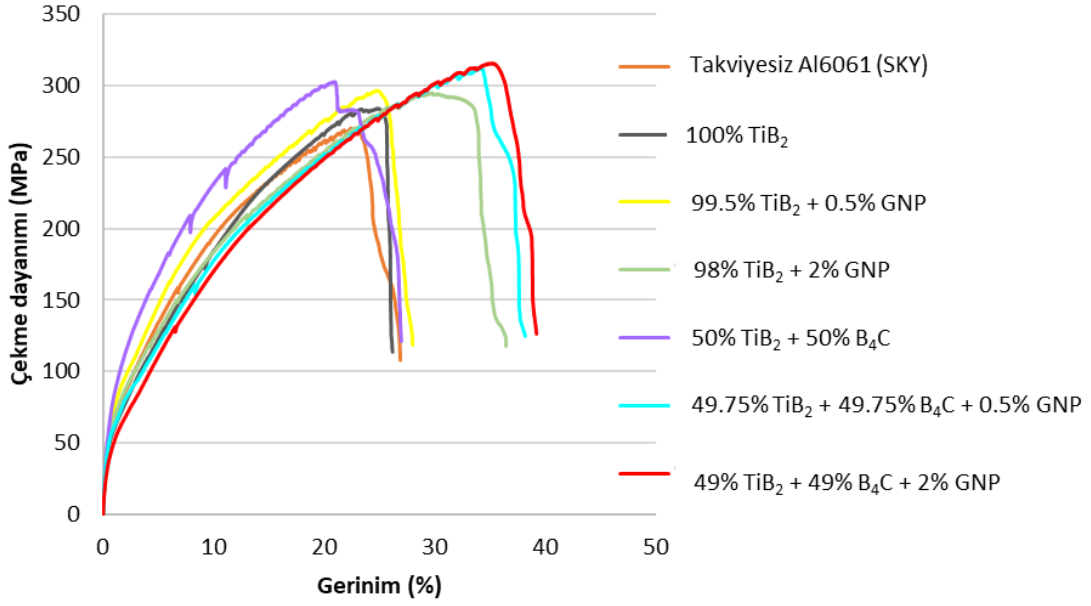
dayanımı sonuçları incelendiğinde en düşük dayanım takviyesiz AL6061 alaşımında tespit edildi. En yüksek dayanım ise %49 TiB₂ + %49 B₄C + %2 GNL tozlarıyla oluşturulmuş yüzey kompozit malzemede görüldü (Şekil 20-21). Yüzey kompozitlerde sertliğin yüksek olduğu %100 TiB₂ ilavesinde çekme dayanımı düşük olurken B₄C ve GNL ilavesine bağlı olarak çekme dayanımının arttığı görülmüştür. Bu durum hibrit parçacık ilaveli kompozitlerin mekanik özellikleri iyileştirdiğini göstermektedir. Benzer bir çalışmada Senthilnathan ve Balachandar TiB₂-B₄C ilaveli Al esaslı tekli ve hibrit kompozit malzemelerde ikili olan (TiB₂-B₄C) ilavesinin çekme dayanımını iyileştirdiğini rapor etmişlerdir [41]. Essam ve arkadaşları SKY ile ürettikleri grafen nano levha ilaveli yüzey kompozitlerde GNL ilavesinin çekme dayanımını iyileştirdiğini göstermişlerdir [42]. Dayanım sonuçları ve mikroskopik görüntülerde çekme testi sonrası kopan numunede ilave edilen toz parçacıklarının herhangi bir tarafta kalmadığı, tozların malzeme içerisinde kırılarak homojen olarak dağıldığı görüldü. İlave tozların malzeme çekme dayanımı üzerinde artırıcı etki yaptığı görüldü. Çekme sonrası kopan malzemelerin makro resimleri Şekil 22'de verildi.



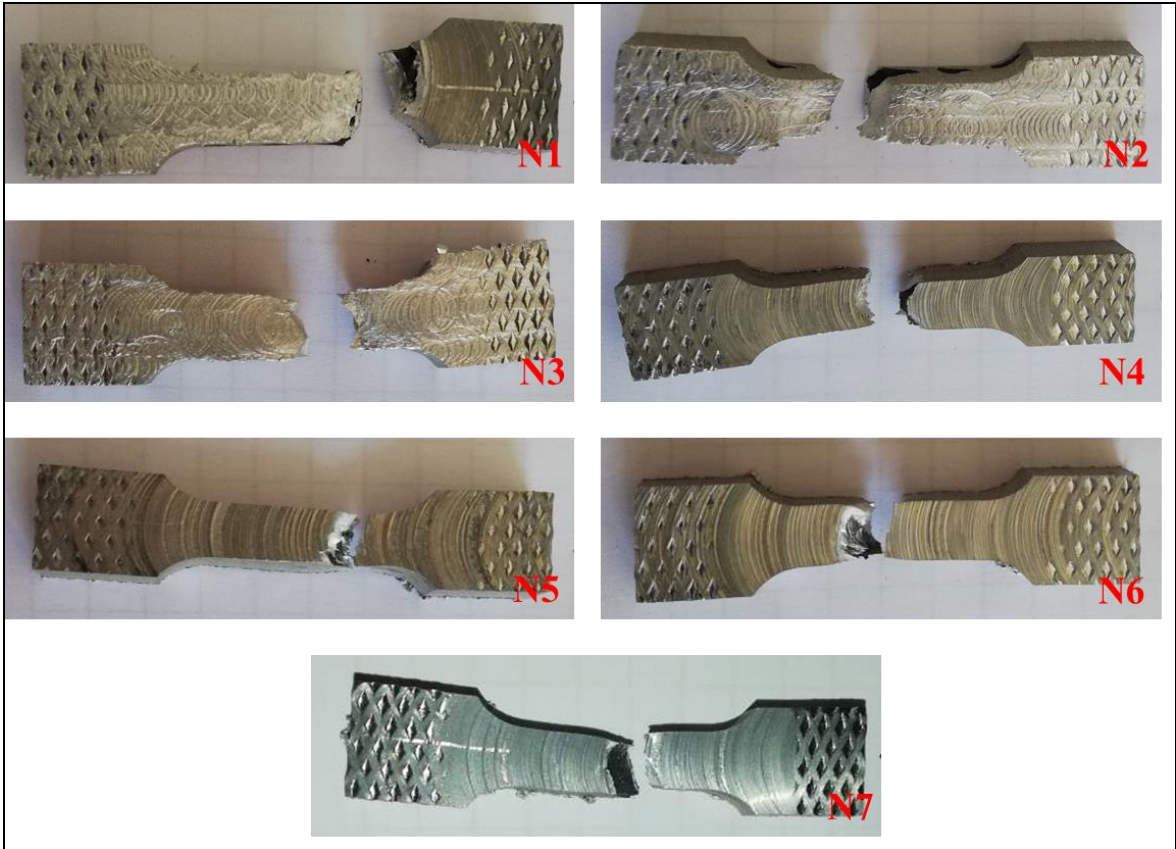
Şekil 19. a) Sertlik alınan noktaların yan kesitte gösterimi b) yatak (+x/-x) alınan sertlik değerleri grafiği c) dikey alınan sertlik değerleri grafiği (a) Side section representation of hardness points b) bed (+x/-x) hardness values graph c) vertical hardness values graph



