

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

PART C: TASARIM VE TEKNOLOJİ

Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology



ISSN: 2147-9526

Year: 2025, Volume: 13 Issue: 1

İmtiyaz Sahibi/ Owner	Prof. Dr. Uğur ÜNAL – 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. Mustafa AKTAŞ – Gazi Üniversitesi Prof. Dr. Nihat ÖZTÜRK – Gazi Üniversitesi Prof. Dr. Murat Tolga ÖZKAN – Gazi Üniversitesi Prof. Dr. Muhammet Ali AKCAYOL – Gazi Üniversitesi Prof. Dr. Yusuf Tansel İÇ – Başkent Üniversitesi Prof. Dr. Sinan AKSÖZ – Pamukkale Üniversitesi Prof. Dr. Sait Dünder SOFUOĞLU – Kütahya Dumlupınar Üniversitesi Prof. Dr. Fatih Emre BORAN – Gazi Üniversitesi Prof. Dr. Adem ACIR – Gazi Üniversitesi Doç. Dr. Ahmet AKTAŞ – Gazi Üniversitesi Doç. Dr. Gökhan SÜRÜCÜ – Gazi Üniversitesi Doç. Dr. Volkan KILIÇLI – Gazi Üniversitesi Doç. Dr. Halil KARAKOÇ – Hacettepe Üniversitesi Doç. Dr. Beste Desticioğlu TAŞDEMİR – Milli Savunma Üniversitesi Doç. Dr. İlyas KARASU – Samsun Üniversitesi Doç. Dr. Mehmet Rıda TÜR – Batman Üniversitesi Dr. Öğr. Üyesi Seda ŞAHİN – Çankırı Karatekin Üniversitesi

	<p>Dr. Öğr. Üyesi Muhammed Ali KOŞAN – Kahramanmaraş İstiklal Üniversitesi</p> <p>Dr. Öğr. Üyesi Berre KÜMÜK – İskenderun Teknik Üniversitesi</p> <p>Dr. Öğr. Üyesi Sinem UZUN – Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi</p> <p>Dr. Öğr. Üyesi Güven MERAL – Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi</p> <p>Dr. Öğr. Üyesi Muhsine Bilge İMER – Orta Doğu Teknik Üniversitesi</p> <p>Dr. Öğr. Üyesi İdris Tuğrul GÜLENÇ – Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi</p> <p>Dr. Öğr. Üyesi Sidem KANER – Pamukkale Üniversitesi</p> <p>Öğr. Gör. Dr. Emre AYHAN – Gazi Üniversitesi</p>
Sekretarya / Secretariat	Dr. Öğr. Üyesi Selçuk YAĞMUR– Gazi Üniversitesi
Mizanpaj Editörleri / Layout Editors	<p>Oğuz Kaan ÇİNİCİ – Gazi Üniversitesi</p> <p>Yaren GÜVEN – Gazi Üniversitesi</p> <p>Can ALİCAN – Gazi Üniversitesi</p>
Teknik Editör / Technical Editor	Medine ÖZKAYA – Gazi Üniversitesi

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 yayımına 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. **Comparison of ASE Spectrums of Single Pass and Double Pass Er, Yb, Er-Yb Doped Fiber Amplifiers** (Araştırma Makalesi), Pouria PISHGAM, Murat YÜCEL 1
2. **Optuna Tabanlı Hiper Parametre Optimizasyonu ile Konut Fiyat Tahminlemede Makine Öğrenmesi Tekniklerinin Karşılaştırmalı Analizi** (Araştırma Makalesi), Vahid SİNAP 10
3. **Hibrit Aktarım Öğrenme Tekniklerini Kullanarak Beyin Tümörü Sınıflandırmasında Yeni Sonuçlar** (Araştırma Makalesi), Doğukan KALENDER, Atahan ÖZTÜRK, Ömer BİLGİN, Durmuş Özkan ŞAHİNİ 29
4. **Post-Disaster Vehicle Routing Problem Under Uncertain Time** (Araştırma Makalesi), İlknur TÜKENMEZ 48
5. **Galvaniz Kaplı 3. Nesil Çeliklerde Nokta Direnç Kaynağı Sonrası Sıvı Metal Kırılabilirliği Oluşumu** (Derleme Makalesi), Tanya A. Başer, Mehtap Hidroğlu, Nizamettin Kahraman 60
6. **Sıcak Preslenmiş Bronz-Nikel-Kobalt'lı Matrislere Sıvı Fazın Etkisinin İncelenmesi** (Araştırma Makalesi), Büşra TUNÇ, Ertuğrul ÇELİK 75
7. **UV Weathering of Green Composites Based on Polyamide 6 (PA6) and Sunflower Seed (Helianthus Annuus L.) Husk, Pistachio (Pistacia Vera L.) Shell and Walnut (Juglans Regia L.) Shell Flour** (Araştırma Makalesi), Emel KURAM, Fatih AYDINLI, Omer Faruk AKKUZU, Babur OZCELIK 87
8. **Effect of Processing Parameters on Cutting Torque in Boring of AISI P20 Plastic Mold Steel on Vertical Machining Machine** (Araştırma Makalesi), Aslan AKDULUM, Mehmet SÜZGÜNOL, Yunus KAYIR 101
9. **Alümina (Al₂O₃) Takviyeli Petek Çekirdekli Sandviç Panellerin Yüksek Hızlı Darbe Tepkisi: Sayısal Analiz Çalışması** (Araştırma Makalesi), İsmail TÜRKDÖNMEZ, Yusuf Tansel İÇ 112
10. **Akarsu Ortalama Akımlarının Çeşitli Makine Öğrenme Algoritmaları Kullanılarak Tahmini: Köprüçay Örneği** (Araştırma Makalesi), Yunus Ziya KAYA 130
11. **Common Aperture DSLR Camera Design Approach with Diffractive Lens** (Araştırma Makalesi), Ahmet ÜNAL 143
12. **An Arbitrage Study with Wind-Solar-BESS Hybrid Power Plant** (Araştırma Makalesi), Eren GÜZ, Kübra Nur AKPINAR 154
13. **Performance investigation of a vapor compression refrigeration system with and without heat exchanger using mono and hybrid nanofluids and operated with R1234yf** (Araştırma Makalesi), Kemal SARIOĞLU, Gökhan YILDIZ 169

İÇİNDEKİLER / CONTENTS

14. **Design of Simulation Program for Analysis of Shortest Path Algorithms in Grid-Based Path Planning** (Araştırma Makalesi), İbrahim ŞANLIALP, İbrahim YANDI 187
15. **Impact of Channel Geometry and Operating Temperature on the Performance of Solid Oxide Electrolyzer Cells: A Study of Uniform and Non-Uniform Temperature Effects** (Araştırma Makalesi), Berre KUMUK 200
16. **Reducing Carbon Footprint in Ankara: The Use of Biodiesel Produced from Waste Oils in Public Transportation** (Araştırma Makalesi), Osman Furkan KAPIKIRAN, Halil İbrahim VARİYENLİ, Mert ÖKTEN, Semih Sadi KILIÇ 219
17. **Thermodynamic and Exergoeconomic Assessment of a Solar-Assisted Combined Cooling, Heating, and Power System in Antalya, Turkey** (Araştırma Makalesi), Abdulrazzak AKROOT, Mohammed REFAEI 231
18. **Optimization of Vortex Tube Design Parameters Using the Taguchi Method** (Araştırma Makalesi), Himmet Erdi TANÜRÜN, Adem ACIR 245
19. **Mimari Tasarım Sürecinde Kapsayıcı Sanal Gerçeklik Kullanımının Araştırılması** (Araştırma Makalesi), Gönenç KURPINAR, Aslıhan ÇEVİK, Yeliz KURPINAR 260
20. **MAG Kaynak Yöntemiyle Farklı Kaynak Parametreleri Kullanılarak Birleştirilen S235 ve S355 Çeliklerinin Kaynak Bölgelerinin İncelenmesi** (Araştırma Makalesi), Halil GÜLTOPLAYAN, Mehmet Serkan YILDIRIM, Yakup KAYA 272
21. **Evaluating the Trade-Off Between Energy Efficiency and Energy Saving in Spray Drying Operations** (Araştırma Makalesi), Gülşah KARACA DOLGUN 285
22. **ZrO₂ Katkılanmış Karbon Fiber Takviyeli Polimer Kompozitlerin Termal ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi** (Araştırma Makalesi), Esra ÖZTÜRK, Erdem MERMER, Hanifi ÇİNİCİ 296
23. **CO₂ Emission Inventory in Türkiye and Estimation of CO₂ Concentration over Türkiye by Using Dispersion Modelling** (Araştırma Makalesi), Ali CAN, Aysel T. ATIMTAY, Turgut TOKDEMİR 308
24. **Numerical Modal Analysis of Foams with Different Types and Configurations** (Araştırma Makalesi), Kübra Çağla ÇIBIKÇI, Mustafa YAMAN 330
25. **Analysis of Mechanical and Thermal Material Characteristics of GPL-Reinforced Double-FG Composite Nanoplates under Temperature Load** (Araştırma Makalesi), Kerim Gökhan AKTAŞ 341
26. **3D Printing Applications in the Biomedical Industry** (Derleme Makalesi), Mustafa GÜNEŞ, Metin ZEYVELİ 355

İÇİNDEKİLER / CONTENTS

27. **Enhancing Multi-Disease Prediction with Machine Learning: A Comparative Analysis and Hyperparameter Optimization Approach** (Araştırma Makalesi), Mariam KİLİ BECHIR, Ferhat ATASOY 367
28. **Measuring The Effect Of The Use Of Electronic Information System In The Service Industry On The Service Quality with Benchmarking Approach and Its Application In A Resting Facility** (Araştırma Makalesi), Olcay Özge ERSÖZ, Adnan AKTEPE, Süleyman ERSÖZ, Ahmet Kürşad TÜRKER 382
29. **İki Farklı Düzeyde Isıl İşlem Uygulanmış Ahşap Özelliklerinin Karşılaştırmalı Deneysel Olarak İncelenmesi** (Araştırma Makalesi), Kevser KÖKTÜRK, Mustafa ALTUNOK 392
30. **Voltage Level Managements of Multilevel Inverter Based on Renewable Energy Sources and Environment Conditions** (Araştırma Makalesi), Ahmed Yaseen Hamad, Ersagun Kürşat Yaylacı, Rakan Khalil Antar 404

Comparison of ASE Spectrums of Single Pass and Double Pass Er, Yb, Er-Yb Doped Fiber Amplifiers

Pouria PISHGAM¹  Murat YÜCEL^{2*} 

¹Gazi University Dept. of Electrical-Electronic Engineering, Faculty of Technology Ankara, Turkey, pouria.pishgam1@gazi.edu.tr

²Gazi University Dept. of Electrical-Electronic Engineering, Faculty of Technology Ankara, Turkey, muyucel@gazi.edu.tr

Article Info

Research article

Received: 05/12/2024

Revision: 20/12/2024

Accepted: 21/12/2024

Keywords

Amplified spontaneous emission
EDFA
YDFA
EYDFA
Single-pass
Double-pass

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi

Başvuru: 05/12/2024

Düzeltilme: 20/12/2024

Kabul: 21/12/2024

Anahtar Kelimeler

Kendiliğinden yükseltilmiş yayılma
EDFA
YDFA
EYDFA
Tek geçiş
Çift geçiş

Graphical/Tabular Abstract (Grafik Özet)

In the study, single pass and double pass amplifier systems were compared with dual port optical analyzer. By adding EDF, YDF, EYDF to the doped fiber block, single and double pass arrangements were examined. /Çalışmada tek geçişli ve çift geçişli yükselteç sistemlerinin dual port optic analizörle karşılaştırılmaları yapılmıştır. Katkılı fiber blokuna EDF, YDF, EYDF ekleyerek tek ve çift geçişli düzenekler halinde incelemeler yapılmıştır.

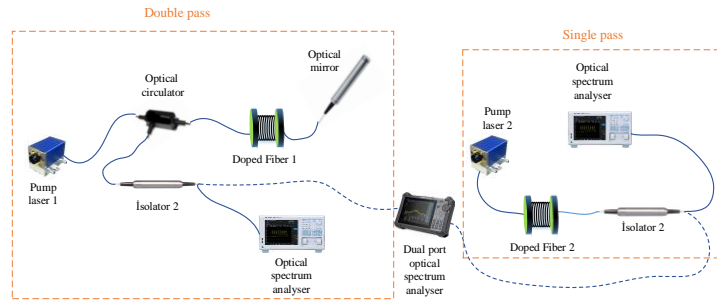


Figure 2: Single-pass and double-pass schemes / Şekil 2: Tek geçişli ve çift geçişli düzenek

Highlights (Önemli noktalar)

- Analyses of EDFA, YDFA and EYDFA setups were carried out by taking the equations obtained from the erbium energy band level as an example. /Erbiyum enerji bant seviyesinden elde edilen denklemler örnek alınarak EDFA, YDFA ve EYDFA düzeneklerinin analizleri yapılmıştır.
- Single- and double-pass setups were analyzed separately for each fiber type/ Tek ve çift geçişli düzenekler her bir fiber türü için ayrı ayrı analiz edilmiştir.
- ASE spectra obtained in EDFA, YDFA and EYDFA setups were analyzed. / EDFA, YDFA ve EYDFA setuplarında elde edilen ASE spektrumları analiz edilmiştir.

Aim (Amaç): In the study, the ASE values of EDFA, YDFA and EYDFA doped optical amplifiers in single and double pass setups were examined and the setup with higher ASE values was shown in graphs. / Çalışmada EDFA, YDFA ve EYDFA katkılı optik yükselteçlerin tek ve çift geçişli düzeneklerde ASE spektrumları incelenmiştir ve hangi düzenekte ASE değerinin daha yüksek olduğu grafiklerde gösterilmiştir.

Originality (Özgünlük): The originality of the study is that ASE spectra for EDFA, YDFA and EYDFA are optimized and obtained and compared in single and double pass setups. / EDFA, YDFA ve EYDFA için ASE spektrumlarının optimize edilerek tek ve çift geçişli düzeneklerde elde edilmesi ve kıyaslanması çalışmanın özgünlüğüdür.

Results (Bulgular): The ASE value for EDFA was 0 dBm in the double-pass setup and -6 dBm in the single-pass setup, while for YDFA these values were 11 dBm at 975.3 nm and -17 dBm at 976 nm in the double-pass and single-pass setups, respectively, and 4.84 at 1560 nm and -14 dBm at 1568 nm in the double-pass and single-pass setups in EYDFA, respectively. /EDFA için ASE değeri çift geçişli düzenekte 0 dBm ve tek geçişlide -6 dBm, YDFA için bu değerler çift geçişli ve tek geçişli de sırasıyla 975.3 nm'de 11 dBm ve 976 nm'de -17 dBm oldu ve EYDFA'da çift geçişli ve tek geçişli düzeneklerde sırasıyla 1560 nm'de 4.84 ve 1568 nm'de -14 dBm olarak elde edildi.

Conclusion (Sonuç): As a result, higher ASE value was obtained in double-pass setups with the same amplifiers and the highest ASE value was obtained as 4.84 dBm in the C operating band at 1560 nm wavelength in the EYDFA setup. / Sonuç olarak, aynı yükselteçler ile çift geçişli düzeneklerde daha yüksek ASE değeri elde edildi ve EYDFA kurulumunda 1560 nm dalga boyunda C çalışma bandında en yüksek ASE değeri 4,84 dBm olarak elde edildi.



Comparison of ASE Spectrums of Single Pass and Double Pass Er, Yb, Er-Yb Doped Fiber Amplifiers

Pouria PISHGAM¹ Murat YÜCEL^{2*}

¹Gazi University Dept. of Electrical-Electronic Engineering, Faculty of Technology, Ankara, Turkey, pouria.pishgam1@gazi.edu.tr

²Gazi University Dept. of Electrical-Electronic Engineering, Faculty of Technology, Ankara, Turkey, muyucel@gazi.edu.tr

Article Info

Research article
Received: 05/12/2024
Revision: 20/12/2024
Accepted: 21/12/2024

Keywords

Amplified spontaneous emission
EDFA
YDFA
EYDFA
Single-pass
Double-pass

Abstract

In this study, the amplified spontaneous emission (ASE) spectra of Erbium (EDFA), Ytterbium (YDFA), and Erbium-Ytterbium (EYDFA) doped optical amplifiers were obtained in single-pass and double-pass simulation setups, compared and interpreted with each other. The spectra of the single-pass and double-pass setups of EDFA, YDFA, and EYDFA were compared using the ASE equations obtained at the Erbium energy level. The values applied in the single-pass and double-pass simulations, pump wavelength, pump power, amplifier length, and amplifier parameters, were assumed equally in both models. The pump wavelength for EDFA was 1480 nm, and the pump power was 1400 mW; the pump wavelength for YDFA was 960 nm, and the pump power was 800 mW, and these values were applied as 1025 nm and 1600 mW for EYDFA, respectively. The graphs at the output of the dual port spectrum analyzer showed that higher ASE values were obtained in the double-pass environment compared to the single-pass environment.

Tek Geçişli ve Çift Geçişli Er, Yb, Er-Yb Katkılı Fiber Amplifikatörlerin ASE Spektrumlarının Karşılaştırılması

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 05/12/2024
Düzeltilme: 20/12/2024
Kabul: 21/12/2024

Anahtar Kelimeler

Kendiliğinden yükseltilmiş yayılma
EDFA
YDFA
EYDFA
Tek geçiş
Çift geçiş

Öz

Bu çalışmada, Erbiyum (EDFA), İterbiyum (YDFA) ve Erbiyum-İterbiyum (EYDFA) katkılı optik yükselteçlerin güçlendirilmiş spontan emisyon (ASE) spektrumları tek geçişli ve çift geçişli simülasyon düzeneklerinde elde edilmiş, birbirleriyle karşılaştırılmış ve yorumlanmıştır. EDFA, YDFA ve EYDFA'nın tek geçişli ve çift geçişli kurulumlarının spektrumları, Erbiyum enerjisi seviyesinde elde edilen ASE denklemleri kullanılarak karşılaştırılmıştır. Tek geçişli ve çift geçişli simülasyonlarda uygulanan değerler, pompa dalga boyu, pompa gücü, yükselteç uzunluğu ve yükselteç parametreleri her iki modelde de eşit olarak kabul edilmiştir. EDFA için pompa dalga boyu 1480 nm ve pompa gücü 1400 mW idi; YDFA için pompa dalga boyu 960 nm, pompa gücü ise 800 mW olarak bulunmuş, bu değerler EYDFA için sırasıyla 1025 nm ve 1600 mW olarak uygulanmıştır. Çift portlu spektrum analizörünün çıkışındaki grafikler, çift geçişli ortamda, tek geçişli ortama kıyasla daha yüksek ASE değerlerinin elde edildiğini göstermiştir.

1. INTRODUCTION (GİRİŞ)

Optical sensing and communication systems are important in various applications in terrestrial, space, and submarine environments. However, integrating these systems poses several challenges, especially regarding energy sustainability and control [1-3]. Optical amplifiers are used to compensate for signal loss in optical systems. These

amplifiers are classified according to various characteristics. The most used amplifiers are rare earth-doped fiber optic amplifiers. Erbium, Ytterbium, and Erbium-Ytterbium doped optical amplifiers are widely used due to their operating wavelengths and other properties [3-5].

Power attenuation and signal loss due to long distances in fiber optic transmission lines have been the subject of much research today. Increasing the

signal power along the transmission line is the best solution, and various methods are used [6-8]. The most common and efficient of these methods are rare earth-doped optical amplifiers. Erbium, Ytterbium, and Erbium-Ytterbium doped optical amplifiers are widely used due to their operating wavelengths and other features [9-14].

In rare earth-doped fiber optic amplifiers, amplified spontaneous emission (ASE) is a noise generated by the pump signal applied to the system and in the amplifier energy band structure. The pump signal applied to the doped fiber causes the atoms of the element to move from the ground level to a higher level. Some of the atoms accumulated at the metastable level emit photons from themselves while descending to a lower level, and the emitted photon beams are called ASE. Since ASE emission does not have the same phase and characteristics as the input signal, it reduces the gain [10]. In general, ASE is a type of noise that occurs in optical laser sources, semiconductor optical amplifiers, and doped optical amplifiers. Still, more efficient optical amplifiers have been designed for certain wavelengths by optimizing the ASE value [15-30].

Broadband optical devices in the 1500–2100 nm wavelength range have recently attracted much research attention [21-24]. These devices include lasers, amplifiers, sensors, and optical sources. Optical sources can be based on doped fibers' enhanced spontaneous emission phenomenon. ASE sources are widely used in many applications, including medicine, imaging, and environmental monitoring through the detection of chemicals [10, 12].

In this study, ASE values of Er, Yb, and Er-Yb doped optical amplifiers were obtained and examined in single-pass and double-pass setups. In addition, absorption, emission, N_1 and N_2 graphs and values of the amplifiers were obtained.

In the second part of the study, information about the theory of EDFA will be given; simulation setups will be given in the third part. Finally, the results obtained from the study will be concluded in the fourth part.

2. EDFA THEORETICAL MODEL (EDFA TEORİK MODELİ)

For theoretical modeling of EDFA systems, equations obtained from Erbium energy band level facilitated doped fiber design, and the effects and characteristics of the parameters can be found. Therefore, in this study, Er³⁺ energy band level rate

equations were first written, then equations for propagation equations and ASE were obtained.

2.1. Rate Equations (Oran Denklemleri)

Figure 1 shows the 2-level erbium energy band level. ${}^4I_{13/2}$ is level 2 and ${}^4I_{15/2}$ is level 1.

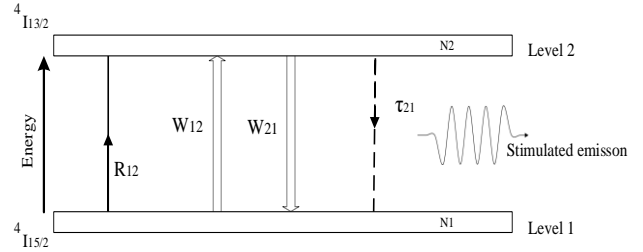


Figure 1. Erbium energy band levels (Erbium enerji bant seviyeleri)

$$\frac{dN_1}{dt} = -R_{12}N_1 - W_{12}N_1 + W_{21}N_2 + N_2 / \tau_{21} \quad (1)$$

$$\frac{dN_2}{dt} = R_{12}N_1 + W_{12}N_1 - W_{21}N_2 - N_2 / \tau_{21} \quad (2)$$

Here, the transition rate corresponds to the energy levels W_{ij} , N_i and N_j , and R_{ij} is the pump transition rate between N_i , N_j and [8].

Generally, τ_{21} is the stimulated emission lifetime and is radiative [9].

At the 1480 nm pump wavelength, the EDFA energy band level operates in 2 levels. Level 2 contributions are made only through the 1480 nm pump wavelength absorption cross-section from Level 1 to Level 2, as shown in Figure 1 [14]. This study performed EDFA simulation studies at 1480 nm pump wavelength.

2.2. Propagation Equations (Yayımlım Denklemleri)

The dynamic propagation equations can be written as follows, with pump propagation at P_p wavelength of 1480 nm and signal propagation P_s at 1550 nm with EDFA length (L) and z-direction:

$$\frac{dP_p}{dz} = -\Gamma_p P_p (N_1 \sigma_{12(pa)} - N_2 \sigma_{21(pe)}) - \alpha_p P_p \quad (3)$$

$$\frac{dP_s}{dz} = -\Gamma_s P_s (N_1 \sigma_{12(sa)} - N_1 \sigma_{21(se)}) - \alpha_s P_s \quad (4)$$

In the above equations, P_p and P_s are the pump power and signal power, respectively, Γ_p and Γ_s are the pump and signal overlap factor, respectively, $\sigma_{12(pa)}$ is the pump absorption cross-sectional area, $\sigma_{21(pe)}$ is the pump propagation cross-sectional area, $\sigma_{12(sa)}$ is the signal absorption cross-sectional area, $\sigma_{21(se)}$ is the signal propagation cross-sectional area, α_p is the loss in pump signal wavelength and α_s is the loss in signal wavelength [13].

2.3. Amplified Spontaneous Emission (ASE)

Equations (Kendiliğinden Yükseltmiş Yayılma (ASE))

ASE is generated in the active fiber and travels forward and backward. The total ASE power is the sum of the forward and backward ASE powers in the z -direction in the erbium-doped fiber. ASE emission can be obtained from the following equations at a given wavelength:

$$\frac{dP_{ASE}^+}{dz} = \Gamma_s P_{ASE}^+ (N_2 \sigma_{21(se)} - N_1 \sigma_{12(sa)}) + 2\Gamma_s \sigma_{21(se)} N_2 h\nu_s \Delta\nu - \alpha_s P_{ASE}^+ \quad (5)$$

$$\frac{dP_{ASE}^-}{dz} = -\Gamma_s P_{ASE}^- (N_2 \sigma_{21(se)} - N_1 \sigma_{12(sa)}) - 2\Gamma_s \sigma_{21(se)} N_2 h\nu_s \Delta\nu + \alpha_s P_{ASE}^- \quad (6)$$

$$P_{ASE} = \Gamma_s \sigma_{21(sa)} N_2 P_0 \quad (7)$$

$$P_0(\lambda) = \frac{2hc^2}{\lambda^3} \quad (8)$$

Assuming Equation $\frac{dN_1}{dt} = \frac{dN_2}{dt} = 0$, equations

N_1 and N_2 are as follows:

$$N_1 = \frac{(1 + W_{21}\tau_{21})N}{1 + (W_{12} + W_{21})\tau_{21} + R_{12}\tau_{21}} \quad (9)$$

$$N_2 = \frac{(R_{12}\tau_{21} + W_{12}\tau_{21})N}{1 + (W_{12} + W_{21})\tau_{21} + R_{12}\tau_{21}} \quad (10)$$

Finally, the following equations can be written for the pumping rate R_{12} and the throughput rate W_{ij} :

$$W_{12} = \frac{\Gamma_s \sigma_{12(sa)}}{h\nu_s A} (P_s + P_{ASE}^+ + P_{ASE}^-) \quad (11)$$

$$W_{21} = \frac{\Gamma_s \sigma_{21(se)}}{h\nu_s A} (P_s + P_{ASE}^+ + P_{ASE}^-) \quad (12)$$

$$R_{12} = \frac{\Gamma_p P_p \sigma_{12(pa)}}{h\nu_p A} \quad (13)$$

3. SIMULATION SETUPS (SİMÜLASYON DÜZENEKLERİ)

Figure 2 shows all doped fibers' single and double pass configurations. Table 1 shows the parameters used in the simulation for all doped fibers.

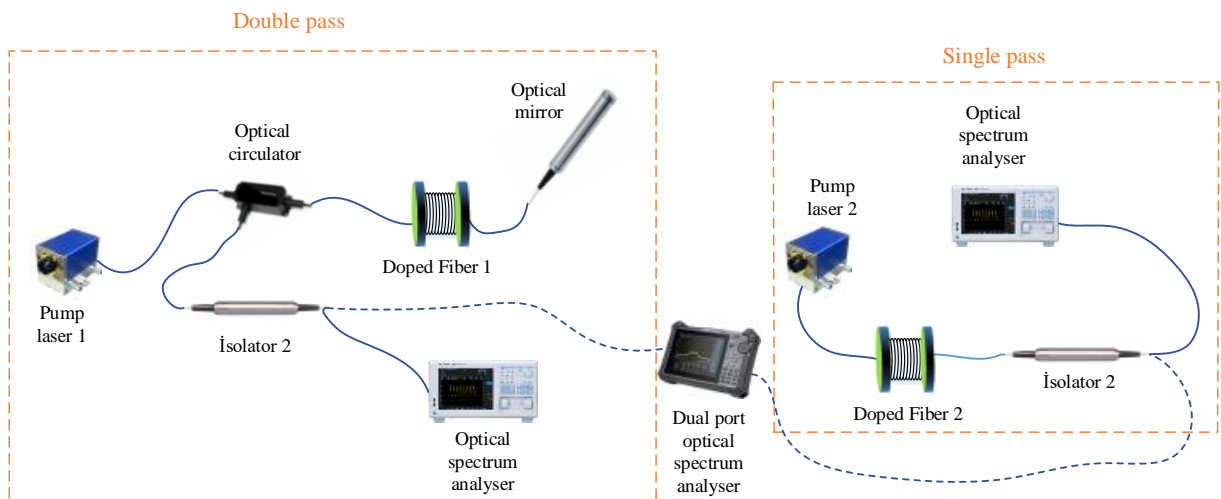


Figure 2. Single-pass and double-pass schemes (Tek ve çift geçişli düzenekler)

Table 1. Doped fiber parameters (Katkılı fiber parametreleri)

Parameters	EDFA	YDFA	EYDFA
Numerical aperture	0.24	0.2	0.15
Metastable lifetime (ms)	10	9.9	Er=10, Yb=1.5
Core radius (μm)	1.4	3.4	2
Ion density (m^{-3})	2200	1000	Er= 5140, Yb= 6200
doping radius (μm)	1.3	3.4	2
Pump wave length (nm)	1480	960	1025
Pump power (mW)	400	800	1600
Doped fiber length (m)	4.3	6	16

3.1. EDFA Analysis (EDFA Analizi)

In this section, the results were obtained by placing Erbium-doped fiber (EDF) in the doped fiber blocks in Figure 2 and using the EDFA parameters in Table 1. Figure 2 shows the ASE comparison of two different setups fed from two pump sources in the EDFA simulation setup. The dual port optical analyzer makes the comparison, and the obtained result is shown in Figure 3. According to the results, the ASE value in the double-pass amplifier reached its highest value of -0.25 dBm at 1533 nm, and this value was obtained as -6.25 dBm at 1533 nm in the single-pass amplifier.

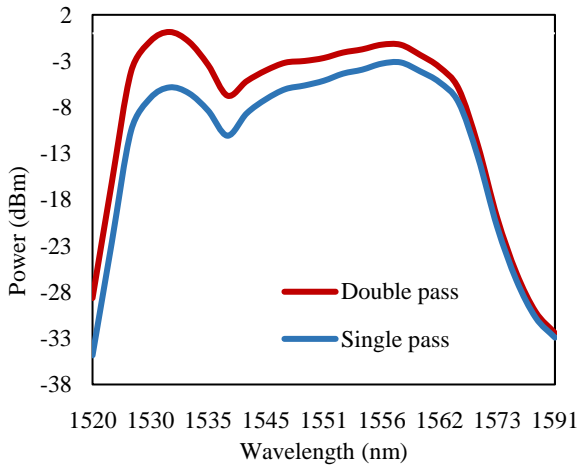


Figure 3. Comparison of ASE spectrums in EDFA double-pass and single-pass configurations (çift geçişli ve tek geçişli EDFA ASE spektrumlarının karşılaştırılması)

EDF absorption and emission values are shown in Figure 4. In the obtained graphs, as seen in Figure 2, the absorption and emission cross section reached their highest values at the wavelength where ASE

has the highest value, and an increase is observed in these values at the point where ASE rises at 1558 nm.

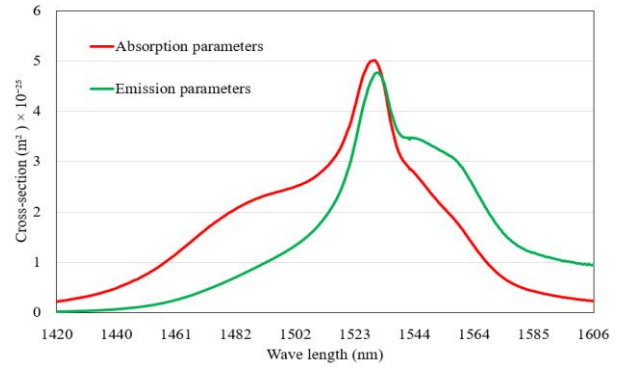


Figure 4. Erbium absorption and emission cross-section spectrums (Erbiyum soğurum ve yayılım kesit alanı spektrumları)

In this study, the EDF length was selected as 4.3 m. In Figure 5, the forward, backward ASE and N_1 , N_2 change graphs were obtained according to the EDF length. N_2 had the highest and lowest values around the EDF length of 1.81 meters, and the reason for this is that the population inversion reached its maximum value. Therefore, this region's forward and backward ASE values reached minimum values. As the length increased, the population inversion value decreased with the increase of N_1 and the decrease of N_2 in the lengths after 3.62 meters, and thus, the forward ASE value also started to increase. The fact that N_1 and N_2 were equal at 3.65 meters shows that light's absorption and emission ratio is balanced.

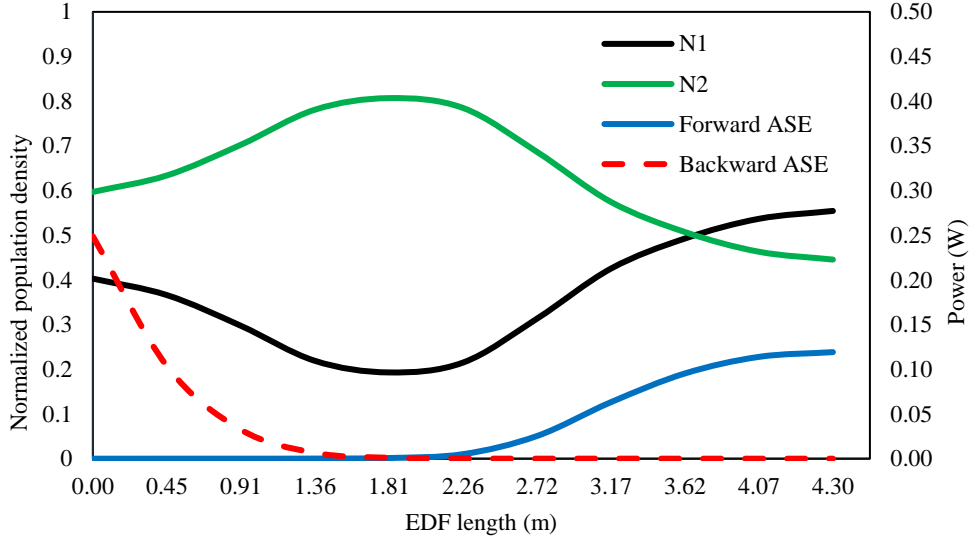


Figure 5. N_1 , N_2 , forward and backward ASE spectrums (İleri ve geri ASE, N_1 ve N_2 spektrumları)

3.2. YDFA Analysis (YDFA Analizi)

In the YDFA study, simulations and results were obtained for YDFA by taking the EDFA equations in Figure 1 as an example. The ASE graph is shown in Figure 6 using the same parameters in single and double-pass setups. The results were obtained using the YDFA parameter values in Table 1. According to the results, the ASE value increased to 9 dBm at the wavelength of 975.5 nm in the double pass simulation setup. This value was found to be -16.88 dBm for the single-pass system at the same wavelength. ASE values moved parallel to each other at wavelengths before 988 nm, and in the graphs after 988 nm, the two ASE intervals started to decrease and had almost equal values at 1100 nm.

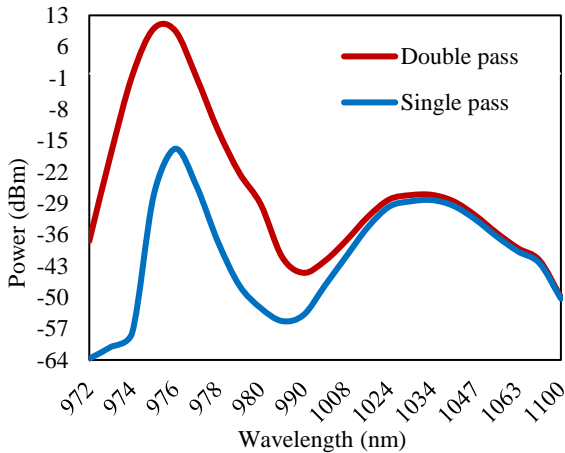


Figure 6. Comparison of ASE spectrums in YDFA double-pass and single-pass configurations (YDFA tek ve çift geçişli düzenekte ASE spektrumları)

Yb absorption and emission cross-section values were obtained graphically in this part of the study.

The wavelength at which the emission has the highest value is the highest value reached by ASE. However, the wavelength at which the absorption value reaches the highest point is the wavelength at which ASE is the lowest.

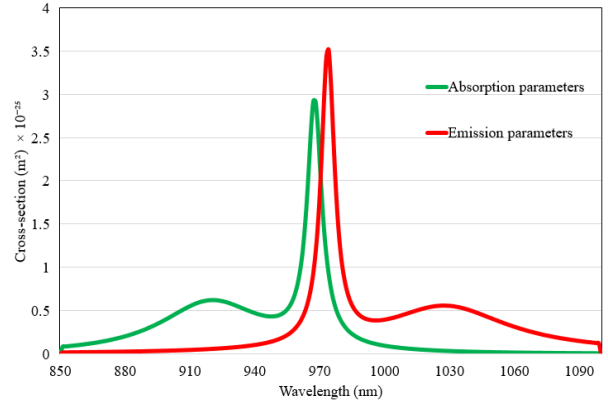


Figure 7. Yb absorption and emission cross-section spectrums (Yb soğurum ve yayılım kesit alan spektrumları)

Figure 8 shows Population N_1 , Population N_2 , forward ASE (F-ASE), and backward ASE (B-ASE). The number of electrons transferred from N_2 to N_1 reaches its highest value at the 1.3 m YDF length, and the forward ASE reaches its highest value with the number of electrons at the ground level reaching its highest value. At the length of 0.6 m, where N_2 has its highest value, the forward and backward ASE values become zero due to the high population inversion and in the region where stimulated emission is low.

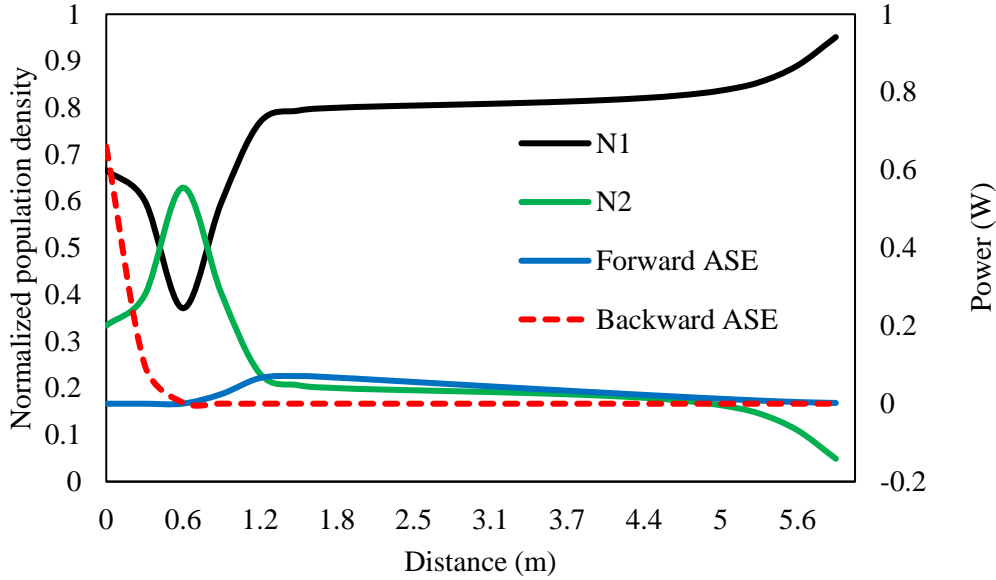


Figure 8. N_1 , N_2 , forward and backward spectrums in YDF (İleri ve geri ASE, N_1 ve N_2 spektrumları)

3.3. EYFDA Analysis (EYDFA Analizi)

For the EYDFA study, the equations obtained from the Erbium energy band level in Figure 1 were taken as an example, and the values of the parameters effective for ASE were obtained graphically using the EYDF parameters in Table 1.

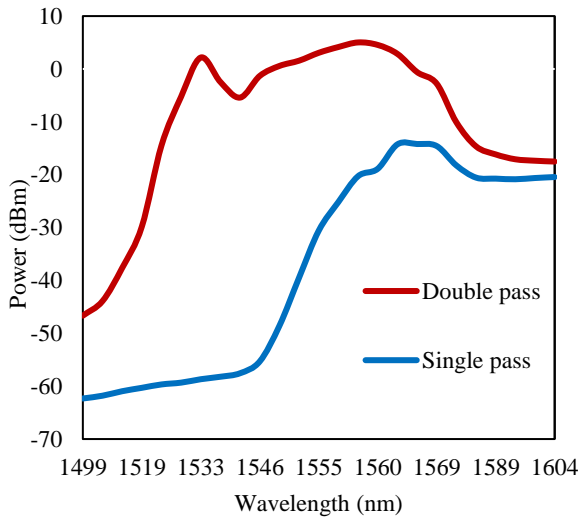


Figure 9. Comparison of ASE spectrums in EYDFA double-pass and single-pass configurations (Tek ve çift geçişli EYDFA düzeneğinin ASE spektrumları)

The ASE graphs of the double-pass and single-pass systems are shown in Figure 9. In the double-pass setup, the ASE value increased to 5 dBm at 1558 nm wavelength, and for the single-pass simulation environment, the highest ASE value increased to -14 dBm at 1565 nm. EYDFAs generally operate at a pump wavelength of 800-1100 nm; therefore,

considering studies in the literature, a pump wavelength of 1025 nm was applied for EYDFA in this study. Since the applied pump wavelength is close to the YDFA operating pump wavelength, the Yb emission and absorption values are higher than Er in Figure 10. Other reasons for this are the transfer of the energy of the pump source from Yb to Er and the ion density of Yb being higher than that of Er.

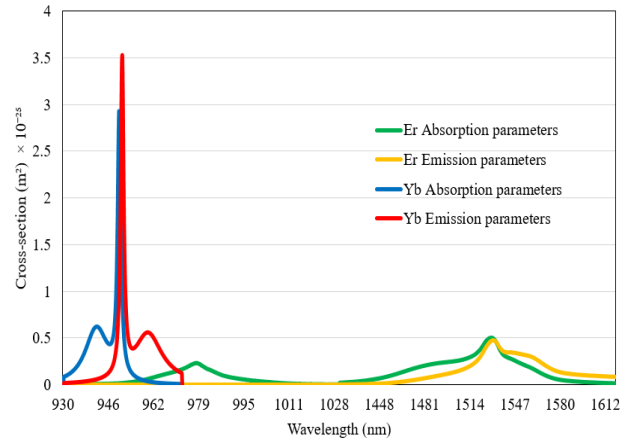


Figure 10. Yb and Er absorption and emission cross-sections spectrums (Yb, Er soğurum ve yayılım kesit alanı spektrumları)

Figure 11 shows the energy and total forward and backward ASE graphs in the EYDF band levels. Yb has an energy level of 2, and Er has an energy level of 4. Since the lifetimes of the electrons in the Er 3rd and 4th levels in the EYDF energy band level are very short, the energies of these levels are shown as zero in Figure 11, so as seen in the figure, the highest energy transfer (from 0 to 1W) is made for Yb at the N5 and N6 levels.

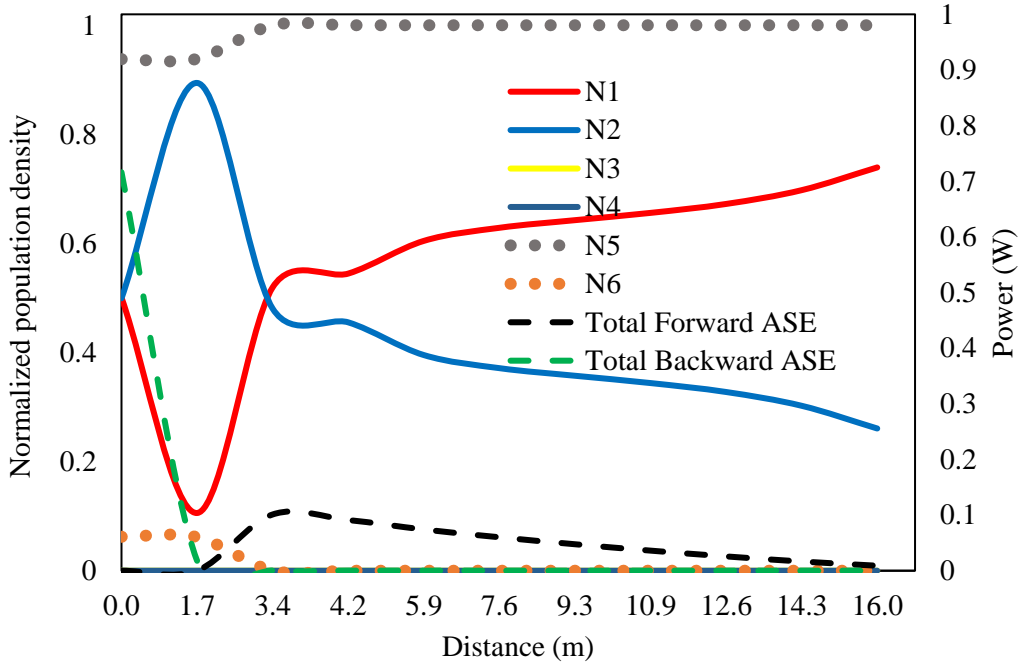


Figure 11. N1, N2, N3, N4, N5, N6, F-ASE and B-ASE according to EYDFA length (EYDFA uzunluğuna göre ileri ve geri ASE, N1, N2, N3, N4, N5 ve N6 spektrumları)

4. RESULTS AND CONCLUSIONS (BULGULAR VE SONUÇLAR)

In this study, Er, Yb, and Er-Yb doped optical amplifiers were examined and compared in single-pass and double-pass setups. The equations obtained from the Erbium energy band level (Figure 1) were taken as an example, and results were obtained for YDFA and EYDFA setups.

For the EDFA study, the highest ASE value in the double pass setup increased to 0 dBm at 1532 nm wavelength. At the wavelength where the emission value (Fig. 4) is highest, this value became -6 dBm in single pass at the same wavelength, and ASE values were obtained as 0 dBm and -3 dBm in double pass and single pass setups at 1558 nm wavelength, respectively.

In the YDFA setup, the highest ASE value was obtained at 975.3 nm in the region where the emission parameter is the highest, 11 dBm, while in the single pass setup, this value was obtained at 976 nm, -17 dBm. The highest ASE value obtained in the EYDFA simulation was 4.84 dBm at 1560 nm wavelength in the double pass setup and -14 dBm at 1568 nm in the single pass setup. In addition, the double pass setup increased the ASE spectrum to 2 dBm at 1533 nm.

As a result, the highest ASE value was obtained as 4.84 dBm in the C operating band at 1560 nm

wavelength in the double pass EYDFA setup, and -14 dBm ASE value was obtained in the 1568 nm L band in the single pass setup with the same amplifier. As can be seen, in EDFA and YDFA amplifiers, the highest ASE values did not reach the L band, and with the combination of Er and Yb rare earth elements, the ASE peak value and the amplifier operating band also moved towards the L band.

AUTHORS' CONTRIBUTIONS (YAZARLARIN KATKILARI)

Pouria PISHGAM: He conducted the simulations, analyzed the results, and performed the writing process.

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

Murat YÜCEL: He conducted the simulations, analyzed the results, and performed the writing process.

Metodoloji, sonuçların kontrolü, yazımların incelenmesi ve düzeltilmesi işlemlerini 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] Wahyu Hendra Gunawan; Juan M. Marin; Alaaeddine Rjeb; Chun Hong Kang; Islam Ashry; Tien Khee Ng, “Energy Harvesting Over Fiber From Amplified Spontaneous Emission in Optical Sensing and Communication Systems”, *Journal of Lightwave Technology*, 42 (2024) 6511-6521.
- [2] Becker, P. C., Olsson N. A., Simpson, J. R., “Erbium-Doped Fiber Amplifiers Fundamentals and Technology”, Academic Press, 1999.
- [3] Bao P. Q. , Son, L. H., “Gain and Noise in Erbium-Doped Fiber Amplifier (EDFA) - A Rate Equation Approach (REA)”, *Communications in Physics*, 141 (2004) 1-6.
- [4] Pishgam, P., Yücel, M., “Erbiyum, İterbiyum ve Erbiyum-İterbiyum Katkılı Optik Yükselteçlerde, Yükselteç Uzunluğunun ASE’ye Etkileri”, *Ankara International Congress On Scientific Research-X*, Ankara, Turkey, (2024) 388-399.
- [5] Torres-Ferrera, P., Rizzelli, G., Napoli, A., Gaudino, R., “Filtering Power Penalty Evaluation of Coherent Systems Affected by ASE and Transceiver Noise”, *Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC)*, 2024.
- [6] Yücel, M., Yiğit, E. “İki Aşamalı Üç Geçişli EKFY Tasarımı ve EKFY Parametrelerinin Optimizasyonu”, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım Ve Teknoloji*, 8 (2020) 335-344.
- [7] Celen, S., Özden, H., Uyar, E., “İterbiyum-Katkılı Fiber Lazerle Q-Anahtarlamalı Modda İmplant Yüzeyi Mikro-İmalatı Ve Karakterizasyonu”, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım Ve Teknoloji*, 2 (2014), 197-202.
- [8] Akcesme, O., Yücel, M., “Generation and Spectrum Analysis of C Band ASE Using Erbium-Doped Fibers with Different Properties”, *10th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ICEEE)* (2023).
- [9] Durak, F.E., Altuncu, A., “The effect of ASE reinjection configuration through FBGs on the gain and noise figure performance of L-Band EDFA”, *Optics Communications*, 386 (2016) 31- 36.
- [10] Qiao, L., Vella, P. J., “ASE Analysis and Correction for EDFA Automatic Control”, *Journal of Lightwave Technology*, 25(2007) 771-778.
- [11] Falconi, M. C., Loconsole, A.M., Portosi, V., Taccheo, S., Prudenzeno, F., “600 nm-Wide Band ASE Optical Source Exploiting a Tm:Er:Yb:Ho Co-Doped Germanate Fiber”, *2020 22nd International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*, Bari, Italy, (2020) 1-5.
- [12] Giles, C. R., Desurvire, E., “Modeling Erbium doped fiber Amplifier”, *Journal of Lightwave Technology*, 9 (1991) 271- 283.
- [13] Bulbul A., Zinat M. S., “ Numerical Analysis of Gain and Amplified Spontaneous Emission Characteristics in an Erbium Doped Fibre under 830 nm Pump”, *2019 International Conference on Electrical, Computer and Communication Engineering (ECCE)*, Bangladesh, (2019) 1-6.
- [14] Naji, A.W., Hamida, B.A., Cheng, X.S., Mahdi, M.,A, Harun, S.W., “Review of Erbium-Doped Fiber Amplifier,” *International Journal of the Physical Sciences*, 6 (2011) 4674-4689.
- [15] Yu, Y., Yingye A., Jianqiu C., Shaofeng, G., Xiaojun, X., “Experimental Study on All-Fiberized Continuous-Wave Yb-Doped Fiber Amplifier Operating Near 980 nm”, *IEEE Photonics Technology Letters*, 28 (2016) 398-401.
- [16] Kofod, N., Nawrocki, P.R., Platas-Iglesias, C., Sørensen, T.J., “Electronic Structure of Ytterbium(III) Solvates-a Combined Spectroscopic and Theoretical Study”, *Inorganic Chemistry*, (2021) S2-S16.
- [17] Han, Q., Yan, W., Yao, Y., Yao, Fei C., Tieggen L., “Optimal design of Er/Yb co-doped fiber amplifiers with an Yb-band fiber Bragg grating” *Photonics Research*, 4 (2016) 53-56.
- [18] Huang, Y., Lin, D., Lin, X., Xu, C., Zeng, Z., Liao, T., Duan, Y., “2 μm Tm³⁺ doped silica microsphere laser using amplified spontaneous emission light for pumping,” *Optics Communications*, 460 (2019) 125137.
- [19] Maeda, Y., Yamada, M., Endo, T., Ohta, K., Tanaka, T., Ono, M., Senda, K., Ono, J., Koyama, O., “1700 nm ASE light source and its application to mid-infrared spectroscopy,” *OptoElectronics and Communication Conference and Australian Conference on Optical Fibre Technology*, (2014) 410–411.
- [20] Meng, S.H., Hu, S.B., Chui, H.C., Chang, C.H., Chu, S.C., “A broadband ASE light source-based ftx rof-wdm optical network system.” *Journal of Network Intelligence*, 2 (2017) 162–170.

[21] Yu, X., Feng, M., Zhang, R., Feng, Y., You, H., Guo, F., Chen, S., Zhang, D., “Amplified spontaneous emission from a single organic microfiber fabricated by melt electrospinning,” *Organic Electronics*, 51 (2017) 442–445.

[22] Harun, S. W., Rahman, F. A., Dimyati, K., Ahmad, H., “An efficient multiwavelength light source based on ASE slicing,” *Laser Physics Letters*, 3 (2006) 495–497.

[23] Wang X., Huang, W., “Band selective C- or L-band ASE source using unpumped erbium-doped fiber with an optical switch,” *Optics & Laser Technology*, 48 (2013), 263–266.

[24] Röβner, M. R., Müller, M. S., Buck, T. C., Koch, A. W., “Broadband light source for fiber-optic measurement system in spaceborne applications,” *Acta Astronautica*, 70 (2012) 95–99.

Optuna Tabanlı Hiper Parametre Optimizasyonu ile Konut Fiyat Tahminlemede Makine Öğrenmesi Tekniklerinin Karşılaştırmalı Analizi

Vahid SİNAP^{1*} 

¹Ufuk Üniversitesi, İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi, Yönetim Bilişim Sistemleri Bölümü, Ankara, Türkiye

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 07/09/2024
Düzeltilme: 09/12/2024
Kabul: 11/12/2024

Anahtar Kelimeler

Konut Fiyat Tahmini
Makine Öğrenmesi
Performans Karşılaştırması
Hiper Parametre
Optimizasyonu
Optuna

Article Info

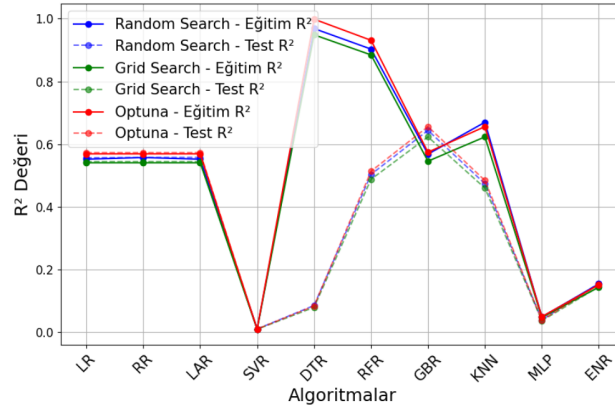
Research article
Received: 07/09/2024
Revision: 09/12/2024
Accepted: 11/12/2024

Keywords

House Price Prediction
Machine Learning
Performance Comparison
Hyperparameter
Optimization
Optuna

Grafik Özet (Graphical/Tabular Abstract)

Bu çalışma, konut fiyatlarını tahmin etmek için 10 farklı regresyon algoritmasını ve çeşitli hiper parametre optimizasyon yöntemlerini karşılaştırmıştır. Optuna ile optimize edilen Gradyan Artırma Regresyonu modeli, yüksek R^2 (0.6558) ve düşük RMSE (4469.48) değerleriyle en başarılı model olmuştur. / This study compared 10 regression algorithms and various hyperparameter optimization methods for predicting housing prices. The Gradient Boosting Regression model optimized with Optuna emerged as the best, achieving a high R^2 (0.6558) and low RMSE (4469.48), demonstrating Optuna's precision and effectiveness in hyperparameter optimization.



Şekil A: Modellerin doğruluk karşılaştırması / Figure A: Accuracy comparison of models

Önemli noktalar (Highlights)

- Optuna, regresyon modellerinde hiperparametre optimizasyonunda hassasiyet ve etkinlik avantajları sunmaktadır. / Optuna provides precision and efficiency advantages in hyperparameter optimization for regression models.
- Gradyan Artırma Regresyonu, RMSE ve R^2 metriklerine göre konut fiyatlarını tahmin etmede diğer modelleri geride bırakmıştır. / Gradient Boosting Regressor outperforms other models in predicting house prices based on RMSE and R^2 metrics.
- Makine öğrenmesi yöntemleri, konut fiyatı belirleyicilerindeki doğrusal olmayan etkileşimleri modellemede geleneksel yöntemlerden daha yüksek doğruluk oranlarına ulaşmıştır. / Machine learning methods achieve higher accuracy than traditional methods for modeling non-linear interactions in house price determinants.

Amaç (Aim): Optuna tabanlı hiperparametre optimizasyonu kullanarak konut fiyatı tahmini için en başarılı makine öğrenmesi algoritmasını belirlemek. / To identify the most successful machine learning algorithm for house price prediction using Optuna-based hyperparameter tuning.

Özgünlük (Originality): Bu çalışma, ekonomik sürdürülebilirlik boyutlarına odaklanarak üç hiperparametre ayarlama stratejisini dahil eden ve 10 farklı denetimli regresyon modelini karşılaştıran bir analiz sunmaktadır. / This study compares 10 different supervised regression models while incorporating three hyperparameter tuning strategies, highlighting the economic sustainability aspects of automatic forecasting systems.

Bulgular (Results): Optuna ile optimize edilen Gradyan Artırma Regresyonu, RMSE 4469.48 ve R^2 0.6558 ile test setinde en iyi sonuçları elde ederek diğer yöntemleri geride bırakmıştır. / Optuna-optimized Gradient Boosting Regressor achieved the best test results with an RMSE of 4469.48 and an R^2 of 0.6558, outperforming alternatives.

Sonuç (Conclusion): Optuna, en verimli hiperparametre ayarlama yöntemi olarak öne çıkmakta olup, makine öğrenmesi modelleri konut fiyatlarını tahmin etmede geleneksel yöntemlere kıyasla önemli avantajlar sunmaktadır. / Optuna stands out as the most efficient hyperparameter tuning method, and machine learning models offer significant advantages over traditional methods in predicting house prices.



Optuna Tabanlı Hiper Parametre Optimizasyonu ile Konut Fiyat Tahminlemede Makine Öğrenmesi Tekniklerinin Karşılaştırmalı Analizi

Vahid SİNAP^{1*}

¹Ufuk Üniversitesi, İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi, Yönetim Bilişim Sistemleri Bölümü, Ankara, Türkiye

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 07/09/2024
Düzeltilme: 09/12/2024
Kabul: 11/12/2024

Anahtar Kelimeler

Konut Fiyat Tahmini
Makine Öğrenmesi
Performans
Karşılaştırması
Hiper Parametre
Optimizasyonu
Optuna

Öz

Konut fiyatlarının etkili bir şekilde tahmin edilmesi, ekonominin şekillenmesinde kritik bir rol oynamaktadır. Bu çalışmanın amacı, konut fiyatlarını tahminlemede en iyi performans gösteren makine öğrenmesi modelini belirlemektir. Bu amaçla, 10 farklı denetimli regresyon algoritması kullanılarak çeşitli modeller eğitilmiştir. Modellerin performansını optimize etmek amacıyla Grid Search, Random Search ve Optuna gibi hiper parametre ayarlama yöntemleri uygulanmıştır. Eğitim ve test setlerinde elde edilen metrik değerler, modellerin genel performansını değerlendirmek için kullanılmıştır. Araştırma sonuçları, hiper parametre ayarlama yöntemlerinin modellerin genel başarısını etkileyen kritik bir faktör olduğunu göstermiştir. Optuna ile optimize edilen Gradyan Artırma Regresyonu modeli, test veri setinde elde ettiği yüksek R² değeri (0.6558) ve düşük RMSE değeri (4469.48) ile konut fiyatlarını tahminlemede en başarılı model olarak belirlenmiştir. Optuna, hiper parametre optimizasyonunda sağladığı hassasiyet ve etkinlik ile diğer yöntemlere kıyasla belirgin bir üstünlük sunmuştur.

A Comparative Analysis of Machine Learning Techniques for House Price Prediction with Optuna-Based Hyperparameter Optimization

Article Info

Research article
Received: 07/09/2024
Revision: 09/12/2024
Accepted: 11/12/2024

Keywords

House Price Prediction
Machine Learning
Performance Comparison
Hyperparameter
Optimization
Optuna

Abstract

Effectively predicting house prices plays a critical role in shaping the economy. This study aims to identify the best-performing machine learning model for predicting house prices. For this purpose, various models were trained using 10 different supervised regression algorithms. Hyperparameter tuning methods such as Grid Search, Random Search, and Optuna were applied to optimize the performance of these models. Metric values obtained from the training and test sets were used to evaluate the overall performance of the models. The research results indicate that hyperparameter tuning methods are a critical factor influencing the overall success of the models. The Gradient Boosting Regressor model optimized with Optuna was identified as the most successful model for predicting house prices, achieving a high R² score (0.6558) and a low RMSE value (4469.48) on the test dataset. Optuna demonstrated a significant advantage in hyperparameter optimization compared to other methods due to its precision and efficiency.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Konut fiyatlarının etkili bir şekilde tahmin edilmesi, ekonominin şekillenmesinde kritik bir rol oynamaktadır. Bu önemli konunun altında yatan sebeplerden biri, gayrimenkul sektöründeki dalgalanmaların önceden tahmin edilebilmesi ve bu sayede ekonomik istikrarın sürdürülebilir bir şekilde sağlanabilmesidir. Gayrimenkul piyasasındaki ani çalkantılar genellikle ekonomik dengesizliklere yol açmakta ve bu durum, konut

talebi ile arzı dengelemede zorluklar yaşanmasına neden olabilmektedir [1]. Bununla birlikte, konut fiyatlarının doğru tahmin edilmesi aynı zamanda hükümetlerin gayrimenkul piyasasını daha iyi düzenleyebilmesi anlamına gelmektedir [2]. Bu düzenleme, ekonominin sürdürülebilir bir büyüme patikasında ilerlemesine katkı sağlamaktadır. Hükümetler, konut talebi ile arzını dengeleyerek, gayrimenkul sektöründeki dengesizlikleri önleyerek ekonomik istikrarı koruyabilmektedir [3]. Diğer bir etken, konut üreticilerinin zamanında ve bilinçli

yatırım kararları almasını sağlamaktır. Konut fiyatlarının doğru bir şekilde tahmin edilmesi, konut projeleri geliştiren şirketlere piyasadaki değişimlere önceden uyum sağlama imkânı sunmaktadır [4]. Örneğin, bölgesel altyapı projeleri veya kentsel dönüşüm planları gibi faktörlerin etkisi önceden tahmin edilebilirse, şirketler projelerini buna göre planlayabilir ve rekabet avantajı elde edebilirler. Konut sadece bir bireyin temel ihtiyacını karşılamakla kalmayıp, aynı zamanda bir yatırım şekli olarak da önemlidir [5]. Bu nedenle, konut fiyatlarının doğru bir şekilde tahmin edilmesi, alıcılar ve satıcılar için büyük bir ilgi konusudur [6]. Gerçekçi fiyat tahminleri, alıcıların bütçelerine uygun konut seçeneklerini değerlendirmelerine ve satıcıların rekabetçi bir fiyat belirlemelerine yardımcı olabilmektedir.

Geleneksel olarak, konut fiyatı tahmininde çoğunlukla profesyonel değerlendirme uzmanlarına başvurulmaktadır. Bu uzmanlar, gayrimenkul değerlemesi yaparak, konutların piyasa değerini belirlemeye yönelik geleneksel yöntemleri uygulamaktadırlar [7]. Değerleme sürecinde konutun fiziksel özellikleri (örneğin, oda sayısı, konutun yaşına ilişkin bilgiler), coğrafi konumu, çevresel faktörler ve benzeri unsurlar dikkate alınmaktadır. Geleneksel değerlendirme yöntemleri arasında sıkça kullanılan modellerden biri hedonik regresyon analizidir. Bu model, konut fiyatını etkileyen çeşitli faktörleri inceleyerek, bu faktörlerin konutun değeri üzerindeki etkisini analiz etmeyi amaçlamaktadır [8]. Ancak, bu geleneksel yöntemlerin bazı sınırlamaları bulunmaktadır. Örneğin, hedonik regresyon modeli, bazı durumlarda model varsayımlarının ihlal edilmesine duyarlı olabilir ve doğrusal olmayan ilişkileri yeterince ele alamayabilir [9]. Ayrıca, hedonik fiyat modeli, model varsayımları, tahmin ve doğrusal olmayan sorunları çözme konusunda yetersiz kalabilmektedir [10]. Buna ek olarak, konut fiyatlarını tahmin etmek için geleneksel yöntemler genellikle bireysel özelliklere dayanır ve bu durum, değerlendirme uzmanlarının önyargılı olma riskini artırabilir [11]. Bunun yanı sıra, bu yöntemler, geniş veri setlerini işlemekte zorlanabilir ve özellikle karmaşık, dinamik piyasa koşullarında doğru tahminler yapma konusunda sınırlamalara sahiptir [12]. Bu noktada, bağımsız bir üçüncü taraf kaynağı olarak hizmet edebilecek otomatik bir tahmin sistemi, daha az önyargılı bir yaklaşım sunabilir.

Otomatik tahmin sistemleri, makine öğrenmesi veya istatistiksel yöntemleri kullanarak, belirli bir olayın veya durumun gelecekteki olası sonuçlarını tahmin etmeye odaklanan bilgisayar tabanlı

sistemlerdir [13]. Bu sistemler, büyük miktarda veriyi analiz ederek desenleri tanımlamakta ve bu desenlere dayanarak gelecekteki olayları öngörmeye çalışmaktadır. Otomatik tahmin sistemleri, büyük veri setlerini analiz ederek desenleri belirlemek ve gelecekteki olayları tahmin etmek için makine öğrenmesi tekniklerini kullanır. Bu nedenle, makine öğrenmesi tabanlı tahmin sistemleri, otomatik tahmin sistemlerinin daha gelişmiş ve veri odaklı bir versiyonunu temsil etmektedir. Makine öğrenmesi tabanlı tahmin sistemleri, belirli bir algoritma tarafından öğrenilen modelleri kullanarak veri setlerinden öğrenme yeteneğine sahiptir [14]. Bu modeller, karmaşık ilişkileri ele alarak değişken koşullara uyum sağlayabilmektedir. Otomatik tahmin sistemleri, büyük veri setlerini analiz edebilme, hızlı öğrenme ve gerçek zamanlı adaptasyon gibi avantajlar sunmaktadır.

Makine öğrenmesi teknikleri, konut fiyat tahmininde geleneksel yöntemlere kıyasla önemli avantajlar sunmaktadır. Bu teknikler, esnek modelleme yetenekleri ile öne çıkmaktadır. Geleneksel değerlendirme yöntemleri genellikle lineer ilişkileri ele alabilirken, makine öğrenmesi modelleri karmaşık ve doğrusal olmayan ilişkileri daha etkili bir şekilde modelleyebilmektedir [15]. Bu, konut fiyatlarını etkileyen faktörler arasındaki daha ince ve karmaşık ilişkilerin anlaşılmasını sağlamaktadır. Şehir planlama süreçlerinde, altyapı projelerinin ve kentsel dönüşüm planlarının konut fiyatları üzerindeki etkisini doğru bir şekilde modelleyerek, kamu yatırımlarının etkinliğini artırmak mümkün hale gelebilir. Benzer şekilde, yatırım analizlerinde, piyasadaki değişkenlerin karmaşık etkileşimlerini değerlendirerek daha öngörülebilir risk ve getiri analizleri yapılabilir. Ayrıca, makine öğrenmesi modelleri büyük veri setleriyle daha etkili bir şekilde çalışabilmektedir [16]. Konut piyasasındaki çeşitli değişkenlerin karmaşıklığı göz önüne alındığında, geniş veri setlerini işleme yetenekleri, daha kapsamlı ve doğru tahminlere olanak tanımaktadır. Bu modeller, konut fiyatlarını etkileyen pek çok değişkeni aynı anda değerlendirebilmekte ve bu faktörler arasındaki etkileşimleri analiz edebilmektedir. Şehir planlamasında, geniş veri setlerinden elde edilen öngörüler, yerel yönetimlerin konut talebine uygun projeler geliştirmesine yardımcı olabilir. Yatırım analizleri açısından ise bu modeller, yatırımcıların pazar trendlerini daha iyi anlamasını ve daha bilinçli yatırım kararları almasını sağlayabilir. Makine öğrenmesi teknikleri, öğrenme yetenekleri sayesinde zaman içindeki değişen konut piyasası koşullarına uyum sağlayabilmektedir. Bu, modelin güncel ve dinamik verilere dayalı olarak sürekli

olarak iyileştirilebilmesine olanak tanımaktadır. Örneğin, makine öğrenmesi modelleri, ani piyasa değişikliklerine hızlı bir şekilde uyum sağlayarak, şehir planlama kararlarının ve yatırım stratejilerinin gerçek zamanlı olarak optimize edilmesine katkı sunabilir. Böylece hem kamu sektöründe hem de özel sektörde daha stratejik ve etkili kararlar alınabilir.

Makine öğrenmesi modellerinin faydalarının yanı sıra bazı zorlukları da bulunmaktadır. Bu modeller, genellikle karmaşık yapılara dayandığı için anlaşılması ve yorumlanması zor olabilmektedir [17]. Modelin içsel mekanizmalarının şeffaflık eksikliği, karar süreçlerinin bilinmezliğine yol açabilir ve bu da güvenilirlik sorunlarına neden olabilir [18]. Ayrıca, makine öğrenmesi modelleri, geniş veri setlerini etkili bir şekilde işleyebilme yeteneklerine rağmen, veri setlerindeki gürültü ve anlamsız ilişkilerle başa çıkma konusunda zorluklar yaşayabilir [19]. Yanlılık ve varyans arasındaki dengeyi bulma sürecinde modelin aşırı öğrenme veya yetersiz öğrenme eğiliminde olması, tahminlerin doğruluğunu etkileyebilir [20]. Bunlara ek olarak, makine öğrenmesi modelleri, belirli bir döneme veya bağlam içerisindeki geçmiş verilere aşırı bağımlı hale gelebilir [21]. Bu durum, modellerin gelecekteki beklenmeyen olaylara tepki verme yeteneklerini sınırlayabilir ve tahminlerin güvenilirliğini azaltabilir.

Makine öğrenmesi teknikleri konut fiyat tahmininde önemli avantajlar sunsa da kullanımlarıyla ilgili bu zorlukları anlamak ve ele almak önemlidir. Güvenilirlik ve genel model performansı açısından dengeli bir yaklaşım benimsemek, makine öğrenmesi tabanlı tahmin modellerinin etkin bir şekilde kullanılması açısından kritiktir. Bu bağlamda araştırmanın amacı, konut fiyatlarını tahminlemede en iyi performans gösteren makine öğrenmesi modelinin tespitini yapmaktır. Araştırmada, Doğrusal Regresyon (Linear Regression - LR), Ridge Regresyonu (Ridge Regression - RR), Lasso Regresyonu (Lasso Regression - LAR), Destek Vektör Regresyonu (Support Vector Regression - SVR), Karar Ağacı Regresyonu (Decision Tree Regression - DTR), Rastgele Orman Regresyonu (Random Forest Regression - RFR), Gradyan Artırma Regresyonu (Gradient Boosting Regression - GBR), K-En Yakın Komşu Regresyonu (K-Nearest Neighbors Regression - KNN), Çok Katmanlı Algılayıcı Regresyonu (Multilayer Perceptron Regression - MLP), ElasticNet Regresyonu (ElasticNet Regression - ENR) olmak üzere 10 denetimli regresyon algoritması kullanılmıştır. Makine öğrenmesi modellerinin oluşturulması sırasında veri

ön işleme aşamaları ve modellerin performansını etkileyen durumlar ayrıntılı ele alınarak alanda yapılacak gelecekteki araştırmalara bir yol haritası çizilmesi hedeflenmektedir. Araştırmanın bir diğer önemli amacı, Grid Search, Random Search ve Optuna hiper parametre ayarlama yöntemlerinin kullanılmasıyla hiper parametrelerin optimize edilmesi ve bu optimizasyonların model performansları üzerindeki etkilerinin incelenmesidir. Buna göre, farklı makine öğrenmesi modellerinin çeşitli hiper parametre ayarları altında tahminleme yeteneklerinin, performans metriklerine dayalı olarak objektif bir şekilde değerlendirilmesi, araştırmanın ana odak noktalarını oluşturmaktadır. Ayrıca, otomatik tahmin sistemlerinin kullanımının, konut piyasasındaki dalgalanmaların önceden tahmin edilmesi ve bu bilgilerin ekonomik istikrarın sürdürülebilirliğine nasıl katkı sağladığının değerlendirilmesi amaçlanmaktadır. Belirlenen amaç ve hedeflere ulaşılması dahilinde, konut fiyat tahmininde en etkili ve güvenilir modelin belirlenmesine yönelik kapsamlı bir değerlendirme elde edilecektir. Araştırma bulgularının, konut sektöründeki paydaşlara, hükümetlere ve ekonomi uzmanlarına daha bilinçli kararlar almalarında rehberlik etme potansiyeline sahip olacağı ön görülmektedir.

2. İLGİLİ ARAŞTIRMALAR (RELATED WORKS)

Bu araştırmada, konut fiyatlarını daha etkili bir şekilde tahmin etmek için çeşitli makine öğrenmesi algoritmalarının analizi gerçekleştirilerek karşılaştırmaları yapılmıştır. Konut fiyatlandırmasındaki trendler, mevcut ekonomik durumu göstermekte ve doğrudan alıcılar ve satıcılarla ilgili bir konu olarak karşımıza çıkmaktadır. Bir evin gerçek fiyatı birçok faktöre bağlıdır. Bunlar arasında yatak odası sayısı, banyo sayısı ve konum gibi faktörler bulunmaktadır. Kırsal bölgelerde fiyatlandırma genellikle şehirlere göre daha düşüktür. Ev fiyatları, otoyola, alışveriş merkezine, süpermarkete, iş olanaklarına, iyi eğitim tesislerine gibi faktörlere yakınlıkla artmaktadır. Gayrimenkul şirketlerinin birkaç yıl öncesine kadar mülk fiyatını manuel olarak tahmin etmeye çalıştıkları bilinmektedir. Gayrimenkul satışı yapan şirketlerde genellikle herhangi bir gayrimenkul mülkünün fiyatını tahmin etmek için özel bir yönetim ekibi bulunmaktadır. Ancak, bu manuel tahminlerde, alıcılar ve satıcılar için önemli bir kayba neden olacak, ortalama %25 civarında hata oluşabilmektedir. Bu nedenle, ev fiyatlarının daha etkili ve tutarlı bir şekilde belirlenmesine yönelik birçok araştırma yapılmıştır.

Lu ve diğerleri [22] tarafından gerçekleştirilen araştırmada gelişmiş bir ev fiyat tahminleme sistemi önerilmiştir. Bu sistem, çeşitli özelliklere dayalı olarak iyi bir ev fiyat tahmini sunan etkili bir makine öğrenmesi modeli içermektedir. Bu sayede ev satın alacakların bütçelerine ve önceliklerine göre makul bir fiyatın belirlenmesi hedeflenmiştir. Modelin geliştirilmesinde hibrit regresyon tekniği kullanılmıştır. Ayrıca, çalışmada sınırlı veri seti ve veri özellikleri ile özellik mühendisliği (feature engineering) yöntemleri incelenmiştir. Çalışmada oluşturulan regresyon modeli ile veri setindeki özniteliklere bağlı olarak tahminlemeler gerçekleştirilmiş ve oluşturulan modellerin ev fiyatlarını tahminlemede önemli bir başarı elde ettiği vurgulanmıştır. Bu şekilde, ev piyasasındaki dalgalanmalara karşı daha dirençli ve kullanıcı dostu bir tahmin modeli oluşturulmuştur.

Durganjali ve Pujitha [23] sınıflandırma algoritmalarını kullanarak ürettikleri model ile ev yeniden satış fiyatı tahmini gerçekleştirmişlerdir. Araştırmada, evin yeniden satış fiyatının tahmininde Lineer Regresyon, Karar Ağacı, K-Means ve Rastgele Orman gibi farklı sınıflandırma algoritmaları kullanılmıştır. Ev fiyatını etkileyen birçok faktör bulunmaktadır. Bu faktörler arasında fiziksel özellikler, konum ve ekonomik koşullar yer almaktadır. Çeşitli performans metrikleri ile bu algoritmaların farklı veri setleri üzerindeki performansı değerlendirilmiştir. Sonuç olarak, Rastgele Orman'ın eğitim verilerine göre en iyi sonucu verdiği bulunmuştur.

Rahadi ve diğerleri [24] tarafından yürütülen bir araştırma, Jakarta, Endonezya'daki konut fiyatlarını, kavramsal model (conceptual model) ve anketler kullanarak analiz etmiştir. Araştırmanın temel amacı ev fiyatını etkileyen faktörleri sınıflandırmaktır. Araştırma sonuçlarına göre, her bir konutun fiyatını etkileyen özelliklerin farklılık gösterdiği belirlenmiştir. Bu faktörler arasında konum, yapısal özellikler ve çevresel koşullar öne çıkan başlıklar olmuştur.

Konut fiyat tahmini çalışmalarında, kullanılan makine öğrenmesi modelleri kadar veri setlerinde bulunan konut özellikleri de öneme sahiptir. Kurulan modellerin daha iyi performans verebilmesi için konut özelliklerinin doğru yorumlanması gerekmektedir. Literatürde konut özellikleri üzerine bazı değerli araştırmalar bulunmaktadır.

Konum, ev fiyatı belirlemede en önemli özellik olarak kabul edilmektedir [24-25]. Osmadi ve diğerleri [26] tarafından yapılan çalışmalarda, konut

fiyatlarını etkileyen konum özelliklerinin önemi gözlemlenmiştir. Çalışmada mülkün konum özelliklerinin önemi üzerine bir gözlem yapılmıştır. Mülkün konumu, en yakın alışveriş merkezine olan mesafe veya tepeleri veya sahili gösteren konum özelliklerini içeren sabit bir konum özelliğine ayrılmıştır. Çalışma, alışveriş merkezine olan mesafe veya tepeleri veya sahili gösteren konum özellikleri gibi konumsal özelliklerin fiyatlandırma ile yakın ilişkiye sahip olduğunu göstermiştir.

Ev fiyatını etkileyen diğer önemli bir özellik de fiziksel veya yapısal özellikler olarak belirtilmektedir [25,27]. Bir evin yapısal özellikleri yatak odası ve banyo sayısı, kat alanı, garaj veya veranda olup olmaması gibi özellikleri içermektedir. Potansiyel alıcıları çekmek ve evleri cazip kılmak için inşaat firmaları da söz konusu yapısal özelliklere dikkat ederek, potansiyel alıcıların isteklerini karşılamayı hedeflemektedirler. Ball [28] çalışmasında, yapısal özelliklerin ev alacaklar için ne satın alacaklarını belirlemede temel bir düşünce olacağını belirtmiştir. Rodriguez ve Sirmans [29] gerçekleştirdikleri çalışmada, yapısal özelliklerin ev fiyatlarının artmasında önemli bir etkiye sahip olduğunu vurgulamıştır.

Çevresel özellikler, ev fiyatını belirlemede dahil edilebilecek diğer bir faktördür. Chau ve Chin'e [27] göre evin içerisinde bulunduğu çevre halkının eğitim seviyesinin ve sosyal statüsünün evin değerini genellikle artırdığı belirtilmektedir. Owusu-Manu ve diğerleri [30] çalışmalarında, benzer yapısal özelliklere sahip iki ev arasında mahallenin maddi gelir ortalamasına göre ev fiyatlarında önemli bir artış olduğu tespit edilmiştir.

Bu çalışma, literatürdeki konut fiyat tahmin araştırmalarından birkaç önemli noktada farklılık göstermektedir. İlk olarak, daha önceki araştırmalar genellikle tek bir model veya sınırlı sayıda model üzerinde yoğunlaşırken, bu çalışmada konut fiyat tahmini için 10 farklı denetimli regresyon algoritmasının performans karşılaştırması yapılmıştır. Ayrıca, mevcut literatürün aksine, hiper parametre optimizasyonu için Grid Search, Random Search ve Optuna gibi üç farklı yöntem sistematik olarak değerlendirilmiş ve bu yöntemlerin model performansları üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bu yaklaşım, sadece en iyi tahmin modelini belirlemekle kalmamış, aynı zamanda hiper parametre ayarlama stratejilerinin önemini de vurgulamıştır. Literatürde genellikle hiper parametre optimizasyonunun sınırlı şekilde ele alındığı görülmektedir. Bu kapsamlı değerlendirme, konut fiyat tahmin modellerinin daha doğru ve güvenilir sonuçlar üretebilmesi için önemli bir

rehber niteliğindedir. Buna ek olarak, araştırma, otomatik tahmin sistemlerinin konut piyasasındaki dalgalanmaları öngörme potansiyelini inceleyerek, ekonomik istikrarın sürdürülebilirliğine nasıl katkı sağlayabileceğini değerlendiren bir perspektif sunmaktadır. Bu yaklaşım, konut fiyat tahmini çalışmalarında ekonomik sürdürülebilirlik boyutunun nadiren ele alınan bir konu olması nedeniyle literatürde önemli bir boşluğu doldurmayı hedeflemektedir. Bu özgün yaklaşım, araştırmayı literatürdeki diğer çalışmalardan ayırmakta ve gelecekteki çalışmalara değerli bir temel oluşturmayı amaçlamaktadır.

3. MAKİNE ÖĞRENMESİ (MACHINE LEARNING)

Makine öğrenmesi, bilgisayar sistemlerinin veri setlerinden öğrenme yeteneği kazandığı bir yapay zekâ alt alanı olarak kabul edilmektedir. Bu alandaki temel kavramları anlamak adına 1959 yılında Arthur Samuel tarafından önemli bir tanım yapılmıştır. Samuel, makine öğrenmesini, “Bir programın bir görevi iyi yapmasını sağlayacak şekilde deneyimden öğrenmesi” olarak tanımlamıştır [31]. Bu, makine öğrenmesinin özünü, deneyimden öğrenme ve adaptasyon süreçleriyle ilişkilendiren önemli bir tanımdır. Makine öğrenmesinin temel amacını belirleyen bir başka tanım Tom Mitchell tarafından 1997 yılında sunulmuştur. Mitchell, makine öğrenmesini, “Bir bilgisayar programının belirli bir görevde performansını ölçmek amacıyla bir görevi öğrenmesi” olarak ifade etmiştir [32]. Bu, makine öğrenmesinin odak noktasının performans artışı ve öğrenme sürecinin ölçülmesi olduğunu vurgulayan bir tanımdır.

Makine öğrenmesi, genel olarak denetimli öğrenme, denetimsiz öğrenme ve pekiştirmeli öğrenme olmak üzere üç ana kategori altında incelenmektedir. Denetimli öğrenme, makine öğrenmesinin bir alt dalı olup, algoritmaya giriş verileri ile çıkış etiketleri arasındaki ilişkiyi öğrenme yeteneği sağlayan bir öğrenme türüdür. Bu süreçte, bir model, eğitim verileri üzerinden öğrenmekte ve daha sonra bu öğrenilen bilgileri yeni, önceden belirlenmemiş verilere uygulayarak çıkışları tahmin etmektedir. Bu yöntem, genellikle bir öğrenme problemi çerçevesinde kullanılmaktadır. Önceden etiketlenmiş bir veri seti kullanılarak model eğitilmektedir. Bu veri setinde her girişe karşılık gelen doğru çıkış etiketi bulunmaktadır. Model, bu giriş ve çıkışları kullanarak veri setindeki desenleri anlamaya çalışmaktadır. Denetimli öğrenme, sınıflandırma ve regresyon olmak üzere iki ana kategoriye ayrılmaktadır. Sınıflandırma, bir veri noktasını belirli bir kategoriye atama görevini

üstlenirken, regresyon bir veri noktasının bir değeri tahmin etme görevini üstlenir. Regresyon analizleri nicel verilerle çalıştığından, özellikle sayısal değerlerle ilgilenen durumları kapsamaktadır [33]. Araştırmada da ele alınan durum olarak ev fiyatlarını belirleme süreci düşünüldüğünde ev fiyatları, bir dizi faktör tarafından etkilenebilecek karmaşık bir konsepttir. Bir regresyon modeli, bir evin metrekare büyüklüğü, oda sayısı, bulunduğu semt gibi özelliklere dayalı olarak bir evin fiyatını tahmin edebilir.

Eğitim aşamasında model bir veri seti kullanılır ve her ev için bilinen gerçek fiyatlar, modelin öğrenmesi için kullanılan çıkış etiketleri olarak kabul edilir [34]. Bu veri setindeki evlere ait özellikler (bağımsız değişkenler) ile fiyatlar (bağımlı değişken) arasındaki ilişki, model tarafından öğrenilir. Eğitilen model, daha sonra yeni bir evin özelliklerini kullanarak tahmin yapabilmektedir. Örneğin, bir regresyon modeli, 200 metrekare büyüklüğünde, 3 odalı ve şehir merkezine yakın bir semtte bulunan bir evin fiyatını tahmin edebilir. Model, bu özelliklere dayanarak benzer özelliklere sahip diğer evlerin fiyatlarından yola çıkarak tahminini gerçekleştirmektedir. Model, eğitim verileri üzerinden öğrenirken, belirli bir kayıp fonksiyonu kullanılır. Bu fonksiyon, modelin tahmin ettiği çıkış ile gerçek etiket arasındaki farkı ölçer. Eğitim süreci, bu kaybı minimize etmeye çalışarak modelin doğruluğunu artırır [35].

Denetimli öğrenmenin geniş bir uygulama yelpazesi bulunmaktadır. Görüntü tanıma, doğal dil işleme, tıbbi teşhis, finansal tahminler gibi birçok alanda başarıyla kullanılmaktadır. Bu yöntem, veri bilimi ve istatistiksel analizde yaygın olarak benimsenmiş bir araçtır [36]. Bu araştırma, konut fiyatlarını tahminleme bağlamında gerçekleştirilmiş olup, LR, RR, LAR, SVR, DTR, RFR, GBR, KNN, MLP ve ENR olmak üzere 10 denetimli regresyon algoritması kullanılmıştır. Bu algoritmalar, konut fiyatlarını belirleyen faktörleri ve bu faktörler arasındaki ilişkileri modelleme yetenekleri nedeniyle seçilmiştir. Denetimli regresyon algoritmalarının konut fiyatı tahminleme görevi için seçilmesiyle her bir algoritmanın konut piyasasındaki değişkenlikleri yakalama yeteneklerinin değerlendirilmesi amaçlanmaktadır.

3.1. Doğrusal Regresyon (Linear Regression)

LR, bir istatistiksel modelleme tekniğidir ve bağımlı değişken ile bir veya daha fazla bağımsız değişken arasındaki ilişkiyi ifade etmek için kullanılmaktadır. LR, veri setindeki bu ilişkiyi temsil eden bir doğrusal fonksiyonun bulunmaya

çalışıldığı bir istatistiksel tekniktir [37]. Bu denklem Eşitlik 1'de verilmiştir.

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_n X_n + \varepsilon \quad (1)$$

Eşitlik 1'deki denklemin içerisinde Y bağımlı değişkeni, X_1, X_2, \dots, X_n bağımsız değişkenleri, $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_n$ regresyon katsayıları ve ε hata terimi yer almaktadır. LR'nin amacı, regresyon katsayılarını gözlemlerle uyumlu hale getirilerek tahmin edilen değerlerle gerçek değerler arasındaki hatayı minimize etmektir. Bu optimizasyon genellikle en küçük kareler yöntemiyle gerçekleştirilmektedir. Algoritmanın işleyişi, veri setindeki gözlemler arasındaki doğrusal ilişkiyi temsil eden en iyi uyan doğruyu bulmayı içermektedir [38]. Bu, regresyon katsayılarının tahmin edilmesi ve modelin eğitilmesi sürecini içermektedir. Eğitim sonrasında, elde edilen model yeni bağımsız değişken değerleriyle kullanılarak bağımlı değişkenin tahminini yapabilir.

3.2. Ridge Regresyonu (Ridge Regression)

RR, doğrusal regresyonun bir genişlemesi olarak kabul edilmekte ve regresyon katsayılarının tahmin edilmesi sürecinde bir düzenleme (regülerizasyon) eklenmektedir. Temelde, en küçük kareler yöntemine benzer bir şekilde çalışılmakta, ancak regresyon katsayılarının aşırı uyum (overfitting) riskini azaltmak ve modelin genelleme yeteneğini artırmak için ek bir terim eklenmektedir. RR, L2 normu kullanılarak düzenleme uygular ve regresyon katsayılarının karelerinin toplamını sınırlayan bir terim eklenilerek gerçekleştirilir [39].

3.3. Lasso Regresyonu (Lasso Regression)

LAR, doğrusal regresyonun bir türevidir ve temel amacı regresyon katsayılarını tahmin ederken bir düzenleme yöntemi uygulamaktır. LAR, en küçük kareler yöntemini kullanır, ancak aynı zamanda regresyon katsayılarının mutlak değerlerini kontrol altında tutarak değişken seçimini gerçekleştirir. Lasso'nun belirgin özelliği, regresyon katsayılarını sıfıra yaklaştırma eğiliminde olmasıdır. Bu özellik, gereksiz veya düşük etkili değişkenlerin modelden çıkartılmasına olanak tanır. Lasso, bu seçici özelliği sayesinde, regresyon modelinin daha basit ve genelleştirilebilir olmasını sağlar. Algoritmanın çalışma prensibi, hedef değişken ile bağımsız değişkenler arasındaki ilişkiyi ifade eden bir denklem üzerinde düzenlemeli bir terim ekleyerek gerçekleşir. Bu düzenlemeli terim, regresyon katsayılarını kontrol altına alır ve aşırı uymayı önler. Lasso, düzenleme parametresi olarak

adlandırılan bir katsayı kullanır, bu parametre arttıkça regresyon katsayıları sıfıra daha fazla yaklaşır ve değişken seçimi daha etkili hale gelir [40].

3.4. Destek Vektör Regresyonu (Support Vector Regression)

SVR, doğrusal ve doğrusal olmayan regresyon görevlerini gerçekleştirmek için kullanılan bir öğrenme algoritmasıdır. SVR, destek vektör makinelerinin bir regresyon uygulamasıdır ve özellikle aykırı değerlere dayanıklı bir regresyon modeli sağlar. SVR'nin temel amacı, veri noktalarının çoğunun bir hiperdüzlem (hyperplane) tarafından belirlenen bir bölge içinde bulunmasını sağlamaktır. Bu hiperdüzlem, regresyon modelinin doğrusal veya doğrusal olmayan ilişkileri ifade etmesi amaçlanan bir düzlem veya uzaydır. Algoritma, destek vektörler olarak adlandırılan ve regresyon modelini tanımlayan kritik veri noktalarını kullanır. Bu destek vektörler, hiperdüzlemle en iyi uyum sağlayacak şekilde seçilir. SVR, bu destek vektörleri arasındaki mesafeyi (margin) maksimize etmeye çalışırken, aynı zamanda aykırı değerlere karşı dirençli olacak şekilde tasarlanmıştır [41].

SVR'nin çalışma prensibi, bir çekirdek fonksiyonu kullanarak girdi verilerini yüksek boyutlu uzaya taşımasıdır. Bu sayede, doğrusal olmayan ilişkileri ele alabilir ve daha karmaşık veri yapılarını modelleyebilir. Çekirdek fonksiyonları, veri noktalarının orijinal uzayda lineer olmayan ilişkilerini ifade etmektedir [42].

3.5. Karar Ağacı Regresyonu (Decision Tree Regression)

DTR, veri kümesini kullanarak bir regresyon modeli oluşturan bir öğrenme algoritmasıdır. Bu algoritma, veriyi bölme ve sınıflandırma işlemlerini gerçekleştiren bir ağaç yapısı kullanır. Algoritmanın çalışma prensibi, veri kümesini özelliklere göre bölme ve bu bölmelerde hedef değişkenin ortalamasını tahmin etme şeklindedir. DTR, bu bölme işlemlerini gerçekleştirirken, her bir bölme noktasının belirli bir özellik değeri ve eşik değeri ile belirlendiği bir yapı oluşturur [43]. Algoritmanın temel amacı, veri kümesini en iyi şekilde açıklamak ve hedef değişkenin değerini doğru bir şekilde tahmin etmektir. Eşitlik 2'de DTR'nin formülüne yer verilmiştir.

$$f(x) = \sum_{m=1}^M c_m \cdot I(x \in R_m) \quad (2)$$

Bu formül incelendiğinde $f(x)$, tahmin edilen hedef değişkenin değerini; M , ağaçtaki terminal düğüm sayısını; R_m , m numaralı terminal düğümdeki bölgeyi; c_m , m numaralı terminal düğümdeki tahmin edilen değeri ifade etmektedir. $I(x \in R_m)$, x girdi verisi R_m bölgesinde ise 1, değilse 0 değerini almaktadır.

3.6. Rastgele Orman Regresyonu (Random Forest Regression)

RFR, bir makine öğrenmesi algoritması olarak geniş bir kullanım alanına sahiptir. Bu algoritma, bir dizi karar ağacının bir araya getirilmesiyle oluşturulan bir topluluk öğrenmesi (ensemble) modelidir. Regresyon problemlerinde her bir karar ağacı belirli bir hedef değişkenin tahminini gerçekleştirir. RFR'nin temel işleyişini anlamak için, her bir ağacın oluşturulma sürecine odaklanmak gerekmektedir. İlk olarak, eğitim veri setinden rastgele örneklemeler alınır. Bu örneklemeler, her bir ağacın eğitiminde kullanılacak alt veri setlerini oluşturur. Daha sonra, her bir ağaç, bu alt veri setleri üzerinde bağımsız olarak eğitilir. Eğitim sırasında, her bir karar ağacı belirli bir özellik alt kümesi üzerinde düğüm bölünmeleri yapar. Bu bölünmeler, her düğümde en iyi bölünmeyi seçmek için belirli bir ölçü kullanılarak gerçekleştirilir. Bu sayede her ağaç, veri setindeki desenleri farklı yollarla öğrenir. Son olarak, her bir ağacın tahminleri bir araya getirilir ve genel tahmin değeri elde edilir. Bu birleştirme süreci, regresyon problemlerinde genellikle ağaç tahminlerinin aritmetik ortalamasını içerir. Bu yöntem, her bir ağacın bağımsız olarak öğrenmesini ve genelleme yeteneklerini artırarak modelin performansını artırmaktadır [44].

3.7. Gradyan Artırma Regresyonu (Gradient Boosting Regression)

GBR, bir hata fonksiyonunu minimize etmek amacıyla artan gradyan adımları kullanarak bir modelin eğitildiği bir regresyon tekniğidir. Başlangıçta belirlenen bir model üzerinden gerçek ve tahmin edilen değerler arasındaki hataların karesinin toplamını içeren bir hata fonksiyonu hesaplanmaktadır. Bu hata fonksiyonunun gradyanı alınarak, parametrelerin değiştirilme yönü belirlenmekte ve parametreler, gradyanın tersine doğru küçük adımlarla güncellenmektedir. Yeni parametrelerle elde edilen modelin performansı değerlendirilmekte ve bu süreç, hata fonksiyonunun minimize edildiği bir noktaya ulaşana kadar tekrarlanmaktadır. Matematiksel formülde, her bir parametrenin, öğrenme oranı ile hatanın türevinden

çıkartılmasıyla güncellendiği gradyan iniş (gradient descend) adımı ifade edilmektedir. Bu iteratif süreç, modelin eğitim verilerine uyum sağlaması ve optimize olması için kullanılmaktadır [45]. GBR, Eşitlik 3'te yer alan formülle temsil edilmektedir.

$$\theta_j := \theta_j - \alpha \frac{\alpha}{\alpha \theta_j} J(\theta_0, \theta_1, \dots, \theta_n) \quad (3)$$

Formülde θ_j , j . parametreyi; α , öğrenme oranını; $J(\theta_0, \theta_1, \dots, \theta_n)$, hata fonksiyonunu temsil etmektedir. Bu formül, her bir parametrenin, öğrenme oranı ile hatanın türevinden çıkartılmasıyla güncellendiği gradyan iniş adımı temsil eder. Bu adımlar, hata fonksiyonunu minimize edecek parametre değerlerini bulmak üzere tekrarlanır.