Şekil 20. Çekme testi sonuçları grafiği (Tensile test results chart)



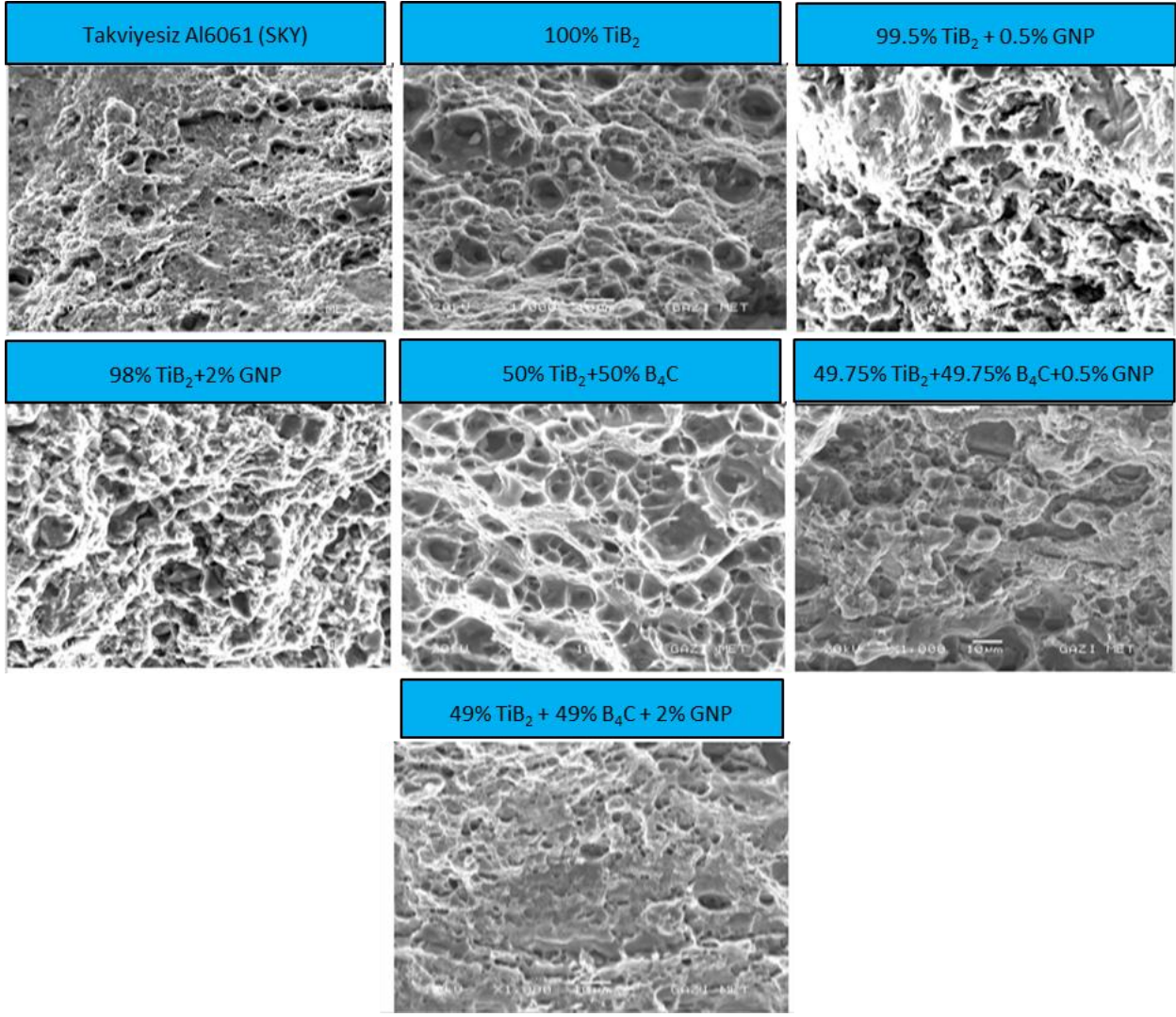
Şekil 21. Tüm malzemelerin ortak gerilim-gerinim grafiği (stress-strain graph of all materials)



Şekil 22. Çekme testi yapılan numunelerin test sonrası görüntüsü (Post-test image of tensile tested samples)

SKY ile üretilen yüzey kompozitlerin çekme testi sonrası kırık yüzey görüntüleri Taramalı Elektron Mikroskopunda (SEM) alınarak Şekil 23'de olduğu gibi verilmiştir. Al6061 malzemesinde karıştırma bölgesinde kırık yüzey görüntülerine bakıldığında sünme bölgeleri saptanmıştır. Bu ana malzemenin

sünme yapıda olmasından kaynaklı olabilir. Takviye elemanlı malzemenin çekme dayanımını artırıp malzeme daha gevrek bir hale getirdiği görülmüştür. Bu da kırık yüzey görüntülerine yansımış ve kırık yüzeylerde daha sığ ve geniş sünme bölgeleri oluşturmuştur.