3.8. K-En Yakın Komşu Regresyonu (K-Nearest Neighbors Regression)

KNN Regresyonu, örnekler arasındaki benzerlik temelinde çalışarak bir tahmin yapma yöntemini benimsemektedir. İlk aşamada, bir veri setindeki her bir örnek, sahip olduğu özelliklere göre uzayda bir nokta olarak temsil edilir. Tahmin yapılacak yeni bir örnek geldiğinde, bu örneğin uzaydaki konumu, mevcut veri setindeki diğer örneklerle karşılaştırılır. Özellik uzayındaki benzer örnekler belirlenerek bu örneklerin çıkış değerleri tahminde kullanılmaktadır. Bu belirleme işlemi Öklidyen uzaklık metriği kullanılarak gerçekleştirilir. Yani, iki örnek arasındaki uzaklık, özelliklerine göre hesaplanır ve bu uzaklıklar kullanılarak en yakın k komşu belirlenir [46]. Matematiksel formülle ifade edildiğinde, N adet örneğin bulunduğu veri setinde, i -inci örneğin çıkış değeri \mathcal{Y}_i ve j -inci örneğin çıkış değeri \mathcal{Y}_j olmak üzere, örneğin tahmini şu şekilde hesaplanır (Eşitlik 4):

$$\hat{Y} = \frac{1}{k} \sum_{i \in N_k} \mathcal{Y}_i \quad (4)$$

Formülde, \hat{Y} yeni örneğin tahmin edilen çıkış değerini, k ise belirlenen komşu sayısını temsil eder. N_k , yeni örneğe en yakın k komşuyu ifade eden bir kümedir.

3.9. Çok Katmanlı Algılayıcı Regresyonu (Multilayer Perceptron Regression)

MLP Regresyonu, bir yapay sinir ağı modelidir ve regresyon problemlerini çözmek için kullanılmaktadır. Bu algoritma, giriş katmanı, bir veya daha fazla gizli katman ve bir çıkış katmanından oluşan bir yapıya sahiptir. Giriş katmanında bulunan nöronlar, özelliklerle ilişkilendirilmiş veri setinin her bir ögesini temsil

eder. Gizli katmanlardaki nöronlar, öğrenilecek karmaşık ilişkileri modellemek için kullanılır. Çıkış katmanındaki nöronlar ise regresyon sonuçlarını üretir. MLP Regresyonunun, geniş bir uygulama yelpazesi bulunmaktadır [47]. Özellikle, ev fiyat tahmininden finansal analize kadar birçok alanda başarıyla kullanılmaktadır. Eğitim süreci boyunca ağırlıkların ve yanlılıkların (bias) optimize edilmesi, modelin veri setine daha iyi uymasını sağlamak ve doğru tahminler yapmasına olanak tanımaktadır.

3.10. ElasticNet Regresyonu (ElasticNet Regression)

ENR, bir regresyon yöntemi olup, hem L1 (Lasso) hem de L2 (Ridge) ceza terimlerini içeren bir lineer regresyon türüdür. Bu algoritma, öznelik seçimi yapabilme özelliğini sağlayan Lasso regresyonunun avantajları ile çoklu korelasyonlu özneliklerle başa çıkabilme yeteneğini temin eden Ridge regresyonunun avantajlarını birleştirmektedir. ElasticNet, ağırlıkları güncellemek için hatanın gradyanı ile iki ceza terimini de kullanır. ENR, belirli bir hiper parametre olan alpha tarafından kontrol edilen bir karışım oranı kullanarak L1 ve L2 terimlerini birleştirmektedir [48]. Eğitim süreci, modelin geliştirilmiş bir performans elde etmesi amacıyla hatanın minimize edilmesini amaçlamaktadır. ElasticNet regresyonunun matematiksel formülü, belirli bir hiper parametre olan alpha, cezalandırma terimleri ve model parametrelerini içerir. Eğitim sırasında bu parametreler, veri setine uygun bir şekilde güncellenir. Bu sayede, ElasticNet, veri setlerindeki karmaşıklıkları ele alarak etkili bir regresyon modeli oluşturabilir.

4. YÖNTEM (METHOD)

Bu bölümde, araştırmada kullanılan veri setinin özelliklerine, algoritmaların karşılaştırılmasında kullanılan performans ölçütlerine ve veri hazırlama sürecine ilişkin bilgilere yer verilmiştir.

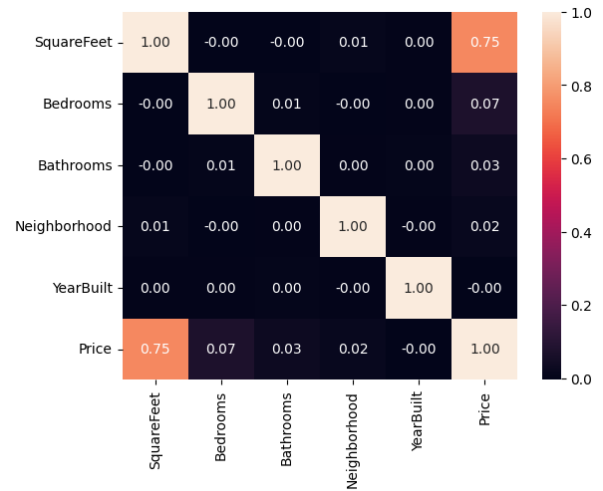
4.1. Veri Seti (Dataset)

Araştırmada kullanılan veri seti "Housing Prices Dataset (Konut Fiyatları Veri Seti)" olarak adlandırılmaktadır ve geniş bir veri kümesini içermektedir. Bu veri seti, ev fiyatlarını tahminlemek, konut piyasasındaki çeşitli faktörleri anlamak ve bu faktörlerin ev fiyatları üzerindeki etkilerini değerlendirmek amacıyla kullanılan popüler bir açık kaynaklı veri setidir. Kaggle platformundan da erişilebilen bu veri seti, çeşitli makine öğrenimi modellerini eğitmek ve ev fiyatlarının belirlenmesinde etkili olan faktörleri

değerlendirmek için bir kaynak olarak kullanılmaktadır. Veri seti 49.841 kayıt ve evlerin özelliklerini belirten altı öznelik içermektedir. Veri setindeki özneliklere ve açıklamalarına aşağıda yer verilmiştir:

- SquareFeet: Mülkün toplam alanı (m²).
- Bedrooms: Mülkteki yatak odalarının sayısı.
- Bathrooms: Mülkteki banyoların sayısı.
- Neighborhood: Mülkün bulunduğu mahalle.
- YearBuilt: Mülkün inşa edildiği yıl.
- Price: Mülkün fiyatı.

Şekil 1'de veri setine ait ısı haritası verilmiştir. Isı haritası incelendiğinde, mahalle (Neighborhood) ve inşa yılı (YearBuilt) öznelikleri arasında belirgin bir ilişki bulunmamaktadır. Ancak, metrekare (SquareFeet) özneliğinin, hedef özneliği olan fiyat (price) üzerinde güçlü bir etkisi olduğu gözlemlenmektedir. Yapılan ısı haritası incelemesi, ev fiyatlarını belirlemede SquareFeet özneliğinin önemli bir faktör olduğunu ortaya koymaktadır.

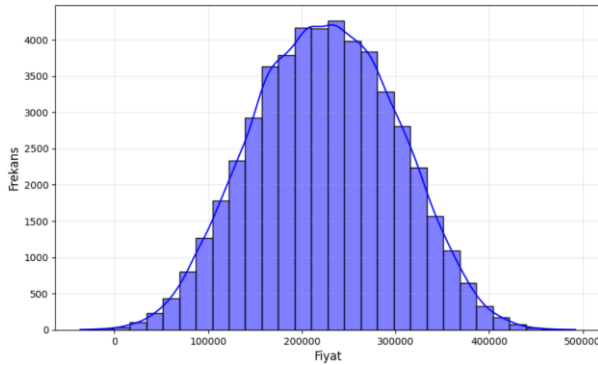


Şekil 1. Isı haritası (Heatmap)

4.2. Verilerin Hazırlanması (Data Preparation)

Araştırma sürecinde, ev fiyat tahminleme modellerini oluşturmaya başlamadan önce veri setinin ön işleme aşamasında bazı önemli işlemler gerçekleştirilmiştir. İlk olarak, ev fiyatları negatif değerlere sahip olan kayıtlar, bu durumun model performansını olumsuz etkilememesi amacıyla veri setinden çıkarılmıştır. Bu olgu, veri setindeki hatalı veya yanlış etiketlenmiş verilerin temizlenmesini sağlamaktadır. Ardından, veri setinde tekrarlanan kayıtların silinmesi işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu adım, veri setindeki tutarsızlık ve gereksiz karmaşıklığı azaltarak modelin genel performansını artırmayı hedeflemektedir. Coğrafi konumunun ev

fiyatlarındaki etkisini doğru bir şekilde yakalamak amacıyla kategorik bir değişken olan mahalle (Neighborhood) özneliğinin kodlanması gerçekleştirilmiştir. Evin bulunduğu mahalle, ev fiyatlarını etkileyen önemli bir faktördür ve bu bilgiyi modelin daha etkili bir şekilde öğrenmesi için sayısallaştırmak önemlidir. Son olarak, modelin daha güvenilir ve genelleme yeteneği yüksek tahminler yapmasına yardımcı olmak amacıyla ev fiyatlarının yuvarlanması işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu adım, fiyatları daha anlamlı ve modelin anlayabileceği bir formda temsil etmektedir. Bu ön işleme adımları, modelin eğitim verilerini daha sağlam ve güvenilir hale getirerek, ev fiyatlarını daha doğru bir şekilde tahmin etmesine olanak sağlamaktadır.



Şekil 2. Fiyat dağılımı (Price distribution)

Veri setindeki fiyat (Price) dağılımı, konut fiyatlarının istatistiksel özelliklerini anlamak amacıyla incelenmiştir. Bu bağlamda, fiyatların dağılımını görselleştirmek için histogram ve Çekirdek Yoğunluğu Tahmini (Kernel Density Estimate - KDE) kullanılmıştır. Fiyat dağılımı, Şekil 2'deki grafikte yer aldığı gibi normal dağılım özelliklerini göstermektedir. Grafik, fiyatların çoğunluğunun belirli bir aralıkta yoğunlaştığını ortaya koymaktadır. Normal dağılımı simüle eden eğri, verilerin simetrik ve çan şeklinde dağıldığını ve bu dağılımın ortalama etrafında yoğunlaştığını göstermektedir. Bu dağılımın normal dağılıma yakın olması, konut fiyatlarının çoğunlukla merkezi bir değere yakın olduğunu, ancak bazı istisnaların (örneğin, lüks konutlar veya kriz sonrası fiyatlar gibi) bu dağılımın uçlarında yer aldığını göstermektedir. Normal dağılımın bu şekilde sergilenmesi, istatistiksel analizler için verinin uygun olduğunu ve ileri düzey tahmin modelleri geliştirmek için uygun bir temel oluşturduğunu ifade etmektedir.

4.3. Performans Metrikleri (Performance Metrics)

Regresyon modellerinin etkin bir şekilde değerlendirilmesi ve oluşturulan modeller arasında

performans karşılaştırması yapılmasını sağlamak amacıyla çeşitli performans değerlendirme metriklerinin kullanılmasını gerektirmektedir. Bu bağlamda, araştırmada tercih edilen metrikler arasında Ortalama Mutlak Hata (Mean Absolute Error – MAE), Ortalama Kare Hata (Mean Squared Error – MSE), Kök Ortalama Kare Hata (Root Mean Squared Error – RMSE) ve belirleme katsayısı (coefficient of determination - R^2) skoru bulunmaktadır.

MAE, modelin tahminlerinin gerçek değerlerden ortalama sapmasını ölçen bir metrik olarak kabul edilmektedir. Düşük bir MAE değeri, modelin daha keskin ve doğru tahminler gerçekleştirdiğinin göstergesi olarak kabul edilir. Bu metrik, her bir tahmin hatasının mutlak değeri alınarak bunların toplandığı ve ardından ortalama değerinin hesaplandığı bir formülle ifade edilir. Bu sayede, modelin ne kadar yanıltıcı olmadığı ve tahminlerin gerçek değerlere ne kadar yakın olduğu değerlendirilmiş olur [49]. MAE'nin formülü Eşitlik 5'te gösterilmektedir.

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i| \quad (5)$$

MSE, hataların karelerinin ortalamasını temsil eder ve bu nedenle büyük hataların, küçük hatalara kıyasla daha fazla ağırlığa sahip olduğu durumları vurgular. Bu metrik, her bir tahmin hatasının karesinin alınması, bunların toplanması ve ardından ortalama değerinin hesaplanmasıyla elde edilmektedir. Bu hesaplama ile modelin tahminlerinin gerçek değerlere ne kadar yakın veya uzak olduğunu değerlendirmek mümkün olmaktadır. MSE, regresyon modelinin performansını ölçerken hataların büyüklüğünün önemli olduğu durumlar için kullanışlı bir değerlendirme kriteridir [50]. MSE'nin formülü Eşitlik 6'da verilmiştir.

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (6)$$

RMSE, regresyon modelinin tahminlerinin gerçek değerlere ne kadar yakın veya uzak olduğunu değerlendirmek için kullanılan bir performans metriğidir. RMSE, MSE'nin karekökü olarak geçmektedir ve bu sayede hataların orijinal biriminde ifade edilmesine olanak tanır. Büyük hataların model performansını daha fazla etkilediği durumları vurgulamaktadır. Her bir tahmin hatasının karesinin alınmasıyla bunların toplanması sağlanır. Ardından ortalama değeri hesaplanarak karekök alınır. RMSE, regresyon modellerinin hata düzeyini daha açıklayıcı bir şekilde ifade etmek için

yaygın olarak tercih edilen bir metriktir [51]. RMSE'nin formülü Eşitlik 7'de yer almaktadır.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (7)$$

R² skoru, bağımlı değişkenin varyansının bağımsız değişkenler tarafından ne kadarının açıklandığını ölçen bir metriktir. Bir modelin veriyi ne kadar iyi açıkladığını belirlemek için kullanılmaktadır. R² skoru, 0 ile 1 arasında bir değer alır, 1'e ne kadar yakınsa, modelin veriyi o kadar iyi açıkladığı anlamına gelir. R² skoru, regresyon modelinin toplam varyansın yüzde kaçını açıkladığını ifade eder. Modelin açıklama gücüne dair bir ölçüdür ve ne kadar yüksekse, modelin başarısı o kadar yüksek kabul edilir [52]. Formülü Eşitlik 8'de yer almaktadır.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (8)$$

5. DENEYSEL ÇALIŞMA VE BULGULAR (EXPERIMENTAL STUDY AND FINDINGS)

Bu çalışmada, konut fiyatlarını tahminleme amacıyla 10 farklı denetimli regresyon algoritması kullanılmıştır. Modeller oluşturulurken, veri seti %80 eğitim ve %20 test olmak üzere ikiye ayrılmıştır. Kullanılan bütün algoritmalarda rastgele durum (random state) 42 olarak ayarlanmıştır. Modeller için en iyi hiper parametre ayarları, Grid Search, Random Search ve Optuna yöntemleri kullanılarak belirlenmiştir ve bu belirlenen hiper parametrelere göre performans karşılaştırmaları gerçekleştirilmiştir. Grid Search, belirtilen hiper parametre aralıkları içinden farklı kombinasyonlar deneyerek en iyi performansı veren hiper parametreleri seçmektedir. Grid Search kullanarak bir RF modelinin hiper parametrelerinin

ayarlanması durumunda, Grid Search belirlenen hiper parametre aralıkları içinden her bir kombinasyonu deneyerek birçok farklı RF modeli oluşturmaktadır. Daha sonra bu modelleri belirli bir metrik kullanarak değerlendirmekte ve en iyi performansı veren hiper parametre kombinasyonunu seçmektedir [53]. Random Search, hiper parametrelerin rastgele seçilen kombinasyonlarını deneyerek modelin performansını optimize etmeyi amaçlamaktadır. Bu yöntem, Grid Search'in aksine, belirli bir hiper parametre aralığında rastgele örneklemeler yaparak hiper parametre uzayını daha geniş bir şekilde keşfetmekte ve daha hızlı sonuçlar elde edilmesine olanak tanımaktadır. Optuna ise hiper parametre optimizasyonunda daha gelişmiş bir yöntem sunmaktadır. Optuna, bir optimizasyon algoritması kullanarak hiper parametre aralığından en iyi sonuçları aramak üzere deneyler yapmaktadır. Bu yöntemde hiper parametrelerin etkilerinin daha hızlı ve etkili bir şekilde değerlendirilmesi için Bayes optimizasyonu gibi teknikler kullanılmaktadır. Araştırmada, modellerin performanslarını daha güvenilir bir şekilde değerlendirmek amacıyla beş katmanlı çapraz doğrulama yöntemi uygulanmıştır. Modellere ait en iyi sonuçlar Optuna yöntemi ile belirlenen hiper parametreler ile elde edilmiştir. Buna göre algoritmaların hiper parametre değerleri Tablo 1'de verilmiştir.

Araştırmada kullanılan her bir algoritmanın performansını değerlendirmek, regresyon modelinin ne kadar iyi tahmin yaptığını ölçmek amacıyla MAE, MSE, RMSE ve R² metrikleri kullanılmıştır. Tablo 2'de Random Search yöntemi ile, Tablo 3'te Grid Search yöntemi ile ve Tablo 4'te ise Optuna yöntemi ile ayarlanmış hiper parametrelerle elde edilmiş modellerin tahminleme yeteneklerine dair performans ölçümleri sunulmuştur.

Tablo 1. Algoritmaların hiper parametre ayarları (Hyperparameter settings of algorithms)

Algoritma	Parametreler	Değer
LR	fit_intercept, normalize, solver, alpha	True, False, 'lbfgs', 0.0001
RR	alpha, fit_intercept, normalize	1.0, True, False
LAR	alpha, fit_intercept, normalize	1.0, True, False
SVR	C, epsilon, kernel, degree	Belirlenmiş, Belirlenmiş, 'rbf', -
RFR	n_estimators, max_features, min_samples_split, min_samples_leaf	100, "auto", 2, 1
GBR	n_estimators, learning_rate, max_depth, subsample, min_samples_split	100, 0.1, None, 1.0, 2
DTR	max_depth, min_samples_split, min_samples_leaf, criterion	5, 2, 1, 'squared_error'
KNN	n_neighbors, weights, algorithm	5, 'uniform', 'auto'
MLP	hidden_layer_sizes, activation, learning_rate, solver, alpha	(100, 50), 'relu', 'constant', 'adam', 0.0001

ENR alpha, 11_ratio, fit_intercept, normalize 0.5, 0.5, True, False

Tablo 2. Random Search ile ayarlanmış hiper parametrelerle modellerin performansı (Performance of models with hyperparameters tuned with Random Search)

Algoritma	MAE		MSE		RMSE		R ²	
	Eğitim	Test	Eğitim	Test	Eğitim	Test	Eğitim	Test
LR	4114.88	4078.94	2577.32	2522.21	5102.68	5068.68	0.5519	0.5564
RR	4076.20	4112.98	2542.17	2519.52	5056.96	5067.03	0.5572	0.5574
LAR	4114.88	4112.88	2577.32	2519.61	5102.68	5067.05	0.5519	0.5575
SVR	6700.79	6634.06	5922.49	5833.70	7909.95	7860.58	0.0101	0.0101
DTR	1972.01	6316.91	8314.29	5428.43	2974.52	7466.34	0.9686	0.0850
RFR	1611.58	4368.61	4086.93	2870.13	2026.32	5453.65	0.9031	0.5034
GBR	4037.82	3787.24	2518.91	2118.19	5120.94	4691.60	0.5680	0.6439
KNN	3662.91	4470.33	2037.68	3041.92	4511.15	5615.21	0.6697	0.4735
MLP	6076.87	6136.66	5350.86	5446.10	7511.67	7611.89	0.0485	0.0392
ENR	5865.44	5799.30	5079.17	4999.94	7246.43	7218.47	0.1541	0.1555

Tablo 3. Grid Search ile ayarlanmış hiper parametrelerle modellerin performansı (Performance of models with hyperparameters tuned with Grid Search)

Algoritma	MAE		MSE		RMSE		R ²	
	Eğitim	Test	Eğitim	Test	Eğitim	Test	Eğitim	Test
LR	4196.88	4144.52	2627.36	2592.31	5252.36	5217.10	0.5404	0.5442
RR	4196.89	4172.85	2627.36	2592.32	5252.36	5217.09	0.5404	0.5442
LAR	4196.88	4172.92	2627.36	2592.32	5252.36	5217.10	0.5404	0.5442
SVR	6500.32	6489.20	6035.33	6008.24	7960.58	7842.70	0.0093	0.0094
DTR	1908.91	6127.82	8051.91	5562.17	2907.66	7642.16	0.9487	0.0792
RFR	1657.90	4450.44	4187.77	2953.38	2096.93	5568.70	0.8846	0.4877
GBR	4169.55	3748.67	2594.03	2097.51	5219.95	4692.95	0.5455	0.6230
KNN	3748.51	4581.38	2097.51	3131.61	4692.95	5723.78	0.6230	0.4597
MLP	6259.20	6275.98	5793.25	5835.11	7799.31	7827.44	0.0470	0.0365
ENR	5985.47	5969.61	5173.94	5142.80	7370.64	7348.43	0.1435	0.1449

Tablo 4. Optuna ile ayarlanmış hiper parametrelerle modellerin performansı (Performance of models with hyperparameters tuned with Optuna)

Algoritma	MAE		MSE		RMSE		R ²	
	Eğitim	Test	Eğitim	Test	Eğitim	Test	Eğitim	Test
LR	3997.03	3947.16	2502.25	2468.87	5002.25	4968.67	0.5689	0.5728
RR	3997.04	3974.14	2502.25	2468.76	5002.25	4968.66	0.5689	0.5728
LAR	3997.03	3974.16	2502.25	2468.76	5002.25	4968.67	0.5689	0.5728
SVR	6190.78	6170.67	5747.93	5722.14	7581.51	7564.48	0.0098	0.0099
DTR	1818.01	5836.02	7668.49	5297.30	2769.20	7278.25	0.9986	0.0834
RFR	1578.95	4237.56	3988.35	2812.74	1997.08	5303.53	0.9312	0.5133
GBR	3971.95	3570.16	2471.46	1997.63	4971.38	4469.48	0.5742	0.6558
KNN	3570.01	4363.22	1997.63	2982.49	4469.48	5451.22	0.6558	0.4839
MLP	5961.14	5977.12	5517.38	5557.25	7427.91	7454.70	0.0495	0.0384
ENR	5700.45	5675.82	4927.56	4897.90	7019.66	6998.50	0.1511	0.1525

Tablo 2, Tablo 3 ve Tablo 4'te modellerin hiper parametre ayarlama yöntemlerine göre hem eğitim hem de test veri setlerinde aldığı skorlar verilmiştir. Modellerin genel performansını değerlendirilmesi açısından test seti daha kritik kabul edilmektedir. Modelin gerçek dünya verileriyle nasıl başa çıkabildiğini değerlendirmek, modelin genelleme yeteneğini daha iyi yansıtmaktadır. Ancak, eğitim

setindeki performans değerleri, modelin veriyi ne kadar iyi öğrendiğini anlamak için önemlidir. İdeal durumda, model eğitim ve test setlerinde benzer performans göstermelidir. Eğer model eğitim setinde çok iyi performans sergilerken, test setinde kötü performans gösteriyorsa, bu durum aşırı uyuma işaret edebilir. Bu nedenle, modelin hem

eğitim hem de test setlerinde iyi performans sergilemesi hedeflenir.

Araştırma bulgularına göre Optuna ile hiper parametreleri ayarlanmış GBR modeli, diğer modeller arasında test veri seti üzerinde alınan en yüksek R^2 değeri ile konut fiyatlarını belirlemede en iyi model olarak belirlenmiştir (RMSE = 4469.48, $R^2 = 0.6558$). LR, RR ve LAR modelleri eğitim ve test veri setlerinde benzer performans sergilemektedir. Bahsedilen modeller açısından R^2 değerleri yaklaşık olarak %57'dir. Bu değer, hedef değişkenin varyansının %57'sinin açıklandığını göstermektedir. SVR modeli eğitim ve test veri setlerinde düşük performans göstermektedir. R^2 değeri yaklaşık olarak 0'a yakındır, bu da modelin verilere uygun olmadığı şeklinde yorumlanabilir. Buna ek olarak MAE (6170.67) ve RMSE değerlerinin (7564.48) yüksek bulunmasıyla da daha büyük bir tahmin hatasının olduğuna işaret etmektedir. DTR, eğitim setinde olağanüstü performans göstermektedir (RMSE = 2769.20, $R^2 = 0.9986$). Ancak test setinde performans çok ciddi ölçüde düşmektedir (RMSE = 7278.25, $R^2 =$

0.0834). Bu durum modelin potansiyel bir aşırı uyum durumuna girdiğini göstermektedir. RFR, eğitim setinde DTR'ye benzer şekilde yüksek bir performans göstermiştir (RMSE = 1997.08, $R^2 = 0.9312$). Eğitim seti üzerindeki yüksek R^2 değeri, modelin iyi bir genelleme performansı gösterdiğine işaret etmektedir. Ancak, test setindeki performansa bakıldığında DTR kadar olmasa da modelin performansının önemli ölçüde düştüğü görülmektedir (RMSE = 5303.53, $R^2 = 0.5133$). Bunların yanı sıra, bulgular, Optuna'nın genel olarak en yüksek performansı sağladığını ve diğer yöntemlere kıyasla belirgin bir üstünlük sunduğunu göstermektedir. Optuna'nın hiper parametre optimizasyonundaki hassasiyeti ve etkinliği, algoritmaların performansını artırmada en etkili yaklaşım olarak öne çıkmaktadır. Buna karşılık, Random Search en düşük performansı gösterirken, Grid Search daha iyi sonuçlar elde etmiştir ancak, Optuna'nın sağladığı yüksek verimliliği yakalayamamıştır. Grid Search, sistematik bir tarama ile Random Search'tan üstün performans sergilese de Optuna'nın sunduğu optimizasyon avantajlarını sağlayamamıştır.

Tablo 5. Optuna ile hiper parametreleri ayarlanmış modellerin doğrulama veri setinde performansı
(Performance of Optuna hyper-parameterized models on validation dataset)

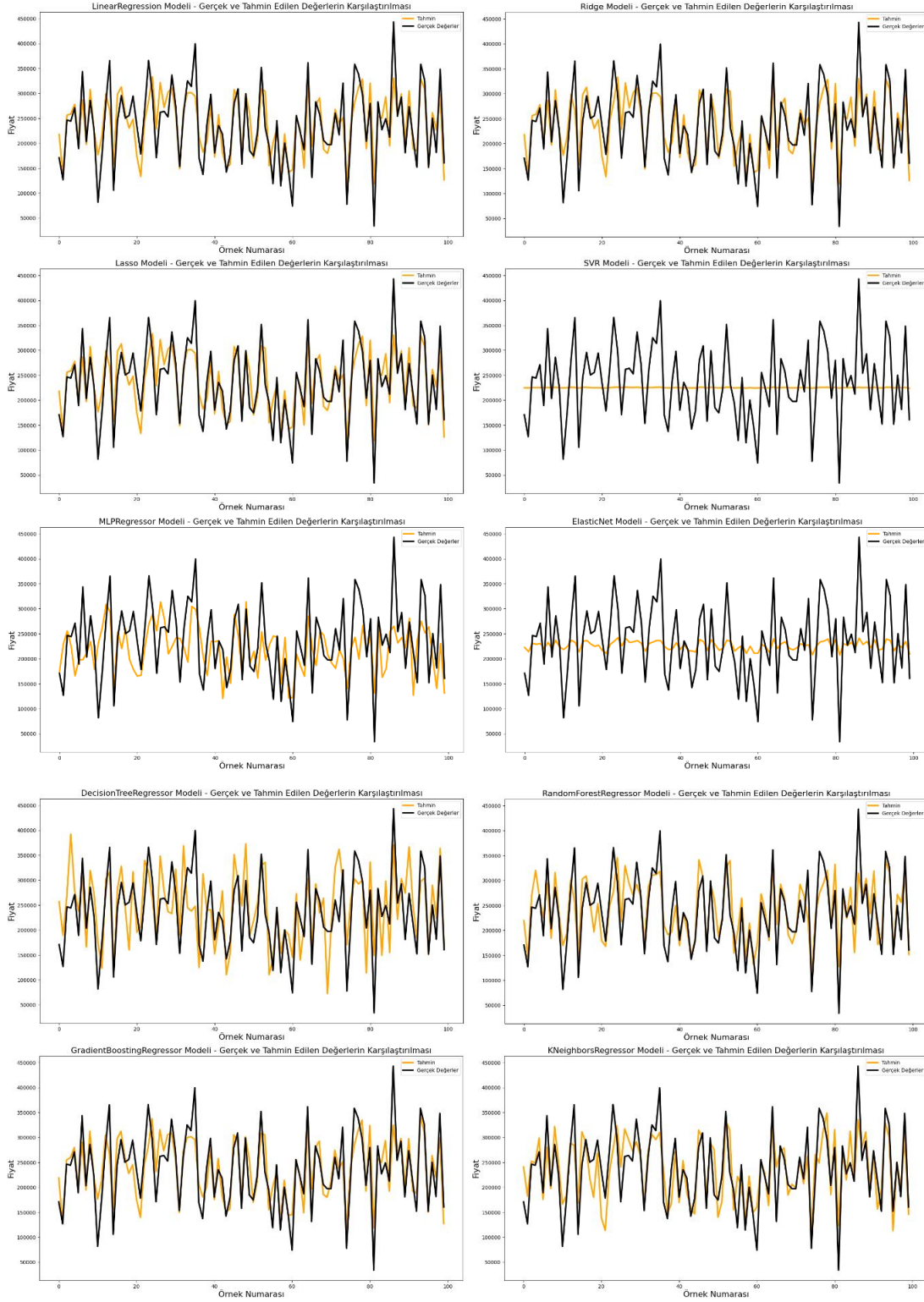
Algoritma	MAE		MSE		RMSE		R^2	
	Doğrulama	Test	Doğrulama	Test	Doğrulama	Test	Doğrulama	Test
LR	3983.21	3965.16	2481.19	2456.35	4981.55	4956.16	0.5774	0.5682
RR	3983.21	3965.08	2481.19	2456.32	4981.63	4956.13	0.5774	0.5682
LAR	3983.21	3965.11	2481.19	2456.34	4981.56	4956.15	0.5774	0.5682
SVR	6211.48	6129.86	5812.46	5631.82	7623.95	7504.55	0.0099	0.0099
DTR	5835.94	5827.88	5340.62	5298.47	7307.95	7279.05	0.0903	0.0685
RFR	4273.26	4208.20	2864.71	2773.79	5352.30	5266.68	0.5120	0.5124
GBR	3991.73	3969.73	2490.29	2465.43	4990.28	4965.31	0.5758	0.5666
KNN	4399.74	4326.71	3029.14	2935.85	5503.76	5418.35	0.4840	0.4839
MLP	6174.98	6037.88	5885.91	5704.85	7671.97	7553.05	0.0025	0.0029
ENR	5714.81	5636.84	4975.00	4820.79	7053.37	6943.19	0.1525	0.1525

Veri seti, modellerin genelleme yeteneğini daha ayrıntılı değerlendirebilmek amacıyla eğitim (%70), doğrulama (%15) ve test (%15) olarak yeniden bölünmüştür. Daha önceki ölçümlerde en yüksek performans değerleri Optuna ile hiper parametre optimizasyonu gerçekleştirildiğinde elde edildiği için modeller bu ayarlamalarla yeniden test edilmiştir. Doğrulama veri seti üzerindeki modellerin performans sonuçları Tablo 5'te sunulmuştur. Tablo 5'teki değerlendirmeler, Tablo 4'te yer alan test sonuçlarıyla kıyaslandığında bazı modellerin performansında önemli değişimler olduğu gözlemlenmiştir. GBR modeli, doğrulama veri setinde en iyi performansı sergilemiştir ($R^2 = 0.5758$, RMSE = 4990.28). Test seti sonuçları ile karşılaştırıldığında, doğrulama veri setindeki

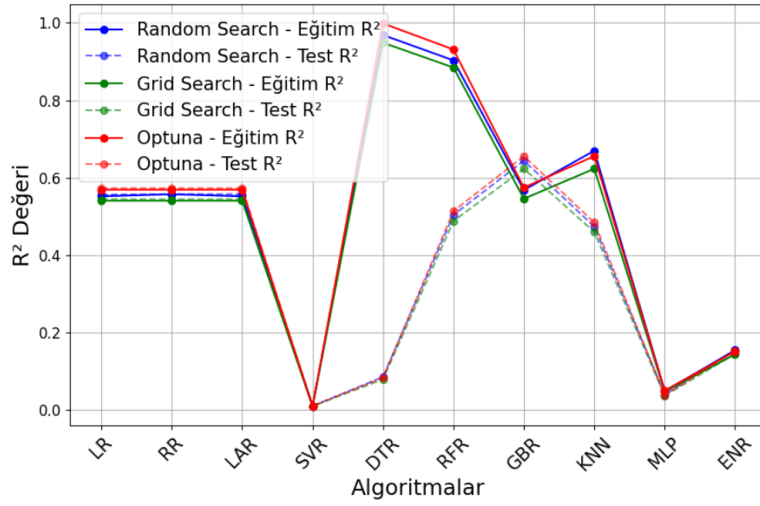
RMSE değerinin %11.3 oranında daha yüksek olduğu görülmektedir. Ancak, bu durum modelin genelleme başarısını hala koruduğunu ve veri bölme yönteminden kaynaklanan sapmanın kabul edilebilir düzeyde olduğunu göstermektedir. RFR modeli, doğrulama veri setinde $R^2 = 0.5120$ ve RMSE = 5352.3 skorlarıyla eğitim ve test veri setlerine kıyasla daha düşük performans göstermiştir. Bu düşüş, modelin aşırı uyuma yatkın olabileceğine işaret ederken, RFR'nin genel anlamda güçlü bir tahmin aracı olmaya devam ettiğini göstermektedir. Özellikle test veri setindeki RMSE değeriyle kıyaslandığında, doğrulama veri setindeki RMSE'nin %0.9 oranında daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Genel olarak, GBR modeli en iyi performansı sergilerken, doğrulama seti

sonuçları Tablo 4’teki test seti sonuçlarına göre bazı modellerde küçük sapmalar olduğunu, ancak genel

sıralamanın büyük ölçüde değişmediğini ortaya koymuştur.



Şekil 3. Gerçek fiyat değerleri ile tahmin edilen değerlerin karşılaştırması (Comparison of actual price values and predicted values)



Şekil 4. Modellerin doğruluk karşılaştırması (Accuracy comparison of models)

Şekil 3'te gerçek satış değerleri ile Optuna ile hiper parametreleri ayarlanmış algoritmalar tarafından tahmin edilen değerlerin karşılaştırması bulunmaktadır. Şekil 3 incelendiğinde RFR ve GBR modellerinin, gerçek değerlere en yakın tahminleri ürettiği gözlemlenmiştir. GBR modelinin tahmin performansı, diğer modellere kıyasla daha kararlı ve doğruluğu yüksek bulunmuştur. Buna karşın SVR modelinde tahmin edilen değerlerin gerçek değerlerden önemli ölçüde sapma gösterdiği dikkat çekmektedir.

Hiper parametre optimizasyon yöntemlerinin modeller üzerindeki etkisi ise Şekil 4'te R² değerleri üzerinden değerlendirilmiştir. Random Search, Grid Search ve Optuna yöntemleri, modellerin performansını artırmada farklı derecelerde etkili olmuştur. GBR ve RFR hem eğitim hem de test veri setlerinde yüksek R² değerleri elde etmiştir. Bu durum, söz konusu modellerin hem eğitim setinde öğrenme kapasitesinin hem de test setinde genelleme yeteneğinin güçlü olduğunu göstermektedir. Hiper parametre optimizasyon yöntemleri arasında Optuna, modellerin performansını en çok artıran yöntem olarak öne çıkmıştır. Bunlara ek olarak SVR modeli, hiper parametre optimizasyon yöntemlerinden bağımsız olarak düşük R² değerleri göstermiştir.

6. SONUÇ VE TARTIŞMA (CONCLUSION AND DISCUSSION)

Bu çalışmada, konut fiyat tahminlemede en başarılı makine öğrenmesi algoritmasını belirleyebilmek amacıyla 10 farklı denetimli regresyon algoritmasının performans karşılaştırmaları gerçekleştirilmiştir. Eğitim ve test setlerinde elde edilen metrik değerler, modellerin genel performansını anlamak adına detaylı bir değerlendirmeye tabi tutulmuştur. Ayrıca, algoritmaların performansını optimize etmek için

Grid Search, Random Search ve Optuna gibi hiper parametre ayarlama yöntemleri kullanılmıştır. Bu yöntemler, her bir modelin hiper parametrelerini en uygun şekilde ayarlayarak en iyi performansı elde etmek için kapsamlı bir şekilde uygulanmıştır. Hiper parametre ayarlama süreçleri, modellerin genel başarılarını etkileyen önemli bir faktör olarak değerlendirilmiştir.

Optuna ile hiper parametreleri ayarlanmış GBR modeli, test veri seti üzerinde elde ettiği yüksek R² değeri (0.6558) ve düşük RMSE değeri (4469.48) ile konut fiyatlarını tahminleme konusunda en başarılı model olarak belirlenmiştir. Optuna'nın hiper parametre optimizasyonundaki sağladığı hassasiyet ve etkinlik, diğer yöntemlerle karşılaştırıldığında belirgin bir üstünlük sunmuştur. Grid Search ve Random Search yöntemlerinin sınırlamaları göz önüne alındığında, Optuna'nın daha ileri düzeyde performans iyileştirmeleri sağladığı gözlemlenmiştir. Grid Search, hiper parametre kombinasyonlarını sistematik bir şekilde tarayarak geniş bir arama alanı sunmasına rağmen, belirli bir kombinasyonun optimal olduğunu garantileyememektedir. Random Search ise hiper parametreleri rastgele kombinasyonlarla denediğinden, hiper parametrelerin en iyi kombinasyonlarına ulaşmada sınırlı başarı göstermiştir. Buna karşın, Optuna'nın Bayesiyen optimizasyon yaklaşımı, hiper parametre alanında daha verimli ve hedefe yönelik bir arama yaparak daha iyi sonuçlar elde edilmesini sağlamıştır. Optuna, önceki deneyimlere dayalı olarak her yeni hiper parametre kombinasyonunu seçerken, performans fonksiyonunun olasılıksal modelini güncellemekte ve böylece daha verimli bir arama süreci sağlamaktadır [54]. Optuna'nın TPE (Tree-structured Parzen Estimator) gibi yöntemleri, hiper parametrelerin dağılımlarını modelleyerek, performansın yüksek olduğu bölgeleri

hedeflemekte ve daha az performans gösteren bölgelerden kaçınılmaktadır [55]. Bu sayede, hiper parametre alanında daha hızlı ve etkili bir keşif süreci gerçekleştirilmekte ve model performansını önemli ölçüde artırılmaktadır. Optuna'nın diğer yöntemlere kıyasla üstünlüğü, arama alanını dinamik olarak daraltarak daha hedefe yönelik bir şekilde hiper parametre seçimi yapmasından kaynaklanmaktadır. Literatürde Optuna'nın özellikle derin öğrenme modelleri gibi yüksek boyutlu hiper parametre alanlarına sahip problemler için daha etkili olduğu belirtilmektedir. Çünkü TPE algoritması, her iterasyonda performansı yüksek bölgeleri daha iyi modelleyerek, performansı düşük olasılık alanlarını hızla elemine edebilmektedir [56]. Ayrıca, Optuna'nın "prune" özelliği, düşük performans gösteren denemeleri erken durdurma imkânı sağlayarak zaman ve kaynak israfını önlemektedir. Bu özellik, özellikle yüksek sayıda hiper parametre kombinasyonu gerektiren senaryolarda, diğer yöntemlere göre önemli bir avantaj sağlamaktadır [57]. Literatürde, Optuna'nın hiper parametre optimizasyon sürecinde öğrenme oranı, ağaç derinliği veya minibatch boyutu gibi parametrelerin hassas bir şekilde ayarlanmasında etkili olduğu ve bu sayede daha iyi genelleme performansı elde edildiği gösterilmiştir [58]. Bunun yanı sıra, TPE, karmaşık hiper parametre etkileşimlerini daha iyi modelleyerek, klasik Bayesiyen optimizasyon yöntemlerinden daha iyi sonuçlar vermektedir [59]. Araştırmada kullanılan modeller açısından değerlendirildiğinde ise GBR diğer modellere kıyasla daha iyi genelleme yeteneği göstermiş ve tahminlerde daha düşük hata payına sahip olmuştur. Bu durum, GBR'nin konut fiyatlarındaki karmaşıklığı daha iyi öğrenme yeteneğine sahip olduğunu göstermektedir.

SVR modeli, düşük R^2 değeri (0.0099) ve yüksek RMSE değeri (7564.48) ile test setinde zayıf performans sergilemiştir. Bu durum, SVR'nin konut fiyatlarını doğru bir şekilde modelleyemediğini ve genelleme yeteneğinin düşük olduğunu göstermektedir. SVR'nin düşük performans göstermesi, özellikle veri setindeki karmaşıklığın bu modelin öğrenme yeteneğini sınırladığını düşündürmektedir. SVR'nin başarılı bir şekilde uygulanabilmesi için parametre ayarının ve kernel fonksiyonunun doğru seçilmesi önemlidir.

DTR ve RFR modelleri ise eğitim setinde yüksek performans göstermelerine rağmen, test setinde performanslarında önemli düşüşler yaşamışlardır. Bu durum, bu modellerin aşırı uyuma yatkın olduğunu ve genelleme yeteneklerinin sınırlı olduğunu göstermektedir. Aşırı uyuma, bir modelin eğitim setine aşırı derecede uyum sağlayarak, bu

veri kümesindeki gürültü ve rastgele varyasyonları öğrenme eğiliminde olduğu durumu ifade etmektedir. Bu durum, modelin eğitim verilerine mükemmel bir şekilde uymasıyla sonuçlanırken, gerçek dünya verileri üzerinde beklenmedik ve kötü tahminlere yol açmaktadır.

DTR ve RFR gibi karar ağacı tabanlı modeller, veri setindeki karmaşıklığı öğrenme yetenekleri nedeniyle aşırı uyuma eğilimindedir. Özellikle eğitim setindeki yüksek performans, modelin veri setindeki detayları ezberleme kapasitesine işaret eder. Ancak, test setinde performansın düşük olması, modelin bu ezberlenen bilgileri genelleme yeteneğinin zayıf olduğunu gösterir. Karmaşık yapıların kontrol edilmesi, bu modellerin aşırı uyuma eğilimini azaltmaya yönelik önemli bir stratejidir. Bu durumu kontrol edebilmek için literatürde birkaç strateji geçmektedir. Modelin karmaşıklığını düzenleyen hiper parametrelerin (max_depth, n_estimators gibi) ayarlanması, aşırı uyum eğilimini azaltmaktadır. Ayrıca, veri setindeki gürültüyü azaltmak ve gereksiz karmaşıklığı önlemek için özellik mühendisliği (feature engineering) tekniklerinin uygulanması önerilmektedir.

Diğer doğrusal modeller olan LR, RR ve LAR modelleri benzer performans göstermişlerdir. Eğitim ve test setlerindeki R^2 değerleri yaklaşık olarak %57 olduğundan, bu modellerin hedef değişkenin varyansının önemli bir kısmını açıkladığı söylenebilir. Ancak, GBR modeline kıyasla tahminlerde daha yüksek hata payına sahiptirler. Doğrusal regresyon modelleri hedef değişkenin doğrusal bir kombinasyonunu modellediği için yeterince esnek olmayabilir. Ancak, bu modellerin genel olarak anlaşılır ve yorumlanabilir olması, bazı uygulamalarda tercih edilmelerine neden olmaktadır [34].

6. GELECEK ARAŞTIRMALAR VE UYGULAMALAR İÇİN ÖNERİLER (RECOMMENDATIONS FOR FUTURE RESEARCH AND APPLICATIONS)

Araştırma sonuçları, konut fiyatlarını tahminlemede en yüksek performansa sahip modelin GBR olduğunu göstermektedir. Ancak, model seçimi sürecinde dikkate alınması gereken önemli faktörler bulunmaktadır. Bu faktörler arasında güvenilirlik ve genel performansın dengeli bir şekilde ele alınması önemli bir rol oynamaktadır. Güvenilirlik, modelin güvenilir sonuçlar üretme kabiliyetini içermektedir. Genel performans ise modelin hem eğitim hem de test veri setlerinde başarılı bir şekilde çalışma yeteneğini ifade etmektedir. Özellikle hiper parametre ayarlama yöntemleri bu süreçte önemli

bir rol üstlenmektedir. Hiper parametrelerin uygun şekilde ayarlanması, modelin hem eğitim hem de test veri setlerinde daha iyi genelleme yapabilmesine ve tahmin performansını maksimize etmesine olanak tanımaktadır. Bu çalışmada Optuna, hiper parametrelerin optimize edilmesinde daha verimli ve hedefe yönelik bir arama yaparak GBR modelinin performansını önemli ölçüde artırmıştır.

Gelecekteki araştırmalarda, hiper parametre optimizasyonu sürecinin ötesine geçilerek, farklı makine öğrenmesi yöntemlerinin performanslarının kıyaslanması ve değerlendirilmesi önerilmektedir. Model performansını artırmak için “genetik algoritma” veya “benzetilmiş tavlama (simulated annealing)” gibi evrimsel ve doğadan ilham alan arama yöntemlerinin kullanımı araştırılabilir. Bu yöntemler, Grid Search veya Random Search farklı olarak, daha karmaşık ve çok boyutlu hiper parametre alanlarında daha etkin arama yapabilme potansiyeline sahiptir. Ayrıca, modellerin genelleme yeteneklerini geliştirmek için “topluluk (ensembling)” tekniklerinin (örneğin, bagging, boosting ve stacking) daha kapsamlı bir şekilde incelenmesi önerilmektedir. Bu yaklaşımlar, tek bir modelin sınırlamalarını aşmak ve daha dengeli ve güvenilir tahminler elde etmek için farklı modellerin birlikte kullanımını mümkün kılmaktadır. Örneğin, konut fiyat tahminleri için GBR modelinin yanı sıra, XGBoost, LightGBM veya CatBoost gibi diğer gelişmiş yöntemlerle yapılan topluluk modellerinin performansı değerlendirilebilir. Bununla birlikte, konut fiyat tahmin modellerinin geliştirilmesinde sadece model performansını artırmakla sınırlı kalmamak, aynı zamanda model açıklanabilirliğini de ön planda tutmak önerilmektedir. “SHAP değerleri” veya “LIME” gibi açıklanabilirlik tekniklerinin kullanımı, model tahminlerinin nasıl ve neden yapıldığına dair daha fazla içgörü sağlayabilir ve bu da modelin kullanıcılar ve paydaşlar tarafından daha kolay kabul görmesine olanak tanıyabilir. Bu tür tekniklerin, konut fiyatlarını etkileyen temel faktörlerin daha iyi anlaşılmasına katkı sağlayacağı öngörülmektedir. Bunlara ek olarak, coğrafi konum, konut özellikleri ve piyasa koşulları gibi farklı değişkenlerin modeller üzerindeki etkisinin daha derinlemesine incelenmesi için “coğrafi bilgi sistemleri (Geographic Information System - GIS)” ile entegre edilen modellerin geliştirilmesi, konut piyasasının dinamiklerini daha kapsamlı ve doğru bir şekilde analiz etmeye yardımcı olabilir. Bu yaklaşım, bölgesel farklılıkların ve yerel piyasa trendlerinin daha iyi anlaşılmasına olanak tanımaktadır.

Otomatik tahmin sistemlerinin kullanımı ve bu bilgilerin ekonomik istikrara olan katkısı alanda değerlendirilmesi gereken önemli bir konu başlığı olarak öne çıkmaktadır. Bu tür sistemlerin konut piyasasındaki dalgalanmaları önceden tahmin edebilme potansiyeli, ekonomik planlamada ve karar almalarda önemli bir rol oynayabilir. Bu konuda yapılacak daha fazla araştırma, otomatik tahmin sistemlerinin gerçek dünya uygulamalarında nasıl kullanılabilceği konusunda daha kapsamlı bilgiler sunabilir. Bu çalışma, konut fiyat tahminleme konusunda makine öğrenmesi tekniklerinin önemini ve kullanılabilirliğini göstermesiyle gelecekteki araştırmalar için bir yol haritası çizmektedir.

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 etmektedir.

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)

Vahid SİNAP: Deneyleri yapmış, sonuçlarını analiz etmiş ve makalenin 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.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Sornette D, Woodard R. Financial bubbles, real estate bubbles, derivative bubbles, and the financial and economic crisis. In: Econophysics approaches to large-scale business data and financial crisis. Springer Japan; 2010: 101-148.
- [2] Tse RY. An application of the ARIMA model to real-estate prices in Hong Kong. Journal of Property Finance. 1997; 8(2): 152-163.
- [3] Cervero R. Jobs-housing balancing and regional mobility. Journal of the American Planning Association. 1989; 55(2): 136-150.
- [4] Ghysels E, Plazzi A, Valkanov R, Torous W. Forecasting real estate prices. In: Handbook of Economic Forecasting. Vol. 2. 2013: 509-580.

- [5] Hutchison NE. Housing as an investment? A comparison of returns from housing with other types of investment. *Journal of Property Finance*. 1994; 5(2): 47-61.
- [6] Pai PF, Wang WC. Using machine learning models and actual transaction data for predicting real estate prices. *Applied Sciences*. 2020; 10(17): 5832.
- [7] Peter NJ, Okagbue HI, Obasi EC, Akinola AO. Review on the application of artificial neural networks in real estate valuation. *International Journal*. 2020; 9(3): 5-11.
- [8] Herath SK, Maier G. The hedonic price method in real estate and housing market research. A review of the literature. *Institute for Regional Development and Environment*. 2010: 1-21. Vienna, Austria: University of Economics and Business.
- [9] Taylor LO. Theoretical foundations and empirical developments in hedonic modeling. In: *Hedonic methods in housing markets: Pricing environmental amenities and segregation*. 2008: 15-37. New York, NY: Springer New York.
- [10] Landajo M, Bilbao C, Bilbao A. Nonparametric neural network modeling of hedonic prices in the housing market. *Empirical Economics*. 2012; 42: 987-1009.
- [11] Northcraft GB, Neale MA. Experts, amateurs, and real estate: An anchoring-and-adjustment perspective on property pricing decisions. *Organizational Behavior and Human Decision Processes*. 1987; 39(1): 84-97.
- [12] Patil P. A comparative study of different time series forecasting methods for predicting traffic flow and congestion levels in urban networks. *International Journal of Information and Cybersecurity*. 2022; 6(1): 1-20.
- [13] Venkatachalam AR, Sohl JE. An intelligent model selection and forecasting system. *Journal of Forecasting*. 1999; 18(3): 167-180.
- [14] Bojer CS. Understanding machine learning-based forecasting methods: A decomposition framework and research opportunities. *International Journal of Forecasting*. 2022; 38(4): 1555-1561.
- [15] Almeida JS. Predictive non-linear modeling of complex data by artificial neural networks. *Current Opinion in Biotechnology*. 2002; 13(1): 72-76.
- [16] Vanschoren J, Van Rijn JN, Bischl B, Torgo L. OpenML: Networked science in machine learning. *ACM SIGKDD Explorations Newsletter*. 2014; 15(2): 49-60.
- [17] L'heureux A, Grolinger K, Elyamany HF, Capretz MA. Machine learning with big data: Challenges and approaches. *IEEE Access*. 2017; 5: 7776-7797.
- [18] Felzmann H, Fosch-Villaronga E, Lutz C, Tamò-Larrieux A. Towards transparency by design for artificial intelligence. *Science and Engineering Ethics*. 2020; 26(6): 3333-3361.
- [19] Maharana K, Mondal S, Nemade B. A review: Data pre-processing and data augmentation techniques. *Global Transitions Proceedings*. 2022; 3(1): 91-99.
- [20] Bejani MM, Ghatee M. A systematic review on overfitting control in shallow and deep neural networks. *Artificial Intelligence Review*. 2021; 1-48.
- [21] Janiesch C, Zschech P, Heinrich K. Machine learning and deep learning. *Electronic Markets*. 2021; 31(3): 685-695.
- [22] Lu S, Li Z, Qin Z, Yang X, Goh RSM. A hybrid regression technique for house prices prediction. In: *2017 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM)*. 2017: 319-323. IEEE.
- [23] Durganjali P, Pujitha MV. House resale price prediction using classification algorithms. In: *2019 International Conference on Smart Structures and Systems (ICSSS)*. 2019: 1-4. IEEE.
- [24] Rahadi RA, Wiryono SK, Koesrindartoto DP, Syamwil IB. Factors affecting housing products price in Jakarta metropolitan region. *International Journal of Property Sciences*. 2016; 6(1).
- [25] Alfiyatin AN, Febrita RE, Taufiq H, Mahmudy WF. Modeling house price prediction using regression analysis and particle swarm optimization case study: Malang, East Java, Indonesia. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*. 2017; 8(10).
- [26] Osmadi A, Kamal EM, Hassan H, Fattah HA. Exploring the elements of housing price in Malaysia. *Asian Social Science*. 2015; 11(24): 26.
- [27] Chau KW, Chin TL. A critical review of literature on the hedonic price model. *International Journal for Housing Science and Its Applications*. 2003; 27(2): 145-165.
- [28] Ball MJ. Recent empirical work on the determinants of relative house prices. *Urban Studies*. 1973; 10(2): 213-233.
- [29] Rodriguez M, Sirmans C. Managing corporate real estate: evidence from the capital markets. *Journal of Real Estate Literature*. 1996; 4(1): 13-33.
- [30] Owusu-Manu DG, Edwards DJ, Donkor-Hyiaman KA, Asiedu RO, Hosseini MR, Obiri-

- Yeboah E. Housing attributes and relative house prices in Ghana. *International Journal of Building Pathology and Adaptation*. 2019; 37(5): 733-746.
- [31] Samuel AL. Some studies in machine learning using the game of checkers. *IBM Journal of Research and Development*. 1959; 3(3): 210-229.
- [32] Mitchell TM. *Machine learning*. McGraw Hill. 1997.
- [33] Hastie T, Tibshirani R, Friedman JH. *The elements of statistical learning: data mining, inference, and prediction*. Vol. 2. 2009: 1-758. New York: Springer.
- [34] James G, Witten D, Hastie T, Tibshirani R. *An introduction to statistical learning*. Vol. 112. 2013: 18. New York: Springer.
- [35] Xu C, Lu C, Liang X, Gao J, Zheng W, Wang T, Yan S. Multi-loss regularized deep neural network. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*. 2015; 26(12): 2273-2283.
- [36] Kotsiantis SB, Zaharakis I, Pintelas P. Supervised machine learning: A review of classification techniques. *Emerging Artificial Intelligence Applications in Computer Engineering*. 2007; 160(1): 3-24.
- [37] Speelman D. Logistic regression. *Corpus Methods for Semantics: Quantitative Studies in Polysemy and Synonymy*. 2014; 43: 487-533.
- [38] Menard S. Coefficients of determination for multiple logistic regression analysis. *The American Statistician*. 2000; 54(1): 17-24.
- [39] McDonald GC. Ridge regression. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics*. 2009; 1(1): 93-100.
- [40] Ranstam J, Cook JA. LASSO regression. *Journal of British Surgery*. 2018; 105(10): 1348-1348.
- [41] Zhang F, O'Donnell LJ. Support vector regression. In: *Machine learning*. 2020: 123-140. Academic Press.
- [42] Cristianini N, Shawe-Taylor J. *An introduction to support vector machines and other kernel-based learning methods*. Cambridge University Press. 2000.
- [43] Xu M, Watanachaturaporn P, Varshney PK, Arora MK. Decision tree regression for soft classification of remote sensing data. *Remote Sensing of Environment*. 2005; 97(3): 322-336.
- [44] Li Y, Zou C, Bercibar M, Nanini-Maury E, Chan JCW, Van den Bossche P, et al. Random forest regression for online capacity estimation of lithium-ion batteries. *Applied Energy*. 2018; 232: 197-210.
- [45] Fu MC, Qu H. Regression models augmented with direct stochastic gradient estimators. *INFORMS Journal on Computing*. 2014; 26(3): 484-499.
- [46] Zhang L, Liu Q, Yang W, Wei N, Dong D. An improved k-nearest neighbor model for short-term traffic flow prediction. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*. 2013; 96: 653-662.
- [47] Aitkin M, Foxall R. Statistical modelling of artificial neural networks using the multi-layer perceptron. *Statistics and Computing*. 2003; 13: 227-239.
- [48] Liu W, Dou Z, Wang W, Liu Y, Zou H, Zhang B, Hou S. Short-term load forecasting based on elastic net improved GMDH and difference degree weighting optimization. *Applied Sciences*. 2018; 8(9): 1603.
- [49] Chai T, Draxler RR. Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE)?—Arguments against avoiding RMSE in the literature. *Geoscientific Model Development*. 2014; 7(3): 1247-1250.
- [50] Prasad NN, Rao JN. The estimation of the mean squared error of small-area estimators. *Journal of the American Statistical Association*. 1990; 85(409): 163-171.
- [51] Willmott CJ, Matsuura K. Advantages of the mean absolute error (MAE) over the root mean square error (RMSE) in assessing average model performance. *Climate Research*. 2005; 30(1): 79-82.
- [52] Onyutha C. A hydrological model skill score and revised R-squared. *Hydrology Research*. 2022; 53(1): 51-64.
- [53] Ranjan GSK, Verma AK, Radhika S. K-nearest neighbors and grid search cv based real time fault monitoring system for industries. In: *2019 IEEE 5th International Conference for Convergence in Technology (I2CT)*. 2019: 1-5. IEEE.
- [54] Hanifi S, Cammarono A, Zare-Behtash H. Advanced hyperparameter optimization of deep learning models for wind power prediction. *Renewable Energy*. 2024; 221: 119700.
- [55] Nguyen HP, Liu J, Zio E. A long-term prediction approach based on long short-term memory neural networks with automatic parameter optimization by Tree-structured Parzen Estimator and applied to time-series data of NPP steam generators. *Applied Soft Computing*. 2020; 89: 106116.
- [56] Wang L, Xie S, Li T, Fonseca R, Tian Y. Sample-efficient neural architecture search by learning actions for Monte Carlo Tree Search. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 2021; 44(9): 5503-5515.
- [57] Srinivas P, Katarya R. hyOPTXg: OPTUNA hyper-parameter optimization framework for predicting cardiovascular disease using

XGBoost. *Biomedical Signal Processing and Control*. 2022; 73: 103456.

- [58] Bian K, Priyadarshi R. Machine learning optimization techniques: A survey, classification, challenges, and future research issues. *Archives of Computational Methods in Engineering*. 2024; 1-25.
- [59] Zulfiqar M, Gamage KA, Kamran M, Rasheed MB. Hyperparameter optimization of Bayesian neural network using Bayesian optimization and intelligent feature engineering for load forecasting. *Sensors*. 2022; 22(12): 4446.

Hibrit Aktarım Öğrenme Tekniklerini Kullanarak Beyin Tümörü Sınıflandırmasında Yeni Sonuçlar

Doğukan KALENDER¹ , Atahan ÖZTÜRK¹ , Ömer BİLGİN¹ , Durmuş Özkan ŞAHİN^{1*} 

¹Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Samsun, Türkiye

Makale Bilgisi

Research article
Received: 14/06/2024
Revision: 26/10/2024
Accepted: 04/12/2024

Anahtar Kelimeler

Derin öğrenme
Beyin tümörü tespiti
Aktarım öğrenmesi
Görüntü işleme
Tıbbi görüntü
Tıbbi görüntü sınıflandırma

Article Info

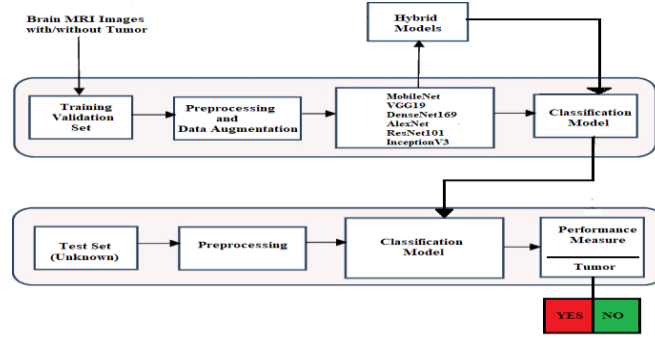
Araştırma makalesi
Başvuru: 14/06/2024
Düzeltilme: 26/10/2024
Kabul: 04/12/2024

Keywords

Deep learning
Brain tumor detection
Transfer learning
Image Processing
Medical image
Medical image
classification

Grafik Özet (Graphical/Tabular Abstract)

Bu çalışma, beyin MR görüntülerinde tümör tespiti için aktarım öğrenmesi yöntemlerini kullanarak bir sistem geliştirmektedir. Çalışma adımları sırasıyla: veri kümesinin hazırlanması, ön işleme, veri artırma, çeşitli aktarım öğrenme tekniklerinin uygulanması, bu tekniklerin birleştirilerek yeni modellerin geliştirilmesi ve test görüntüleri üzerinde performans değerlendirmesidir. Şekil A, bu süreçlerin aşamalarını görsel olarak özetlemektedir. / This study develops a system for tumor detection in brain MRI images using transfer learning techniques. The steps involved are: dataset preparation, preprocessing, data augmentation, application of various transfer learning methods, combination of these methods to develop new models, and performance evaluation on test images. Figure A provides a visual summary of these stages.



Şekil A: Beyin Tümörü Tespit Sisteminin Yapısı / Figure A: Structure of Brain Tumor Detection System

Önemli noktalar (Highlights)

- Çeşitli aktarım öğrenme teknikleri kullanılarak beyin MR görüntüleri üzerinde tümör tespiti yapıldı. / Tumor detection was performed on brain MRI images using various transfer learning techniques.
- VGG19 ve DenseNet169 modellerinin birleşimiyle oluşturulan hibrit model, %99.21 doğrulukla en yüksek başarıyı sağladı. / The hybrid model created by combining VGG19 and DenseNet169 achieved the highest performance with an accuracy of 99.21%.
- Hibrit modeller kullanılarak sınıflandırma başarımında %2'den fazla iyileşme elde edildi. / The use of hybrid models resulted in an improvement of over 2% in classification performance.

Amaç (Aim): Beyin MR görüntüleri üzerinde derin öğrenme tabanlı modeller kullanarak tümör tespiti yapmaktır. Sınıflandırma doğruluğunu artırmak için hibrit modeller geliştirilmiştir. / To detect tumors using deep learning based models on brain MRI images. Hybrid models have been developed to increase the classification accuracy.

Özgünlük (Originality): Hibrit modellerin uygulanmasıyla, doğruluk oranında önemli bir artış sağlanarak literatüre katkı sağlanmıştır. / The application of hybrid models has resulted in a significant increase in accuracy, contributing to the existing literature.

Bulgular (Results): VGG19 ve DenseNet169 modellerinin birleşimiyle oluşturulan hibrit modelden %99.21 doğrulukla en iyi sınıflandırma başarımı elde edilmiştir. / The best classification performance with 99.21% accuracy was obtained from the hybrid model created by combining the VGG19 and DenseNet169 models.

Sonuç (Conclusion): Bu çalışmada, derin öğrenme tabanlı modeller kullanarak beyin MR görüntülerinde tümör tespiti başarıyla yapılmıştır. Hibrit modellerin uygulanması, sınıflandırma doğruluğunu önemli ölçüde artırarak daha yüksek performans elde edilmesini sağlamıştır. / In this study, tumor detection in brain MRI images was successfully performed using deep learning-based models. The application of hybrid models significantly improved classification accuracy, leading to higher performance.



Hibrit Aktarım Öğrenme Tekniklerini Kullanarak Beyin Tümörü Sınıflandırmasında Yeni Sonuçlar

Doğukan KALENDER¹ , Atahan ÖZTÜRK¹ , Ömer BİLGİN¹ , Durmuş Özkan ŞAHİN^{1*}

¹ Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Samsun, Türkiye

Makale Bilgisi

Research article
Received: 14/06/2024
Revision: 26/10/2024
Accepted: 04/12/2024

Anahtar Kelimeler

Derin öğrenme
Beyin tümörü tespiti
Aktarım öğrenmesi
Görüntü işleme
Tıbbi görüntü
Tıbbi görüntü
sınıflandırma

Öz

Bu çalışmada derin öğrenme modelleri kullanılarak beyin MR görüntüleri işlenmiştir. Kullanılan veri seti tümör bulunan ve bulunmayan görüntülerden oluşmaktadır. Bu görüntüler bazı ön-işleme aşamalarından geçerek modellerin eğitimi için uygun hale getirilmektedir. Çalışmada kullanılan derin öğrenme modelleri aktarım öğrenmesine dayalı modellerden oluşmaktadır. Bunlar MobileNet, VGG19, DenseNet169, AlexNet, ResNet101 ve InceptionV3 modelleridir. Bu modeller önceden eğitilmiş yapıda bulunmaktadır. Bu nedenle derin öğrenme modellerinin daha iyi genelleme yaparak doğru tahminlerde bulunmasını sağlarlar. Modellerin performansını arttırmak için veri arttırma, erken durduma, öğrenme oranı zamanlayıcısı, katman dondurma ve özel katmanların eklenmesi gibi yöntemler kullanılmıştır. Yapılan deneylerde en yüksek başarımlı doğruluk metriğine göre %98.63 ile MobileNet modelinden elde edilmektedir. Daha sonra deneylerden elde edilen sonuçlara göre en başarılı üç modelin ikili kombinasyonları alınarak hibrit modeller oluşturulmuştur. Önerilen bu hibrit modellerin kullanılması ile elde edilen en yüksek başarımlı doğruluk metriğine göre %99.21'dir. Bu sonuç VGG19 ve DenseNet169 modellerinin birleştirilmesiyle elde edilmiştir. Tüm hibrit modellerden elde edilen sonuçlar göz önünde bulundurulduğunda sınıflandırma başarımlarında %2'den fazla iyileştirme sağlanmıştır.

New Results in Brain Tumor Classification Using Hybrid Transfer Learning Techniques

Article Info

Araştırma makalesi
Başvuru: 14/06/2024
Düzeltilme: 26/10/2024
Kabul: 04/12/2024

Keywords

Deep learning
Brain tumor detection
Transfer learning
Image Processing
Medical image
Medical image
classification

Abstract

In this study, brain MRI images were processed using deep learning models. The data set used consists of images with and without tumor. These images are made suitable for training models by going through some pre-processing stages. The deep learning models used in the study consist of models based on transfer learning. These are MobileNet, VGG19, DenseNet169, AlexNet, ResNet101 and InceptionV3 models. These models are pre-trained. Therefore, they enable deep learning models to generalize better and make accurate predictions. Methods such as data augmentation, early stopping, learning rate timer, layer freezing and adding special layers have been used to increase the performance of the models. In the experiments, the highest performance is obtained from the MobileNet model with 98.63% according to the accuracy metric. Then, according to the results obtained from the experiments, hybrid models were created by taking binary combinations of the three most successful models. The highest performance achieved by using these proposed hybrid models is 99.21% according to the accuracy metric. This result was obtained by combining VGG19 and DenseNet169 models. Considering the results obtained from all hybrid models, more than 2% improvement in classification performance was achieved.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Dünya Sağlık Örgütü'nün son verilerine göre beyin tümörleri dünya üzerinde ölüme sebebiyet veren ve en sık rastlanan kanser türlerinden biridir [1]. Bu bağlamda beyin tümörlerinde erken teşhis birçok hastayı kurtarabilir ve gerekli tedavinin zamanında yapılmasını sağlayabilir. Medikal alanda veri hacminde gözle görülür bir artış vardır ve

geleneksel modeller bununla verimli bir şekilde başa çıkamamaktadır. Son zamanlarda medikal görüntüleri kullanan makine öğrenimi analizi, büyük veri tekniklerinde önemli bir yere sahiptir.

Ulusal Beyin Tümörü Vakfı verisine göre her geçen yıl beyin tümörü teşhisi koyulan hastaların sayısı giderek artmaktadır [2, 3, 4]. Bundan dolayı geleneksel yöntemlerin çok zaman alması teşhis

koyulan hastaların tedavisine negatif yönde etki etmektedir. Bunun için alternatif bir yol olarak derin öğrenme kullanan otomatik karar destek sistemleri, alanında uzman kişiler tarafından teşhis yapılmasına ve tedavi sürecinin hızlandırılmasına katkı sağlar [5]. Bu çalışmada ise birçok sınıflandırma problemine başarılı bir şekilde uygulanan aktarım öğrenme tekniklerinin beyin tümörü sınıflandırma probleminde kullanılması amaçlanmaktadır. Ayrıca bu aktarım öğrenme teknikleri birleştirilerek hibrit modeller oluşturulmuştur. Önerilen bu hibrit modeller kullanılarak sınıflandırma başarımında iyileştirme sağlanmaktadır.

1.1. Literatür İncelemesi (Literature Review)

Shivam vd. yapmış oldukları beyin tümörü tespit ve sınıflandırma çalışmasında MRG, Bilgisayarlı Tomografi (BT), Pozitron Emisyon Tomografi taraması (PET SCAN) gibi görüntü tekniklerini kullanarak bu görüntüleri bir kısım incelemeyen geçirmişlerdir. Bu aşamalar sırasıyla ön-işleme, katmanlama, eşikleme, özellik çıkarımı ve sınıflandırmadır. Bu aşamalardan geçen ve destek vektör makinesi (SVM) algoritmasına giren görüntüler alanında uzman kişiler tarafından görüntülenebilen bir görüntüye dönüştürülmüştür. Yaptıkları çalışma sonucunda %92 kesinlik değeri elde etmişlerdir [6].

Syed Muhammad vd. ise kullandıkları BRATS 2015 veri kümesiyle beraber görüntü işleme algoritmaları kullanmışlardır. Araştırmacılar MR görüntülerini alarak bu görüntülerden beyindeki tümörün şeklini, lokasyonunu ve dokusunu tespit etmeyi amaçlamışlardır. Çalışmalarında elle yapılan katmanlama işleminin çok zaman almasından ötürü bunu en hızlı şekilde halletmek istemeleridir. Yapılan araştırma yüksek seviyeli ve düşük seviyeli glial tümörler üzerinde olup tasarladıkları algoritma ile bu konuya bir çözüm getirmeyi amaçlamışlardır. Geliştirdikleri algoritma herhangi bir etiketli eğitim veri kümesine ihtiyaç duymamaktadır. Çalışmada tümürlü görüntülerin segmentasyonu için kullanılan algoritma, maksimum arka beklenti maksimizasyonu (MAP-EM) ve K-ortalamlar (K-Means) kümeleme algoritmasıdır. Çalışma sonucunda 0.92 DICE skor değerini elde etmişlerdir [7].

Aryan Sagar beyin tümörü görüntülemenin zorluklarından bahsetmiş olup bunlar hakkında çözüm önerileri sunmuştur. Görüntülemelemedeki zorlukların, tümörün farklı şekillerde ve dokularda olmasından kaynaklanabileceği söylenmiştir. Tümör ve tümör olmayan görüntülerin makinelere

okunmasında yoğunluğun etkili olduğunu söylemekle beraber bunun için histogram eşitleme ve açma gibi farklı ön-işleme tekniklerine projesinde yer vermiştir. Kullandığı veri kümesi farklı tümör şekilleri, boyutları, dokuları ve konumlarını kapsamaktadır. Sınıflandırma için ise evrimsel sinir ağı (CNN) modeli kullanılmış olup buna dair başarı oranları makalesinde yer almıştır. Yaptığı çalışmada 20 devir kullanılmış olup eğitim, test ve doğrulama için ayrı F1 skorları hesaplanmıştır. Bunlar sırasıyla %98.65, %94.74 ve %99.59 değerleridir [8].

Antor Mahamudul vd. beyin tümörlerinin tespiti ve tedavisinin alanında uzman kişilerin tecrübesine bağlı olduğunu söylemişlerdir ve geliştirdikleri modelin bu konuda yardımcı olduğunu vurgulamışlardır. Yaptıkları modelde MR görüntülerinin doğru şekilde analiz edilmesi için evrimsel sinir ağları kullanmışlardır. Bu yaptıkları uygulamada ellerine geçen görüntünün koyu kenarlarını bulup çıkararak görüntü ön işleme ve veri artırma tekniklerinin olduğunu belirtmişlerdir. Bu işlemlerden sonra ise görüntünün uygun bir ölçek bulunarak normalize edildiğini söylemişlerdir. Çalışmalarında ADAM optimizasyonunu kullanmışlardır. Son olarak Kaggle'dan alınan veri kümesi üzerinde deneyler gerçekleştirilmiştir. Kullanılan veri kümesi üzerinde 400 tane görüntü bulunmaktadır. Bunlardan 230 tanesi tümürlü görüntüden oluşmaktadır. Geri kalan 170 görüntü ise tümör içermemektedir. Deney sonuçlarını F1 skoru ile hesaplamışlardır. Yaptıkları çalışmada test ve doğrulama için 0.89 ve 0.91 F1 skorlarını elde etmişlerdir [9].

Mehrdad vd. yaptıkları çalışmada gliomaların erken tanısında ve tedavisinde bu tümöre sahip olan kişilerin hayat kalitesinin arttığını öne sürmüşlerdir. Derin evrimsel sinir ağları beyin tümörü sınıflandırmasında iyi bir performans vermesine karşın gliomaların değişen yoğunluk ve görünümünde bu yöntemin zorlu bir durum olduğunu belirtmişlerdir. Yaptıkları çalışmada iki boyutlu ve UNet tabanlı bir çalışma yapılmıştır. Deneylelerini üç boyutlu yapmadıklarının sebebi şu şekilde açıklanmaktadır: üç boyutlu görüntülerde bağlamsal bilgiler kullanılmaktadır. Bu bilgilerde otomatik olarak daha fazla parametre ve hesap karmaşıklığına yol açar. Bu konuları daha basit bir şekilde çözmek için araştırmacılar bu yöntemi kullanan bir model geliştirdiklerini belirtmişler. Tasarlanan bu modelde başlıca iki teknik kullandıklarını söylemişlerdir. İlk teknik düşük ve yüksek seviye özelliklerin birleştirilmesinde kullanılan bir dikkat sistemidir. İkinci teknik ise çoklu görünüm füzyonudur. Bu teknik iki boyutlu

görüntülerin üç boyutlu görüntülerdeki bağlamsal bilgilerini kullanabilmeyi sağlamaktadır. Çalışma sonuçlarında ise 2017 ve 2018'in en iyi tekniklerinden daha iyi bir sonuç elde ettiklerini söylemektedir. Yaptıkları çalışmada ET, WT ve TC alt bölgelerinin DICE skorları hesaplanmıştır. Bunlar sırasıyla 0.813, 0.895 ve 0.823 değerleridir [10].

Sravanthi vd. yaptıkları çalışmada doktorlara beyin tümörlerinin erken tespiti konusunda yardımcı olmayı amaçlamışlardır. Çalışmalarında MR görüntülerinin çeşitli faktörlere bağlı olarak bozunuma uğrayabileceklerini söylemişlerdir. Bu faktörlerin ise gürültü ve diğer çevresel bozucular olduğunu belirtmişlerdir. Yaptıkları çalışmada diğer çalışmalardan farklı olarak görüntüyü gri tonlamaya dönüştürmüşlerdir. Aynı zamanda görüntüyü diğer faktörlerden arındırmak için bazı filtreler uygulamışlardır. Yaptıkları işlemler görüntüyü bir ön-işleme sürecinden geçirerek modelin performansına katkı sağlamıştır. Bu işlemlerden geçen görüntünün kenarları çok net bir şekilde belli olmayabilir bu sebepten ötürü görüntü bölümlenme kullandıklarına ayrıca değinmişlerdir. Son olarak önerilen modeli MATLAB ortamında tasarlayıp uygulamışlardır. Önerilen modelin altyapısı görüntü işleme ve SVM'dir. Yaptıkları çalışmada doğruluk değerini hesaplayarak bu değeri %97 olarak hesap etmişlerdir [11].

Marium vd. yaptıkları çalışmada beyin tümörlerinin beyin işlev bozuklukları gibi bir takım sorunlara yol açabileceğine değinmişlerdir. Beyin tümörlerinin tespiti için günümüzde güncel olarak MRG ve BT taramaları kullanılmaktadır. Son yıllarda bu taramalardan elde edilen görüntüler üzerinde derin öğrenme algoritmaları, görüntü işleme ve bilgisayar görüşü gibi birçok teknik uygulanmıştır. Araştırmacılar çalışmalarında MRG taramalarının, görüntü işleme ve derin öğrenme tekniklerinin karşılaştırmasını ele almışlardır. Kendi sistemlerini dört basit adımda açıklamaktadırlar. Bu adımlar şöyledir: ilk olarak kaliteyi ayarlamak için bir ön-işleme tekniği kullanılmıştır. İkinci olarak görüntü iyileştirme yöntemlerini kullanarak görüntüyü geliştirmişlerdir. Üçüncü olarak kenarları daha belirgin hale getirmek için kenar tespit yöntemi kullanılmıştır. Dördüncü ve son adımda ise morfolojik operatörler ile görüntü katmanlamayı kullanarak tümörün lokasyonu tespit edilmiştir. Bu aşamalar bittikten sonra derin öğrenme teknikleri kullanılarak sonuçların karşılaştırılması yapılmaktadır. Yaptıkları çalışmanın amacını ise kısaca şöyle açıklamışlardır. Derin öğrenme algoritmaları daha iyi sonuçlar üretebileceği ve

beyin tümörünün tespitinde MR görüntülerinde çoklu sınıflandırmaları gerçekleştirebileceğini belirtmişlerdir [12].

Shirin vd. yaptıkları çalışmada beyin tümörünün erken teşhis edilmesine dikkat çekmişlerdir. Beyin tümörlerinin şekilleri, tümörün beyin içindeki sınırları, konsistansı gibi sebepler bu işi manuel olarak yapmanın zorluklarıdır. Kendileri yaptıkları modelde özellik tespiti için bir adet kodlayıcı, katmanlama için ise bir kod çözücü ve sınıflandırma için bir adet çok katmanlı algılayıcı kullanmışlardır. Kullandıkları çok katmanlı algılayıcıyı meningomaları, gliomaları ve balgamsı adenomalar için kullanmışlardır. Çalışmalarındaki çok özellikli derin öğrenme modelinde büyük bir iyileştirme yapıldığından bahsetmişlerdir. Bunu da her tahmin için %97 doğruluk oranı ile yakalamışlardır [13].

Akila ve Batri yaptıkları çalışmada MR görüntülerinden faydalanmışlardır. Beyin tümörlerinin erken tespitinin önemine dikkat çekmiş olup erken önlem alınmadığı zaman sonuçlarının ölümcül olacağına belirtmişlerdir. Çalışmalarında MR görüntülerini derin öğrenme algoritmalarında kullanarak beyin tümörü tespiti konusunda çalışmışlardır. Çalışmalarını üç alt başlıkta incelemişlerdir. Bunlar ön-işleme, katmanlama ve sınıflandırma şeklindedir. Ön-işleme aşamasında veri artırımı yapmışlardır. Sınıflandırma kısmında beyinde tümör olup olmadığı konusuna değinmişlerdir. Katmanlama kısmında ise evrişimli sinir ağlarının sınıflandırma mimarisini kullanıp beyin görüntülerini sınıflandırmışlardır. Veri kümesi olarak BRATS 2015 verilerini kullanmışlardır. Bu veriler toplamda 256 tanedir. Bunlardan 152 tanesi normal tümör geri kalan 104 tanesi ise anormal tümör olarak etiketlidir. Son olarak evrişimli sinir ağları mimarisi kullanmadan önce elde ettikleri F1-skor değeri %95.6 iken evrişimli sinir ağları mimarisi kullanıldıktan sonra bu değer %98.1'e çıkmıştır [14].

Eker ve Duru çalışmalarında hastalık teşhisi için uzmanların yoğunluklarını minimum seviyeye düşürmeye katkıda bulunmak amacıyla makine öğrenmesi algoritmalarından faydalanmışlardır. Araştırmacılar çalışmalarında derin öğrenme yöntemlerinin medikal görüntü işleme alanındaki uygulamalarını incelemişlerdir. Çalışmalarında segmentasyon ve sınıflandırma gibi konulara dikkat çekmişlerdir. Bu incelemelerin yanında ayrıca U-net derin öğrenme mimarisi ile beyin tümörü segmentasyonu gerçekleştirilmiştir. Veri seti olarak BraTS 2020 kullanmışlardır. Bu veriler üzerinde gerekli gerçeklemeleri yapıp sonuç olarak %86

DICE benzerlik oranı ve %80 hassasiyet değeri elde etmişlerdir [15].

Nadim Mahmud vd. yaptıkları çalışmada beyin tümörünün erken teşhisine dikkat çekmişlerdir. Bu amaçla yaptıkları çalışmayı iki kısma ayırmış olup ilk kısımda beyin tümörü tespiti ikinci kısmında ise derin öğrenmeyi kullanarak MR görüntülerini sınıflandırmışlardır. Kullandıkları YOLO (You Only Look Once) ve derin öğrenme kütüphanesi olan FastAi mimarisinden faydalanmışlardır. Çalışmalarında kullandıkları veri kümesi BRATS 2018 verileri olmakla beraber bu verilerin içinde 1992 adet beyin MRG taraması bulunmaktadır. Çalışmada toplam 1992 taranmış MR görüntüsü kullanılmıştır. Modellerini eğitmek amacıyla 1494 (toplam verilerinin %75'i) görüntü kullanılmış olup geri kalan 498 (toplam verilerin %25'i) görüntü ise modeli test etmek için kullanılmıştır. Son olarak kullandıkları FastAi ve YOLO modellerini karşılaştırmak amacıyla yaptıkları deneylerde FastAi için %95.78 YOLO için ise %85.95 doğruluk oranına ulaşılmıştır. Buna ek olarak FastAi için %96.17 F1-skor değerini YOLO için ise %88.30 F1-skor değerini elde etmişlerdir [16].

Jemimma ve Jacob farklı bir yaklaşım kullanarak çalışmalarını Watershed (Su-bölümleme) algoritmasıyla yapmışlardır. Yaptıkları çalışma temelinde beyin tümörü tespiti ve sınıflandırması üzerinedir. Çalışmalarının temeli Watershed Dynamic Angle Projection - Convolution Neural Network (WDAPP-CNN) üzerine kurmuşlardır. Kendileri Watershed algoritmasının tümörlü bölgeyi yüksek doğruluk oranı ile segmente ettiğini bu yüzden Watershed kullandıklarını söylemişlerdir. Segmentasyonda iki temel yaklaşım vardır. Bunlar sınır yaklaşımı ve bölgesel yaklaşımdır. Watershed ise bu iki yaklaşımın kombinasyonu şeklinde işler. Çalışmalarında Watershed tercih etmelerinin sebebinin bu olduğunu söylemişlerdir. Watershed algoritması ile segmentasyon kısmını kullanıp diğer kısımda ise Dynamic Angle Projection Pattern (Dinamik Açık Projeksiyon Deseni) yapısını kullanmışlardır. Son kısımda ise evrişimli sinir ağlarını kullanarak sınıflandırma aşamasına geçilmiştir. Kullandıkları veriler BRATS verileri olmakla beraber 30 adet hastanın görüntüsü olduğunu söylemişlerdir. Çalışmalarının sonunda başka çalışmalardaki metodlar ile kendi metodlarını kıyaslamışlardır. Kullanılan metodlar arasında DWT-SGLDM, LRACM, MAP-MRF, LaV gibi teknikler bulunup önerilen WSA-DAPP ile %93.5 DICE Score ve %94.2 gibi bir hassaslık değeri elde etmişlerdir. Kendilerine en yakın metod LaV metodudur. LaV

metodunda ise %91.27 DICE skor ve %92.08 hassaslık değeri elde edilmiştir [17].

Periasamy vd. yaptıkları çalışmada VGG-19 modeli ile RESNET-50 modelinin karşılaştırmasını yapmışlardır. Çalışmalarının başında birinci derece beyin tümörüne rastlanan hastaların yaşama oranının %75.2 olduğunu belirtmişlerdir. Bu bağlamda beyin tümörünün erken teşhisinin insan hayatında kritik bir rol oynadığını söylemişlerdir. Geleneksel prosedürlerin hem yavaş olduğuna hem de insan hatasına açık olduğunu vurgulamışlardır. Bu tür zorlukların minimum düzeye indirilmesinde bilgisayar destekli teşhis yöntemlerinin kaçınılmaz olduğuna da ayrıca değinmişlerdir. Çalışmalarında VGG19 ve ResNet50 modelini aynı veri kümeleri üzerinde kullanarak iki modelin karşılaştırmalarını yapmışlardır. Modellerin temelinde görüntü kırpma, tekrar boyutlandırma, veri artırımı, model yapımı ve çıktılarının alınıp sınıflandırılması yer almaktadır. Kullandıkları veri kümesini Kaggle'dan almışlardır. Bu veri kümesinde 253 MR görüntüsü olup bunların 98'i beyin tümörü içermezken 155 tanesi ise tümörlü MR görüntüsüdür. Çalışmanın sonunda elde edilen sonuçlar şöyledir: VGG19 modelinin eğitim verileri için alınan kesinlik, hatırlama, F1-skor ve doğruluk değerleri %94.28, %100, %97.05 ve %96.93 test verileri için değerler ise kesinlik, hatırlama, F1-skor ve doğruluk olmak üzere %96.0, %96.0, %96.0 ve %97.05'tir. ResNet-50'nin eğitim verilerinden alınan değerler sırasıyla kesinlik, hatırlama, F1-skor ve doğruluk olmak üzere %97.05, %100, %98.50, %98.46 test verilerinde ise değerler %100, %96.0, %97.95 ve %97.91 şeklinde raporlanmaktadır [18].

Tapesh Kumar vd. evrişimli sinir ağlarını kullanarak beyin tümörü tespiti adına bir çalışma yapmışlardır. Beyinin içinde milyarlarca nöron olduğunu ve beyinin içinde oluşan bir tümörün insan vücuduna etkisinin büyük olabileceğinden bahsetmişlerdir. Bu bağlamda erişime açık veri kümelerinin olduğu çeşitli veri kümesini birleştirerek örnek sayılarının artırılması hedeflenmiştir. Bu veri kümelerinin içinde farklı renkte görüntüler olduğundan bu görüntüleri griye çevirmek için GaussianBlur filtresini kullandıklarını vurgulamışlardır. Kullanılan veri kümelerinden biri BR35H:Brain Tumor Detection 2020'dir. Bu veri kümesinde 1500 sağlıklı 1500 tümörlü görüntü olmak üzere 3000 görüntü bulunmaktadır. Diğer kullanılan veri kümesi ise Github üzerinden sağlanmıştır. Bu veri kümesinde ise 1019 sağlıklı 1308 adet ise tümörlü görüntü vardır. Bu bağlamda toplam 5327 beyin görüntüsü üzerinde modelleri eğitim ve test için kullanmışlardır. Toplam verinin %80'i kadarını

modellerini eğitmek için %20'lik kısmını ise test için ayrılmıştır. Bunlara ek olarak çalışmalarında ROC Eğrisi, Karışıklık Matrisi ve Doğruluk Eğrisi gibi farklı veri görselleştirme teknikleri ile modelin başarımları değerlendirilmiştir. Modellerindeki kullandıkları katmanlar ise Dense, Max Pooling, Batch normalizasyon ve evrişim katmanlarıdır. Kullandıkları modelin eğitim aşamasındaki doğruluğu %99.59 doğrulama aşamasındaki doğruluğu %98.36 ve test aşamasındaki doğruluğu %99.15'dir [19].

Meena ve Shantha'nın yaptıkları çalışmanın amacı seçtikleri modelleri kullanarak beyin tümörü tespit etmektir. Analiz kısmına geldiklerinde ise temel olarak kullandıkları üç aktarım öğrenmesi kullanan modelden bahsetmişlerdir. Bunlar sırasıyla VGG16, ResNet ve Inception modelleridir. Modellerinde evrişimli sinir ağlarını kullanmış olup ileri besleme ve geri besleme kullandıklarını belirtmişlerdir. Bu şekilde modellerinin ağırlık değerlerini bulmuşlardır. Ellerindeki bu modelleri ImageNet veri kümesi üzerinden alıp eğittiklerini belirtmişlerdir. Eğitim için kullanılan veri kümesi 102 adet tümörsüz görüntü ve 118 adet tümörlü görüntüden oluşmaktadır. Veri kümesinin test aşamasında ise 40 tümörsüz görüntü ve 44 adet tümörlü görüntü bulunmaktadır. Ellerindeki bu görüntülerin boyutları ise 256×256 şeklindedir. En optimum veri kümesini yakalayabilmek için veri artırımı yöntemini kullanmışlardır. Bu yöntemler farklı dallara ayrılmış döndürme, çarpıklık, çevirme ve kesme şeklindedir. Çalışmada döndürme kullanılmış olup bu döndürmeyi 10 ve 20 derece açılarında yapmışlardır. Sonuçlara bakıldığında veri artırımı tekniği kullandıklarında aldıkları doğruluk değerleri hepsinde %100 iken kullanmadıklarında ise sırasıyla %92.9, %97.6 ve %97.6 değerlerdir [20].

Nidaan vd. çalışmalarında beyin tümörü sınıflandırmasında Alexnet mimarisi kullanmışlardır. Beyin tümörü tespitinde erken tespit ne kadar kritik olduğuna ayrıca değinmişlerdir. Veri kümeleri 3264 adet halka açık görüntü olduğunu ve bu görüntüleri Kaggle üzerinden aldıklarını belirtmişlerdir. Veri kümelerini 2870 adedini eğitim 394 adedini ise modelin testi için kullanmışlardır. Ellerindeki verilere ön-işlem uygulamışlardır. İlk aşamada 512 piksellik görüntüleri yeniden boyutlandırarak 224 piksele çevirmişlerdir. Ardından ölçeklendirme yaparak ölçeğini 1/255'e getirmişlerdir. Son olarak ise Grayscale tekniğini kullanarak ellerindeki görselleri gri renge dönüştürmüşlerdir. Kullandıkları bu modellerde optimize edici olarak ADAM, SGD, NADAM, RMSPROP ve ADAMAX

kullandıklarını belirtmişlerdir. Her kullandıkları optimize edici için doğruluk, kesinlik, hatırlama ve F1-skor değerlerini hesaplamışlardır. Bu değerlerin modellerden çıktısı sonucunda hepsinde en yüksek değerleri ADAMAX optimizasyon fonksiyonu verirken en düşük değerler ise NADAM optimizasyon fonksiyonundan elde edilmiştir. Aynı zamanda çalışmalarında modellerin öğrenme katsayısını değiştirmişlerdir. Sırasıyla 0.1, 0.01, 0.001, 0.0001 değerlerini kullanmışlardır. Bunların arasında en yüksek sınıflandırma başarımları öğrenme katsayısı 0.001 değeri olduğunda elde edilmiştir [21].

Manoj Kumar vd. yaptıkları çalışmada YOLOv5x modelini kullanarak beyin tümörü tespiti ve sınıflandırması yapmışlardır. Bu yola çıkış amacı olarak beyin tümörü tespitinde erken teşhis ve sınıflandırmanın medikal alanda çok büyük rol oynadığını ve tespit edilen tümöre göre teşhisin konulup buna göre yol haritasının çizilmesinin çok önemli olduğunu söylemektedirler. Geleneksel yöntemlerin çok zaman kaybettirdiğini ve efor istediğini de ayrıca vurgulamışlardır. Çalışmalarında YOLOv5x modeli ile bu zaman ve eforu en düşük düzeye indirip beyin tümörü tespitini yapmayı planlamışlardır. Kullandıkları veri setini Brats ve Roboflow'dan aldıklarını ayrıca yaklaşık 5000 adet görüntü üzerinde çalıştıklarını söylemişlerdir. Bu verileri farklı boyutlarda ve renklerde olmasından ötürü ikinci aşama olarak verilerini ön-işleme sürecine sokarak modelin girdisine uygun hale getirmişlerdir. Kullandıkları YOLOv5x modelinin ağırlıklarının önceden eğitilip kendi verilerine en uygun şekilde olduğunu belirtmişlerdir. Performans ölçütleri olarak ise hatırlama, ortalama hassasiyet (mAP), doğruluk ve F1-skor ölçütlerini kullanmışlardır. Çalışmalarının son kısmında ise aldıkları sonuçlar tartışılmıştır. Elde edilen performans ölçüt değerleri şu şekildedir: ortalama hassasiyet değeri: %89.3, hatırlama değeri: %93, F1-skor değeri: %87 ve kesinlik değeri: %90.8. Araştırmacılar YOLOv5x modelinin gerekli girdi koşulları uygulandığında güvenilir ve iyi çalıştığını vurgulamaktadırlar [22].

Çınarer ve Emiroğlu çalışmalarında beyin tümörü tespitinde makine öğrenmesi algoritmalarını kullanmaktadırlar. Kendileri, beyin tümörlerinin kansere bağlı ölüm sebeplerinden en önemlisi olduğunu vurgulamışlardır. Bu yolda erken teşhisin anahtar bir rol oynadığını söylemişlerdir. Makine öğrenmesi ve sınıflandırma algoritması kullanmanın en temel amacı daha doğru kararları yüksek doğruluk oranı ile vermesi olarak belirtmişlerdir. Çalışmalarında sınıflandırma metotlarının performansı üzerinde

yoğunlaşmışlardır. Bu alanda da fazlaca bilinen ve kendilerinin de kullandığı algoritmalar şunlardır: K En Yakın Komşu (KNN), Rastgele Orman, Destek Vektör Makinesi ve Doğrusal Ayırma Algoritması. Çalışmalarında REMBRANDT veri seti kullanılmıştır. Bu veri kümesinde 99 hastanın MR görüntüleri bulunmaktadır. Her hasta için ise 30'a yakın MR görüntüsü olduğu belirtilmiştir. Her bir algoritma için farklı sınıflandırma sonuçları bulunmuştur. Doğruluk metriğine göre KNN algoritması 0,87 değerini, SVM algoritması 0,90 değerini, LDA algoritması 0,83 değerini ve RF algoritması 0,83 değerini vermiştir. Bunların yanında kullandıkları diğer performans ölçütleri ise kesinlik, hassasiyet ve F1-skor metrikleridir. Kesinlik ölçütü için SVM algoritması diğerlerine 3-4 puanlık bir fark atmış olup %90 değerine ulaşmıştır. Hassasiyet için de benzer sonuçlar elde edilmiştir. SVM algoritması bu ölçütte de %90 değerini yakalamıştır. Son olarak F1-skor ölçütünü iki alanda ele almışlardır. Eğitim sonuçlarına göre KNN: %83, SVM: %83, LDA: %90 ve RF: %83 şeklindedir. Test sonuçları ise KNN: %90, SVM: %90, LDA: %83 ve RF: %90 şeklindedir. Toplam dört algoritma arasından maksimum doğruluk değerini yakalayan algoritma SVM algoritmasıdır. Sınıflandırma çalışmalarında SVM algoritması en yüksek hassasiyet değerini ve doğruluk değerini yakalamıştır. Bu bağlamda diğer algoritmalarından çok daha etkin bir algoritma olduğunu vurgulamışlardır [23].