Şekil 23. Yüzey kompozitlerinin kopma bölgelerinin SEM görüntüleri (SEM images of rupture zones of surface composites)

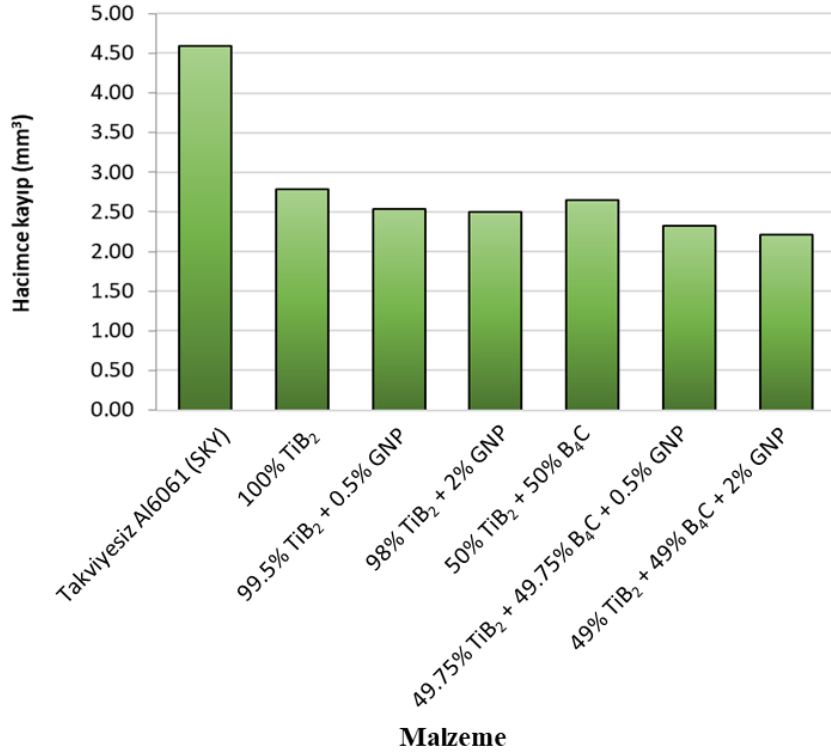
Numunelerin aşınma davranışları pin-on disk yüzeyinde, Hardox400 aşındırıcı çelik disk ile oda sıcaklığında, 1200 m mesafede, 1mm aşındırma hızı ve 191 rpm dönme hızında, malzemelerin 10N yük altında incelendi. Test öncesi ve sonrası numunelerin ağırlıkları ölçüldü. Hacim kayıplarını gösteren grafik Şekil 24’de verilmiştir. En yüksek hacimce kayıp SKY ile kaplanan Al6061 malzemesinde 4.59 mm³ olarak görülürken en düşük hacimce kayıp ise 49% TiB₂ + 49% B₄C + 2% GNL yüzey kompozitinde 2.21 mm³ olarak bulunmuştur. Al6061 SKY yüzey kompozitindeki aşınmadan sonra en fazla aşınma meydana gelen malzeme % 100 TiB₂ yüzey kompozit malzemesidir. % 100 TiB₂ ile 50% TiB₂ + 50% B₄C yüzey kompozitlerini birbiri ile kıyasladığımızda B₄C ilavesinin aşınma özelliklerini iyileştirdiği görülmüştür. Al-B₄C kompozit malzemelerde B₄C parçacıklarının yüksek sertlikte olması ve yağlayıcı özellikte olması sebebi ile aşınma özelliklerini

iyileştirdiği bilinmektedir [43][44]. Şenel ve Demir ve arkadaşları yapmış oldukları çalışmada B₄C ilavesinin aşınma miktarını düşürdüğünü rapor etmişlerdir [45]. 0.5 ve 2 oranında GNL ilavesini kıyasladığımızda, GNL miktarının artması ile birlikte hacimce kayıpların azaldığı görülmüştür. GNL’lar Al alaşımı içerisinde çok iyi yağlayıcı özelliğe sahip olduklarından aşınma özelliklerini iyileştirmişlerdir. Başka bir çalışmada yazarlar GNL ilavesi ile birlikte aşınma hacimce kayıpların azaldığını rapor etmişlerdir [46].