Aslan çalışmasında beyin tümörü tespiti için MobilNetV2 modelini kullanarak beyin tümörü tespiti yapmayı amaçlamıştır. MobilNetV2 modelinde farklı olarak KNN algoritmasını kullanmıştır. Aslan çalışmasından elde ettiği sonuçları birçok araştırmada kullanılan model ve yöntem ile kıyaslamıştır. Bu yöntemlere bölütleme algoritmaları, Markov rastgele alan, Ayrık Dalgacık Dönüşümü, CapsNet, Destek Vektör Makinesi, Çok Katmanlı Algılayıcılar, Lojistik Regresyon, Alexnet, VGG örnek olarak verilebilir. Çalışmanın temelinde kullanılan üç ana bölüm vardır. Bunlar veri artırma, derin öznitelik çıkarımı ve sınıflandırma adımlarıdır. İlk aşamada veri kümesinde bulunan 253 MR görüntüsü veri artırma ile 1265 örnek görüntüye çıkartılmıştır. Daha sonra bu görüntüleri MobileNetV2 modelinin girişine uygun olarak 224x224x3 şeklinde boyutlandırmıştır. Öznitelik çıkarımı kısmında ise model çalıştırılıp "Logits" tam bağlı katmanından 1000 derin öznitelik bulunmuştur. Son aşamada KNN algoritması kullanılmıştır ve 1000 öznitelik KNN' girdi olarak verilmiştir. 253 MR görüntüsünden 155 adedi tümürlü iken 98 adedi ise tümürsüz görüntüdür. Çalışmada doğruluk,

duyarlılık, özgüllük, keskinlik, F1-Skor ve Matthews Korelasyon Katsayısı (MCC) metrikleri ile sınıflandırma başarımları değerlendirilmiştir. Bu ölçütlere bağlı olarak orijinal ve çoğaltılmış veri setleri üzerinde karşılaştırmalar yapılmıştır. Orijinal veri seti üzerinde doğruluk metriğine göre KNN olmadan %86.56 başarımlar elde edilirken KNN ile birlikte %89.72 başarımlar elde edilmiştir. Duyarlılık metriğine göre KNN algoritması olmadan %86.73 KNN algoritması ile birlikte %88.78 başarımlar elde edilmiştir. Diğer metriklerden elde edilen sonuçlar incelendiğinde de KNN modeli kullanmanın sınıflandırma başarımına olumlu yönde etki ettiği gözlemlenmektedir. Verilerin çoğaltılmasından sonraki durumda ise bütün değerlerde bir artış olduğunu ayrıca belirtilmektedir. Sonuç olarak araştırmacının yaptığı bu çalışmada kullanılan veri artırma ve KNN algoritmasının modelin performans değerlerinde iyileştirme olduğunu göstermektedir [24].

1.2. Motivasyon ve Katkı (Motivation and Contribution)

Geleneksel yöntemler beyin tümörü tespitinde zaman ve verimlilik kaybına neden olmaktadır. Önerilen beyin tümörü tespit sistemi ile hastalık teşhisinde oluşan zaman ve verimlilik kaybının önüne geçilmesi hedeflenmektedir. Ayrıca başarılı derin öğrenme modelleri sayesinde beyin tümörlerinin doğru ve hızlı bir şekilde tespit edilmesi ana motivasyonumuzdur. Bu doğrultuda aktarım öğrenmesi modellerini kullanarak beyin tümörü tespiti sisteminin başarımı nasıl olur sorusuna cevap verilecektir. Çalışmanın ana katkıları şöyle özetlenebilir:

- MobileNet, VGG19, DenseNet169, AlexNet, ResNet101 ve InceptionV3 aktarım öğrenme modelleri dengeli bir veri kümesi üzerinde çalıştırılarak başarımları değerlendirilmiştir.
- MobileNet F1-Skor metriğine göre %98.67 başarımlar ile en başarılı model olmaktadır. VGG19 ve DenseNet169 ise MobileNet'den sonra en başarılı modellerdir. Bu modellerin başarımları ise sırasıyla %97.89 ve %97.59 olmaktadır.
- Kütüphanenin sağladığı layers.concatenate modülü kullanılarak en başarılı 3 model olan ağlar ikili bir şekilde birleştirilerek hibrit ağ modelleri oluşturulmuştur. Bu ağ modellerinden en başarılı olanı VGG19-DenseNet169 birleşimidir. Bu hibrit model F1-Skor metriğine göre %99.22 başarımlar vererek sınıflandırma performansı iyileştirilmiştir.
- Aktarım öğrenmeleri tek başına kullanıldığında elde edilen en düşük başarımlar F1-Skor metriğine

göre %96.44 olurken hibrit modellerden elde edilen en düşük başarımları F1-Skor metriğine göre %98.67 olmaktadır. Bu durumda %2'den fazla sınıflandırma başarımında iyileştirme sağlanmaktadır. Hibrit modellerden elde edilen en yüksek başarımları göz önünde bulundurulduğunda ise %3'e yakın sınıflandırma başarımında iyileştirme yapılmıştır.

1.3. Organizasyon (Organization)

Çalışmanın geri kalan kısımları şu şekildedir: Bölüm 2'de, çalışmanın altyapısının oluşturulmasında kullanılan programlama diline, kitaplıklara ve veri kümesine değinilecektir. Bölüm 3'te, derin öğrenme tabanlı beyin tümörü tespit sisteminin mimarisi ve bu mimariye ait detaylar verilecektir. Bölüm 4'te yöntemlerden elde edilen sonuçlar verilerek yorumlanacaktır. Bölüm 5'te ise genel değerlendirme yapıp gelecek çalışmalar hakkında bilgi verilecektir.

2. DENEYSEL AYARLAMALAR (EXPERIMENTAL SETTINGS)

Bu bölümde beyin tümörü tespit sisteminin altyapısında kullanılan bileşenler tanıtılacaktır. Bu bölüm 3 alt bölümden oluşmaktadır. İlk alt bölümde kullanılan programlama dili ve bu dile ait yararlanılan kitaplıklara değinilecektir. İkinci alt bölümde ise çalışma kapsamında kullanılan veri kümesi tanıtılacaktır. Son olarak üçüncü alt bölümde ise sınıflandırma başarımının ölçülmesinde kullanılan metriklere yer verilecektir.

2.1. Kullanılan Programlama Dili ve Kitaplıklar (Programming Language and Libraries Used)

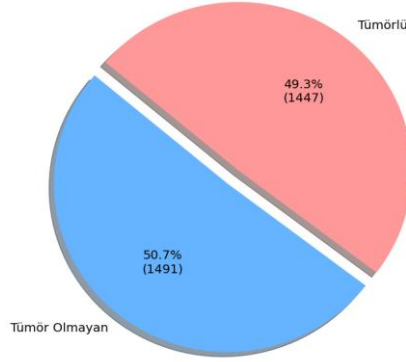
Yapılan çalışmanın gerçekleştirildiği ortam olan Google Colab genellikle makine öğrenimi, derin öğrenme ve veri analizi gibi hesaplama yoğunluklu alanlar için kullanılmaktadır. Kullanıcıların Python kodlarını bulut ortamında yazıp çalışmalarına imkân sunan ücretsiz bir platformdur [25]. Genel amaçlı ve yüksek seviyeli bir programlama dili olan Python, Guido van Rossum tarafından 1991 yılında geliştirilmiştir. Nesne yönelimli, etkileşimli ve modüler özelliklere sahip olmasıyla birlikte okunabilir ve yazılabilir sözdizimine sahiptir [26].

Çalışmada kullanılan Python kütüphaneleri ise şunlardır:

- Keras: Keras kütüphanesi derin öğrenme modeli oluşturmak, eğitmek ve değerlendirmek için kullanılan bir kütüphanedir. Kullanımı kolay olan Keras, karmaşık derin öğrenme modellerini birkaç kısa kod bloğuyla oluşturmayı ve eğitmeyi mümkün hale getirir. Keras hızlı model geliştirme ve araştırma amacıyla geliştirilmiştir. Çeşitli katmanlar, optimizasyon yöntemleri, aktivasyon fonksiyonları gibi özellikler sunarak, kullanıcılara esnek ve özelleştirilebilir modeller geliştirebilecekleri bir fırsat sunar [27].
- OpenCV: Bu kütüphane bilgisayarlı görü ve görüntü işleme için çokça kullanılan bir kütüphanedir. Temelinde görüntü işleme, dönüşümler ve işlemler yapmak için kullanılır. Bu kütüphanenin yapabildiği başlıca işlemlerden bahsetmek gerekirse kullanılan görüntüye gri tonlama uygulama, gürültü temizleme ve görüntü kırpması gibi görüntü işleme için belli fonksiyonları vardır [28].
- PyTorch: PyTorch, derin öğrenme uygulamalarında sıkça kullanılan Python dilinin bir kütüphanesidir. Temeli tensorlara dayanan PyTorch'un öne çıkan birkaç özelliği otomatik fark alma ve dinamik hesaplama grafiğidir. Bunlar model geliştiren yazılımcılar için oldukça elverişlidir. PyTorch birçok kullanıcı tarafından kullanılması sayesinde bu kütüphanede araştırma yapanlar derin öğrenme modelleri ve optimizasyon gibi stratejileri rahatlıkla kullanabilirler. Kütüphanenin bize sunduğu esneklik ve kolaylık çalışmada analiz ve işleme açısından gözle görülür bir kolaylık sağlamıştır [29].

2.2. Kullanılan Veri Kümesi (Dataset Used)

Çalışma kapsamında kullanılan veri seti Kaggle'dan alınmıştır [30]. Bu veri seti üzerinde 2938 tane beyin MR görüntüsü bulunmaktadır. Bunların 1491 tanesi tümör olmayan beyin görüntüsü ve 1447 tanesi de tümörlü beyin görüntüsüdür. Veri setindeki görüntülerin dağılım grafiği Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. Veri Kümesindeki Sınıf Dağılımları (Class Distributions in the Dataset)

Çalışmada kullanılan toplam veri setinin %70'i eğitim %30'u test için kullanılmıştır. Veriler karıştırılarak bölünmektedir. Tüm modellerde aynı bölümlenmeyi yapmak için rastgele durum parametresi tüm modeller için "0" olarak seçilmiştir. Modellerin daha verimli eğitilmesi için veri setindeki görüntüler 240 x 240 piksel formatından yeniden boyutlandırılarak 128 x 128 piksel formatına getirilmiştir. Veri setinde bulunan rastgele seçilmiş tümörlü ve tümör olmayan MR görüntüleri Şekil 2'de gösterilmiştir.

2.3. Başarım Değerlendirme (Performance Evaluation)

Çalışmada dört farklı performans ölçütü kullanılmıştır. Bunlar sırasıyla doğruluk (accuracy), kesinlik (precision), hatırlama (recall) ve F1-Skor ölçütleridir. Ölçütlerin matematiksel gösterimi Eşitlik 1, 2, 3 ve 4'te sırasıyla verilmiştir [31, 32]. Bu ölçütleri hesaplamak için modelin tahminlerinin

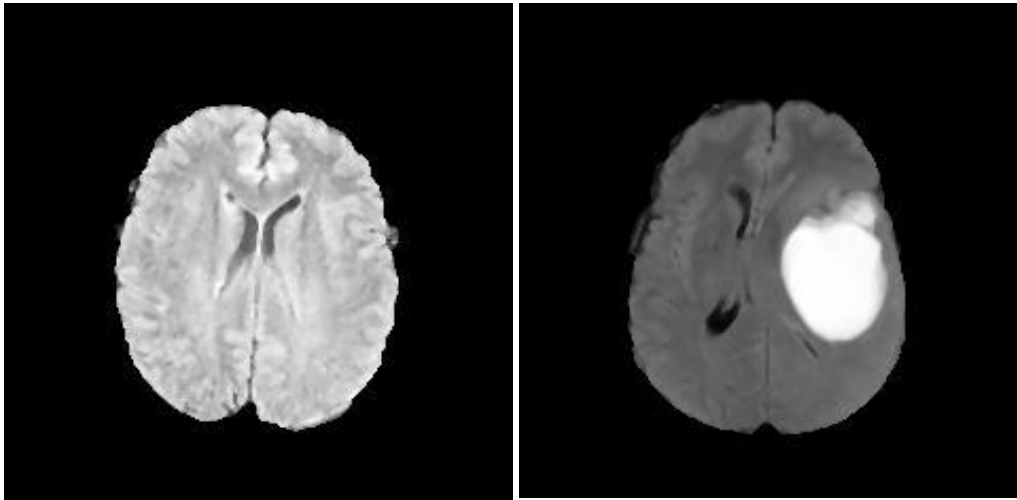
sonuçlarını içeren karmaşıklık matrisindeki değerler kullanılır. Bunlar sırasıyla doğru pozitif (TP), doğru negatif (TN), yanlış pozitif (FP), yanlış negatif (FN) değerleridir. Verinin gerçek değeri pozitif ve modelin verdiği etiket de pozitif ise bu doğru pozitifdir. Verinin gerçek değeri pozitif ve modelin verdiği etiket negatif ise bu doğru negatifdir. Verinin gerçek değeri negatif ve modelin verdiği etiket pozitif ise bu yanlış pozitifdir. Verinin gerçek değeri negatif ve modelin verdiği etiket de negatif ise bu yanlış negatifdir.

$$\text{Doğruluk} = \left(\frac{TP+TN}{FP+FN+TP+TN} \right) \times 100 \quad (1)$$

$$\text{Kesinlik (Precision)} = \left(\frac{TP}{TP+FP} \right) \times 100 \quad (2)$$

$$\text{Hatırlama (Recall)} = \left(\frac{TP}{TP+FN} \right) \times 100 \quad (3)$$

$$\text{F1 Skor} = 2 \times \left(\frac{\text{Kesinlik} \times \text{Hatırlama}}{\text{Kesinlik} + \text{Hatırlama}} \right) \times 100 \quad (4)$$

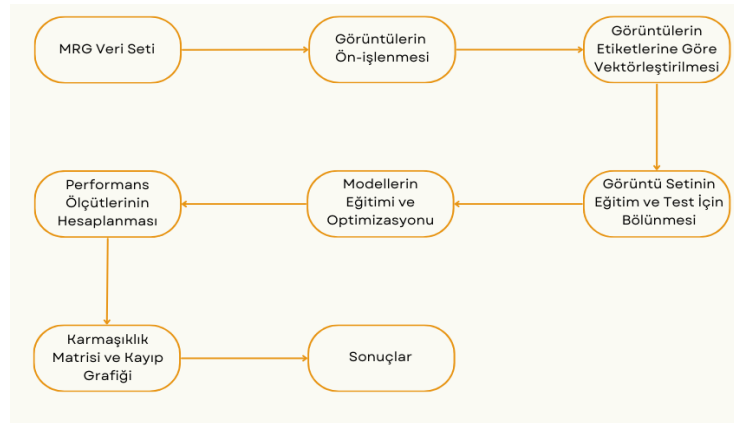


Şekil 2. Kullanılan Veri Setinden Rastgele Seçilmiş Beyin MR Görüntüleri (Randomly Selected Brain MRI Images from the Data Set Used)

3. YÖNTEM (METHODOLOGY)

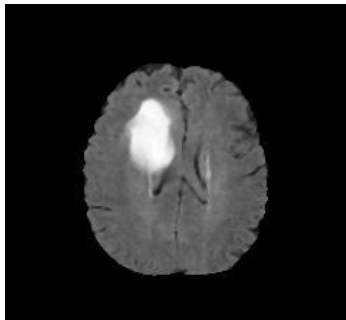
Yapılan çalışmanın genel işleyişi Şekil 3'te verilmiştir. İlk olarak tümör içeren ve tümör içermeyen MR görüntüleri bulunan veri seti kullanıma hazır hale getirilmelidir. Ardından bu görüntüler bir takım ön işlemlerden geçirilir. Bu ön işlemler gri tonlama, eşikleme (thresholding), kontur bulma, en büyük konturu seçme, sınırlayıcı kutu oluşturma ve son olarak görüntüyü kırpma adımlarından oluşmaktadır. Gri tonlama işleminde renkler kaldırılır ve gri tona çevirerek sadece parlaklık bilgileri bırakılır. Eşikleme işleminde ise

elde edilen görüntü cv2.threshold fonksiyonu kullanılarak ikili görüntüye çevrilir. Bu yöntemdeki asıl amaç belli bir değer belirleyip bu değer üstünde kalan pikselleri beyaza(255), altında kalanları ise siyaha(0) çevirmektir. Bu işlem beyin yapısını arka plandan ayırtmaya yarar. Kontur bulma yönteminde ise cv2.findContours fonksiyonu kullanılarak, eşikleme yönteminden elde edilen ikili görüntülerde beyaz piksellerin sınırları belirlenir ve bu sınırların yapısı çıkarılır. En büyük konturu seçmek bu yöntemde çok önemlidir. Bunun sebebi ise tüm beyinin yapısını temsil etmesidir. Sınırlayıcı

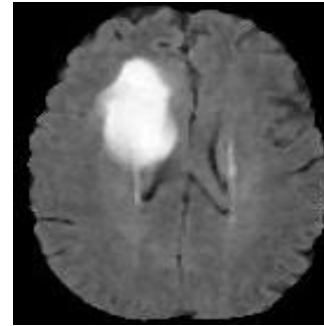


Şekil 3. Sistemin Genel Mimarisi (General Architecture of the System)

kutu oluşturulması bölümünde önceki aşamalarda seçilen konturun etrafına dikdörtgen bir kutu çizilir. Bu çizilen kutu konturu çevreleyen en küçük dikdörtgendir. Son aşama olan görüntü kırpmada ise dilimleme yöntemi ile oluşturulan sınırlayıcı kutu kırılarak ilgili nesne ortaya çıkartılır. Böylece görüntü artık derin öğrenme modellerinin kullanımına hazır hale getirilmiş olacaktır. Şekil 4'te ve Şekil 5'te bu aşamaların görüntüye uygulanmadan önceki hali ve sonraki hali gösterilmiştir.



Şekil 4. Rastgele Seçilmiş Bir Beyin MR Görüntüsünün Ön-İşleme Aşamasından Öncesi (Before the Pre-Processing Stage of a Randomly Selected Brain MRI Image)



Şekil 5. Rastgele Seçilmiş Bir Beyin MR Görüntüsünün Ön-İşleme Aşamasından Sonrası (After the Pre-Processing Stage of a Randomly Selected Brain MRI Image)

Veri setinde bulunan görüntüler tümör bulunanlar için evet (yes) bulunmayanlar için ise hayır (no) şeklinde ikiye ayrılır. Veri ve etiketlerin doğru olup olmadığı kontrol edilir. OneHotEncoder işlemine tabi tutularak veriler sayısal bir formatla kategorilere ayrılır. Ardından her kategori ikili (0 ve 1) rakamları bulunduran bir vektöre dönüştürülür. Veri setindeki veriler ve oluşturulan etiketler kullanılan fonksiyon ile belirli oranda karıştırılarak ayrılır. Fonksiyon dört çıktı üretir. Bunlar eğitim aşamasında kullanılacak veri özellikleri olan

"x_train", test aşamasında kullanılacak veri özellikleri olan "x_test", eğitim aşamasında kullanılacak etiketler olan "y_train" ve test aşamasında kullanılacak etiketler olan "y_test" çıktılarıdır. Bu işlemin ardından kullanılan modelin "x_train" ve "y_train" ile eğitimi sağlanır. "x_test" ve "y_test" ile performansı değerlendirilir. Ardından veri özelliklerini içeren çıktılar normalize edilerek modelin performansı artırılır bu sayede daha hızlı ve daha doğru bir öğrenim hedeflenmiş olur. Son olarak veri artırma (data augmentation) işlemi uygulanır. Bu işlem veri setindeki eğitim için kullanılan görüntüleri çeşitlendirerek farklı varyasyonları oluşturur. Bu sayede modelin eğitim sırasında genelleme yapma ve farklı şekildeki görüntüleri tanıması sağlanır. Çalışmada kullanılan ImageDataGenerator sınıfı, görüntüler üzerinde dönüşümler uygulayarak veri artırımı yapar. Bunu yaparken bir takım parametreler kullanır. Bu parametreler ise sırasıyla şu şekildedir;

- rotation_range: Bu parametre sıfır ile girilen sayı arasından rastgele seçilen sayının derecesi kadar görüntüyü döndürür.
- width_shift_range: Görüntü genişliğini sıfır ile girilen sayının arasından rastgele seçilen sayının yüzdelik değeri kadar yatay kaydırma yapar.
- height_shift_range: Görüntü yüksekliğini sıfır ile girilen sayının arasından rastgele seçilen sayının yüzdelik değeri kadar dikey kaydırma yapar.
- shear_range: Sıfır ile girilen sayının arasından rastgele seçilen sayının derecesi kadar makaslama işlemi yapar.
- zoom_range: Sıfır ile girilen sayının arasından rastgele seçilen sayının yüzdelik değeri kadar yakınlaştırma ve uzaklaştırma işlemi yapar.
- horizontal_flip: Girilen değer doğrultusunda (True, False) görüntüyü yatay olarak çevirir.
- fill_mode: Girilen değer doğrultusunda boş kalan pikselleri doldurur.

Elde edilen toplam görüntü sayısından bahsedilecek olursak kullanılan Keras kütüphanesinin "ImageDataGenerator" sınıfı her bir görüntüye dönüşüm işlemleri uygularken "augmented_data_count" değişkenini kullanır. Bu değişken belirlenen sayı kadar veri sayısını katlayarak istenen dönüşümleri uygular.

Uygulamanın temel noktası, kullanılan modellerin önceden eğitilmiş olmasıdır. Buna aktarım öğrenmesi (transfer learning) denir. Bu modellerle özelleştirilmiş katmanlar eklenerek kullanılan veri

setine daha uygun hale getirilir. Eklenen özelleştirilmiş katmanlardan bahsedecek olursak;

- layers.GlobalAveragePooling2D()(x): Bu katman global ortalama havuzlama ile çıktı boyutunda bir küçülme sağlar. Yapılan bu küçültme ile bilgi kaybını minimize etmek amaçlanır. Aynı zamanda tam bağlı katmanlar için daha uygun bir çıktı boyutu elde edilir.
- layers.Dense()(x): Bu kod ile yeni bir tam bağlı katman eklenir. Bu katmanın içine yazılan değerlere göre işlevi değişir. Yazılan ilk sayı değeri ile katmanın kaç nörona oluşacağı belirlenir. Aynı şekilde kullanılan aktivasyon fonksiyon ve regularizasyon tekniği ile birlikte katmanın hangi fonksiyonları ve teknikleri kullanacağı belirlenir. Örneğin aktivasyon fonksiyonu ile negatif ve pozitif girişler düzenlenirken regularizasyon tekniği ile aşırı uyum(overfitting) durumu engellenir.
- layers.Dropout()(x): Bu katman eğitim sırasında rastgele olarak belirlenen bir takım nöronları devre dışı bırakır. Bu işlemin yapılmasının sebebi modelin aşırı uyum durumunu engellemek içindir. Bu teknik ile modelin nöronlara çok fazla bağımlı olması engellenerek daha genel bir öğrenme sağlanır. Çalışmada kullanılan bu katmanlar ile modelin aşırı uyum sağlamasının önüne geçilir. Kullanılan aktivasyon fonksiyonları ile modelin çalışmasındaki doğruluğun artması amaçlanır.

Modelin katmanlarının sonuna ilave edilen bu katmanlar ile modelin aşırı uyum sağlamasının önüne geçilir. Kullanılan aktivasyon fonksiyonları ile modelin çalışmasındaki doğruluğun artması amaçlanır. Özelleştirilmiş katmanların hemen öncesinde dondurma işlemi (freezing) uygulanır. Bu işlemde modelin tüm katmanları dondurulur. Ancak belirli katmanları dondurulduktan sonra serbest bırakılarak yeniden eğitimi yapılır. Detaylandırmak gerekirse tüm katmanları donduran "for layer in basemodel.layers: layer.trainable = False" kodu ile katmanlar sırayla gezilerek eğitilemez olduğu belirtilir ve eğitim sırasında bu katmanların güncellenmemesine sebep olur. Sonrasında eğitilmesi istenen kadar katmanı çözmek için "for layer in base_model.layers[-20:]: layer.trainable = True" kodundan yararlanılır. Bu kod sondan yirmi katmanı sırayla dolaşarak katmanların tekrar eğitilebilir olduğunu belirtir ve eğitim sırasında güncellenmesini sağlar. Modelden modele eğitilmesi istenen katman sayısı değişiklik gösterebilir. Bu durumda parantez içindeki yirmi sayısını istenen sayı doğrultusunda değiştirmek

yeterli olacaktır. Bu işlemler sonucu modelin aktarım öğrenmesi ile önceden öğrendiği bilgilerden faydalanılır. Dondurulmayan katmanlar yeniden eğitilerek kullanılan veri setine ve özelliklerine daha uyumlu hale gelir. Sonuç olarak modelin eğitim süresi ve ezberleme riski en aza indirilir. Modelin eğitim aşamasında kullanılan iki metot vardır. İlki öğrenme oranı azaltıcıdır. Bu metot modelin mevcut öğrenme katsayısını ayarlayarak daha performanslı bir eğitim sağlar. İkincisi ise erken durdurma metodudur. Bu metot modelin eğitimi sırasında seçilen parametrenin eğitim süresi boyunca takip edilmesini ve belirlenen devir (epoch) içerisinde gelişim göstermediği takdirde eğitimin durdurulmasını sağlar. Ek olarak kullanılan bu modeller birbirleriyle ilişkilendirilebilir. Bunun sonucunda ortaya çıkan modele hibrit model denir. Hibrit modellerin dikkate değer birçok faydası bulunmaktadır. Bunlar, çoklu özellik çıkarma, genelleştirilmiş öğrenme, ölçeklenebilirlik, hesaplama verimliliği ve son olarak daha iyi genelleme yapabilme olarak sıralanabilir.

4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

Bu çalışmada AlexNet, VGG19, DenseNet169, InceptionV3, ResNet101 ve MobileNET aktarım

öğrenme modelleri kullanılmıştır. Modeller Keras kütüphanesi kullanılarak modellenmiştir. AlexNet modeli ise PyTorch kütüphanesi kullanılarak kodlanmıştır. Model altyapılarında kullanılan hiper-parametreler Tablo 1’de verilmiştir. Çalışmada geliştirme ortamı olarak Google Colab tercih edilmiştir. Programlama dili olarak Python kullanılmıştır. Kullanılan bütün modellerde aynı geliştirme ortamı, hiper-parametreler ve programlama dili kullanılarak modeller üzerinde adil karşılaştırma yapılabilmesi sağlanmıştır.

Modellerin performans ölçütleri Tablo 2’de verilmiştir. Bu doğrultuda MobileNet %98.67 F1-Skor değerini alarak diğer modellere üstünlük sağlamıştır. Ardından gelen VGG19 modeli %97.89 değerini almıştır. Bunun yanı sıra DenseNet169 ve Alexnet birbirlerine çok yakın F1-Skorları alarak %97.59 ve %97.57 değerlerini elde etmiştir. ResNet101 için F1-Skor değeri %97.00 iken %96.44 F1-skoruyla InceptionV3 en düşük performansı göstermiştir.

Tüm aktarım öğrenme modelleri içerisinde en yüksek başarıyı MobileNet verdiği için bu aktarım modeline ait sonuçlar detaylandırılacaktır. Şekil 6’da MobileNet modelinin karışıklık matrisi gösterilmektedir.

Tablo 1. Modeller için Hiper-parametreler (Hyper-parameters for models)

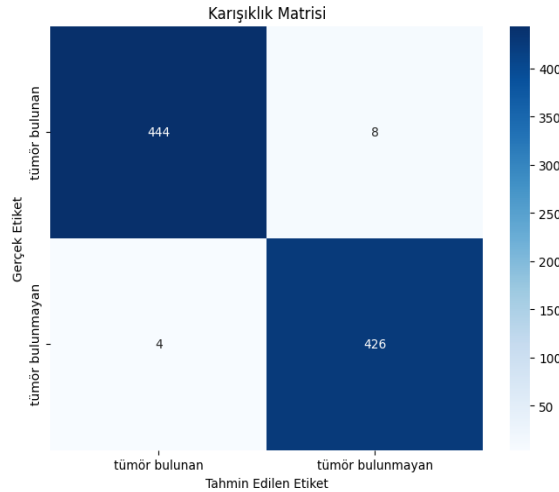
Hiper-parametre	Değer
Optimizasyon Algoritması	Adam
Görüntü Boyutu	128 x 128
Ağırlık	ImageNet (Önceden eğitilmiş tanımlı ağırlıklar)
Kayıp Fonksiyonu	İkili çapraz entropi (Binary crossentropy)
Ölçütler	Doğruluk (Accuracy)
Epoch Sayısı	50
Mini-Batch Boyutu	32
Başlangıç Öğrenme Oranı	0.0001
Düşürme Oranı	0.5

Tablo 2. Modellerin Test Sonuçlarının Doğruluk, Hatırlama, Kesinlik ve F1-Skoru Baz Alınarak Karşılaştırılması (Comparison of Models Test Results Based on Accuracy, Recall, Precision and F1-Score)

Model	Doğruluk	Hatırlama	Kesinlik	F1-Skor
MobileNet	%98.63	%98.23	%99.11	%98.67
VGG19	%97.85	%97.57	%98.22	%97.89
DenseNet169	%97.50	%98.67	%96.54	%97.59
AlexNet	%97.62	%96.70	%98.65	%97.57
ResNet101	%96.94	%96.46	%97.54	%97.00
InceptionV3	%96.37	%95.80	%97.09	%96.44

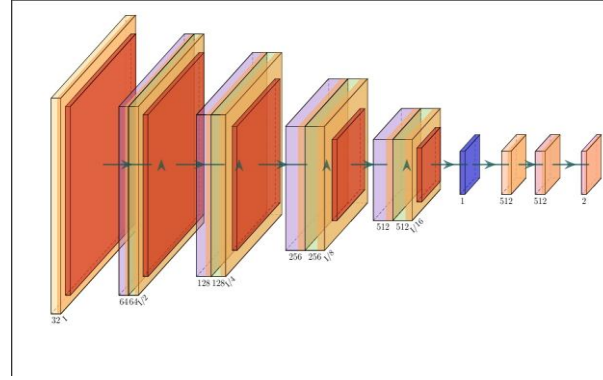
Bu modelden elde edilen F1-Skor değeri %98.67'dir. Model 452 tümör bulunan görüntüden 444 tanesini doğru bir şekilde sınıflandırmaktadır. Gerçekte "tümör bulunan" 8 görüntüyü ise "tümör

bulunmayan" olarak sınıflandırmıştır. Ayrıca gerçekte "tümör bulunmayan" 4 görüntüyü "tümör bulunan" olarak sınıflandırmıştır. MobileNet modelinin mimarisi Şekil 7'de gösterilmiştir.

**Şekil 6.** MobileNet Modelinin Test Sonuçlarına Göre Karışıklık Matrisi (Confusion Matrix Based on Test Results of The MobileNet Model)

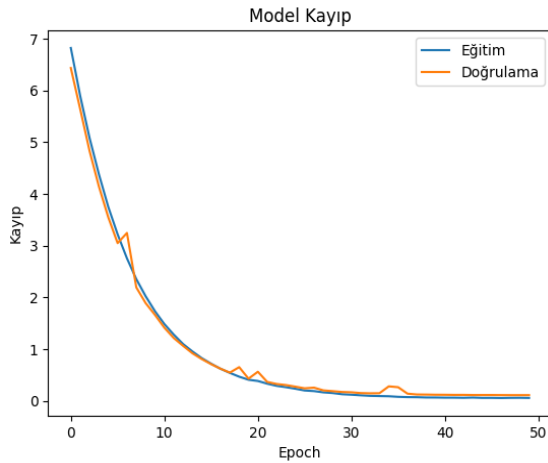
MobileNet'i diğer modellerden ayıran özellikleri vardır. Derin ayrımlı konvülasyonlar kullanarak parametre sayısını ve hesaplama maliyetini önemli ölçüde minimize eder. Diğer modellerin aksine, MobileNet hafif ve verimli bir yapıdadır. Bu sebeple MobileNet mobil ve gömülü cihazlarda kullanıma daha uygundur. Kullanılan diğer modellerdeki yoğun bağlantılar ve artık bloklar gibi yapıları kullanmaz. MobileNet'in yaklaşımı daha

basit ve etkilidir. Diğer modellerdeki gibi karmaşık modüller kullanmaz. Bunun yerine aynı performansı daha az hesaplama kaynağı ile sağlar. Sonuç olarak bu özellikler MobileNet'i diğer modellere göre daha hızlı ve verimli kılar. MobileNet'in beyin tümörü tespitinde oldukça başarılı olması bu özelliklerinden dolayı umut vericidir. Çünkü gömülü veya mobil cihaz tabanlı bir beyin tümörü tespit sistemi tasarlamak istenildiğinde doğrudan entegre edilebilir.



Şekil 7. MobileNet Modelinin Mimarisi (Architecture of The MobileNet Model)

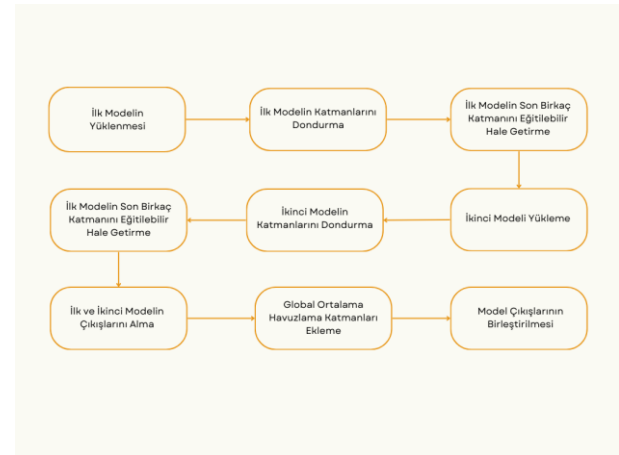
Şekil 8’de MobileNet modelinin değer kayıp grafiği verilmiştir. Bu grafiğin odak noktası olan nokta eğitim ve doğrulama aşamalarındaki kayıp (loss) değerinin devirler (epoch) ile beraber olan değişimidir. Modelin eğitim performansının başarılı ilerlediği görülmektedir. Bunun sebebi ilk birkaç devir içerisinde her iki kayıp değeri de hızla düşüş göstermesinden kaynaklanmaktadır. 5-10. devirler arasında bakıldığında doğrulama kaybı, eğitim kaybından bir miktar daha düşüktür. Bu kayıp değerleri bize modelin öğrenmediğini göstermektedir. Grafiğe bakıldığında 20. devirden sonra kayıp değerleri istikrarlı hale gelmiştir. Bu modelin verileri iyi öğrendiğini ve öğrenmeyi büyük ölçüde bitirdiğini göstermektedir. Sonuç olarak kayıpların benzer şekilde azalması ve bir süreden sonra istikrarlı olması, modelin eğitim ve doğrulama verileri üzerinde yüksek bir başarı elde ettiği olarak yorumlanabilir.



Şekil 8. MobileNet Modelinin Eğitim Değer Kaybı (Training Loss Value of the MobileNet Model)

Tablo 2’de en yüksek F1-skoruna sahip olan üç model birleştirilerek hibrit modeller oluşturulmuştur. Şekil 9’da bir hibrit modelin nasıl çalıştığı gösterilmiştir. Hibrit model hakkında bilgi

vermek gerekirse, hibrit model mimarisi iki veya daha fazla modelin birleştirilmesi ile oluşur. Hibrit model kullanımındaki amaç birbirinden farklı modellerin güçlü yanlarını birleştirilerek daha yüksek performanslı ve verimli çalışan bir model elde etmektir. Bu modeller daha çok derin öğrenme veya makine öğrenmesi süreçlerinde kullanılır. Elde edilen model ile tek modelin öğrenme sınırları aşılabılır. Model seçimi yapılırken performans metrikleri ele alınarak birbiri ile en optimal modeller seçilir. Aynı tekli modellerde yapıldığı gibi hibrit modellerde de dondurma işlemi yapılır. Bu yaklaşım ile verimli bir eğitim süreci sağlanır. Model çıktılarının birleştirilmesi birleştirme (concatenation) katmanı ile sağlanır. Bu katman kullanılan modellerin çıktılarını uç uca ekleyerek birden fazla modelin birbirinden farklı özelliklerinin bir araya getirilmesi ile daha genel ve güçlü bir temsiliyet sağlar. Farklı modellerin birleştirilmesi ile sağlanan çeşitliliğin faydası ise hata toleransı ve aşırı uyum (overfitting) gibi sorunları minimize etmektir.



Şekil 9. VGG19-Densenet169 Modelinin Hibritlendiği Örnek Model (An Example of Hybridizing VGG19-Densenet169 Model)

Hibrit modellerden elde edilen başarımlar ölçütleri Tablo 3'te verilmiştir. Hibrit VGG19-DenseNet169 modeli F1-Skoru metriğine göre %99.22 ile en yüksek başarımlar elde edilmiştir. Öte yandan Hibrit VGG19-MobileNet ve Hibrit Dense169-MobileNet modelleri sırasıyla F1-Skoru metriğine göre %98.89 ve %98.67 başarımlarını vermiştir. Tablo 2'de verilen sonuçlar göz önünde bulundurulduğunda sınıflandırma başarımlarında %2 ile %3 arasında

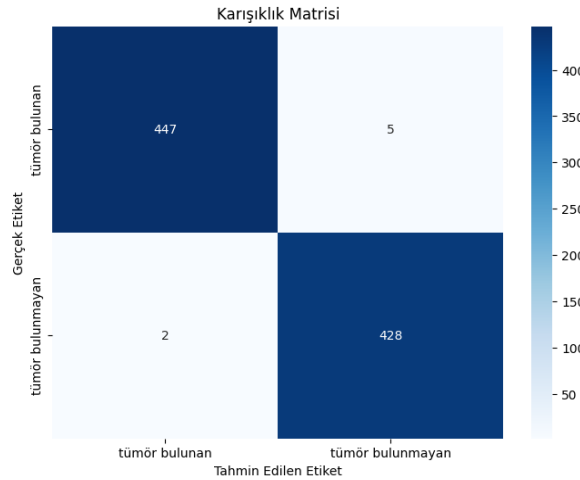
iyileştirme yapılmıştır. Örneğin MobileNet tek başına kullanıldığında F1-Skoru metriğine göre %98.67 başarımlar verirken, VGG19 tek başına kullanıldığında F1-Skoru metriğine göre %97.89 başarımlar vermiştir. Ancak bu iki model birleştirildiğinde F1-Skoru metriğine göre %98.89 başarımlar elde edilmiştir. Her iki modelinde başarımları bu durumda artış göstermiştir. Bu artış diğer hibrit model sonuçlarında da görülmektedir.

Tablo 3. Hibrit Modellerin Test Sonuçlarının Doğruluk, Hatırlama, Kesinlik ve F1-Skoru Baz Alınarak Karşılaştırılması (Comparison of Test Results Hybrid Models Based on Accuracy, Recall, Precision and F1-Score)

Model	Doğruluk	Hatırlama	Kesinlik	F1-Skor
Hibrit VGG19-DenseNet169	%99.21	%98.89	%99.55	%99.22
Hibrit VGG19-MobileNet	%98.87	%98.67	%99.11	%98.89
Hibrit Dense169-MobileNet	%98.6	%98.67	%98.67	%98.67

Şekil 10'da hibrit VGG19-DenseNet169 modelinin karışıklık matrisi gösterilmektedir. Bu modelden elde edilen F1-skor değeri %99.22 ile tüm deneylerden elde edilen en yüksek başarımlar değeridir. Model 452 tümörlü görüntüden 447

tanmesini doğru etiketlemektedir. Buna karşın gerçekte "tümör bulunan" 5 görüntüyü "tümör bulunmayan" olarak sınıflandırmıştır. Ayrıca gerçekte "tümör bulunmayan" 2 görüntüyü "tümör bulunan" olarak sınıflandırmıştır.



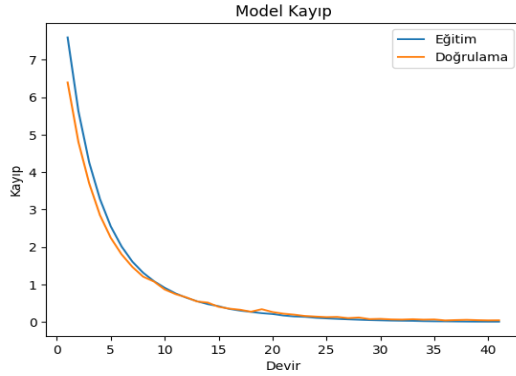
Şekil 10. Hibrit VGG19-DenseNet169 Modelinin Test Sonuçlarına Göre Karışıklık Matrisi (Confusion Matrix Based on Test Results of Hybrid VGG19-DenseNet169 Model)

Hibrit VGG19-DenseNet169 modeli derin özellik çıkarımı alanında kuvvetlidir. VGG19'un derin ve geniş katman yapısı güçlü özellikler çıkarmasını sağlar, DenseNet169'un yoğun bağlantıları bilgi akışında iyileştirme sağlar. Her iki modelin güçlü yönleri birleştirilerek iyileştirilmiş bir model elde edilir. Bu da modelin doğruluğunu artırmaktadır.

Şekil 11'de hibrit VGG19-DenseNet169 modelinin değer kayıp grafiği verilmiştir. 0-10. devirler arasında bakıldığında doğrulama kaybı, eğitim kaybından bir miktar daha düşüktür. Bundan yola çıkarak modelin iyi bir genelleme yaptığı söylenebilir. Grafiğe bakıldığında yaklaşık 20. devirden sonra kayıp değerleri istikrarlı hale gelmiştir. Bu modelin devam eden devirlerinin

önemli bir ölçüde iyileşme sağlamadığını göstermektedir. Sonuç olarak kayıpların benzer şekilde azalması ve bir süreden sonra oturtulmuş olması, modelin eğitim ve doğrulama verileri üzerinde yüksek bir başarı elde ettiğini gösterir.

yaklaşımın sonuçlarının literatürdeki sonuçlar ile rekabet ettiği görülmektedir.



Şekil 11. Hibrit VGG19-DenseNet169 Modelinin Eğitim Değer Kaybı (Training Loss Value of the Hybrid VGG19-DenseNet169 Model)

4.1. Önceki Çalışmalar ile Kıyaslama (Comparison with Previous Studies)

Tablo 4'te beyin tümör görüntüleri üzerinde yapılan çalışmalar karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Tablo 4 incelendiğinde araştırmacıların kullandıkları veri kümeleri ve veri kümelerinde yer alan dağılımların oldukça farklılık gösterdiği gözlemlenmektedir. Bu nedenle çalışmalarda elde edilen sonuçların karşılaştırmasını anlamlı yapabilmek için veri kümeleri biraz daha detaylı yazılmıştır. Tablo 4 incelendiğinde beyin tümörü sınıflandırmasında elde edilen en yüksek başarımlı doğruluk metriğine göre %100 olarak raporlanmıştır [20]. Çalışma [20]'de araştırmacılar InceptionV3 aktarım öğrenmesi tekniğini uygulayarak bu sonucu elde etmektedirler. Karşılaştırma tablosunda yer alan en yüksek ikinci başarımlı ise bu çalışmadan elde edilen %99.22 sonucudur. Bizim sonucumuza en yakın sonuç ise çalışma [19]'da verilen %99.15 sonucudur. Bu üç çalışmada ikili bir sınıflandırma problemi ele alınmıştır. Sadece çalışma [19, 20]'de doğruluk metriği değerlendirme metriği olarak tercih edilmiştir. [8, 9, 11, 14, 16, 18, 24] çalışmalarında da ikili sınıflandırma problemi ele alınmıştır. Ancak bu çalışmada elde edilen sonuç bunlara göre daha yüksektir. Çalışma [13]'te üç sınıflı bir problem ele alınırken, çalışma [21]'de ise 4 sınıflı bir problem ele alınmaktadır. Bunlara ek olarak karşılaştırma tablosunda yer alan diğer çalışmalar ise beyin tümörü segmentasyonu ile ilgilidir. Karşılaştırma tablosunda yer alan sonuçlar birlikte değerlendirildiğinde önerdiğimiz

Tablo 4. Önceki Çalışmalar ile Kıyaslama (Comparison with Previous Studies)

Referans No	Veri Kümesi	Kullanılan Yöntemler	Değerlendirme Metriği	Elde Edilen Sonuç
[6]	Kaggle platformundan alınan veri kümesi kullanılmıştır. Ancak görüntü sayısı hakkında detaylı bilgi verilmemiştir.	Görüntü işleme + SVM	Kesinlik	0.92
[7]	BRATS 2013'ün bir uzantısı olan BRATS 2015 klinik veri seti kullanılmıştır. Yüksek dereceli glioma hastalarından 30 rastgele görüntü ve düşük dereceli glioma hastalarından 10 rastgele ile deneyler gerçekleştirilmiştir.	MAP-EM + K-ortalamlar algoritması	Dice	0.92
[8]	Farklı veri kümelerinden görüntüler bir araya getirilerek 4222 görüntü üzerinde deneyler yapılmıştır. Bu görüntülerin 3334 tanesi tümör içeren görüntü iken 888 tanesi ise tümör içermeyen görüntüdür.	CNN	F1-skor	0.9474
[9]	400 tane görüntü bulunmaktadır. Bunlardan 230 tanesi tümörlü görüntüden oluşmaktadır. Geri kalan 170 görüntü ise tümör içermemektedir.	CNN	F1-skor	0.89
[10]	Eğitim kümesinde 285 farklı hastanın görüntüsü bulunmaktadır. Doğrulama kümesinde ise BRATS 2017 ve BRATS 2018'den bilinmeyen derecelere sahip 46 ve 66 hastanın görüntüleri vardır.	Çoklu görünüm füzyon ağı	Dice	0.895
[11]	Normal tümör ve anormal tümör olarak etiketli veri kümesi kullanılmıştır. Ancak veri kümesinin dağılımı hakkında bilgi verilmemiştir.	Görüntü işleme + SVM	Doğruluk	%97
[13]	Çevrimiçi ücretsiz erişime sahip Çin'deki iki hastaneden alınan veri kümesi kullanılmıştır. Bu görüntüler 2005 ile 2010 yılları arasında 233 hastadan alınmıştır. Bu veri seti 3064 dilimden oluşmaktadır. Veri kümesi 708 menenjiyom, 1426 gliyom ve 930 hipofiz tümörü olarak kategorilere ayrılmıştır.	Çoklu Görev U-Net mimarisi	Doğruluk	%97
[14]	152 tanesi normal tümör 104 tanesi ise anormal tümör olarak etiketli veri kümesi kullanılmıştır.	CNN	F1-skor	0.981
[15]	BraTS 2020 veri kümesi kullanılmıştır. Ancak veri kümesinin dağılımı hakkında net bir sayı verilmemiştir.	U-net	Dice	%86
[16]	1992 tane görüntü kullanılmıştır. Bu görüntülerin 1494 tanesi eğitim için 498 tanesi (273 tane tümör içeren, 225 tanesi tümör içermeyen) ise test için kullanılmıştır.	FastAi temelli CNN	Doğruluk	%95.78
[17]	30 hasta görüntüsünü içeren BRATS veri kümesi kullanılarak deneyler gerçekleştirilmiştir.	Watershed bölütleme algoritması + CNN	Dice	%93.5
[18]	25 tane görüntüden oluşan veri kümesi kullanılmıştır. Bunlardan 98'i beyin tümörü içermezken 155 tanesi ise tümörlü görüntüdür.	ResNet-50	F1-skor	0.9795
[19]	5327 görüntü kullanılmıştır. Bunlardan 2519 tanesi tümör içermeyen görüntülerken 2808 tanesi ise tümör içeren görüntülerdir.	CNN	Doğruluk	%99.15
[20]	102 adet tümörsüz görüntü ve 118 adet tümörlü görüntü eğitim için kullanılmıştır. 40 tümörsüz görüntü ve 44 adet tümörlü görüntü test için kullanılmıştır.	InceptionV3	Doğruluk	%100
[21]	3264 adet görüntüden oluşan veri kümesi kullanılmıştır. Bunlardan 2870 tanesi eğitim için geriye kalan 394 tanesi test için kullanılmıştır. Veri kümesindeki etiketlerin dağılımı ise 500 tümörsüz,	CNN + AlexNet	F1-skor	0.9275

	926 glioma beyin tümörü, 937 menenjiyom beyin tümörü ve 901 hipofiz beyin tümörü şeklindedir.			
[22]	5000 adet görüntü üzerinde deneyler gerçekleştirilmiştir.	YOLOv5x	F1-skor	0.87
[23]	REMBRANDT veri kümesinden 99 hastanın MR görüntüleri alınarak deneyler gerçekleştirilmiştir. Her hasta için ise 30'a yakın MR görüntüsü olduğu raporlanmıştır.	SVM	F1-skor	0.90
[24]	253 görüntü kullanılmıştır. Bu görüntülerin 155 tanesi tümürlü iken 98 tanesi ise tümörsüz görüntüdür.	KNN + derin sinir ağı özellikleri	Doğruluk	%89.72
Önerilen hibrit VGG19+DenseNet169	2938 tane beyin MR görüntüsü ile deneyler yapılmıştır. Bunların 1491 tanesi tümör olmayan beyin görüntüsü, 1447 tanesi ise tümürlü beyin görüntüsüdür.	VGG19+DenseNet169	F1-skor	%99.22

5. GENEL DEĞERLENDİRMELER ve GELECEK ÇALIŞMALAR (GENERAL EVALUATIONS AND FUTURE WORKS)

Bu çalışmada yapılan deneyler incelendiğinde MobileNet modelinin diğer modellerden (VGG-19, Resnet101, Densenet169, InceptionV3, Alexnet) daha yüksek F1-Skor değerine ulaştığı görülmektedir. Kullanılan hibrit modellerde (VGG19-DenseNet169, VGG19-MobileNet, Dense169-MobileNet) ise en yüksek F1-Skor değeri VGG19-DenseNet169 modeli ile elde edilmiştir. MobileNet'i diğer modellerden ayıran temel özelliği derin ayrımlı konvülasyonlar kullanmasıdır. Bu özelliği modele parametre sayısında ve hesaplama maliyetinde kayda değer biçimde düşüşe sebebiyet verir. VGG19'un düşük seviyeli özellikleri iyi yakalaması ve DenseNet169 modelinin karmaşık özellikleri yakalamada iyi olması gibi özelliklerin kombine edilmesiyle VGG19-DenseNet169 hibrit modeli tüm test edilen modeller arasında en başarılı model olmuştur. Modellerin birleştirilmesi ile sınıflandırma başarımlarında artış olduğu gösterilmiştir. Tüm sonuçlar incelendiğinde en başarılı modelden %99'un üzerinde sınıflandırma başarımları elde edilmiştir. Gelecekteki çalışmalarda MobileNet modelinin mimarisinde modifikasyonlar ve hiper parametre optimizasyonu yapılarak sınıflandırma başarımının iyileştirilmesi planlanmaktadır. Ayrıca farklı görüntü sınıflandırma problemlerinde önerilen hibrit aktarım öğrenmesi mimarilerinin denenmesi 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)

Yazarlar çalışmaya eşit oranda katkı sağlamıştır.

The authors have contributed equally to the work.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

There is no conflict of interest in this study.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Abd El Kader I, Xu G, Shuai Z, Saminu S, Javaid I, Salim Ahmad I. Differential deep convolutional neural network model for brain tumor classification. Brain Sciences. 2021; 11(3): 352.
- [2] Logeswari T, Karnan M. An improved implementation of brain tumor detection using segmentation based on hierarchical self organizing map. International Journal of Computer Theory and Engineering. 2010; 2(4): 591.
- [3] El-Dahshan ESA, Mohsen HM, Revett K, Salem AM. Computer-aided diagnosis of human brain tumor through MRI: A survey and a new algorithm. Expert Systems with Applications. 2014; 41(11): 5526–5545.
- [4] Chahal PK, Pandey S, Goel S. A survey on brain tumor detection techniques for MR

- images. *Multimedia Tools and Applications*. 2020; 79(29): 21771–21814.
- [5] Arı A, Alcin OF, Hanbay D. Brain MR image classification based on deep features by using extreme learning machines. *Biomedical Journal of Scientific and Technical Research*. 2020; 25(3).
- [6] Varshney S, Prajapati SK, Rajput S, Kaur M, Rakesh N, Goyal MK. Image processing based brain tumor detection. In: 2022 International Conference on Fourth Industrial Revolution Based Technology and Practices (ICFIRTP); 2022. p. 204–209. IEEE.
- [7] Anwar SM, Yousaf S, Majid M. Brain tumor segmentation on multimodal MRI scans using EMAP algorithm. In: 2018 40th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC); 2018. p. 550–553. IEEE.
- [8] Methil AS. Brain tumor detection using deep learning and image processing. In: 2021 International Conference on Artificial Intelligence and Smart Systems (ICAIS); 2021. p. 100–108. IEEE.
- [9] Hashan AM, Agbozo E, Al-Saeedi AAK, Saha S, Haidari A, Rabi MNF. Brain tumor detection in MRI images using image processing techniques. In: 2021 4th International Symposium on Agents, Multi-Agent Systems and Robotics (ISAMSR); 2021. p. 24–28. IEEE.
- [10] Noori M, Bahri A, Mohammadi K. Attention-guided version of 2D UNet for automatic brain tumor segmentation. In: 2019 9th International Conference on Computer and Knowledge Engineering (ICCCKE); 2019. p. 269–275. IEEE.
- [11] Sravanthi N, Swetha N, Devi PR, Rachana S, Gothane S, Sateesh N. Brain tumor detection using image processing. *International Journal of Scientific Research in Computer Science, Engineering and Information Technology*. 2021; 7(3): 348–352.
- [12] Malik M, Jaffar MA, Naqvi MR. Comparison of brain tumor detection in MRI images using straightforward image processing techniques and deep learning techniques. In: 2021 3rd International Congress on Human-Computer Interaction, Optimization and Robotic Applications (HORA); 2021. p. 1–6. IEEE.
- [13] Kordnoori S, Sabeti M, Shakoob MH, Moradi E. Deep multi-task learning structure for segmentation and classification of supratentorial brain tumors in MR images. *Interdisciplinary Neurosurgery*. 2024; 36: 101931.
- [14] Gurunathan A, Krishnan B. Detection and diagnosis of brain tumors using deep learning convolutional neural networks. *Int J Imaging Syst Technol*. 2021;31(3):1174–1184.
- [15] Eker AG, Duru N. Medikal görüntü işlemede derin öğrenme uygulamaları. *Acta Infologica*. 2021;5(2):459–474.
- [16] Dipu NM, Shohan SA, Salam KMA. Deep learning based brain tumor detection and classification. In: Proceedings of the 2021 International Conference on Intelligent Technologies (CONIT); 2021; 1–6. IEEE.
- [17] Jemimma TA, Vetharaj YJ. Watershed algorithm based DAPP features for brain tumor segmentation and classification. In: Proceedings of the 2018 International Conference on Smart Systems and Inventive Technology (ICSSIT); 2018; 155–158. IEEE.
- [18] Periasamy JK, Buvana S, Jeevitha P. Comparison of VGG-19 and RESNET-50 Algorithms in Brain Tumor Detection. In: Proceedings of the 2023 IEEE 8th International Conference for Convergence in Technology (I2CT); 2023; 1–5. IEEE.
- [19] Kumar T, Yadav PK, Yadav V. Detection of Brain Tumor using CNN. In: Proceedings of the 2022 4th International Conference on Inventive Research in Computing Applications (ICIRCA); 2022; 1121–1126. IEEE.
- [20] Prakash RM, Kumari R. Classification of MR brain images for detection of tumor with transfer learning from pre-trained CNN models. In: Proceedings of the 2019 International Conference on Wireless Communications Signal Processing and Networking (WiSPNET); 2019; 508–511. IEEE.
- [21] Khofiya SN, Fu'adah YN, Pratiwi NKC, Naufal RI, Pratama AD. Brain Tumor Classification Based On MRI Image Processing With Alexnet Architecture. In: Proceedings of the 2022 IEEE Asia Pacific Conference on Wireless and Mobile (APWiMob); 2022; 1–6. IEEE.
- [22] Kumar M, Pilania U, Bhayana T, Thakur S. Utilizing YOLOv5x for the Detection and Classification of Brain Tumors. In: Proceedings of the 2024 2nd International Conference on Disruptive Technologies (ICDT); 2024; 1343–1348. IEEE.
- [23] Çınarer G, Emiroğlu BG. Classification of brain tumors by machine learning algorithms. In: Proceedings of the 2019 3rd International Symposium on Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies (ISMSIT); 2019; 1–4. IEEE.

- [24] Aslan M. Derin Öğrenme Tabanlı Otomatik Beyin Tümör Tespiti. Fırat Üniv Mühendislik Bilimleri Derg. 2022;34(1):399–407.
- [25] Google. Google colab, 2017, <https://colab.google/>
- [26] Guido Van Rossum and Fred L Drake Jr. Python reference manual. Centrum voor Wiskunde en Informatica Amsterdam, 1995.
- [27] Keras Team. Keras: Deep Learning for humans, <https://keras.io/>
- [28] OpenCV. The OpenCV Reference Manual, 2.4.13.7 edition, April 2014.
- [29] Facebook. Pytorch, 2016, <https://pytorch.org/>
- [30] Brain Tumor — kaggle.com. <https://www.kaggle.com/datasets/jakeshbohaju/brain-tumor/data>, [Son erişim tarihi 06-01-2024].
- [31] Er MB. Akciğer Seslerinin Derin Öğrenme ile Sınıflandırılması. Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology. 2020;8(4):830–844.
- [32] Ali Ö. Automatic Detection of Epileptic Seizures from EEG Signals Using Artificial Intelligence Methods. Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology. 2024; 257–266.

Post-Disaster Vehicle Routing Problem Under Uncertain Time

İlknur TÜKENMEZ^{1*} 

¹Bursa Technical University, Faculty Of Engineering and Natural Sciences, Industrial Engineering Department, Bursa, Türkiye

Makale Bilgisi

Research article
Received: 11/10/2023
Revision: 17/11/2024
Accepted: 14/12/2024

Anahtar Kelimeler

Araç Rotalama Problemi
Stokastik Seyahat Süresi
Afet Yönetimi
Metasezgisel Algoritma

Article Info

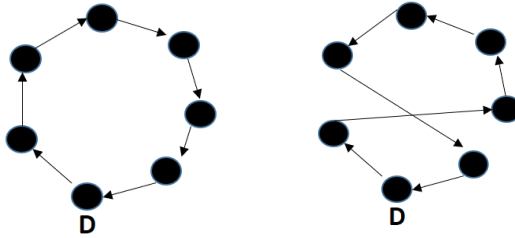
Araştırma makalesi
Başvuru: 11/10/2023
Düzeltilme: 17/11/2024
Kabul: 14/12/2024

Keywords

Vehicle Routing Problem
Stochastic Travel Time
Disaster Management
Metaheuristic Algorithm

Grafik Özet (Graphical/Tabular Abstract)

Afet sonrası insani yardım malzemelerinin toplanma alanlarına ulaştırılmaları gerekmektedir. Yollarda oluşan trafik ulaşım sürelerinde değişkenliğe neden olmaktadır. Seyahat süresinin stokastik olarak ele alındığı bu çalışmanın amacı toplam ulaşım süresinin enküçüklenmesidir. After a disaster, humanitarian aid supplies must be delivered in post-disaster gathering areas. There is a traffic on the way, and transportation time on the roads may vary. The aim of this problem is minimize the total reaching time, the travel time between nodes is considered stochastic.



Şekil A: Rota Yapısı / Figure A: Route Structure

Önemli noktalar (Highlights)

- Afet sonrası araç rotalama probleminde seyahat süresi stokastik olarak ele alınmıştır. / Travel time is considered stochastic in the post-disaster vehicle routing problem.
- Küçük boyutlu örneklerde matematiksel modelle eniyi çözümler elde edilebilmiştir. Optimum results are get by mathematical model in small scale problem.
- Orta boyutlu problemler için metasezgisel algoritma geliştirilmiştir ve kaliteli sonuçlar elde edilmiştir. Metaheuristic algorithm is used for medium scale problems, and quality results are obtained.

Amaç (Aim): Bu çalışmada afet sonrası insani yardım dağıtım probleminde seyahat süresi stokastik olarak ele alınmıştır. Orta boyutlu problemlerin çözümü için metasezgisel algoritma kullanılmıştır. / In this study, post-disaster aid distribution problem is considered with stochastic travel time. Metaheuristic algorithm is used for medium scale problems.

Özgünlük (Originality): Afet sonrası araç rotalama probleminde seyahat süresi stokastik olarak ele alınmıştır. / In post-disaster vehicle routing problem, travelling time is considered stochastic.

Bulgular (Results): Orta boyutlu problemler metasezgisel algoritma ile kısa süre içerisinde çözülmüştür. / Medium scale problems are solved in a short time.

Sonuç (Conclusion): Uyarlanabilir Büyük Komşu Araöa algoritmasının orta boyuttaki stokastik araç rotalama problem için kısa sürede kaliteli sonuçlar verdiği görülmüştür. / It has been observed that the Adaptive Large Neighborhood Search Algorithm gives quality results in a short-time for medium-sized stochastic vehicle routing problem.



Belirsiz Süre Altında Afet Sonrası Araç Rotalama Problemi

İlknur TÜKENMEZ^{1*}

¹Bursa Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Bursa, Türkiye

Makale Bilgisi

Research article
Received: 11/10/2023
Revision: 17/11/2024
Accepted: 14/12/2024

Anahtar Kelimeler

Araç Rotalama Problemi
Stokastik Seyahat Süresi
Afet Yönetimi
Metasezgisel Algoritma

Öz

Afet sonrası toplanma bölgelerindeki afetzedelere mümkün olan en kısa süre içerisinde insani yardım malzemelerinin ulaştırılması gerekmektedir. Afet sonrası insanların afet bölgesinden uzaklaşmak istemeleri veya yakınlarını merak eden kişilerin bilgi almak için afet bölgesine gitmek istemeleri yollarda trafiğe neden olabilmektedir. Bu nedenle yollardaki ulaşım süresi değişebilir. Öncelikli ulaşım süresi toplamının enküçüklenmesinin amaçlandığı problemde düğümler arasındaki seyahat süresi stokastik olarak ele alınmıştır. Araç rotalama problemi NP-Zor sınıfında bir problem olduğu için problem boyutu büyüdükçe kesin çözüm yöntemleriyle en iyi çözüm elde edilemeyebilir. Bu nedenle sezgisel algoritmalara ihtiyaç duyulmaktadır. Uyarlanabilir Büyük Komşu Arama algoritması bu problemin çözümü için uygulanmıştır. Küçük örneklerde kesin çözüm yöntemiyle sezgisel algoritma ile elde edilen sonuçlar kıyaslanmıştır ve çözüm kalitesinin iyi olduğu görülmüştür. Geliştirilen metasezgisel algoritma orta boyutlu problemlerin çözümü için de kullanılmıştır.

Post-Disaster Vehicle Routing Problem Under Uncertain Time

Article Info

Araştırma makalesi
Başvuru: 11/10/2023
Düzeltilme: 17/11/2024
Kabul: 14/12/2024

Keywords

Vehicle Routing Problem
Stochastic Travel Time
Disaster Management
Metaheuristic Algorithm

Abstract

Humanitarian aid supplies must be delivered to post-disaster victims in post-disaster gathering areas as soon as possible. After a disaster, people want to get away from the disaster area or people who are curious about their relatives want to go to the disaster area to get information, which can cause traffic on the roads. For this reason, transportation time on the roads may vary. In the problem where the primary aim is to minimize the total reaching time, the travel time between nodes is considered stochastic. Since the vehicle routing problem is an NP-Hard class problem, the best solution may not be obtained with exact solution methods as the problem size increases. Therefore, heuristic algorithms are needed. The adaptive large neighborhood search algorithm has been applied to solve this problem. In small examples, the results obtained with the exact solution method and the heuristic algorithm are compared and the solution quality is found to be good. The developed metaheuristic algorithm is also used to solve medium-sized problems.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Araç rotalama problemi (ARP) uzun süredir çalışılmasına rağmen hala güncelliğini koruyan bir problemdir. Kapasiteli ARP, açık ARP, çok amaçlı ARP, heterojen filolu ARP, yeşil ARP, topla-dağıt ARP, eş zamanlı ARP, seçici ARP, elektrikli ARP, dron rotalama, insani yardım ARP, problem çeşitlerinden bazılarıdır. ARP'nin amacı uğranması gereken tüm düğümleri içeren amaç fonksiyonuna ve kısıtlara uygun en iyi rotanın oluşturulmasıdır. Amaç fonksiyonları ise maliyetin, sürenin, enerjinin

enküçüklenmesi veya karın, memnuniyetin enbüyüklenmesi şeklinde olabilir. Afet yönetimi alanında yapılan çalışmalar ise son zamanlarda yoğunlaşmıştır. Afet yönetimi alanında çalışılan birçok problem çeşidi vardır. Geçici çadır tesis yer seçimi, insani yardım lojistiği, enkaz kaldırma/ yol onarma problemi, yaralıların hastanelere ulaştırılması ve rotalama problemi çalışılan problemlerden bazılarıdır. Afet sonrası yardım dağıtım problemi ise mümkün olan en kısa sürede yardımların belirlenen noktalara ulaştırılmasını amaçlar.

Afet sonrası insanların afet alanından uzaklaşmak istemeleri veya yakınlarına ulaşma istekleri nedeniyle yollarda fazla araç bulunabilir ve bu durum trafiğe neden olabilmektedir. Trafiğe bağlı olarak ulaşım süreleri de artmaktadır. Sürenin artışı yaralıların hastanelere ulaşımını ve yardımların afetzedelere ulaşımını etkilemektedir. Problemden karşılaşılan belirsizlikler stokastik parametrelerle modele dahil edilebilir. İnsani yardım lojistiği problemlerinde talep veya süre belirsiz parametreler olarak modele dahil edilebilmektedir. Bu çalışma kapsamında süre stokastik parametre olarak ele alınmıştır ve düğümler arasındaki mesafe hızın düşük, orta ve hızlı olmasına göre 3 senaryo olarak modele dahil edilmiştir. Ele alınan problemin amaç fonksiyonu öncelikli ulaşım süresi toplamının enküçüklenmesidir. Literatürde ulaşılabilen çalışmalar incelendiğinde ulaşım süresinin stokastik olarak ele alındığı ve öncelikli ulaşım süresinin enküçüklediği afet sonrası son kilometre dağıtım problemlerine rastlanmamıştır. Bu çalışmanın bu yönüyle literatürdeki boşluğu dolduracağı düşünülmektedir.

Bu çalışmanın izleyen bölümünde yapılan literatür taraması, üçüncü bölümünde problem ve geliştirilen matematiksel model, dördüncü bölümde deneysel sonuçlar verilmiş, son bölümde ise elde edilen sonuçlar ve öneriler tartışılmıştır.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI (LITERATURE RESEARCH)

Araç rotalama problemi literatürde uzun yıllardır çalışılan bir problemdir ve birden fazla çeşidi vardır. Her çalışmadan burada söz etmek mümkün değildir. Bu nedenle bu çalışmada stokastik parametre içeren, afet sonrası yardım dağıtımını dikkate alan çalışmalar incelenmiştir. Bozorgi-Amiri ve Khorsi (2016) [1] yerleşim-rotalama problemini çok amaçlı ve çok periyotlu olarak ele almışlardır ve problemi Epsilon kısıt yöntemiyle çözmüşler. Liu vd. (2022) [2] araç kullanımını artırmayı ve maliyeti azaltmayı amaçladıkları acil durum ARP'ni melez bir algoritmayla çözmüşler ve benzetim modeliyle de sonuçları desteklemiştir. Zhang ve Liu (2021) [3] çok amaçlı acil durum çizelgeleme problemini memetik algoritma ve memetik algoritma ile melezlenmiş çok amaçlı evrimsel algoritma ile çözmüşlerdir. Seyahat süresinin stokastik ele alındığı problemde 5 senaryo kullanılmıştır.

Mohammadi vd. (2020) [4] afet sonrası yardım dağıtımını problemini yaralıların hastaneye ulaştırılması problemi ile birlikte ele almışlardır. Problemden toplam lojistik maliyeti, yaralıların hastaneye ulaşma süresi ve iş yükü arasındaki dengesizliğin enküçüklenmesi amaçlanmıştır ve talep, tesislerin kapasitesi, ve seyahat süresi stokastik olarak ele alınmıştır. Modeldeki belirsizliklerden dolayı problem robust eniyileme ile çözülmüştür.

Molina vd. (2018) [5] gecikme toplam maliyeti enküçüklemeyi amaçladıkları afet ARP'ni çok başlangıçlı yerel arama ve NSGA-II algoritması ile çözmüşlerdir. Literatürden farklı olarak araçlar sınırlı kapasite ve maliyet nedeniyle birden fazla tur için kullanılabilir. Sonuçlara bakıldığında çok başlangıçlı yerel arama algoritmasının daha iyi sonuç verdiği görülmüştür.

Penna vd. (2017) [6] da araçların her yola girememesi durumunu dikkate alarak heterojen filoyu modele dahil etmişlerdir. Çok depolu ele alınan modelde gerçek hayat verileri kullanılmış ve ardışıklı yerel arama ile kaliteli sonuçlar elde edilmiştir. Nodoust vd. (2021) [7] de afet sonrası bazı yolların ulaşımına kapalı olma durumunu modele dahil etmişlerdir. Talepler bulanık-rassal parametre olarak modele dahil edilmiştir. Anuar vd.(2022) [8] de talebi stokastik olarak ele almışlardır ve talep bölünmüş olarak da karşılanabilir. Problem çözümünde sezgisel ve mat-sezgisel algoritmalar kullanılmıştır.

Afet sonrası hiç istenmese de yollarda trafik meydana gelebilir. Bu durum da yardımların ulaşım süresini etkilemektedir. Chang vd. (2022) [9] araç hızını stokastik olarak ele almışlardır. Araç hızı depremin şiddetine göre değişmektedir. Çok ürün dağıtımını içeren modelde gerçek deprem verileri kullanılmış ve problem benzetim modeli ile çözülmüştür. Bruni vd. (2020) [10] de seyahat süresini stokastik olarak modele dahil etmişlerdir. Kümelenebilir olan yardım noktalarına olan gecikme süresinin enküçüklenmesinin amaçlandığı problem Değişken Komşu Arama (DKA) ile küçük ve orta büyüklükteki veriler için çözülmüştür. Sonuçlar benzetim modeliyle de karşılaştırılmıştır. Ahmadi vd. (2015) [11] insani yardım lojistiği için yerleşim-rotalama probleminde seyahat süresini stokastik olarak 4 senaryo dahilinde ele almışlardır. Küçük

boyutlu problemler kesin çözüm yöntemiyle elde edilirken büyük boyutlu problemler için DKA algoritması kullanılmıştır.

Elçi ve Noyan (2018) [12] insani yardım lojistik probleminde talebi, seyahat süresini ve afet şiddetini stokastik olarak ele almışlardır. Küçük ve orta büyüklükteki problemler senaryo tabanlı Benders ayrıştırma yöntemi ile çözülmüştür. Uslu vd. (2017) [13] çok-depolu stokastik talepli insani yardım dağıtım problemini ele almışlardır. Şans kısıtı ekleyerek kapasite aşımına belli bir oranda izin verdikleri doğrusal olmayan modeli doğrusallaştırarak Ankara ili için çözmüşlerdir. Barbarosoğlu ve Arda (2004) [14] da afet sonrası yardım dağıtım problemini iki aşamalı stokastik problem olarak ele almışlardır ve kapasite, arz ve talep değerlerini stokastik olarak modele dahil etmişlerdir. Li ve Chung (2018) [15] de talep ve seyahat süresini belirsiz olarak dahil ettikleri modeli robust enyileme yöntemiyle ele almışlardır. Modeli 5 farklı amaç fonksiyonuna göre farklı algoritmalarla çözmüşlerdir. Che ve Zhang (2023) [16] eş zamanlı topla-dağıt ARP'inde talebi stokastik olarak ele almışlardır. İki aşamalı stokastik model L-şekli algoritma kullanılarak çözülmüştür.

Wolgemuth vd. (2012) [17] afet sonrası dağıtım problemini dinamik olarak ele almıştır ve toplam seyahat süresinin enküçüklenmesi amaçlanmıştır. Maghfiroh ve Hanaoka (2018) [18] afet sonrası yardım dağıtım problemini dinamik olarak modellemişlerdir. Taleplerin belirsiz olduğu problemde heterojen araçlar kullanılmıştır. Bazı düğümlerin talepleri iki tip araçla da karşılanırken bazı düğümlerin talepleri sadece küçük araçla karşılanabilir. Çok amaçlı olarak ele alınan problemde karşılanan talebin enbüyüklenmesiyle birlikte maliyet ve zamanın enküçüklenmesi amaçlanır. Tavlama Benzetimi (TB) ve melez DKA algoritmaları problemin çözümü için kullanılmıştır. Mulumba vd.(2024) [19] topla-dağıt ARP'nde

kamyon ve dronu birlikte ele almışlardır. Büyük boyutlu problemlerin çözümünde Uyarlanabilir Büyük Komşu Arama (UBKA) sezgisel algoritması kullanılmıştır.

Allahviranloo vd. (2014) [20] seçici ARP'ni güvenilir, robust ve bulanık olmak üzere 3 farklı belirsizlik yöntemiyle ele almışlardır. 3 paralel Genetik Algoritma (GA) ile 200 düğüm boyutuna ulaşan problem çözülmüştür. Afet sonrası insani yardım lojistiği açısından ele alındıktan problemde süre kısıtı olduğu için her düğüme uğranamamaktadır. Düğümlerin öncelikleri vardır ve süre içerisinde uğranabilecek en fazla sayıda düğüme uğranması amaçlanır. Çetin Kaya vd. (2021) [21] ise salgın hastalık durumunda dağıtım problemini dron rotalama olarak ele almışlardır.

Anuar vd. (2021) [22] insani yardım ARP alanında bir derleme çalışması yapmıştır. Tahliye rotalama ve kurtarma rotalama problemi alanında yapılan çalışmaların az olduğunu vurgulamıştır. Yanez-Sandivari vd. (2021) [23] de insani yardım lojistiği alanında literatür taraması yapmışlardır.

Shi vd. (2023) [24] müşteri taleplerini karşılarken bölge tabanlı ücretlendirmeyi dikkate almışlardır. Aynı bölgede yaşayan müşteriler taşıma ücretini paylaşabilirler. Yüksek taşıma ücretleri talepleri azaltabilirken, düşük taşıma ücretleri de firmanın karını azaltabilir. Karı enbüyükleme amaçlı araç rotalama problemi UBKA ve DKA ile çözülmüştür ve UBKA ile daha iyi sonuç elde edildiği görülmüştür. Wang vd.(2024) [25] zaman pencereli çok depolu dinamik ARP'ni UBKA ile çözmüşlerdir. Algoritmada iki yeni çıkarma ve zaman penceresi uygunluğu tabanlı ekleme metodlarını kullanmışlardır. Huang vd. (2024) [26] taze ürünlerin dağıtımında ürünlerin dağıtım zamanına ve tazeliğine göre müşteri memnuniyetini dikkate aldıkları ARP'ni UBKA ile çözmüşlerdir. Çalışmaların kısa özeti Tablo1'de verilmiştir.

Table 1. Literatür Araştırması (Literature Research)

Yazar	Model	Çözüm Yöntemi	Amaç Fonksiyonu
Bozorgi-Amiri ve Khorsi (2016)	Yerleşim-Rotalama Problemi	Épsilon Kısıt	Toplam seyahat süresi, afet öncesi ve sonrası maliyet ve karşılanamayan talebin enküçüklenmesi
Liu vd. (2022)	Acil durum ARP	Melez algoritma, Benzetim modeli	Araç kullanımını enbüyüklemek ve maliyeti enküçüklemek

Zhang ve Liu (2021)	Acil durum lojistik- çizelgeleme	Memetik algoritma, melez memetik algoritma	Karşılanmayan talebin ve gecikmenin enküçüklenmesi
Mohammadi vd. (2020)	Afet sonrası ARP	Robust eniyileme	Toplam lojistik maliyeti, yaralıların hastaneye ulaşma süresi ve iş yükü arasındaki dengesizliğin enküçüklenmesi
Molina vd. (2018)	ARP	NSGA-II algoritması	Toplam gecikme maliyetinin enküçüklenmesi
Penna vd. (2017)	Afet sonrası ARP	Yerel Arama	Kullanılan araç sayısı
Nodoust vd. (2021)	Afet sonrası ARP	Robust eniyileme	Depo maliyetinin ve karşılanamayan talebin enküçüklenmesi
Anuar vd.(2022)	Afet sonrası ARP	Kesin Çözüm yöntemi	Kullanılan araç sayısı
Chang vd. (2022)	Afet sonrası ARP	Benzetim modeli	Toplam Tamamlanma zamanı
Bruni vd. (2020)	Afet sonrası ARP	DKA	Gecikme süresinin enküçüklenmesini
Ahmadi vd. (2015)	Yerleşim-Rotalama Problemi	DKA	Dağıtım süresi, karşılanamayan talep ve açılan depo sayısının enküçüklenmesi
Elçi ve Noyan (2018)	İnsani yardım dağıtımı problemi	Benders Ayrıştırması	Toplam taşıma maliyeti
Uslu vd. (2017)	İnsani yardım dağıtımı problemi	Kesin Çözüm yöntemi	Toplam mesafenin enküçüklenmesi
Barbarosoğlu ve Arda (2004)	İnsani yardım dağıtımı problemi	Kesin Çözüm Yöntemi	Toplam ulaşım amliyeti ve beklenen maliyetin enküçüklenmesi
Li ve Chung (2018)	Afet sonrası ARP	Yasaklı arama algoritması, ekleme algoritması	Toplam sürenin, toplam maliyetin, kullanılan araç sayısının, ulaşım süresinin ve öncelikli ulaşım süresinin enküçüklenmesi
Che ve Zhang (2023)	Topla-Dağıt ARP	L-Şekli algoritma	Toplam maliyetin enküçüklenmesi
Wolgemuth vd. (2012)	Afet sonrası ARP	Yasaklı arama algoritması	Toplam seyahat süresinin enküçüklenmesi
Maghfiroh ve Hanaoka (2018)	Afet sonrası ARP	Tavlama Benzetimi, Melez Değişken Komşu Arama	Karşılanan talebin enbüyüklenmesi ve maliyet ve zamanın enküçüklenmesi
Mulumba vd.(2024)	Topla-Dağıt ARP	Uyarlanabilir Büyük Komşu Arama algoritması	Toplam maliyetin enküçüklenmesi
Allahviranloo vd. (2014)	Seçici ARP	Paralel Genetik Algoritma	Maliyetin enküçüklenmesi, ulaşılan insan sayısının enbüyüklenmesi
Çetinkaya vd. (2021)	Salgın Hastalık ARP	Kümele algoritması, Karınca kolonisi	Maliyetin enküçüklenmesi
Shi vd. (2023)	ARP	Uyarlanabilir Büyük Komşu Arama algoritması, Değişken Komşu Arama	Karın enbüyüklenmesi

Wang vd.(2024)	Dinamik ARP	Uyarlanabilir Büyük Komşu Arama algoritması	Mesafenin enküçüklenmesi
Huang vd. (2024)	ARP	Uyarlanabilir Büyük Komşu Arama algoritması	Toplam dağıtım maliyetinin enküçüklenmesi

3. PROBLEM TANIMI VE MATEMATİKSEL MODEL (PROBLEM DEFINITION AND MATHEMATICAL MODEL)

Bu çalışmada afet sonrası yardım dağıtım problemi ele alınmıştır. Toplanma noktalarının belli miktardaki talepleri mümkün olan en kısa süre içerisinde dağıtılmalıdır. Fakat afet sonrası yollarda meydana gelebilecek trafik nedeniyle düğümler arasındaki ulaşım süresi değişebilmektedir. Bu nedenle bu çalışmada seyahat süresi az, orta ve çok olmak üzere 3 senaryo olarak modele dahil edilmiştir ve her senaryonun gerçekleşme olasılığı 0,33 olarak kabul edilmiştir. Her bir düğüme olan ulaşım süresi toplamı, toplam ulaşım süresinden farklıdır. Toplam seyahat süresi enküçüklendiği zaman her düğüme olan ulaşım süresi gözden kaçırılmış olabilir. Afet sonrası her düğüme en kısa sürede ulaşılması, yardıma ihtiyacı olan insanların ihtiyaçlarının giderilmesi dikkate alındığı için hayati önem taşımaktadır. Ayrıca her bölgede yaşayan insan sayısı aynı yoğunlukta değildir ve deprem de her bölgeyi aynı derecede etkilemeyebilir. Bu nedenle bu çalışmada nüfus yoğunluğuna öncelik verilmiştir. Ulaşım süresi taleple çarpılarak öncelikli ulaşım süresi elde edilir. Öncelikli ulaşım süresinin etkisini de görmek amacıyla her düğüme ilk ulaşım süresinin enküçüklenmesi ve öncelikli ulaşım süresi toplamının enküçüklenmesi ayrı ayrı ele alınmıştır. Önerilen matematiksel model aşağıda verilmiştir.

Amaç Fonksiyonu ve Kısıtlar:

$$Enk z_1 = \sum_i q_i y_i \quad (1)$$

$$Enk z_2 = \sum_i y_i \quad (2)$$

$$\sum_j x_{0j} \leq m \quad (3)$$

$$\sum_j x_{j0} \leq m \quad (4)$$

$$\sum_i x_{ij} = 1, \forall j, j \geq 1 \quad (5)$$

$$\sum_j x_{ij} = 1, \forall i, i \geq 1 \quad (6)$$

$$\sum_j f_{ji} - \sum_j f_{ij} = q_i, \forall i, i \geq 1 \quad (7)$$

$$q_j x_{ij} \leq f_{ij} \leq (Q - q_i) x_{ij} \quad \forall i, j, i \neq j \quad (8)$$

İndisler:

i : Talep noktaları

n : Senaryo

Parametreler:

q_i : i . düğümün talebi,

t_i : i . düğümün servis süresi

d_{ijn} : i . düğümlerle j . düğüm arasındaki n . senaryo için seyahat süresi

m : araç sayısı,

Q : araç kapasitesi,

N_n : n . senaryonun gerçekleşme olasılığı,

N : senaryo sayısı

Karar Değişkenleri:

f_{ij} : i . düğümden j . düğüme giderken taşınan akış miktarı,

y_i : i . düğüme varış zamanı,

s_j : j . düğümde servisin bitiş zamanı,

x_{ij} : i . düğümden j . düğüme gidilirse 1, d.d. 0,

$$y_i - y_j + t_i + \sum_{n=1}^N d_{ijn} N_n \leq M(1 - x_{ij}), \forall i, j, i \neq j, j \geq 1 \quad (9)$$

$$y_j + t_j - s_j + \sum_{n=1}^N d_{jon} N_n \leq M(1 - x_{j0}), \forall i, j, j \geq 1 \quad (10)$$

$$f_{ij} \geq 0, \forall i, j, i \neq j \quad (11)$$

$$y_i \geq 0, \forall i, \quad (12)$$

(1) numaralı kısıtla her düğüm için öncelikli servis başlama zamanının enküçüklenmesi amaçlanır. (2) numaralı kısıtla her düğüm için servis başlama zamanının enküçüklenmesi amaçlanır. (3) numaralı kısıtla araçların seyahate depodan başlamaları ve seyahate başlayan araç sayısının araç kapasitesini geçmemesi sağlanır. (4) numaralı kısıtla seyahate başlayan araçların seyahatlerini depoda sonlandırmaları sağlanır. (5) ve (6) numaralı kısıtlarla her düğümün bir kez ziyaret edilmesi ve her düğüme tek bir düğümden ulaşılması sağlanır. (7) ve (8) numaralı kısıtlarla taşınan yük miktarı hesaplanır ve her düğümün talebinin karşılanması sağlanır. (9) ve (10) numaralı kısıtlarla her düğüme varış süresi ve toplam rota süresi hesaplanır. Bu süreler hesaplanırken iki düğüm arası karşılaşılabilecek her seyahat süresi de senaryonun gerçekleşme olasılığı ile çarpılarak Diğer kısıtlar işaret kısıtlarıdır.

4. DENEYSSEL SONUÇLAR (EXPERIMENTAL RESULTS)

Literatürde araç rotalama problemi verileri paylaşılmıştır. (<http://vrp.galagos.inf.puc-rio.br/index.php/en/>) Set A bölümünde paylaşılan verilerin talep ve uzaklık değerleri bu probleme göre uyarlanılarak kullanılmıştır. Düğümler arasındaki mesafe elde edildikten sonra hızın düşük, orta ve yüksek olması durumuna göre düğümler arası süre elde edilmiştir.

Bu bölümde ilk olarak ele alınan problemdeki amaç fonksiyonunun öncelikli servis başlama zamanı toplamı, servis başlama zamanı toplamıyla kıyaslanmıştır. 10 düğüm için hazırlanan örnekler için kesin çözüm yöntemiyle en iyi sonuç elde edilebilmiştir. En iyi çözümler GAMS.23.8.2-Cplex çözücüsü ile elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar Tablo 2’de verilmiştir. Z_1 öncelikli ulaşım süresi toplamının enküçüklenmesini amaçlayan modelin sonuçlarını, Z_2 ise ulaşım süresi toplamının enküçüklenmesini amaçlayan modelin sonuçlarını verir. Z_1 ve Z_2 amaç fonksiyonu değerlerini, S rota bitiş sürelerini verir. Diğer sütunlarda ise rota ve çözüm süresi (dakika) bilgisi yer almaktadır. 10 düğümlü örnekler için öncelikli ulaşım süresi toplamının enküçüklenmesi probleminde çözüm süresi 3 ile 15 dakika arasında değişmektedir. Ulaşım süresi toplamının enküçüklenmesinin amaçlandığı problemde ise çözüm süreleri 10 ile 36 dakika arasında değişmektedir. Toplam rota süreleri bazı örneklerde her iki amaç fonksiyonu için de aynı değeri verse bile rotalarda farklılık olabilmektedir. Örneğin 1. örnekte rota süreleri aynıdır, fakat 1.rotalarda farklılık vardır. 2. örnekte ise hem rotalar farklıdır hem de rotaların bitiş zamanları farklılık göstermektedir. Z_2 'nin enküçüklendiği örneklerde çözüm süresi Z_1 'in enküçüklendiği örneklere göre daha uzundur.

Tablo 2. 10 düğümlü Örnek Sonuçları (Results of 10 nodes)

Örnekler	Z_1	S	Rotalar	Çözüm süresi	Z_2	S	Rotalar	Çözüm süresi
1	11844	248,17 219,46	(0,3,4,7,2,8,0) (0,5,9,10,6,1,0)	11	808	248,17 219,46	(0,3,4,7,8,2,0) (0,5,9,10,6,1,0)	14
2	11945	241,23 205,92	(0,8,6,10,4,5,0) (0,9,3,7,2,1,0)	8	799	256,08 217,80	(0,8,6,10,4,2,0) (0,9,5,3,1,7,0)	13
3	8798	223,42 244,54	(0,1,9,4,5,10,0) (0,2,7,8,6,3,0)	15	890	221,44 227,38	(0,1,6,9,5,4,0) (0,2,7,8,3,10,0)	36
4	12093	233,31 243,54	(0,3,1,6,5,10,0) (0,4,8,9,7,2,0)	6	848	216,81 241,23	(0,4,10,3,1,5,0) (0,8,7,9,2,6,0)	16
5	11761	241,89 242,22	(0,2,3,9,8,1,0) (0,10,7,4,5,6,0)	11	900	262,36 224,41	(0,1,2,4,7,5,0) (0,5,8,6,7,3,0)	21

6	7547	211,01 266,84	(0,5,6,7,3,0) (0,8,1,2,4,10,9,0)	3	899	234,96 243,55	(0,1,4,2,10,9,0) (0,5,8,6,7,3,0)	28
7	9128	242,42 160,18	(0,2,10,3,4,0) (0,6,9,7,8,5,1,0)	7	732	212,52 167,64	(0,6,4,2,10,3,0) (0,9,7,5,8,1,0)	24
8	10455	222,09 238,93	(0,4,9,10,1,3,0) (0,6,9,7,8,5,1,0)	13	858	229,02 230,68	(0,2,4,9,10,3,0) (0,5,7,6,8,1,0)	23
9	9834	195,03 221,70	(0,2,6,4,8,3,0) (0,5,10,9,7,1,0)	4	792	217,15 196,69	(0,1,5,10,9,7,0) (0,2,6,8,4,3,0)	21
10	81548	229,69 191,08	(0,4,3,9,8,5,0) (0,10,6,1,2,7,0)	3	783	191,41 229,69	(0,4,3,9,8,5,0) (0,10,6,1,7,2,0)	10

15 düğümlü örnekler için elde edilen sonuçlar Tablo 3'te verilmiştir. Bu örnekler için 3 saat çalışma süresi içinde en iyi sonuç elde edilememiştir. GAP değerleri %38.9 ile %52 arasında değişmektedir.

Ulaşım süresi toplamının enküçüklenmesinin amaçlandığı örneklerde GAP değeri öncelikli ulaşım süresi toplamının enküçüklenmesinin amaçlandığı örneklere göre daha yüksek çıkmıştır.

Tablo 3. 15 düğümlü Örnek Sonuçları (Results Of 15 Nodes)

Örnekler	Z ₁	S	Rotalar	GAP	Z ₂	S	Rotalar	GAP
1	15785	228,04 212,86 235,3	(0,4,7,2,13,3,0) (0,5,15,1,8,14,0) (0,12,9,10,11,6,0)	%42	1211	230,68 212,86 226,38	(0,3,14,8,2,13,0) (0,5,4,7,15,1,0) (0,12,9,10,11,6,0)	%47
2	16522	221,23 211,20 231,21	(0,3,7,15,2,0) (0,6,13,10,4,11,0) (0,8,9,14,5,1,12,0)	%45	1169	241,56 203,28 232,98	(0,8,6,11,10,4,0) (0,9,14,3,7,15,0) (0,13,5,1,12,2,0)	%46
3	17617	252,00 203,94 230,15	(0,1,2,14,9,5,3,0) (0,12,8,4,10,0) (0,13,11,15,7,6,0)	%45	1191	239,13 216,48 219,59	(0,1,14,6,9,5,0) (0,11,15,2,7,8,4,0) (0,13,12,3,10,0)	%57
4	15147	253,77 230,67 228,04	(0,3,1,6,7,2,0) (0,4,13,10,5,11,0) (0,14,8,15,9,12,0)	%47	1239	215,49 228,69 229,69	(0,4,11,8,15,6,0) (0,13,10,3,1,5,0) (0,14,7,9,2,12,0)	%52
5	14901	225,06 242,55 219,78	(0,10,7,4,5,13,0) (0,11,8,9,3,15,0) (0,12,2,14,6,1,0)	%40	1266	267,50 220,44 195,16	(0,1,12,2,14,0) (0,6,10,13,4,7,5,0) (0,11,8,15,3,9,0)	%48
6	11940	227,37 248,50 215,17	(0,1,4,12,10,9,0) (0,5,6,7,11,14,0) (0,8,2,13,15,3,0)	%37	1341	227,37 223,75 246,85	(0,1,4,9,10,12,0) (0,5,14,6,11,7,0) (0,8,2,13,15,3,0)	%51
7	15382	237,27 188,76 232,32	(0,2,15,8,14,1,0) (0,3,10,13,11,12,0) (0,6,9,7,5,4,0)	%41	1182	207,58 223,41 196,68	(0,3,10,11,12,13,0) (0,6,4,2,5,14,0) (0,9,7,15,1,8,0)	%49
8	14816	217,47 230,01 215,83	(0,4,9,10,13,2,0) (0,5,7,8,6,12,0) (0,11,1,15,14,3,0)	%47	1275	212,86 215,83 230,01	(0,2,4,13,9,10,0) (0,5,7,8,6,12,0) (0,11,1,15,3,14,0)	%51
9	14873	241,56 223,08 174,58	(0,2,6,4,11,8,0) (0,5,15,10,1,13,0) (0,9,12,14,7,3,0)	%38	1153	208,24 209,89 201,30	(0,2,11,6,8,4,0) (0,13,10,9,12,3,0) (0,15,1,5,7,14,0)	%49
10	15774	244,20 191,86 221,97	(0,6,1,12,2,7,14,0) (0,10,4,3,11,5,0) (0,13,15,9,8,0)	%42	1235	220,11 229,36 233,32	(0,1,14,4,15,3,0) (0,6,12,7,2,11,0) (0,10,13,9,8,5,0)	%51

Düğüm sayısının artması en iyi çözüme ulaşma süresini de artırmaktadır. Bu yüzden daha büyük boyutlu örnekler için sezgisel bir algoritmaya ihtiyaç duyulmuştur. İngilizce adıyla Adaptive Large Neighborhood Search (ALNS) olan Uyarlanabilir Büyük Komşu Arama (UBKA)

algoritması bu problemin çözümü için kullanılmıştır. UBKA algoritması Python ile kodlanmıştır. İlk olarak 10 ve 15 düğümlü örnekler için kesin çözüm yöntemiyle ve UBKA ile elde edilen sonuçlar kıyaslanmıştır. Sonrasında 20, 30 ve

40 düğümlü örnekler için elde edilen sonuçlar verilmiştir.

4.1. Uyarlanabilir Büyük Komşu Arama Algoritması (Adaptive Large Neighborhood Search Algorithm)

UBKA algoritması Coelho vd. (2012) ve Aksent vd. (2014)'nin uyguladığı şekliyle dört ana bileşenden oluşmaktadır.

A) Komşuluk yapıları: Komşu çözüme geçmek için 6 farklı komşuluk yapısı kullanılmıştır. Komşuluk yapıları şekil 1'de verilmiştir.

Interoute 1-0 move: Rassal olarak iki rota seçilir. Seçilen rotalardan rassal olarak iki düğüm seçilir ve seçilen düğümlerden biri seçilen diğer düğümden sonraki düğüm olarak o rotaya eklenir.