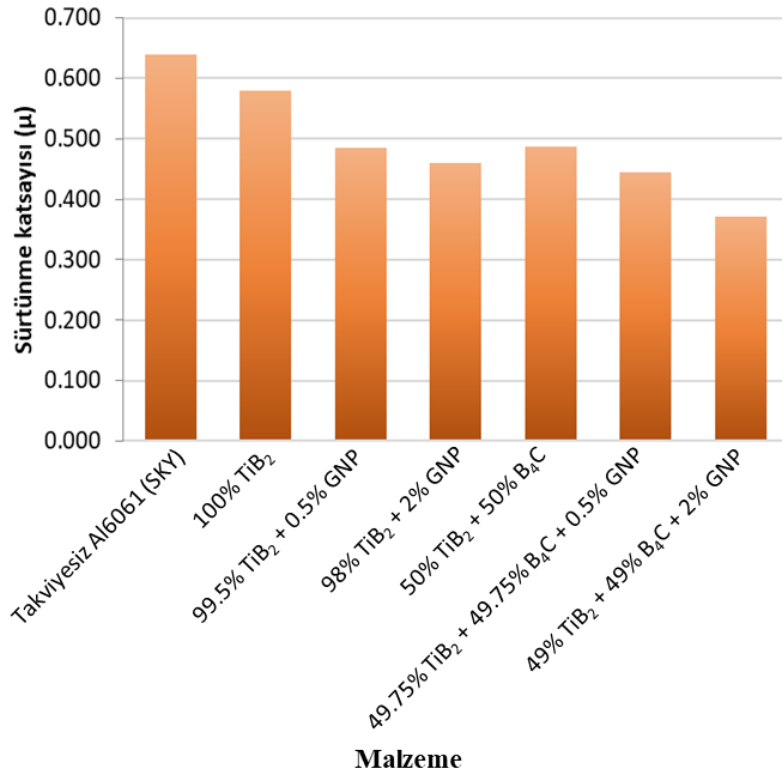
Aşınma testleri sonrası elde edilen ortalama sürtünme katsayıları değeri incelendiğinde en yüksek aşınma katsayısı değeri SKY ile işlem görmüş Al6061 ana malzemesinde (0.64) meydana gelirken en düşük sürtünme katsayısı değeri SKY ile yüzeyi hibrit kaplanmış 49% TiB₂ + 49% B₄C + 2% GNL Malzemesinde (0.37) olarak bulunmuştur (Şekil 25). Eşit şartlar altında yapılan aşınma testi

sonrası sürtünme katsayısı değeri B₄C ve GNL ilavesi ile düşmüştür. Bener çalışmalarında da B₄C ve

GNL ilavesi ile sürtünme katsayısında düşüş olduğu görülmüştür [47][48][49].



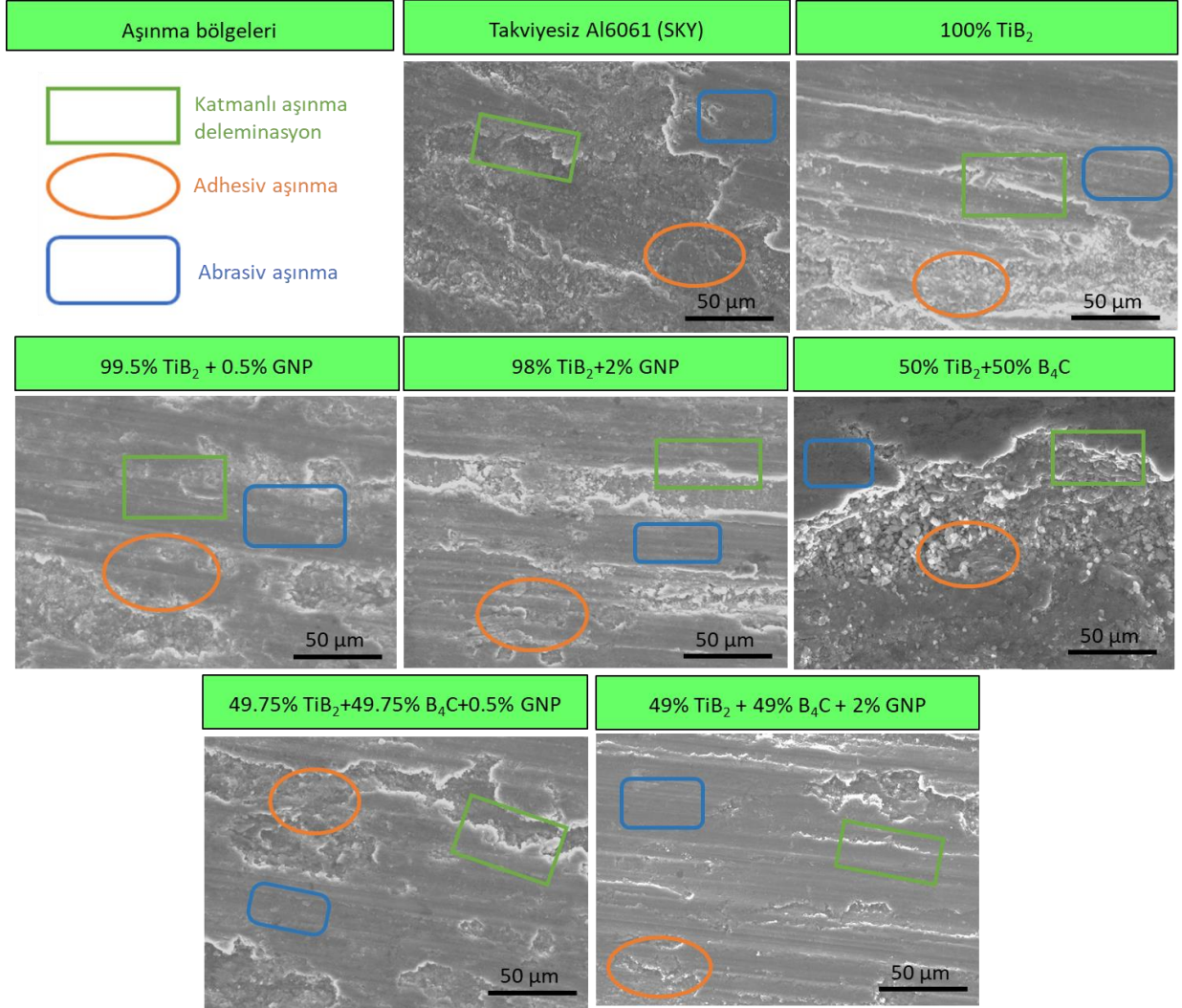
Şekil 24. Yüzey kompozitlerinin farklı yükler altındaki hacimce kayıpları (Volume losses of surface composites under different loads)