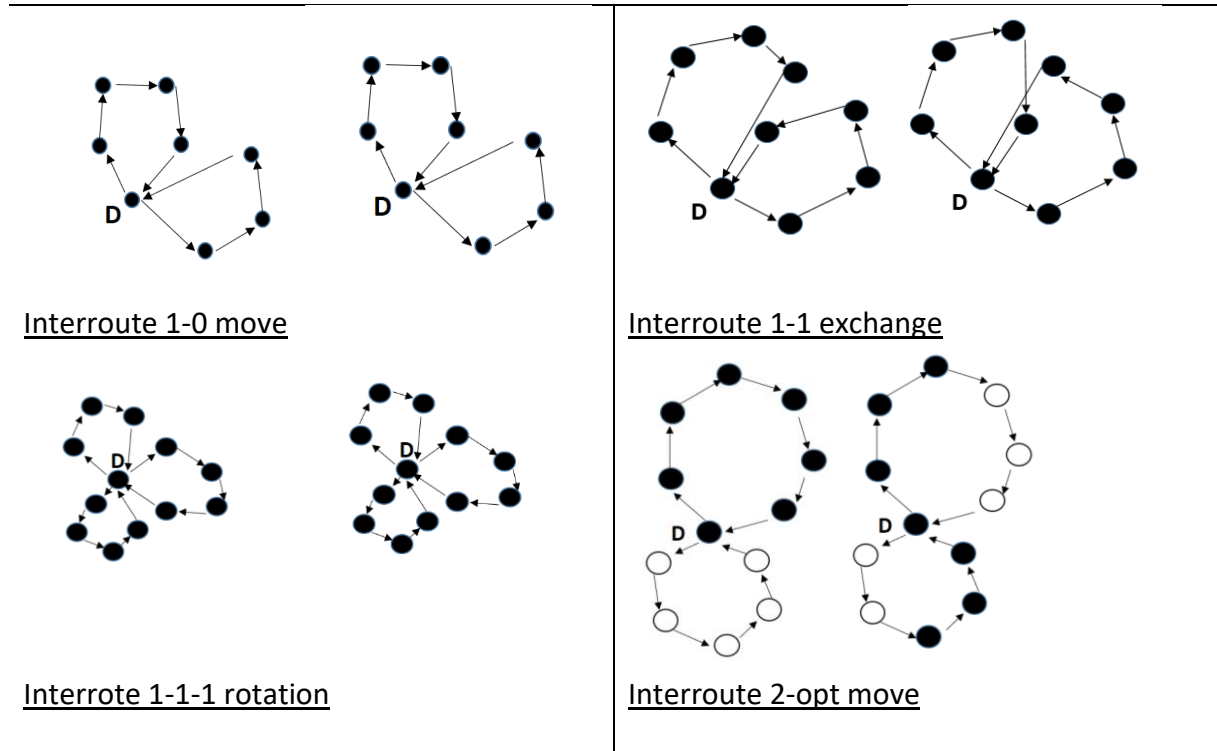
Interoute 1-1 exchange: Rassal olarak iki rota seçilir. Seçilen rotalardan rassal olarak iki düğüm seçilir ve karşılıklı olarak yer değiştirilir.

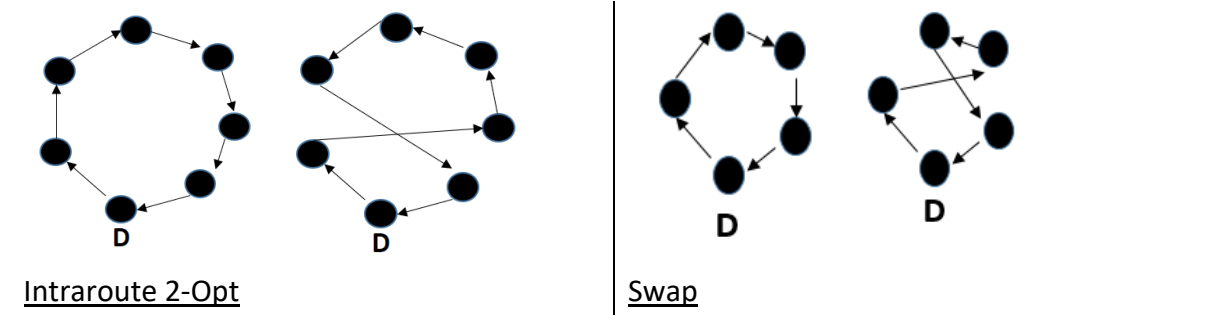
Interrote 1-1-1 rotation: Rassal olarak üç rota seçilir. Seçilen rotalardan rassal olarak üç düğüm seçilir ve bu düğümler yer değiştirilir.

Swap: Rassal olarak bir rota seçilir. Seçilen rotadan rassal olarak bir düğüm seçilir ve seçilen bu düğümden kendinden sonra gelen düğümlerle yer değiştirir.

Intraroute 2-Opt: Rassal olarak bir rota seçilir. Seçilen bu rotadan rassal olarak iki düğüm seçilir ve bu düğümler arasındaki düğümler ters çevrilerek rotaya eklenir. Örneğin rota 0-1-2-3-4-5-6-0 olsun. 2 ve 5 numaralı düğümler rassal olarak seçilmiş olsun. Değişikliğin ardından elde edilen yeni rota 0-1-5-4-3-2-6-0 olur.

Interoute 2-opt move: Rassal olarak iki rota seçilir. Seçilen bu rotalardan rassal olarak iki düğüm seçilir. Seçilen düğümlerden sonraki tüm düğümler rotalar arasında karşılıklı olarak yer değiştirilir. Örneğin ilk rota 0-1-2-3-4-5-0, ikinci rota 0-6-7-8-9-10-0 olsun. Rassal olarak 2 ve 8. Düğümler seçilmiş olsun. Değişikliğin ardından elde edilen yeni rotalar 0-1-2-9-10-0, 0-6-7-8-3-4-5-0 şeklinde oluşur.





Şekil 1. Komşuluk yapıları (Neighborhood Structures)

B) Uyarlanabilir arama motoru: Belli sayıdaki her bir ardıştırma sonrasında komşuluk arama prosedürü rulet tekeri mekanizmasına göre çalışır. Tekerde her bir komşuluğun bir ağırlığı vardır ve komşuluğun seçilme olasılığı bu ağırlığa dayanır. Belli sayıdaki ardıştırma sayısı bitiminde o komşuluk yapısının geçmiş performansına göre yeni çözümdeki ağırlığı belirlenir. Burada w_v , v . komşuluk yapısının ağırlığını belirtir. Komşuluk yapısının seçilme olasılığı $w_v / \sum_{k=1}^{NoN} w_k$ olur. ($\sum_{k=1}^{NoN} w_k$ (NoN: Algoritmada belirlenen komşuluk yapısı sayısı))

C) Uyarlanabilir ağırlık ayarı: Başlangıçta her komşuluk yapısı eşit ağırlığa ve eşit seçilme olasılığına sahiptir. Algoritmadaki ardıştırma sayısı, Ω olarak belirtilen eşit sayıdaki ardıştırmaya bölünür. Ω adet ardıştırma bittiğinde her komşuluk yapısının biten aşamadaki performansına göre yeni çözümdeki ağırlığı güncellenir. v . komşuluk yapısının performansı π_v olarak belirtilir. Her Ω adet ardıştırma bittiğinde her komşuluk yapısının ağırlığı aşağıdaki prosedüre göre belirlenir. Burada $\alpha_1 > \alpha_2 > \alpha_3$ koşulunu sağlamak üzere $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ tam sayı, x_{new} elde edilen yeni çözümü, x_{best} elde edilen en iyi çözümü, x_{now} şimdiki çözümü ifade eder. Enküçükleme amaçlı UBKA algoritmasının sözde kodu aşağıda verilmiştir.

```

if  $Z_{new} < Z_{best}$ :
     $\pi_v: \pi_v + \alpha_1$ 
else if  $Z_{new} < Z_{now}$ :
     $\pi_v: \pi_v + \alpha_2$ 
else if  $Z_{new}$  is accepted as the next current solution
by the SA criterion:
     $\pi_v: \pi_v + \alpha_3$ 
else:
     $\pi_v: \pi_v$ 
end if

```

Bu işlemin amacı daha iyi çözümler veren komşuluk yapısının seçilme olasılığını artırmaktır. Belli sayıdaki her ardıştırma bitiminde her komşuluk yapısının ağırlığı aşağıdaki kurala göre güncellenir.

$$w_{v+1} = \begin{cases} w_{vj} & \text{if } o_{vj} = 0 \\ (1 - \eta)w_{vj} + \frac{\eta\pi_v}{o_{vj}} & \text{diğer durumlarda} \end{cases}$$

o_{vj} v . komşuluk yapısının j . aşamada kaç defa seçildiğini, η ise komşuluğun şimdiki ağırlığını etkileyen kontrol faktörünü belirtir. Bu algoritmada her bir aşamanın ardıştırma sayısı düğüm sayısına göre değiştirilmiştir. $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ ağırlıkları ise 10,5 ve 2 olarak ve kontrol faktörü η , 0,3 olarak alınmıştır.

D) Durdurma Kriteri

Durdurma kriteri belirlenen ardıştırma sayısına ulaşmak olarak belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlarda daha iyi bir çözüm elde edilmediği görüldüğünde ardıştırma sayısı daha fazla artırılmamıştır.

Tablo 4'te Kesin çözüm yöntemi (KÇY) ve UBKA algoritmasıyla elde edilen sonuçlar verilmiştir. Sonuçlara bakıldığında 10 düğümlü tüm örneklerde iki yöntemle de en iyi sonucun elde edildiği görülmüştür. 15 düğümlü örneklere bakıldığında 7. Örnekte UBKA algoritmasıyla elde edilen sonucun GAMS paket programının 3 saat çalıştıktan sonra verdiği sonuçtan daha iyi olduğu görülmüştür. Diğer örneklerde iki yöntemle de aynı değerlerin elde edildiği görülmüştür. UBKA algoritması her düğüm sayısı için 10 kere çalıştırılmış ve elde edilen en iyi sonuç verilmiştir.

Tablo 4. KÇY ve UBKA sonuçlarının karşılaştırılması (Comparison of Results)

Örnekler	10 Düğüm			15 Düğüm		
	KÇY	UBKA	GAP (%)	KÇY	UBKA	GAP (%)
1	11844	11844	0	15785	15785	0
2	11945	11945	0	16522	16522	0
3	8798	8798	0	17617	17617	0
4	12093	12093	0	15147	15147	0
5	11761	11761	0	14901	14901	0
6	7547	7547	0	11940	11940	0
7	9128	9128	0	15382	15253	0,84
8	10455	10455	0	14816	14816	0
9	9834	9834	0	14873	14873	0
10	81548	81548	0	15774	15774	0

Algoritmanın çözüm süresi 10 döngü için 10 düğümlü örnekler için 30 saniye, 15 düğüm için 50 saniyedir. 20 düğüm için 100 saniye, 30 düğüm için 160 saniye, 40 düğüm için 210 saniye olarak elde edilmiştir.

20 düğümlü örnekler için 3 saatlik çalışma süresi içerisinde en iyi çözüm elde edilememiştir ve yüksek GAP değerleri elde edilmiştir. Bu nedenle daha büyük boyutlu örnekler için KÇY yerine sadece UBKA algoritması ile çözüm elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar Tablo 5'te verilmiştir.

Tablo 5. Orta Büyüklükteki Örnekler (Middle Scale Results)

Örnekler	20	30	40	Örnekler	20	30	40
1	20315	28592	36008	6	16927	25384	30321
2	23499	32339	39240	7	19250	30174	44257
3	21837	35109	44109	8	18462	28854	52757
4	20460	33351	44540	9	15724	24913	39758
5	19646	29127	38457	10	21673	28869	40188

Algoritma için çözüm süreleri 20 düğüm için 100 saniye, 30 düğüm için 160 saniye, 40 düğüm için

210 saniye olarak elde edilmiştir. Düğüm sayısı arttıkça deneme sayısı da artırılmıştır.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER (CONCLUSION AND RECOMMENDATIONS)

Araç rotalama probleminin gerçek hayat problemlerinin birçoğunda uygulaması bulunmaktadır. Afet sonrası son kilometre yardım dağıtım problemi de araç rotalama probleminin bir çeşididir. Deprem sonrası insanların deprem bölgesinden uzaklaşmak istemeleri ve yakınlarına ulaşmak istemeleri nedeniyle yollarda trafik meydana gelmektedir. Trafik de ulaşım süresini etkilemektedir. Bu çalışmada trafik durumunun az, orta ve çok olduğu üç durum için ulaşım süreleri stokastik parametre olarak ele alınmıştır. Küçük boyutlu örneklerde kesin çözüm yöntemiyle eniyi çözüm elde edilebilirken problem boyutu

büyüdükçe sezgisel algoritmalara ihtiyaç duyulmuştur. Uyarlanabilir büyük komşu arama algoritması ile elde edilen sonuçlar küçük boyutlu örneklerde kesin çözüm yöntemiyle kıyaslanmıştır ve iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. UBKA algoritması orta boyutlu örneklerin çözümü için uygulandığında kısa sürede iyi sonuçlar elde edilebilmiştir.

İleriki çalışmalarda talep de stokastik bir parametre olarak modele dahil edilebilir. Senaryo sayısı artırılabilir veya düğüm sayısı artırılabilir. Problemin çözümü için farklı matsezgisel veya

metasezgisel algoritmalar kullanılarak çözüm kaliteleri karşılaştırılabilir.

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)

İlknur TÜKENMEZ: Deneyleri yapmış, sonuçlarını analiz etmiş ve maklenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

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

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

There is no conflict of interest in this study.

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

[1] Bozorgi-Amiri, A., Khorsi, M., (2016), A dynamic multi-objective location-routing model for relief logistic planning under uncertainty on demand, travel time, and cost parameters. *Int J Manuf Technol* 85: 1633-1648, DOI 10.1007/s00170-015-7923-3

[2] Liu, H., Sun, Y., Pan, N., Li, Y., An, Y., Pan, D., (2022), Study on the optimization of urban emergency supplies distribution paths for epidemic outbreaks, *Computers and Operations Research*, 146 105912, <https://doi.org/10.1016/j.cor.2022.105912>

[3] Zhang, Y., Liu, J., (2021), Emerceny logistics scheduling under uncertain transportation time using online optimization methods, *IEEE Access*, Vol. 9, DOI 10.1109/ACCESS.2021.3061454

[4] Mohammadi, S., Darestani, S., A., Vahdani, B., Alinezhad, A., (2020). A robust neutrosophic fuzzy-based approach to integrate reliable facility location

and routing decisions for disaster relief under fairness and aftershocks concerns. *Computers&Industrial Engineering*. 148, 106734

[5] Molina, J., Lopez-Sanchez, A.,D., Hernandez-Diaz, A.,G., Martinez-Salazar, I., (2018). A multi-start algorithm with intelligent neighborhood selection for solving multi-objective humanitarian vehicle routing problem. *Journal of Heuristics*, 24:111-133

[6] Penna, H., V., P., Santos, A., C., Prins, C., (2017), Vehicle routing problems for last mile distribution after majör disaster, *Journal of the Operational Research Society*, 69:8, 1254-1268, <https://doi.org/10.1080/01605682.2017.1390534>

[7] Nodoust, S., Pishvae, M., S., Seyedhosseini, S., M., (2021), Vehicle routing problem for humanitarian relief distribution under hybrid uncertainty, *Kybernetes*, Vol. 52, No 4, 1503-1527, <https://doi.org/10.1108/K-09-2021-0839>

[8] Anuar, W., K., Lee, S., L., Pickl, S., (2022), Benchmark dataset for multi depot vehicle routing problem with road capacity and damage road consideration for humanitarian operation in critical supply delivery, *Data in Brief*, 41 107901, <https://doi.org/10.1016/j.dib.2022.107901>

[9] Chang, Kuo-Hao, Hsiung, T-Y, Chang, T-Y, (2022), Multi-commodity distribution under uncertainty in disaster response phase:Model, solution method, and an empirical study, *European Journal of Operational research*, 303 857-876, <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2022.02.055>

[10] Bruni, M., E., Khodaparasti, S., Beraldi, P., (2020), The selective minimum latency problem under travel time variability: An application to post-disaster assessment operations. *Omega*, 102154, <https://doi.org/10.1016/j.omega.2019.102154>

[11] Ahmadi, M., Seifi, A., Tootooni, B., (2015). A humanitarian logistics model for disaster relief operation considering network failure and standard relief time: A case study on Francisco district, *Transportation Research Part E*, 75 145-463

- [12] Elçi, N., Noyan, N., (2018), A chance-constrained two-stage stochastic programming model for humanitarian relief network design, *Transportation Research Part B* 108, 55-83, <https://doi.org/10.1016/j.trb.2017.12.002>
- [13] Uslu, A., Çetinkaya, C., İşleyen, S., K., (2017), Vehicle routing problem in post-disaster humanitarian relief logistics : a case study in Ankara, *Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences*, 35 (3), 481-499
- [14] Barbarasoğlu, G., Arda, Y., (2004), A two-stage stochastic programming framework for transportation planning in disaster response, *Journal of the Operational research Society* 55, 43-53. <https://doi.org/10.1057/palgrave.jors.2601652>
- [15] Li, Y., Chung, S., H., (2018), Disaster relief routing under uncertainty: A robust optimisation approach, *IIE Transactions*, 51:8, 869-886, <https://doi.org/10.1080/24725854.2018.1450540>
- [16] Che, Y., Zhang, Z., (2023), An integer L-shaped algorithm for vehicle routing problem with simultaneous delivery and stochastic pickup, *Computers&Operations Research* 154, 106201
- [17] Wolgemuth, S., Oloruntoba, R., Clausen, U., (2012), Dynamic vehicle routing with anticipation in disaster relief, *Socio-Economic Planning Sciences* 46, 261-271, <http://dx.doi.org/10.1016/j.seps.2012.06.001>
- [18] Maghfiroh, M., F., N., Hanaoka, S., (2018), Dynamic truck and trailer routing problem for last mile distribution in disaster response, *Journal of humanitarian logistics and supply chain management*, Vol 8, No2, 252-278, DOI 10.1108/JHLSCM-10-2017-0050
- [19] Mulumba, T., Diabat, A., (2024), The drone-assisted pickup and delivery problem: An adaptive large neighborhood search metaheuristic, *Computers&Operations Research*, 161 106435
- [20] Allahviranloo, M., Chow, J., Y., J., Recker, W., W., (2014), Selective vehicle routing problems under uncertainty without recourse, *Transportation Research Part E*, 62, 68-88, <http://dx.doi.org/10.1016/j.tre.2013.12.004>
- [21] Çetin Kaya, Y., Kaya, M., Akdağ, M., (2021), Route optimization for medication delivery of Covid-19 Patients with drones. *Gazi University Journal of Science, Part C: Design and Technology*, 9(3): 478-491
- [22] Anuar, W., H., Lee, L., S., Pickl, S., Seow, Hsin-Vonn, (2021), A vehicle routing optimisation in humanitarian operations: A survey on modelling and optimisation approaches, *Applied Sciences* 11,667, <https://doi.org/10.3390/app11020667>
- [23] Yanez-Sandivari, L., Cortes, C., E., Rey, P., A., (2021), Humanitarian logistics and emergencies management: New perspectives o a sociotechnical problem and its optimization approach management, *International Journal of Disaster Risk reduction*. 52 101952, <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2020.101952>
- [24] Shi, Y., Liu, W., Zhou, Y., (2023) An adaptive large neighborhood search based approach for the vehicle routing with zone-based pricing, *Engineering Applications of Artificial Intelligence* 124 106506
- [25] Wang, S., Sun, W., Huang, M., (2024), An adaptive large neighborhood search for the multi-depot vehicle routing problem with time windows, *Computers& Industrial Engineering* 191, 110122
- [26] Huang, M., Liu, M., Kuang, H., (2024), Vehicle routing problem for fresh products distribution considering customer satisfaction through adaptive large neighborhood search, *Computers& Industrial Engineering* 190, 110022

Galvaniz Kaplı 3. Nesil Çeliklerde Nokta Direnç Kaynağı Sonrası Sıvı Metal Kırılma Oluşumu

Tanya A. Başer^{1*}, Mehtap Hıdıroğlu¹, Nizamettin Kahraman²

¹Coşkunöz Kalıp Makina Ar-Ge Merkezi, Bursa, TÜRKİYE

²Karabük Üniversitesi, İmalat Mühendisliği, Karabük, TÜRKİYE

Article Info

Review article
Received: 13/08/2024
Revision: 11/09/2024
Accepted: 20/09/2024

Keywords

3rd generation steels
Liquid-metal embrittlement
Galvanized coating
Resistance spot welding

Makale Bilgisi

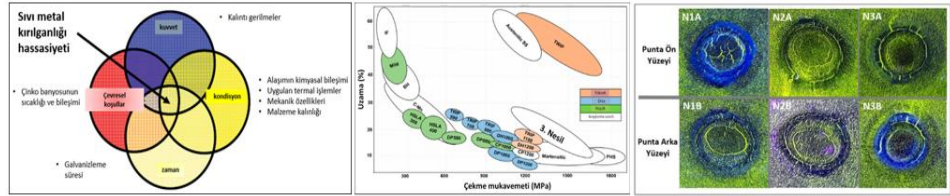
Derleme makalesi
Başvuru: 13/08/2024
Düzeltilme: 11/09/2024
Kabul: 20/09/2024

Anahtar Kelimeler

3. nesil çelikler
Sıvı metal kırılma
Galvaniz kaplama
Nokta direnç kaynağı

Grafik Özet (Graphical/Tabular Abstract)

Çalışmada 3. nesil çeliklerin mekanik özelliklerinin ve mikroyapısının SMK (sıvı metal kırılma) hassasiyetine etkileri anlatılmış olup, aynı zamanda farklı galvaniz kaplama türlerinin SMK oluşumuna etkileri sunulmuştur. Nokta direnç kaynağı sırasında SMK hassasiyetinin olası mekanizmaları tartışılmış ve oluşumunu azaltmak için uygun yöntemler önerilmiştir / In the study, the effects of the mechanical properties and microstructure of the 3rd generation steels on the LME (liquid metal embrittlement) sensitivity are explained. The effects of different galvanized coating types on the LME formation are also presented. Possible mechanisms of LME sensitivity during resistance spot welding (RSW) are discussed and suitable methods to minimize its occurrence are suggested.



Şekil A: Galvaniz kaplı 3. nesil çeliklerde SMK hassasiyeti ve oluşumu / Figure A: LME sensitivity and occurrence in galvanized coated 3rd generation steels

Önemli noktalar (Highlights)

- Galvaniz kaplı 3. nesil çeliklerde SMK oluşumu ve hassasiyeti ele alındı / LME occurrence in galvanized coated 3rd generation steels were studied.
- Galvaniz kaplı çelikler SMK hassasiyetine göre sınıflandırıldı / Galvanized coated steels were classified according to LME sensitivity.
- Galvaniz kaplama türüne göre SMK oluşumu raporlandı / LME sensitivity depending on galvanized coating type was reported.

Amaç (Aim): Bu çalışmanın amacı; nokta direnç kaynağı sırasında SMK hassasiyetinin olası mekanizmaları tartışılması ve oluşumunu azaltmak için uygun yöntemlerin incelenmesidir / The aim of this study is to discuss possible mechanisms of LME sensitivity during spot resistance welding and to investigate proper methods in order to reduce its occurrence.




Özgünlük (Originality): Nokta direnç kaynağı sonrasında oluşan SMK hassasiyeti üzerine yapılan literatür incelemelerinin derlemesi sunulmuştur / A review of the literature survey on LME sensitivity after spot resistance welding is presented.

Bulgular (Results): Çalışmada 3. nesil çelik grubunun mekanik özelliklerinin ve mikroyapısının SMK hassasiyetine etkileri ve aynı zamanda farklı galvaniz kaplama türlerinin SMK oluşumuna etkileri sunulmuştur. Son olarak, nokta direnç kaynağı sırasında SMK hassasiyetinin olası mekanizmaları tartışılmış ve oluşumunu bastırmak için uygun yöntemler önerilmiştir / The effects of the mechanical properties and microstructure of the 3rd generation steel group on the LME sensitivity are explained, and the effects of different galvanized coating types on the LME formation are also presented. Finally, possible mechanisms of LME sensitivity during RSW are discussed and suitable methods to suppress its occurrence are suggested.

Sonuç (Conclusion) NDK sonrasında oluşan SMK hassasiyeti üzerine yapılan literatür incelemelerinin derlemesi sunulmuş olup, bu çalışmalardan elde edilen sonuçlar raporlanmıştır / A review of the literature on LME sensitivity after RSW is presented and the results of these studies are reported.



Galvaniz Kaplı 3. Nesil Çeliklerde Nokta Direnç Kaynağı Sonrası Sıvı Metal Kırılma Oluşumu

Tanya A. Başer^{1*} , Mehtap Hıdıroğlu¹ , Nizamettin Kahraman² 

¹Coşkunöz Kalıp Makina Ar-Ge Merkezi, Bursa, TÜRKİYE

²Karabük Üniversitesi, İmalat Mühendisliği, Karabük, TÜRKİYE

Makale Bilgisi

Derleme makalesi
Başvuru: 13/08/2024
Düzeltilme: 11/09/2024
Kabul: 20/09/2024

Anahtar Kelimeler

3. nesil çelikler
Sıvı metal kırılma
Galvaniz kaplama
Nokta direnç kaynağı

Öz

3. nesil çelikler, ağırlık azaltma çalışmaları kapsamında son yıllarda otomotiv endüstrisinin uygulamalarında büyük bir öneme sahiptir. Özel üretim yöntemine sahip 3. nesil çeliklerin şekillendirme problemleri ile birlikte kaynaklanabilirliği de yoğun olarak çalışılmaktadır. Genellikle galvaniz kaplamalı olarak tercih edilen bu çeliklerin nokta direnç kaynağı (NDK) sırasında, galvaniz kaplamada yer alan çinko (Zn) elementinin ergime derecesinin düşük olması nedeniyle sıvı faza geçmektedir. Bu durum ergimiş Zn atomlarının kaynak sonrası ana malzemeye difüzyonu ile sıvı metal kırılma oluşumuna (SMK) neden olmaktadır. Kaynak bölgesinde meydana gelen SMK hassasiyeti, ana malzemede mikro çatlaklara sebebiyet verebilmektedir. Ayrıca SMK kaynak bölgesinin mekanik özelliklerini de olumsuz yönde etkilemektedir. Bu çalışma, nokta direnç kaynağı sonrasında oluşan SMK hassasiyeti üzerine yapılan literatür incelemelerinin derlemesini içermektedir. Çalışmada 3. nesil çelik grubunun mekanik özelliklerinin ve mikroyapısının SMK hassasiyetine etkileri anlatılmış olup, aynı zamanda farklı galvaniz kaplama türlerinin SMK oluşumuna etkileri sunulmuştur. Son olarak, nokta direnç kaynağı sırasında SMK hassasiyetinin olası mekanizmaları tartışılmış ve oluşumunu bastırmak için uygun yöntemler önerilmiştir.

Liquid Metal Embrittlement Formation in Galvanized 3rd Generation Steel After Resistance Spot Welding

Article Info

Review article
Received: 13/08/2024
Revision: 11/09/2024
Accepted: 20/09/2024

Keywords

3rd generation steels
Liquid-metal embrittlement
Galvanized coating
Resistance spot welding

Abstract

3rd generation steels have been of great importance in the applications of the automotive industry in recent years within the scope of weight reduction efforts. The weldability of 3rd Generation steels with special production methods, along with their forming problems, is being studied intensively. During resistance spot welding (RSW) of these steels, which are generally preferred as galvanized coated, they pass into the liquid phase due to the low melting temperature of the zinc (Zn) element in the galvanized coating. This situation causes liquid metal embrittlement (LME) with the diffusion of molten Zn atoms into the main material after welding. LME sensitivity occurring in the welding area can cause micro cracks in the main material. In addition, LME negatively affects the mechanical properties of the weld area. This study includes a compilation of literature reviews on LME sensitivity that occurs after spot resistance welding. In the study, the effects of the mechanical properties and microstructure of the 3rd generation steel group on the LME sensitivity are explained, and the effects of different galvanized coating types on the LME formation are also presented. Finally, possible mechanisms of LME sensitivity during RSW are discussed and suitable methods to suppress its occurrence are suggested.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Otomotiv endüstrisi ürünlerinin kalitesinden ödün vermeden maliyetleri düşürmeye çalışırken, aynı zamanda da konfordan vazgeçmeden, araç yakıt tüketimini azaltmayı hedeflemektedir. İleri yüksek mukavemetli çeliklerin (İYMÇ) kullanımı yoluyla ağırlık azaltma çalışmaları, yakıt sarfiyatını

azaltmak ve zararlı CO₂ emisyonunu düşürmek için otomotiv endüstrisinde önemli bir rol oynamakta [1] ve son zamanlarda bu malzemelerin kaynaklanabilirliğine odaklanılmaktadır [2]. İYMÇ kategorisinde değerlendirilen 3. nesil çelikler, yüksek dayanım ve iyi şekillenebilirlik özellikleriyle otomotiv endüstrisinde soğuk şekillendirme uygulamalarında yerini almıştır [3].

Bu çelikler, A ve B sütunu, tavan başlığı, tavan rayı, kapı çarpma kirişi, koltuk ve alt gövde tünel takviyeleri gibi otomobil yapısal güvenlik bileşenlerini oluşturmak için kullanılmaktadır [4].

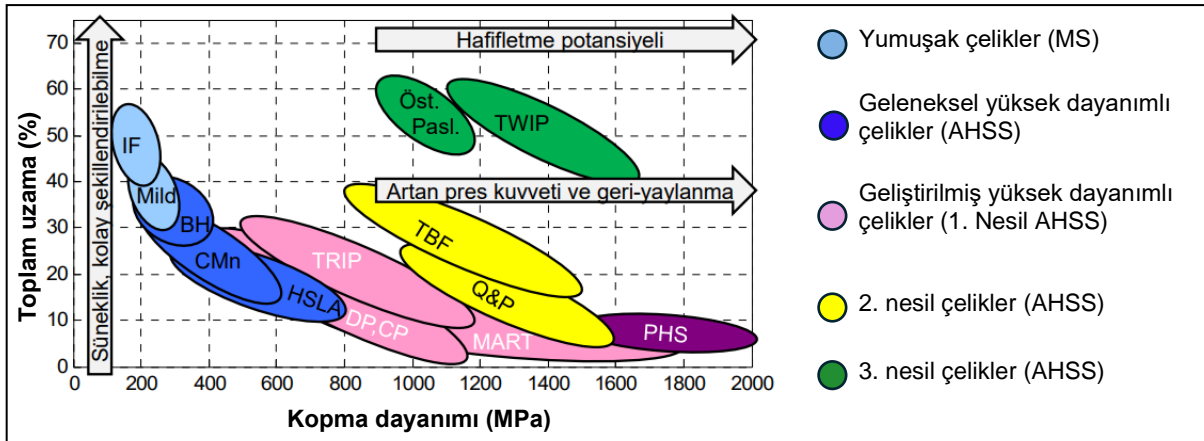
3. nesil çelikler korozyon direncini arttırmak için kaplama işlemine tabi tutulurlar. Yeni nesil kaplama uygulamaları, düşük maliyetleri nedeniyle genel olarak sıcak daldırma galvaniz kaplama olarak tercih edilmektedir. NDK sırasında galvaniz kaplamada bulunan ergimiş Zn atomlarının, çelik ana malzeme yüzeyinde tane sınırlarına nüfuziyeti gerçekleşebilir. NDK sonrası katılaştırma sırasında Zn'nin ana malzemenin tane sınırlarına nüfuziyeti ile çatlaklar oluşabilir [5]. SMK olarak adlandırılan bu çatlak oluşumları 1870 yılından beri bilinmektedir. Ancak, galvaniz kaplı 3. nesil çeliklerde NDK sırasında oluşan SMK yeni bir bulgudur ve bu alanda sınırlı miktarda araştırma çalışması yürütülmüştür [6].

Bu çalışmada, NDK sırasında 3. nesil galvaniz kaplı çeliklerde meydana gelen SMK hassasiyetini anlamak için literatürde yapılan çalışmalar derlenmiştir. İlk olarak 3. nesil çelikler ve otomotiv uygulamaları ile bu malzemelerin en sık birleştirildiği kaynak yöntemleri sunulmuş, devamında 3. nesil çeliklerde SMK hassasiyetinin

oluşum mekanizmaları tanıtılmıştır. Ayrıca SMK çatlaklarının makroskopik ve mikroskopik özellikleri ve NDK sırasında oluşabilecek çatlak konumları hakkında bilgi verilmiştir. Ve son olarak farklı İYMÇ'lerin SMK çatlak oluşumuna duyarlılığı, farklı galvaniz kaplama türlerinin SMK oluşumuna etkileri ve NDK parametrelerinin SMK duyarlılığı üzerindeki etkileri tartışılmıştır.

2. 3. NESİL ÇELİKLER (3RD GENERATION STEELS)

Otomotiv uygulamalarında çelik alaşımlarının kullanım oranları, özellikle B ve C segment araç gövdelerinde diğer hafif alaşımlara göre daha yüksektir. Ağırlık azaltma çalışmaları kapsamında çevresel gereklilikler ve regülasyonlar otomotiv endüstrisinden beklentiyi yükseltmiştir. Bunun nedeni CO2 emisyon oranının %20'sinin araçlardan kaynaklanmasıdır. Sera gazlarının %80 oranının sorumlusu olarak yine otomotiv üreticileri gösterilmektedir [7]. Çelik üreticileri hafif alaşımlar ile rekabeti önemsemekte ve araç hafifletme çalışmaları için düşük yoğunluklu ve yüksek mukavemetli çelik alaşımı geliştirme çalışmaları yapmaktadır. Şekil 1'de gösterilen muz diyagramı olarak adlandırılan görselde çeşitli çelik sınıflarının dayanım-toplam uzama eğrisi gösterilmektedir [8].



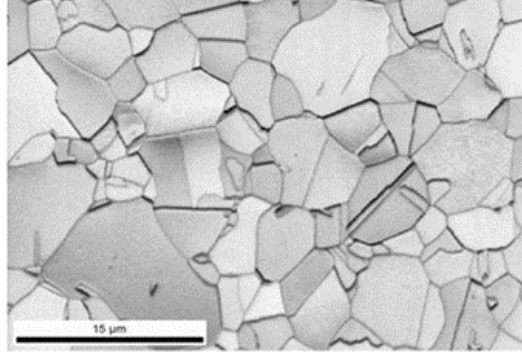
Şekil 1. Çeşitli çelik sınıflarının dayanım-toplam uzama eğrisi [8] (Strength-elongation curve of various steel grades)

3. nesil çelikler, İYMÇ çelikler grubunda yer almaktadır. 2. nesil çelik alaşımları yüksek dayanım ve iyi şekillenebilirlik özellikleri ile (Şekil 1) otomotiv endüstrisinde büyük önem taşımaya rağmen kullanım alanları oldukça kısıtlı kalmıştır. 2. nesil olan TWIP çeliğin mikroyapısı tamamen östenit faz içermektedir (Şekil 2). Yüzey merkezli kübik kristal yapısına sahip östenit faz nedeniyle çok iyi şekillenebilirlik özelliği göstermektedir. Kimyasal bileşimindeki mangan (Mn) elementi ilavesi de (% 15–25 Mn) form vermede kolaylık sağlamaktadır. Ancak TWIP çeliklerinin yüksek

Mn içermesi nedeniyle kaynaklanabilirlikleri oldukça zayıftır. Oda sıcaklığındaki bekleme sürelerinde ise malzeme yüzeylerinde sonradan kırılma denilen oluşum gözlenmektedir. Bu çelikler kaynaklanabilirliğinin kötü olmasının yanında yüksek maliyetlidir. Stok koşulları da göz önüne alındığında TWIP çeliğinin otomotiv sektöründe kullanımı kısıtlı kalmıştır [8]. Tablo 1'de İYMÇ grubundaki 2. nesil TWIP çeliğinin otomotiv endüstrisinde tercih edildiği alaşımların literatürden elde edilen çekme testi sonuçları verilmiştir [9,10]. Şekil 1'de gösterilen 3. nesil çelik grubunun

geliştirilmesindeki en önemli motivasyon, 2. nesil çelikler gibi yüksek mekanik özelliklere sahip aynı zamanda 1. nesil çeliklere yakın bir maliyete sahip çelik sınıfının otomotiv uygulamalarında kullanımını sağlamaktır. Q&P (Quenched ve partitioning çelikleri) ve TBF (Dönüşüm etkili plastisite katkılı bey nitrik ferritik çelikler) sınıfı çelikler bir çok çelik firması tarafından üretilmektedir. Nanosteel sınıfı çelikler için Ar-Ge, patent vb. çalışmalar halen devam etmektedir. Nanosteel, mevcut durumda ticarileşmiş bir ürün

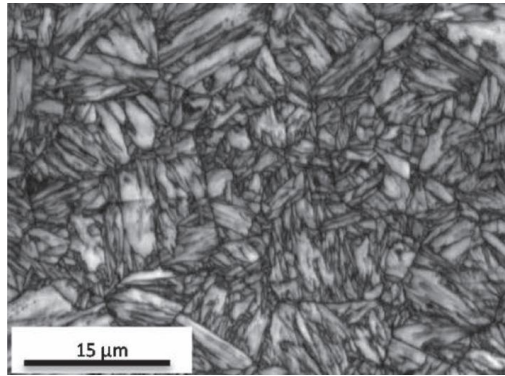
değildir [11]. 3. nesil çelikler, 2. nesil çelik grubuna göre daha düşük oranlarda Mn içerdikleri için (< %10) kaynak kabiliyetleri daha iyidir [11,12]. 3. nesil çelik grubunda olan Q&P çelikleri 1180 Mpa dayanım ve yüksek süneklik kombinasyonunu sergilerler [13]. Şekil 3'de Q&P çeliğin EBSD mikro yapısı verilmiştir. Bu çeliklerin mikroyapısı martenzit ve östenit içermektedir. Ferrit, tek fazlı östenitik bölge yerine iki fazlı bölgede interkritik tavlamanın yapılması durumunda da mevcuttur.



Şekil 2. TWIP çeliğin mikro yapısı [9] (Microstructure of TWIP steel)

Tablo 1. Bazı TWIP çelik alaşımlarının akma, çekme ve % uzama değerleri [9,10] (Yield, tensile and elongation values of some TWIP steels)

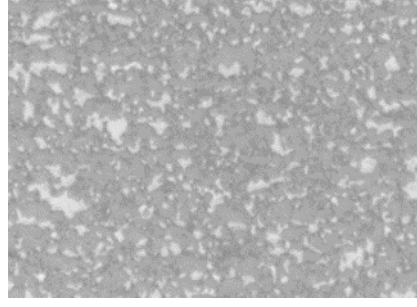
Alaşım	Akma Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Uzama (%)
TWIP880	~480	~880	~45
TWIP980	450-600	950-1050	>45



Şekil 3. Q&P çeliğin mikro yapısı [13] (Micro structure of Q&P steel)

Çelik üretici firmalar tarafından 1. nesil çelik grubunda olan TRIP çelikleri geliştirilerek 3. nesil çelik grubunda yer alan TBF çelikleri üretilmiştir. TRIP çeliklerinin üretiminde yaşanan en büyük problem üretimdeki tekrarlanabilirlik problemidir. Bu problemin bertaraf edilebilmesi için alaşımın mikro yapısal konfigürasyonu

tasarlanarak bey nitrik ve ferrit fazı oluşturulmuştur. Mikroyapıda yer alan kararlı östenit fazı alaşımın özelliklerinin belirlenmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Bu malzemenin isminin baş harfi (T) TRIP malzemesinden diğer iki harf ise bey nit ile ferritten (B ve F) gelmektedir. Şekil 4'de TBF çeliğinin mikro yapısı verilmiştir.



Şekil 4. TBF çeliğin mikro yapısı [14] (Micro structure of TBF steel)

Tablo 2. Bazı Q&P ve TBF çeliklerinin mekanik özellikleri [15] (Mechanical properties of Q&P and TBF steels)

Çelik kalitesi	Akma Mukavemeti (MPa)	Çekme Mukavemeti (MPa)	Uzama (%)
Q&P 980	650-800	980-1050	17-23
Q&P 1180	1000-1150	1180-1300	17
TBF 980	≥600	980-1130	≥18
TBF 1050	≥700	1050-1200	>14
TBF 1180	≥850	1180-1330	≥11

3. 3. NESİL Q&P VE TBF ÇELİKLERİNİN ÜRETİMİ (Production of Q&P and TBF Steels)

3. nesil Q&P ve TBF çeliklerin üretiminde kullanılan alaşım stratejisi element bazında aşağıda açıklanmıştır [15];

Karbon (C) ilavesi: Östenit faz oluşumu için güçlü bir dengeleyicidir. Alaşımın sertleşmesine katkı sağlar. Martenzit fazın mukavemetini yükseltir.

Mangan (Mn) ilavesi: Östenit faz oluşumu için güçlü bir dengeleyicidir. Alaşımın sertleşmesine katkıda bulunur. Ferrit ve östenit fazların dayanımını artırır.

Silisyum (Si) ilavesi: Östenit fazında karbon tutmak için karbür çökmesini engeller. Kaynaklanabilirliği olumsuz yönde etkilediğinden, az miktarlarda ilave edilmelidir.

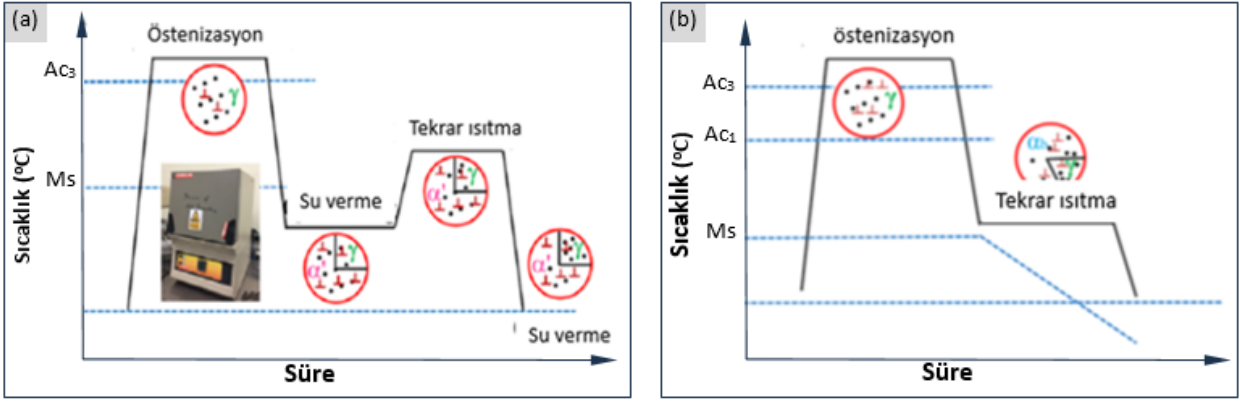
Alüminyum (Al) ilavesi: Östenit fazında C çözünürlüğünü artırır. Ferrit ve östenit fazlarının

dayanımını artırır. Alüminyum ilavesi az da olsa yoğunluk düşüne katkı sağlar.

Niyobyum (Nb) ilavesi: Tane boyutlarının incelmelerini sağladığından daha iyi tokluk ve süneklik elde edilmesine yardımcı olur.

Bor (B), krom (Cr), molibden (Mo) ve titanyum (Ti) ilavesi: Bu elementler alaşımın sertliğine katkı sağlamak amacıyla yeterli miktarlarda ilave edilirler.

3. nesil çeliklerin üretiminde özel ısıl işlem adımları uygulanmaktadır [16]. Bu çeliklere ait üretim diyagramları Şekil 5’de verilmiştir. Bu çeliklere ısıl işlem uygulanırken soğuma aşamasında soğuma işlemi durdurulup tekrar ısıtılmaktadır. Böylelikle malzemenin mikroyapısında kısmi fazlar (östenit, ferrit ve martenzit) oluşmaktadır. Dolayısıyla bu malzemelerde yüksek mukavemet ve iyi bir darbe sönümleme yeteneği elde edilmektedir.



Şekil 5. Q&P (a) ve TBF (b) çeliklerinin üretim adımları [16] (Production steps of Q&P (a) and TBF (b) steels)

4. 3. NESİL ÇELİKLERİN KAYNAĞI (WELDING OF 3RD GENERATION STEELS)

Otomotiv sektöründe çelik sac malzemelerin kullanımının söz konusu olduğu yerlerde birleştirmelerin kaynakla yapılması kaçınılmazdır. Bu sektörde kullanılmak üzere üretilen 3. nesil çelikler genellikle ince sac levha formunda üretilmektedirler. Dolayısıyla bu malzemelerin birleştirilmesinde TIG, MIG-MAG, plazma, lazer ve elektrik direnç kaynakları kullanılmaktadır [17]. Ancak kullanılan bu sacların kalınlıklarının az olması, kaynak esnasındaki yüksek ısı girdisi nedeniyle çarpılma ve distorsiyonu artırmakta dolayısıyla kaynaklanabilirliği düşürmektedir. Bu nedenle bu çalışmada bu tür malzemelerin birleştirilmesinde uygulamada en çok kullanılan lazer ışın ve elektrik direnç kaynakları tanıtılmıştır.

4.1. LAZER IŞIN KAYNAĞI (LASER WELDING)

Lazer teknolojisi günümüzde otomotiv, gemi, hava, askeri ekipmanlar, enerji ve tıp gibi birçok alanda kullanılmaktadır. Ayrıca lazerler yarı iletken üretimi, elektronik, iletişim gibi uygulamalarda da kendine yer bulmaktadır. Lazerler neredeyse bütün malzeme türüne işlem yapılabilen ve lazer teknolojisi endüstride markalama, kazıma, kesme ve kaynak işlemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır [18]. Yüksek güç yoğunluğu ve küçük nokta boyutu nedeniyle, lazer ışın kaynağı, ısıdan etkilenen küçük bölgelerle yüksek hızlarda kaynak yapmak için uygundur. Ek olarak, lazer ışınlarını optik fiberler veya uzak aynalar kullanarak yönlendirme yeteneği, özellikle karmaşık geometrilere sahip parçaların kaynaklanması için nokta direnç kaynağına bir alternatif sağlamaktadır [19]. Lazer kaynağındaki güç yoğunluğu, geleneksel kaynak yöntemlerine göre yaklaşık 4 kat daha yüksek olan 108 W/cm² mertebesinde. Bu nedenle kaynak bölgesinde ve çevresinde etkisi oldukça düşüktür ve bu nedenle

kaynakta mikroyapı bozulması minimum düzeydedir [20]. Endüstride sıklıkla kullanılan lazer kaynağının birçok avantajı bulunmaktadır. Bunlardan bazıları;

- Yüksek güç yoğunluğu sebebiyle malzemede minimum deformasyon,
- Malzemeyi çok hızlı ısıtması nedeniyle yüksek kaynak hızı,
- Her tür malzemeyi ergitebilecek güçte olması,
- Kaynak mukavemetlerinin yüksek ve gözeneksiz olması,
- 25 mm malzeme kalınlığına kadar etkili bir şekilde derin kaynakların yapılabilmesi,
- Lazer ışınının, başka türlü kaynak yapılması mümkün olmayan, ulaşılması zor yerleri yerel olarak kaynaklayabilir olması [21].
- Otomasyona ve robot teknolojisine uygun olması,
- Kaynak operasyonu esnasında izleme olanağı ile sürecin kontrol edilebilir olmasıdır [22].

4.2. NOKTA DİRENÇ KAYNAĞI (RESISTANCE SPOT WELDING)

Nokta direnç kaynağı, otomotiv endüstrisinde araba gövdesi bileşenlerini bir araya getirmek için yaygın olarak kullanılan etkili bir kaynak yöntemidir [23-25]. Bir araba yapısının, bir çarpışma durumunda yaralanmalara karşı yolcularına yeterli koruma sağlama yeteneği olarak tanımlanan aracın çarpmaya dayanıklılığı, büyük ölçüde nokta kaynaklarının bütünlüğüne ve mekanik performansına bağlıdır [26]. Bu nedenle nokta direnç kaynak işlemlerinden beklenen yüksek performanslı ve tekrarlanabilir kaynakların elde edilmesidir. NDK işleminde kaynak yapılacak parçalar su soğutmalı bakır elektrodlar arasına

yerleştirilir ve daha sonra parçalar üzerinden belirli bir süre boyunca büyük bir elektrik akımı geçirilerek ısı elde edilir [27]. Yöntemde herhangi bir dolgu maddesi kullanılmadığından kaynak işleminden sonra parçalar nispeten temiz kalabilmektedir. Birleştirme, basınç ve ısı uygulanmasıyla oluşturulur ve elektrik akımının akışı malzemelerde ısınmaya neden olur. Bu ısıtma ayrıca malzemenin küçük bir kısmının bölgesel olarak ergimesine ve birleşmesine yol açmaktadır [28]. Kaynak parametreleri (akım, zaman ve baskı kuvveti), nokta direnç kaynaklı bağlantıların kalitesi üzerinde önemli bir etkiye sahiptir [29]. Kaynak esnasında elektrik direnci nedeniyle oluşan ısı girdisi aşağıdaki genel ifadeyle verilmektedir.

$$H=I^2RtK \quad (1)$$

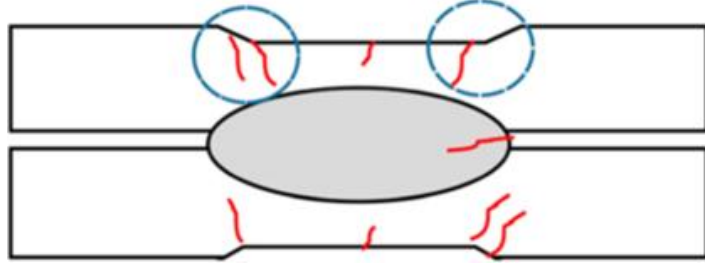
Burada H ısı girdisi, I kaynak akımı, R toplam direnç, t kaynak süresi ve K radyasyon ve iletimden kaynaklanan enerji kayıplarını temsil eden bir faktördür. Toplam direnç R, elektrot direnci, elektrot-iş parçası temas direnci, iş parçası direnci ve iş parçası-iş parçası temas direncinin toplamıdır [19].