Şekil 25. Hibrit yüzey kompozitlerinin sürtünme katsayısı (Friction coefficient of hybrid surface composites)

Şekil 26'da SKY ile yapılan yüzey kompozit numunelerin aşınma davranışı sonrası aşınma yüzeylerinden alınan SEM görüntüleri verildi. Bu resimlerde yeşil dikdörtgen şekli delaminasyon bölgesini, turuncu elips şekli adhezif aşınma bölgesini, mavi dikdörtgen ise abrasif aşınma

bölgesini göstermektedir. Aşınma yüzeyleri SEM görüntüleri incelendiğinde B₄C ve GNL ilavesi ile birlikte aşınan yüzeylerde adhezif aşınma bölgesi ve delaminasyon bölgesi hacminde azalma, abrasif aşınma bölgesi hacminde artma meydana geldi.



Şekil 26. Al6061/TiB₂/B₄C/Nano grafen hibrit yüzey kompozitlerinin aşınma testi sonrası yüzeylerinin (SEM) görüntüleri ve aşınma davranışı türleri (Post-wear test (SEM) images and wear behavior types of Al6061/TiB₂/B₄C/Nano graphene hybrid surface composites)

4. CONCLUSIONS (SONUÇLAR)

Bu araştırmada, Al6061 alaşımına ek olarak B₄C, TiB₂ ve GNP hibrit parçacıkların ilave edilmesiyle elde edilen yüzey kompozitler, SKY adı verilen bir üretim yöntemiyle üretilmiştir. Elde edilen kompozit malzemelerin incelenmesi sonucunda şu bulgular elde edilmiştir:

- SKY işlemi sonrası incelenen numunelerde gözle görülür tek hata çapak oluşumu oldu. Çapaklar, yüksek basınç ve ısıyla

yumuşayan malzemenin işlem bölgesinin kenarlarında birikmesiyle meydana geldi.

- Ön deneylerde, düşük yükler altında yüzeylerde çapak oluşmazken, kesit incelendiğinde tünel kusurlarının meydana geldiği tespit edildi.
- SEM görüntüleri incelendiğinde, mikro yapıda Al6061 alaşımında meydana gelen Mg₂Si çökeltilerinin olduğu görüldü. EDS analizi ile Mg₂Si faz yapıları belirlendi ve

ana malzemede meydana gelen yassı halde duran Mg₂Si çökeltilerinin karıştırma bölgesinde daha ince ve küresel hale geldiği gözlemlendi.

- 49.75% TiB₂/49.75% B₄C/0.5% GNL parçacık ilaveli yüzey kompozitin karıştırma bölgesinde topaklanma ve etraflarında boşluk oluşumlarının meydana geldiği anlaşılmıştır. Yapı içerisinde aynı zamanda küçük ebatlarda grafen nano levhaların dağıldığı görülmüştür. TiB₂ parçacıkların Al alaşımı ile çevrelendiği B₄C parçacıkların ise etrafında boşlukların oluştuğu görülmüştür.
- 49% TiB₂/49% B₄C/2% GNL parçacık ilaveli yüzey kompozitin karışım bölgesinde parçacıkların homojen olarak dağıtıldığı tespit edilmiştir. Bu durum sürtünme karıştırma işlemi esnasında takım ile ana malzeme arasında kalan seramik parçacıkların ısı ve sürtünmenin etkisiyle dağıtılmasından kaynaklanmaktadır.
- XRD analizleri, ilave metallerin ana faz içinde homojen bir şekilde dağıldığını göstermiştir. Bu analizler, mikroyapı analizleri için önemli bir destek sağlamıştır. Ayrıca, yapılan analizler sonucunda Al'un ilave metaller içindeki elementlerle tepkime vermesine yetecek bir aktivasyon enerjisi oluşmadığı, sadece eklenen ilave metallerin tespit edildiği görülmüştür.
- Elde edilen sonuçlara göre, üretilen yüzey kompozitlerinde en yüksek sertlik değerleri karışım bölgesinde tespit edildi. Tüm malzemeler arasında, en yüksek sertlik değeri %100 TiB₂ takviyeli yüzey kompozitinde elde edilirken, en düşük değer takviyesiz AL6061 plakada ölçüldü.
- Çekme dayanımı sonuçları incelendiğinde, en düşük dayanım takviyesiz AL6061 alaşımında (266 MPa) tespit edildi. En yüksek dayanım ise %49 TiB₂ + %49 B₄C + %2 GNL tozlarıyla oluşturulmuş yüzey kompozit malzemede görüldü (312 MPa).
- Yüzey kompozitlerinde sertliğin yüksek olduğu %100 TiB₂ ilavesinde çekme dayanımı düşük olurken, B₄C ve GNL ilavesine bağlı olarak çekme dayanımının arttığı gözlemlendi.
- Dayanım sonuçları ve mikroskopik görüntülerde, çekme testi sonrası kopan numunelerde ilave edilen toz parçacıklarının herhangi bir tarafta kalmadığı, tozların malzeme içerisinde kırılarak homojen olarak dağıldığı gözlemlendi.

- En yüksek hacimce kayıp, SKY ile kaplanan Al6061 malzemesinde 4.59 mm³ olarak kaydedilirken, en düşük hacimce kayıp 49% TiB₂ + 49% B₄C + 2% GNL yüzey kompozitinde 2.21 mm³ olarak belirlendi.
- Al6061 SKY yüzey kompozitindeki aşınmadan sonra en fazla aşınma meydana gelen malzeme %100 TiB₂ yüzey kompozit malzemesidir. %100 TiB₂ ile 50% TiB₂ + 50% B₄C yüzey kompozitlerini kıyasladığımızda, B₄C ilavesinin aşınma özelliklerini iyileştirdiği gözlemlendi.
- 0.5 ve 2 oranında GNL ilavesini karşılaştırdığımızda, GNL miktarının artması ile birlikte hacimce kayıpların azaldığı görülmüştür. GNL'lar Al alaşımı içerisinde çok iyi yağlayıcı özelliğe sahip olduklarından aşınma özelliklerini iyileştirmişlerdir.
- Aşınma testleri sonrası elde edilen ortalama sürtünme katsayıları değerleri incelendiğinde, en yüksek aşınma katsayısı değeri SKY ile işlem görmüş Al6061 ana malzemesinde (0.64) gözlenirken, en düşük sürtünme katsayısı değeri SKY ile yüzeyi hibrit kaplanmış 49% TiB₂ + 49% B₄C + 2% GNL Malzemesinde (0.37) olarak belirlenmiştir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

Bu çalışma Gazi Üniversitesi FYL-2022-7829 numaralı Bilimsel Araştırma Projesiyle desteklenmiştir. / This study was supported by Gazi University Scientific Research Project numbered FYL-2022-7829.

ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazarı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

The author of this article declares that the materials and methods they use in their work do not require ethical committee approval and/or legal-specific permission.

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

Burcu ÇİLİNGİR: Deneyleri yapmış, verileri analiz etmiştir.

She conducted the experiments and analyzed the data.

Halil KARAKOÇ: Deneyleri yapmış, sonuçlarını analiz etmiş ve maklenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

He conducted the experiments, analyzed the results and performed the writing process.

Ramazan ÇITAK: Sonuçlarını analiz etmiş ve maklenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

He analyzed the results and performed the writing process.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

There is no conflict of interest in this study.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Z. Hao, Y. Ju, L. Chen, The Use of Aluminium and Magnesium Alloys in Automotive Lightweight Technologies, *J. Mech. Sci. Technol.* 37 (2023) 4615–4622. <https://doi.org/10.1007/s12206-023-0712-2>.
- [2] S. Thanikodi, A.S.F. Britto, V.S.N.C. Dattu, S. Al Obaid, S. Alfarraj, M.A. Kalam, Machining and mechanical characterization of friction stir processed (FSP) surface hybrid composites (AA8014 + TiB₂ + ZrO₂), *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* (2023). <https://doi.org/10.1007/s00170-023-12198-z>.
- [3] S.A. Kara, C. Özarpa, İ. Esen, H. Ahlatci, Y. Turen, Investigation of corrosion behavior of boron carbide reinforced AA7075 powder composites, *J. Alloys Compd.* 968 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2023.172198>.
- [4] M.M. Jalilvand, Y. Mazaheri, A. Heidarpour, M. Roknian, Development of A356/Al₂O₃ + SiO₂ surface hybrid nanocomposite by friction stir processing, *Surf. Coatings Technol.* 360 (2019) 121–132. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2018.12.126>.
- [5] H. DOĞAN, Y. MUTLU, Production of AA2024-Matrix B4C-SiC- and B4C-Y₂O₃-Particle-Reinforced Composites by Powder Metallurgy and Investigation of Their Mechanical Properties, *Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilim. Derg.* 18 (2022) 321–330. <https://doi.org/10.18466/cbayarfbe.1130031>.
- [6] A. Fathy, D. Ibrahim, O. Elkady, M. Hassan, Evaluation of mechanical properties of 1050-Al reinforced with SiC particles via accumulative roll bonding process, *J. Compos. Mater.* 53 (2019) 209–218. <https://doi.org/10.1177/0021998318781462>.
- [7] H. ARIK, Toz Metalurjisi Metoduyla Al-SiC Kompozit Malzeme Üretimi ve Aşınma Özelliklerinin Araştırılması, *Gazi Üniversitesi Fen Bilim. Derg. Part C Tasarım ve Teknol.* 7 (2019) 741–754. <https://doi.org/10.29109/gujsc.587637>.
- [8] P. Samal, P.R. Vundavilli, A. Meher, M.M. Mahapatra, Recent progress in aluminum metal matrix composites: A review on processing, mechanical and wear properties, *J. Manuf. Process.* 59 (2020) 131–152. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.09.010>.
- [9] L.F. Ali, R. Soundararajan, S. Jeyasurya, M. Kovarthanam, S.N. Prasath, Metallurgical assessment of AA7075 - T6 with x wt% tungsten carbide nanoparticle surface composites processed by FSP route, *Mater. Today Proc.* 45 (2021) 2152–2158. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.10.003>.
- [10] R. Dhayalan, K. Kalaiselvan, R. Sathiskumar, Characterization of AA6063/SiC-Gr surface composites produced by FSP technique, *Procedia Eng.* 97 (2014) 625–631. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.12.291>.
- [11] M.Z. Rahman, A.N. Siddiquee, Z.A. Khan, S. Ahmad, Multi-response optimization of FSP parameters on mechanical properties of surface composite, *Mater. Today Proc.* 62 (2022) 5–8. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.01.379>.
- [12] S. Li, M. Paidar, S. Liu, S. Mehrez, P.S. Kumar, V. Mohanavel, Importance of pin number on mechanical properties and wear performance during manufacturing of AL6061/316 surface composite via FSP, *Mater. Lett.* 326 (2022) 132919. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2022.132919>.

- 9.
- [13] N. Kaya, C. Çetinkaya, H. Karakoç, H. Ada, Effect of process parameters of Al5083/SiC surface composites fabricated by FSP on microstructure, mechanical properties and wear behaviors, *Mater. Chem. Phys.* 315 (2024) 128991. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2024.128991>.
- [14] T. Thankachan, K.S. Prakash, V. Kavimani, Investigating the effects of hybrid reinforcement particles on the microstructural, mechanical and tribological properties of friction stir processed copper surface composites, *Compos. Part B Eng.* 174 (2019) 107057. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107057>.
- [15] M.A. Khan, R. Butola, N. Gupta, A review of nanoparticle reinforced surface composites processed by friction stir processing, *J. Adhes. Sci. Technol.* 37 (2023) 565–601. <https://doi.org/10.1080/01694243.2022.2037054>.
- [16] C.N. Shyam Kumar, R. Bauri, D. Yadav, Wear properties of 5083 Al-W surface composite fabricated by friction stir processing, *Tribol. Int.* 101 (2016) 284–290. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2016.04.033>.
- [17] H. Mehdi, R.S. Mishra, Consequence of reinforced SiC particles on microstructural and mechanical properties of AL6061 surface composites by multi-pass FSP, *J. Adhes. Sci. Technol.* 36 (2022) 1279–1298. <https://doi.org/10.1080/01694243.2021.1964846>.
- [18] W. Ma, M. Paidar, O.O. Ojo, S. Mehrez, A.M. Zain, A. Kulandaivel, V. Mohanavel, S. Kannan, Improving the wear resistance and mechanical properties of hybridized AZ80 Mg/CeO₂+ZrO₂ surface composite by friction stir processing: Effect of pin geometry, *Vacuum.* 212 (2023) 111980. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2023.111980>.
- [19] L. Huang, M. Paidar, A. Mohd Zain, M.R.A. Refaai, S. Abdullaev, M. Šlapáková, Effect of processing environment during friction stir processing of AZ31/(ZrO₂+CuO)_p surface composite on the mechanical and tribological performance, *J. Mater. Res. Technol.* 28 (2024) 1891–1899. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.11.222>.
- [20] E.B. Moustafa, A. V. Mikhaylovskaya, M.A. Taha, A.O. Mosleh, Improvement of the microstructure and mechanical properties by hybridizing the surface of AA7075 by hexagonal boron nitride with carbide particles using the FSP process, *J. Mater. Res. Technol.* 17 (2022) 1986–1999. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.01.150>.
- [21] A. Sharma, D. Narsimhachary, V.M. Sharma, B. Sahoo, J. Paul, Surface modification of Al6061-SiC surface composite through impregnation of graphene, graphite & carbon nanotubes via FSP: A tribological study, *Surf. Coatings Technol.* 368 (2019) 175–191. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2019.04.001>.
- [22] Ö.B. Acımert, S. Murat, A.K. Dayauç, K. Tefvik, Farklı Pasolarda Uygulanmış Sürtünme Karıştırma Prosesinin Al- 5083 ' ün Tribolojik Özellikleri Üzerindeki Etkisinin İncelenmesi Investigation of the Effect of Friction Stir Process Performed in Different Passes on the Tribological Properties of Al-5083, (n.d.) 0–2.
- [23] S. Bharti, N.D. Ghetiya, K.M. Patel, A review on manufacturing the surface composites by friction stir processing, *Mater. Manuf. Process.* 36 (2021) 135–170. <https://doi.org/10.1080/10426914.2020.1813897>.
- [24] H. Gökmeşe, H.B. KARADAĞ, Toz Metal AA 2014-SiC-B4C Kompozit/Hibrit Malzemelerinin Mikroyapı ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilim. Derg. Part C Tasarım ve Teknol.* (2018) 385–398. <https://doi.org/10.29109/http-gujsc-gazi-edu-tr.364857>.
- [25] M. Narimani, B. Lotfi, Z. Sadeghian, Evaluation of the microstructure and wear behaviour of AA6063-B4C/TiB₂ mono and hybrid composite layers produced by friction stir processing, *Surf. Coatings Technol.* 285 (2016) 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2015.11.015>.

- [26] M. Patel, J. Murugesan, Fretting Wear and Corrosion Behaviour of an Al–ZrO₂/Ni Hybrid Composite Developed by Friction Stir Processing, *Trans. Indian Inst. Met.* 75 (2022) 1525–1534. <https://doi.org/10.1007/s12666-022-02527-3>.
- [27] Karakoca, Y. E., & AYTAÇ, A. (2022). Investigation of Drillability of CFRP/Al 7075 Stack. *Mechanics*, 28(6), 430-438. <https://doi.org/10.5755/j02.mech.31038>
- [28] B. Basu, G.B. Raju, A.K. Suri, Processing and properties of monolithic TiB₂ based materials, *Int. Mater. Rev.* 51 (2006) 352–374. <https://doi.org/10.1179/174328006X102529>
- [29] Z.L. Chao, Z.W. Wang, L.T. Jiang, S.P. Chen, B.J. Pang, R.W. Zhang, S.Q. Du, G.Q. Chen, Q. Zhang, G.H. Wu, Microstructure and mechanical properties of B₄C/2024Al functionally gradient composites, *Mater. Des.* 215 (2022) 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2022.110449>.
- [30] O. ALTUNTAŞ, Taguchi Based Gray Relational Analysis of Production Parameters of Al7075/B₄C/GNP's Hybrid Composites, *Gazi Üniversitesi Fen Bilim. Derg. Part C Tasarım ve Teknol.* 11 (2023) 850–856. <https://doi.org/10.29109/gujsc.1348957>.
- [31] P. Cataldi, A. Athanassiou, I.S. Bayer, Graphene nanoplatelets-based advanced materials and recent progress in sustainable applications, *Appl. Sci.* 8 (2018). <https://doi.org/10.3390/app8091438>.
- [32] O. Altuntas, M. Ozer, G. Altuntas, A. Ozer, Investigation of the microstructure, hardness and electrical conductivity properties of Fe/Graphene compacts, *Mater. Sci. Technol. (United Kingdom)*. 39 (2023) 2670–2679. <https://doi.org/10.1080/02670836.2023.2213554>.
- [33] S.K. Patel, V.P. Singh, B.S. Roy, B. Kuriachen, Recent research progresses in Al-7075 based in-situ surface composite fabrication through friction stir processing: A review, *Mater. Sci. Eng. B.* 262 (2020) 114708. <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2020.114708>
- [34] A. Kumar, V. Kumar, A review of recent progress in the fabrication of surface composites through friction stir processing, *Mater. Today Proc.* 63 (2022) 494–503. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.03.648>
- [35] R.K. Arya, R. Kumar, A. Telang, A.S. Yadav, Effect of Microstructure on Mechanical Behaviors of Al6061 Metal Matrix Composite Reinforced with Silicon Nitride (Si₃N₄) and Silicon Carbide (SiC) Micro Particles, *Silicon*. 15 (2023) 5911–5923. <https://doi.org/10.1007/s12633-023-02468-6>.
- [36] R.F. Guo, S.M. Chen, P. Shen, Influence of Si, Ti, and Cu as alloying elements on the wettability and reactivity of an Al/B₄C system, *J. Mater. Res. Technol.* 27 (2023) 6104–6116. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.11.058>.
- [37] A. Jamali, S.E. Mirsalehi, Investigation on effects of traverse speed and number of passes on mechanical and abrasive properties of AA7075-T6/ZrO₂ surface nanocomposite produced using friction stir processing, *Weld. World.* 66 (2022) 2297–2313. <https://doi.org/10.1007/s40194-022-01331-3>.
- [38] İ. ŞİMŞEK, The Effect of B₄C Amount on Wear Behaviors of Al-Graphite/B₄C Hybrid Composites Produced by Mechanical Alloying, *J. Boron.* 4 (2019) 100–106. <https://doi.org/10.30728/boron.556707>.
- [39] S. Singh, K. Pal, Effect of texture evolution on mechanical and damping properties of SiC/ZnAl₂O₄/Al composite through friction stir processing, *J. Mater. Res. Technol.* 8 (2019) 222–232. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2017.07.006>.
- [40] V. Sharma, U. Prakash, B.V.M. Kumar, Surface composites by friction stir processing: A review, *J. Mater. Process. Technol.* 224 (2015) 117–134. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2015.04.019>.
- [41] T. Senthilnathan, K. Balachandar, Mechanical and microstructure evaluation of novel hybrid TiB₂/B₄C aluminium metal matrix composite, *Mater. Res. Express.* 10 (2023). <https://doi.org/10.1088/2053->

- 1591/acda18.
- [42] E.B. Moustafa, A. Melaibari, G. Alsuruji, A.M. Khalil, A.O. Mosleh, Al 5251-based hybrid nanocomposite by FSP reinforced with graphene nanoplates and boron nitride nanoparticles: Microstructure, wear, and mechanical characterization, *Nanotechnol. Rev.* 10 (2021) 1752–1765. <https://doi.org/10.1515/ntrev-2021-0108>.
- [43] M. Çelebi, A. Çanakçı, O. Güler, S. Özkaya, A.H. Karabacak, K.A. Arpacı, Investigation of Microstructure, Hardness and Wear Properties of Hybrid Nanocomposites with Al2024 Matrix and Low Contents of B4C and h-BN Nanoparticles Produced by Mechanical Milling Assisted Hot Pressing, *Jom.* 74 (2022) 4449–4461. <https://doi.org/10.1007/s11837-022-05441-7>.
- [44] I. Şahin, A. Bektaş, F. Gül, H. Çinici, Modeling of wear behavior of Al/B4C composites produced by powder metallurgy, *Mater. Test.* 59 (2017) 491–496. <https://doi.org/10.3139/120.111028>.
- [45] M.C. Şenel, M. DemİR, Effect of Induction Heat Treatment Process and Graphene/B4C Amount on the Tribological and Mechanical Properties of Al6061 Hybrid Composites, *Jom.* 75 (2023) 2554–2568. <https://doi.org/10.1007/s11837-023-05790-x>.
- [46] N.F.B. Wakhi Anuar, M.S. Salleh, M.Z. Omar, W.F.H.W. Zamri, A. Md Ali, S. Samat, Wear properties of graphene-reinforced aluminium metal matrix composite: A review, *Rev. Adv. Mater. Sci.* 62 (2023). <https://doi.org/10.1515/rams-2022-0326>.
- [47] R. Harichandran, N. Selvakumar, Effect of nano/micro B4C particles on the mechanical properties of aluminium metal matrix composites fabricated by ultrasonic cavitation-assisted solidification process, *Arch. Civ. Mech. Eng.* 16 (2016) 147–158. <https://doi.org/10.1016/j.acme.2015.07.001>.
- [48] S. Rengifo, C. Zhang, S. Harimkar, B. Boesl, A. Agarwal, Tribological Behavior of Spark Plasma Sintered Aluminum-Graphene Composites at Room and Elevated Temperatures, *Technologies.* 5 (2017) 4. <https://doi.org/10.3390/technologies5010004>.
- [49] H. min Xia, L. Zhang, Y. chao Zhu, N. Li, Y. qi Sun, J. dong Zhang, H. zhong Ma, Mechanical properties of graphene nanoplatelets reinforced 7075 aluminum alloy composite fabricated by spark plasma sintering, *Int. J. Miner. Metall. Mater.* 27 (2020) 1295–1300. <https://doi.org/10.1007/s12613-020-2009-0>.