Nokta direnç kaynağı ile birleştirilmiş kaynaklı malzemelerde kaynak çekirdeğinin geometrik ve

mekanik özellikleri kaynak akımına, kaynak süresine, uygulanan elektrot kuvvetine, malzeme özelliklerine ve kaynak yapılan malzemelerin yüzey durumlarına bağlıdır [30]. Ayrıca nokta direnç kaynaklarının mekanik performansı SMK çatlaklarından etkilenebilirler. Bu nedenle bu çatlakların giderilmesi gerekmektedir [31]. Bu çalışmada 3. nesil yüksek mukavemetli çeliklerin NDK esnasında meydana gelen SMK probleminin çözüm aranmaya çalışılmıştır.

5. SMK OLUŞUMU VE HASSASİYETİ (LME OCCURANCE AND SENSITIVITY)

3. nesil çeliklerde yüksek dayanım ve yüzeyindeki kaplama nedeniyle kaynak sırasında problemler yaşanmaktadır. Kaynak sırasında yaşanan bu problem sıvı metal kırılabilirliği olarak tanımlanır. Yüksek dayanımlı çelik alaşımları, Zn, Hg, Sn, Pb ve Al gibi sıvı metallerle temas ettiğinde kırılabilirlik oluşur. Galvaniz kaplamaya sahip 3. nesil alaşımlarda kaynak sırasında galvaniz kaplamada bulunan ergimiş Zn atomlarının ana malzeme tane sınırlarına nüfuz etmesi ile yüzeyde kırılmalar meydana gelmektedir [32]. Kaynak sonrası oluşan SMK ve genel olarak çatlakların gözlemlendiği bölgeler Şekil 6'da şematik gösterilmiştir.



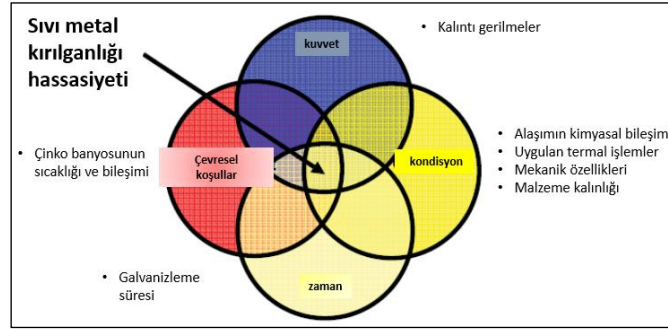
Şekil 6. Kaynak sonrası oluşan SMK ve çatlakların oluştuğu bölgeler [33] (LME and its occurrence areas after welding)

SMK hassasiyetini oluşturan nedenler aşağıda maddeler halinde ve açıklamalı olarak belirtilmiş ayrıca bu oluşum Şekil 7'de gösterilmiştir [32-34].

- 1- Kuvvetler: Kaynak sırasında kalıntı gerilmeler ve ısıl gradyent yoğunlaşması oluşmaktadır.
- 2- Malzeme kondisyonu: Malzemenin kimyasal bileşimi, ısıl işlem geçmişi, mekanik özellikleri önemlidir. 3. nesil çeliklerin mikroyapısında yer alan kalıntı östenitin SMK hassasiyetini arttırdığı raporlanmıştır [32,33]. Ayrıca

malzemenin kalınlığı da SMK hassasiyetini etkilemektedir [33].

- 3- Galvanizleme süresi: Galvanizleme süresi SMK hassasiyetinde önemli bir parametredir. Bununla birlikte malzemeye yapılan galvaniz kaplama türü de SMK hassasiyeti oluşumu tetiklemektedir.
- 4- Çevresel koşullar: Galvanizleme esnasında kullanılan çinko banyosunun bileşimi ve sıcaklığı da SMK hassasiyetini etkilemektedir.



Şekil 7. SMK hassasiyetini oluşturan nedenler [32]. (Effects on LME sensitivity)

Yüksek sünekliğe sahip galvaniz kaplı İYMÇ malzemeler nokta direnç kaynağında belirli termomekanik yüklemeye koşulları altında, SMK hassasiyeti gösterme eğilimindedir. SMK, %95'e kadar ciddi bir süneklik kaybına yol açan taneler arası bir ayrışma olgusudur. Sonuç olarak galvaniz kaplı bir malzeme için SMK'nın oluşması esas olarak termal ve mekanik yüklemeye bağlıdır [35].

Galvaniz kaplamada yer alan çinko (Zn) elementinin ergime sıcaklığı 420 °C'dir (Şekil 8). Zn 782 °C'de tamamen sıvı faza geçmektedir. NDK sırasında 782 °C'de sıvı Zn (Şekil 8), çelik malzemeye nüfuz etmektedir. Bu durum yüzeyde çatlak oluşumuna neden olmakta dolayısıyla da çeliğin dayanımında ve sünekliğinde ciddi oranda düşüş meydana gelmektedir [32]. Kaynak sırasında oluşan SMK hassasiyeti kaynağı yapılan malzeme özelliklerine ve galvaniz kaplama türüne bağlı olduğu bilinmektedir. 2. ve 3. nesil çeliklerde SMK hassasiyeti 1. nesil çeliklere göre daha fazladır. Yüksek Si ilavesi SMK oluşumunu arttırmaktadır. Ancak literatürde yüksek Si ilavesinin olumsuz belirtilmesine rağmen tam net bir kanıt/açıklama bulunmamaktadır [33]. Tüm bu nedenlerin yanında mikroyapının da SMK hassasiyetinde önemli olduğu bir gerçektir. Örneğin östenit fazın SMK hassasiyeti ferrit faza göre daha fazladır. Bununla birlikte SMK hassasiyeti sıcak daldırma galvaniz kaplamada artmaktadır. Ayrıca kaplamasız bir çelik, galvaniz kaplı bir çelik ile kaynak edildiğinde yüzeyde SMK oluşumu gözlemlenmektedir.

Galvaniz kaplamalı malzemelerin kaynak ile birleştirilmesi sonucu meydana gelen SMK oluşumu çeliğin kimyasal bileşimine, çeliğin mikroyapısına, çeliğin kaplamasına ve NDK parametrelerine (örn. elektrot tipi, kaynak akımı, toplam ısı girdisi vb.) bağlıdır. İYMÇ'ler genellikle % 4-5 oranında Mn ve Si içermektedir. Bu çeliklerin içerdiği Mn, Si ve Al gibi elementler dayanıma büyük ölçüde katkı sağladıkları gibi aynı zamanda

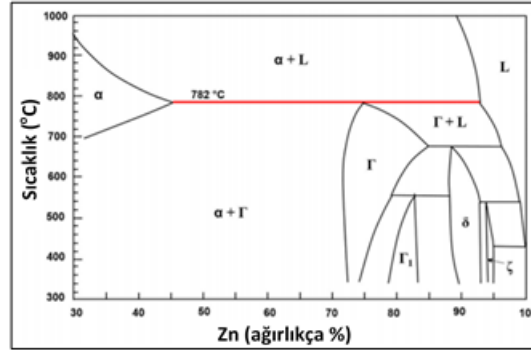
alaşımın elektrik iletkenliği özelliğini de arttırmaktadır. Bu durum yüksek ısı oluşumuna neden olduğu için NDK sırasında daha yüksek gerilmeler ile birlikte düşük alaşımlı çeliklere göre SMK hassasiyeti artmaktadır [37].

5.1. SMK HASSASİYETİ ETKİLEYEN FAKTÖRLER (EFFECTS ON LME SENSITIVITY)

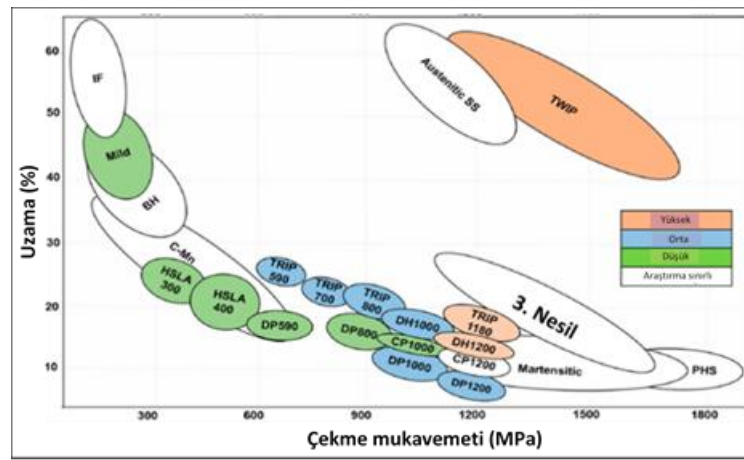
Galvaniz kaplı ileri yüksek mukavemetli çeliklerin kaynaklarında meydana gelen SMK olayını etkileyen birçok faktör bulunmaktadır. Bunların en önemlileri malzeme türü, kaplama çeşidi, mikroyapı etkisi ve kaynak parametrelerinin etkisidir. Bu değişkenlerin etkileri aşağıda kısaca açıklanmıştır.

5.1.1. YÜKSEK DAYANIMLI ÇELİK TÜRÜ (GRADE OF HIGH STRENGTH STEELS)

Çelik alaşımları SMK duyarlılığına göre düşük, orta ve yüksek çelikler olmak üzere sınıflandırılmaktadır. Şekil 9 galvaniz kaplamalı çeliklerin düşük-orta-yüksek SMK hassasiyetine göre sınıflandırılmasını gösterilmektedir. SMK hassasiyetinin, çeliklerin mukavemeti arttıkça artma eğiliminde olduğu söylenebilir. Çekme mukavemeti 1000 MPa'nın üzerinde olan çelikler en yüksek SMK çatlak hassasiyetini sergilemektedir [33]. Birçok çalışmada, TWIP çeliklerinin SMK'ya karşı çok yüksek duyarlılık sergilediği kabul edilmiştir [38-42]. Şekil 9 incelendiğinde 1000 MPa'dan daha yüksek çekme dayanımına sahip TRIP ve çift fazlı yüksek süneklik (DH) çeliklerde de yüksek bir SMK duyarlılığı görülmektedir. Bununla birlikte, benzer dayanım seviyelerine sahip DP çeliklerinin SMK duyarlılığının TRIP veya DH çeliklerinden daha düşük olduğu görülmektedir. TWIP ve TRIP çelikleri, DP çeliklerine kıyasla mikroyapıda daha yüksek östenit fazı oranına sahip olduğundan, genellikle SMK duyarlılığının mikroyapının östenitik faz içeriğinden etkilendiği varsayılmaktadır [33].



Şekil 8. Zn'nin ergime sıcaklığını gösteren faz diyagramı [36]. (Binary phase diagram showing the melting temperature of Zn)



Şekil 9. Zn kaplı çeliklerin SMK hassasiyetine göre sınıflandırılması [18]. (Classification of LME sensitivity according to Zn-coated steels)

5.1.2. Zn KAPLAMA TÜRÜ (TYPE of Zn COATING)

Literatürde sıcak daldırma galvaniz (GI) kaplamanın, galvaniz-tavlı (GA) ve elektro galvaniz (EG) kaplamaya göre SMK hassasiyetini arttırdığı rapor edilmektedir. Sıcak daldırma galvaniz kaplamanın (GI-Zn) ergime noktasının sıcak daldırma galvaniz-tavlı kaplama (GA-FeZn) ve elektro galvaniz kaplamaya (EG-ZnNi) göre daha düşük olmasından dolayı, kaynak sırasında daha fazla Zn sıvı olarak bulunduğu için kırılma artmaktadır. Buna ek olarak kaplama ile ana malzeme arasında oluşan intermetaliklerin, kaplamanın ergime sıcaklığını arttırmalarından dolayı, SMK hassasiyetini azalttığı belirtilmektedir. GA kaplamada, GI kaplamadan farklı olarak 500 °C'de yapılan tavlama işlemi nedeniyle GA kaplama ile ana malzeme arasında oluşan Fe-Zn intermetalik bileşiği SMK hassasiyetini

azaltmaktadır. GE kaplamada, kaplama ile ana malzeme arasında oluşan Zn-Ni intermetalikliği de aynı şekilde SMK hassasiyetini azaltmaktadır [14,43]. Tablo 3'te Zn kaplama bazı malzeme türlerinin SMK duyarlılığı üzerindeki etkileri karşılaştırılmalı olarak verilmiştir.

5.1.3. MİKROYAPININ ETKİSİ (THE EFFECT OF MICROSTRUCTURE)

Literatürde TRIP ve TWIP çeliklerindeki SMK hassasiyetinin çok yüksek olduğu rapor edilmiştir [33]. Bununla birlikte dayanımı 1000 MPa'ın üstündeki çeliklerde SMK hassasiyetinin yüksek olduğu belirtilmektedir. Ancak 1000 MPa üstü DP çeliklerindeki hassasiyet TRIP ve TWIP çeliklerinden daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. Bunun nedeni TRIP ve TWIP'in mikroyapısında östenit oranının daha fazla olmasıdır. Mikroyapının SMK hassasiyeti üzerine etkisini anlamak için termo

Tablo 3. Zn kaplama türlerinin LME duyarlılığı üzerindeki etkisi karşılaştırılması [33] (The comparison of Zn coating types on LME sensitivity)

Çelik kalitesi	Kaplama çeşidi/Kompozisyonu	SMK Hassasiyeti ile ilgili gözlemler
TWIP980	GI (Zn); GA (Fe-Zn); EG (Zn-Ni)	EG < GA < GI
DP1000	GI (Zn); GA (Fe-Zn)	GA < GI
TRIP1180	GI (Zn); GI (Zn-Mg)	GI (Zn) < GI (Zn-Mg)

mekanik çalışmalar yapılmıştır. Yapılan bu çalışmada DP çeliklerinde gevrekleşme östenit oluşum sıcaklığının (Ac₃) üzerinde gözlemlenmiştir. Yapılan birçok çalışmada SMK hassasiyetinin östenit faz oluşumu sonrası ortaya çıktığı raporlanmıştır [11,15,33].

5.1.4. KAYNAK PARAMETRELERİNİN ETKİSİ (THE EFFECT OF WELDING PARAMETERS)

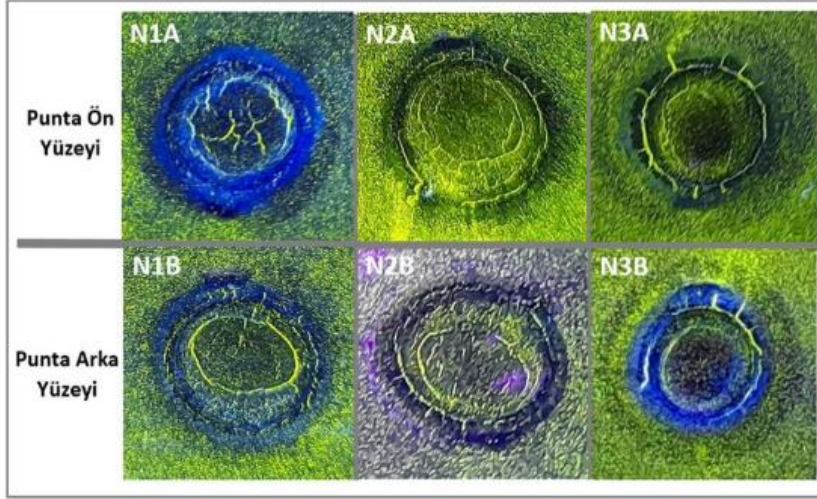
Literatürde değişik malzemeler üzerinde ve farklı kaynak koşullarında SMK oluşumları incelenmiştir. Bu incelemelere göre SMK hassasiyeti kaynak akımının artması, uzun kaynak çevirim süresi, yüksek elektrot kuvvetleri, tutma süresinin artması ve elektrotların yanlış hizalanması ile elektrotların düzensiz baskı kuvveti oluşturması nedeni ile artmaktadır [44,45]. Farklı kaynak parametrelerine bağlı SMK oluşumu incelemelerinde kesitten alınan numunelerde yüzey çatlaklarını tespit etmek için makro ve mikro incelemeler yapılmaktadır [4,5]. Ancak punta yüzeyinde oluşan bazı SMK çatlakları derin olmadığı için yüzeyde görülemez. Sıvı penetrasyon testi, X-ışını testi gibi tahribatsız muayene yöntemleri, NDK sonrası kaynak yüzeyindeki derin olmayan çatlakları belirlemek için kullanılmaktadır. Literatürde sıcak daldırma galvaniz kaplı 3. nesil bir çeliğin NDK sonrası kaynak kesit bölgelerinde floresan manyetik parçacık testi, yüzeydeki çatlaklar tespit etmek için kullanılmıştır. Hıdıroğlu ve arkadaşları [5] galvaniz kaplı TBF1180 çeliğini NDK yöntemi ile üç farklı parametrede birleştirmişler ve elde edilen numunelere manyetik parçacık testi yaparak punta yüzeyindeki SMK çatlak yoğunluğu ve yerlerini tespit etmişlerdir. Şekil 10'da bu çalışmadan elde edilen manyetik parçacık test sonuç görselleri verilmiştir.

Buna göre tüm numunelerde kaynak metalinde ve ısı tesiri altında kalan bölgede (ITAB) çatlakların olduğu ve çatlak miktarı ve uzunluklarının NDK sırasındaki parametre değişiminden etkilendiği tespit edilmiştir.

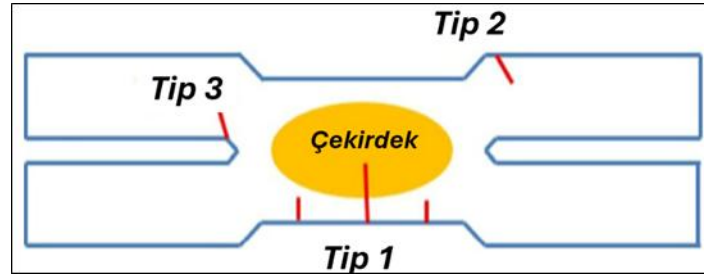
LME çatlakları, Şekil 11'de şematik olarak gösterildiği gibi, American Welding Society (AWS) tarafından üç kategoride sınıflandırılmıştır. Bu üç tip çatlak, konumlarına göre belirlenirler. Bunlar;

- Tip 1 çatlaklar kaynak yüzeyinde, elektrot girinti bölgesinin ortasında bulunur ve kaynak çekirdeğinin iç kısmına ulaşabilirler.
- Tip 2 çatlaklar, mikro yapının genellikle ITAB'a karşılık geldiği elektrot girinti bölgesinin köşesindedir.
- Tip 3 çatlaklar, aşınma yüzeyindeki çentik ucunun yakınında bulunur. Tip 1 ve 2 dış çatlaklar olarak etiketlenirken Tip 3 iç çatlaklar olarak etiketlenir.

Direnç nokta kaynağı sırasında sıvı metal gevrekleşmesi çok sayıda çalışmanın konusu olmasına rağmen, her bir çatlak tipinin arkasındaki kesin mekanizma henüz tam olarak anlaşılammıştır. Yaygın olarak benimsenen senaryo, ergimiş çinkonun kaynak işlemi sırasında tane sınırları boyunca yüzeyin altına hızla nüfuz edebileceğini ve bunun da kaynağın potansiyel kırılabilirliğine yol açabileceğini belirtilmektedir [46]. SMK nedeniyle oluşan çatlaklar genel olarak stereo mikroskopta kolaylıkla görülebilir. Şekil 11'de SMK nedeniyle oluşan çatlakların numune yüzeyi ve kesitinden görüntüleri yer almaktadır. Şekil 11'de belirtilen Tip 1, Tip 2 ve Tip 3 bölgeleri makroskobik olarak gözlemlenmiştir.



Şekil 10. Farklı NDK parametreleri sonrasında manyetik parçacık test sonucu [5] (Magnetic particle test results on different RSW parameters)



Şekil 11. AWS'ye göre LME çatlaklarının kategorileri (LME crack categories according to AWS)

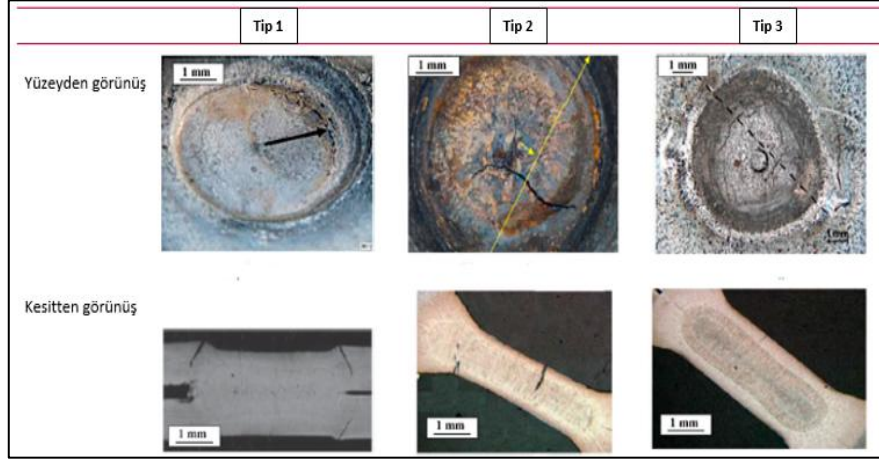
SMK nedeniyle oluşan çatlaklar genel olarak stereo mikroskopta kolaylıkla görülebilir. Şekil 11'de SMK nedeniyle oluşan çatlakların numune yüzeyi ve kesitinden görüntüleri yer almaktadır. Şekil 11'de belirtilen Tip 1, Tip 2 ve Tip 3 bölgeleri makroskobik olarak gözlemlenmiştir.

Çelik sac/elektrot girinti bölgesinin kenarları (kaynak omuzları) (Şekil 12) SMK kırılma yüzeyi olarak hassas bölge olarak belirtilmektedir. Tip 2 bölgesinde meydana gelen SMK çatlakları yaygın olarak tercih edilen endüstriyel kaynak koşullarında gözlenmektedir. Tip 1 ve Tip 3 uygulanan kaynak koşullarında, yüksek ısı ve artan akım ve uzun süreli giriş kaynak çevirimleri ile oluşabilmektedir [33].

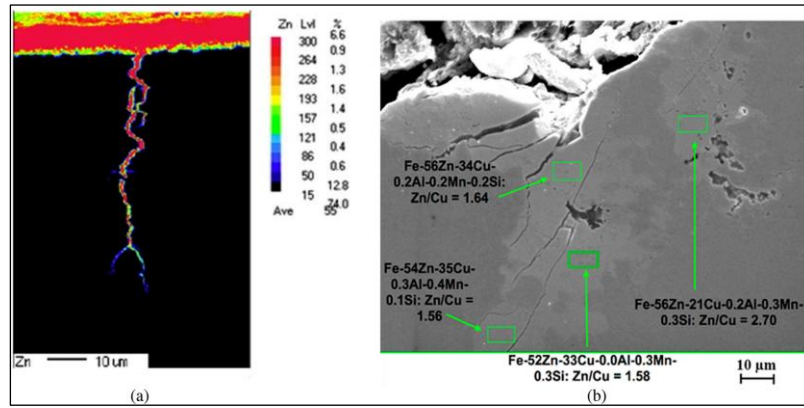
Literatürde [47,48] nokta direnç kaynak sırasında oluşan SMK çatlaklarının karakteristikleri ile kaynaklı numunelerin kırılma yüzeyleri incelenmiştir. Kırılma yüzey çalışmalarında SMK kırılmaların Zn'nin nüfuz etmesi nedeniyle taneler arası oluştuğu gözlemlenmiştir. Galvaniz kaplamalı TWIP alaşımı üzerinde elektron probu mikro analizi

(EPMA) ile elde edilen görüntüler Tip 2 SMK kırılmaları olarak belirlenmiş olup Şekil 13a'da gösterilmektedir. Bu araştırmalardan bazıları Zn'nin Tip 2'deki gibi yüzeyde SMK hassasiyeti oluşturarak çatlak oluştuğunu raporlarken diğer araştırmalar da SMK çatlaklarının oluştuğu bölgede Zn ile birlikte yüksek oranda Cu (ağırlıkça yaklaşık % 15-20) varlığının olduğu Şekil 13b'de gösterilmektedir [33].

Yılmaz ve arkadaşları [49] farklı kalınlıktaki (0,95 ve 1,55 mm) TBF çelik sacların NDK ile kaynaklanabilirliği üzerine deneysel bir çalışma yapmışlar ve NDK'lı TBF çeliklerin sıvı metal gevrekleşme çatlakları hassasiyeti çok yüksek olduğunu, sıvı metal gevrekleşme çatlaklarının sac yüzeyinde başlayıp ve ITAB'da yayıldığını belirtmişlerdir. Bu çatlakların ve çatlak derinliklerinin kaynak ısı girdisi ile yakından ilişkili olduğunu ve ısı girdisinin artışına bağlı olarak arttığını ayrıca çatlakların, nokta kaynakların çekirdek bölgesine kıyasla kaynak çevresi boyunca çok daha derin ve geniş olduğunu rapor etmişlerdir.



Şekil 12. Nokta direnç kaynaklarında SMK çatlaklarının makroskopik görünümü ve çatlak yeri ve derecesine göre sınıflandırılması [33] (Macro images of LME cracks and illustration the location of the LME crack types)



Şekil 13. NDK SMK çatlak karakterizasyonu; a) SMK çatlak oluşumundaki Zn analizi, b) Zn'nin nüfus ettiği bölgedeki Cu oranı (Zn/Cu konsantrasyonu) [33] (RSW LME crack characterisation; a) Zn analysis on LME cracks, b) Cu ratio in the penetration area of Zn (Zn/Cu))

Bhattacharya ve arkadaşları [50] gelişmiş yüksek mukavemetli C-Mn-Si çeliklerinin çinko (Zn) kaynaklı SMK duyarlılığı üzerindeki başlangıç mikro yapısındaki değişikliklerin etkisini araştırmak için yüksek sıcaklık (500, 600 ve 700°C'de) çekme testleri yapmışlardır. Çalışmalarında tek bir alaşım kullanılarak başlangıç mikro yapısı çinko elektrokaplama öncesinde ısıl işlemlerle değiştirilmiştir. Sıcak çekme testi sonucunda martenzitik, DP, Q&P ve TBF çeliklerinde farklı SMK hassasiyetlerinin olduğu belirlenmiştir. DP çeliğinin martenzitik, Q&P veya TBF çeliklerine kıyasla daha düşük SMK duyarlılığı, ultra ince ferrit tanelerinin ve ayrı martenzit adalarının varlığı ve DP mikro yapısının yalnızca %40-50'si martenzitik olduğundan bu mikro yapıda önceki östenit tane sınırlarının daha küçük bir alan fraksiyonuna sahip olmasıyla alakalı olduğunu rapor etmişlerdir. Ayrıca SMK çatlak

yolu analizlerinin, önceki östenit tane sınırlarının, martenzitik, Q&P ve TBF mikro yapıları boyunca LME çatlakları için tercih edilen yayılma yolları olduğunu belirtmişlerdir.

İYMÇ çeliklerin NDK'da sıvı metal kırılma eğilimini önlemek için yapılan çalışmalardan bir tanesi de kaynak esnasında çoklu darbeli kaynak uygulamalarıdır. Wintjes ve arkadaşları [51] TRIP1100 malzemelerin NDK'da çoklu darbe kaynak programlarının SMK şiddeti üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Çalışmaları sonucunda SMK duyarlılığını azaltmak için iki farklı tipte darbe metodolojisi önermişlerdir. Bunlar; çinko kaplamayı çıkarmak için ana kaynak akımından önce bir ön darbe uygulamak ve ısı oluşumunu yönetmek için ana kaynak akımı sırasında darbe uygulamaktır. Burada ön darbe, kaynağa çok fazla ilave ısı vermeden çinkonun kaplamaya yayılmasını ve çinkoyu stabilize etmesini sağlamaktadır. Bu

sonuçlar, SMK'nı etkileyen mekanizmalar önceden düşünülenlerden daha karmaşık olmasına rağmen, çoklu darbe kaynak programlarının SMK çatlamasını azaltmak için başarıyla kullanılabileceğini göstermiştir.

NDK uygulamalarında elektrot ucu geometrisinin de SMK üzerinde etkili olduğu bir gerçektir. Dupuy [52] 1180 MPa'lık 3. nesil yüksek mukavemetli Q&P çeliklerinin NDK esnasında meydana gelen SMK için yeni bir elektrot ucu geometrisi tasarlanmış ve yeni elektrot ucu geometrisi sayesinde levha/elektrot yanlış hizalaması da dahil olmak üzere farklı kaynak koşulları altında oluşan çatlak miktarının azaldığını, ayrıca yeni tasarım ile birlikte elektrod ömürlerinin de arttığını rapor etmiştir.

İYMÇ nokta direnç kaynağında SMK'nı etkileyen parametrelerden bir diğeri de malzemelere uygulanan kaplama cinsidir. DiGiovanni ve arkadaşları [53] hem GI hem de GA kaplı Q&P 980 ve Q&P 1180 malzemeleri NDK yöntemi ile birleştirmişler ve SMK hassasiyeti için birleştirme dayanımlarına kaplamanın etkisini sıcak çekme testi ile incelemişlerdir. Çalışmaları sonucunda kaplama tipine bağlı olarak SMK tepkisinde bir farklılık olduğunu belirlemişlerdir. GI kaplı çeliklerde gözlemlenen SMK'nın GA kaplı çeliklerden elde edilenden daha fazla olduğu dolayısıyla GI kaplı malzemelerdeki süneklilik kaybının GA kaplı malzemeler göre çok daha fazla olduğunu rapor etmişlerdir.

6. SONUÇLAR (CONCLUSION)

Bu çalışmada, NDK sonrasında oluşan SMK hassasiyeti üzerine yapılan literatür incelemelerinin derlemesi sunulmuş olup, bu çalışmalardan elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde özetlenmiştir.

- 3. nesil çeliklerin, 1. ve 2. nesil çelikler ile karşılaştırıldığında yüksek dayanım ve iyi şekillenebilirlik avantajları ile birlikte, maliyetlerinin de düşük olması nedeniyle, yakın gelecekte otomotivde kullanımının artacağını göstermektedir.
- 3. nesil Q&P ve TBF çeliklerin üretiminde alaşım stratejisi element bazında önemli rol oynamaktadır.
- 3. nesil çeliklerde özel bir ısıtma işlem adımları söz konusudur. Isıtma ve soğutma adımlarını içeren

bu özel ısıtma işlemleri ile alaşımın mikroyapısında kısmi fazlar (östenit, ferrit ve martenzitik) oluşturularak yüksek dayanım ve iyi enerji sönümleme yeteneği elde edilmektedir.

- Kaynak sonrası oluşan SMK hassasiyetini oluşturan nedenler arasında NDK sırasında oluşan kalıntı gerilmeler, malzemenin kimyasal bileşimi ve mikroyapısı, galvaniz kaplama cinsi ve çinko banyosunun koşulları gelmektedir.
- Galvaniz kaplamada yer alan çinko (Zn) elementi 782 °C'de tamamen sıvı faza geçerek NDK sırasında çelik ana malzemeye nüfuz etmektedir. Bu durum NDK sırasında yüzeyde çatlaklara neden olarak, alaşımın mekanik özelliklerinde ciddi oranda düşüş meydana gelmektedir.
- Zn kaplı çelikler düşük-orta-yüksek SMK hassasiyetine göre sınıflandırılmıştır. SMK çatlak hassasiyetinin çeliklerin mukavemeti arttıkça artma eğiliminde olduğu söylenebilir. Çekme mukavemeti 1000 MPa'nın üzerinde olan çelikler en yüksek SMK çatlak hassasiyetini sergilemektedir.
- Literatürde sıcak daldırma galvaniz (GI) kaplamanın galvaniz-tavlı (GA) ve elektro galvaniz (EG) kaplamaya göre SMK hassasiyetini artırdığı rapor edilmektedir.
- Literatürde TRIP ve TWIP çeliklerindeki SMK hassasiyetinin çok yüksek olduğu rapor edilmiştir. Bununla birlikte dayanımı 1000 MPa'nın üstündeki çeliklerde SMK hassasiyetinin yüksek olduğu belirtilmektedir.
- Literatürde SMK hassasiyetinin östenit faz oluşumu sonrası ortaya çıktığı raporlanmıştır.
- SMK hassasiyeti kaynak akımının artması, uzun kaynak çevirim süresi, yüksek elektrot kuvvetleri, tutma süresinin artması, yanlış hizalanmış ve/veya aşınmış elektrotlar nedeni ile artmaktadır.
- Nokta direnç kaynaklarında SMK çatlaklarının makroskobik görünümü, çatlak yeri ve derecesine göre Tip 1, Tip 2 ve Tip 3 olarak sınıflandırılmıştır.
- NDK uygulamalarında çoklu darbe kaynak programları SMK çatlamasını azaltmak için kullanılabilir.

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)

Tanya A. Başer: Çelik malzemelerde sıvı metal kırılabilirliğinin tanıtımı, nedenleri ve giderilmesi

Introduction, causes and elimination of liquid metal embrittlement in steel materials.

Mehtap Hidroğlu: 3. nesil çeliklerin tanıtılması ve sıvı metal kırılabilirliğine hassasiyetlerinin tanıtılması.

Introduction of 3rd generation steels and their sensitivity to liquid metal embrittlement.

Nizamettin Kahraman: 3. nesil çeliklerde kaynak yöntemlerine göre sıvı metal kırılabilirlikleri ve kıyaslamaları.

Liquid metal embrittlement and comparisons according to welding methods in 3rd generation steels.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

There is no conflict of interest in this study.

7. KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Yürük A., Çevik B., Kahraman N., Analysis of mechanical and microstructural properties of gas metal arc welded dissimilar aluminum alloys, Mater. Chem. Phys., 273, (2021) 125117.
- [2] Khan M.I., Spot welding of advanced high strength steels, Master Thesis of Applied Science, Ontario, Canada, (2007) 9-16.
- [3] Park G., Jeong S., Lee C., "Fusion weldabilities of advanced high manganese steels: A Review. Met. Mater. Int., 27 (2021) 2046–2058.
- [4] Başer T.A., Resistance Spot Welding of Zn-coated third generation automotive steels using mid-frequency direct current technology, Trans Indian Inst Met, 76 (2023) 49–57.
- [5] Hidroğlu, M., Başer T.A., Tekelioğlu O., Kahraman N., Üçüncü nesil çeliklerin nokta

direnç kaynağında sıvı metal kırılabilirliği, 10th International Automotive Technologies Congress, OTEKON 2020, September 6-7, Bursa, Türkiye, (2021) 1566-1575.

- [6] Yang K., Meschut G., Seitz G., Biegler M., Rethmeier M., The identification of a new liquid metal embrittlement (LME) type in resistance spot welding of advanced high-strength steels on reduced flange widths, Metals, 13 (2023) 1754.
- [7] Karabulut S., Erzincanlıoğlu S., Ünal C. U., Bilici A. Y., Yılmaz İ. Ö., Üçüncü Nesil Çeliklerin Otomotiv Tasarımında Kullanımı, Mühendis ve Makina, (Ağustos 2019) 35-41.
- [8] Billur E., Dykeman J., Altan T., "Three generations of advanced high strength steels for automotive applications, 3 parça yazı dizisi", Stamping Journal: Nov/Dec 2013, p.15-16, Jan/Feb 2014, p.12-13, Mar/Apr 2014, p. 12-13.
- [9] World Steel Association AISBL [https://ahssinsights.org/metallurgy/steel-grades/ahss/twinning-induced-plasticity/#:~:text=TWinning%20Induced%20Plasticity%20\(TWIP\)%20steels,elongation%20typically%20greater%20than%2050%25](https://ahssinsights.org/metallurgy/steel-grades/ahss/twinning-induced-plasticity/#:~:text=TWinning%20Induced%20Plasticity%20(TWIP)%20steels,elongation%20typically%20greater%20than%2050%25) Son erişim tarihi: 17.02.2025
- [10] Horvath C. D., Advanced steels for lightweight automotive structures, Materials, Design and Manufacturing for Lightweight Vehicles, (2010) 35-78.
- [11] Li W., Yong Z., Weijun F., Xinyang J., Speer J.G., Industrial application of Q&P sheet steels, Proceedings of Intl. Symp. on New Developments in Advanced High-Strength Sheet Steels, (2013) 141-151.
- [12] Max-Planck-Gesellschaft https://www.mpie.de/3084542/Research_Project_Optimization_Q_P_steels Son Erişim Tarihi: 17.02.2025
- [13] Huyghe, P., Dépinoy, S., Caruso, M., Mercier, D., Georges, C., Malet, L., Godet, S., On the Effect of Q&P Processing on the Stretch-flange-formability of 0.2C Ultra-high Strength Steel Sheets, ISIJ International, 58(7) (2018), 1341–1350.
- [14] Steels for cold stamping – Fortiform https://automotive.arcelormittal.com/products/flat/third_gen_AHSS/fortiform Son erişim Tarihi: 17.02.2025
- [15] Blake K. Zuidema, Introduction to 3rd Generation Advanced High Strength Steels, ArcelorMittal Global R&D, (2017).
- [16] Liu L., He B., and Huang M., The role of transformation-induced plasticity in the development of advanced high strength steels, Adv. Eng. Mater., 20 (2018) 1701083.

- [17] Yüce O., Farklı özelliklerdeki otomotiv saclarının lazer kaynak uygulamaları, Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Karabük, (2023) 15-28.
- [18] Köle A., Ayan Y., Kahraman N., Markalama ve kesme işlemleri için karbondioksit (CO₂) lazer makinesi tasarımı, üretimi ve test çalışmaları, Politeknik Dergisi, 27(2) (2024) 759-768.
- [19] Dasgupta A. K. and Mazumder J., Laser welding of zinc coated steel: an alternative to resistance spot welding, Science and Technology of Welding and Joining, 13(3) (2008) 289-293.
- [20] Němeček S., Mužík T., Míšek M., Differences between laser and arc welding of HSS steels, Physics Procedia, 39 (2012) 67-74.
- [21] Bakošová D., Bakošová A., Experimental study of thin steel tubes welded by fiber laser, Manufacturing Technology, 21(1) (2021) 3-13.
- [22] Yüce O., Hıdıroğlu M., Erdoğan İ., Kahraman N., TBF1180 Çeliğin Fiber Lazer Uygulamaları, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji, 12(1) (2024) 267-281.
- [23] Spina P. R., Maddis M. De, Lombardi F., and Rossini M., Investigation on resistance spot welding of TWIP Steel sheets, Steel research int., 86(12) (2015) 1480-1489.
- [24] Bina M. H., Jamali M., Shamanian M., Sabet H., Investigation on the resistance spot-welded austenitic/ferritic stainless steel, Int J Adv Manuf Technol, 75 (2014) 1371-1379.
- [25] Kaya İ., Başer T. A., Kahraman N., Mechanical properties and corrosion behavior of similar/dissimilar resistance spot welded automotive aluminum alloys, Materials Science and Engineering Technology (Materialwissenschaft und Werkstofftechnik), 54(11) (2013) 1433-1443.
- [26] Pouranvari M., Alizadeh-Sh M., and Marashi S. P. H., Welding metallurgy of stainless steels during resistance spot welding Part I: fusion zone, Science and Technology of Welding and Joining, 20(6) (2015) 502-511.
- [27] Kahraman N., The influence of welding parameters on the joint strength of resistance spot-welded titanium sheets, Materials and Design, 28 (2007) 420-427.
- [28] Rao S. S., Chhibber R., Aror K. S., Shome M., Resistance spot welding of galvanized high strength interstitial free steel, Journal of Materials Processing Technology, 246 (2017) 252-261.
- [29] Vinas J., Kascak L., and Gres M., Optimization of resistance spot welding parameters for microalloyed steel sheets, Open Eng. 6(1) (2016) 504-510.
- [30] Lin H.C., Hsu C.A., Lee C.S., Kuo T.Y., Jeng S.L., Effects of zinc layer thickness on resistance spot welding of galvanized mild steel, Journal of Materials Processing Tech., 251 (2018) 205-213.
- [31] Murugan S. P., Vijayan V., Ji C., and Park Y.-D., Four types of LME cracks in RSW of Zn-coated AHSS, Welding Journal, 99 (March 2020) 75-92.
- [32] Park Y., Murugan S. P., Liquid metal embrittlement cracks in resistance spot welded advanced high strength steels, Proceedings of the JAAA2018, Kitakyushu, Japan, (November 2018) 27-28.
- [33] Bhattacharya D., Liquid metal embrittlement during resistance spot welding of Zn-coated high-strength steels, Materials Science and Technology, 34(15) (2018) 1809-1829.
- [34] Billur E., Çetin B., Gürleyik M., New generation advanced high strength steels: Developments, trends and constraints, International Journal of Scientific and Technological Research, 2(1) (2016) 50-62.
- [35] Prabitz K. M., Asadzadeh M. Z., Pichler M., Antretter T., Beal C., Schubert H., Hilpert B., Gruber M., Sierlinger R., Ecker W., Liquid metal embrittlement of advanced high strength steel: experiments and damage modeling”, Materials, 14(18) (2021) 5451.
- [36] Ling Z. X., Chen T., Kong L., Wang M., Pan H., Lei M., Liquid metal embrittlement cracking during resistance spot welding of galvanized Q&P980 steel, Metallurgical and Materials Transactions A, 50(11) (2019) 5128-5142.
- [37] Sierlinger R., Gruber M., A cracking good story of liquid metal embrittlement during spot welding of advanced high strength steels, Technical report, Linz, Austria: voestalpine Stahl GmbH, (2016) 1-6.
- [38] Beal C., Kleber X., Fabregue D., Bouzekri M., Embrittlement of a zinc coated high manganese TWIP steel, Materials Science and Engineering A, 543 (2012) 76-83.
- [39] Meyerdierks M., Zinke M., Jüttner S., Biro E., Determination of LME sensitivity of zinc coated steels based on the programmable deformation cracking test,

- Welding in the World, 65 (2020) 2295–2308.
- [40] Ling Z., Wang M., Kong L., Chen K., Towards an explanation of liquid metal embrittlement cracking in resistance spot welding of dissimilar steels, *Materials and Design*, 195 (2020) 109055.
- [41] Lalachan A., Murugan S. P., Jin W. S., Park Y. D., Liquid metal embrittlement in Zn-coated steel resistance spot welding: Critical electrode-contact and nugget growth for stress development and cracking, *Journal of Materials Processing Technology*, 318 (2023) 118009.
- [42] Kim Y.G., Kim I.J., Kim J.S. et al. Evaluation of surface crack in resistance spot welds of Zn-coated steel, *Mater Trans*, 55(1) (2014) 171–175.
- [43] <https://www.baosteel.com/en/home>
Son erişim Tarihi: 17.02.2025
- [44] Emre H. E., Kaçar R., Resistance spot weldability of galvanize coated and uncoated TRIP steels, *Metals (Basel)*, 6 (2016) 299.
- [45] Beal C., Mechanical behaviour of a new automotive high manganese TWIP steel in the presence of liquid zinc, *Doctoral Dissertation, Intelligence and National Security Alliance, Lyon, France*, (2011) 34-67.
- [46] Siar O., Benlatreche Y., Dupuy T., Dancette S., Fabrègue D., Effect of severe welding conditions on liquid metal embrittlement of a 3rd-generation advanced high-strength steel, *Metals*, 10(9) (2020) 1166.
- [47] Ashiri R., Anwarul H. M., Chang-Wook J., et al., Super-critical area and critical nugget diameter for liquid metal embrittlement of Zn-coated twinning induced plasticity steels, *Scr Mater.* 109 (2015) 6–10.
- [48] Ashiri R., M Shamanian., Salimijazi H. R., et al., Liquid metal embrittlement-free welds of Zn-coated twinning induced plasticity steels, *Scr Mater.* 114 (2016) 41–47.
- [49] Yılmaz I. O., Bilici A. Y., and Aydın H., Resistance spot weldability of TBF steel sheets with dissimilar thickness, *Metall. Res. Technol.* 117(6) (2020) 620-633.
- [50] Bhattacharya D., Cho L., van der A E., Pichler A., Pottore N., Ghassemi-Armaki, H. Findley K. O., Speer J.G., Influence of the starting microstructure of an advanced high strength steel on the characteristics of Zn-Assisted liquid metal embrittlement, *Materials Science and Engineering: A*, 804 (2021) 140391.
- [51] Wintjes E., DiGiovanni C., He L., Bag S., Goodwin F., Biro E., Zhou Y., Effect of multiple pulse resistance spot welding schedules on liquid metal embrittlement severity, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 141(10) (2019) 101001.
- [52] Dupuy T., A novel electrode tip geometry to mitigate liquid metal embrittlement during resistance spot welding, *Welding in the World*, 66(9) (2022) 1715–1731.
- [53] DiGiovanni C., He L., Pan H., Zhou N. Y., Biro E., Predicting liquid metal embrittlement severity in resistance spot welding using hot tensile testing data, *Welding in the World*, 66(9) (2022) 1705–1714.

Sıcak Preslenmiş Bronz-Nikel-Kobalt'lı Matrislere Sıvı Fazın Etkisinin İncelenmesi

Büşra TUNÇ^{1*} Ertuğrul ÇELİK²

¹Artvin Çoruh Üniversitesi, Borçka Aclarlar Meslek Yüksekokulu, Elektronik ve Otomasyon Bölümü, Artvin, Türkiye

²Munzur Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Tunceli, Türkiye

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 16/08/2024
Düzeltilme: 13/01/2025
Kabul: 15/01/2025

Anahtar Kelimeler

Metal matris kompozitleri
Toz metalürjisi
Sıvı faz sinterleme
Sıcak presleme

Article Info

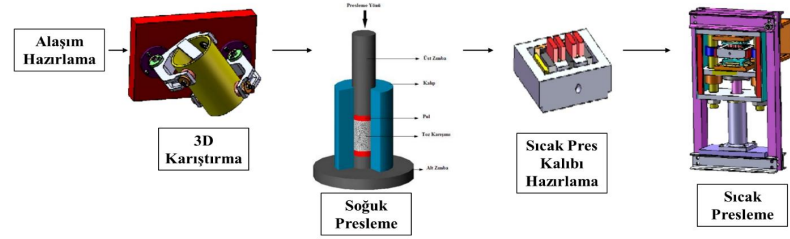
Research article
Received: 16/08/2024
Revision: 13/01/2025
Accepted: 15/01/2025

Keywords

Metal matrix composites
Powder metallurgy
Liquid phase sintering
Hot pressing

Grafik Özet (Graphical/Tabular Abstract)

Bu çalışmada, %80 bronz, %15 nikel ve %5 kobalt içeren bir metal matris kompozit malzeme, Ag-Cd katkıları (%2, %4, %6) eklenerek sıvı faz sinterleme ve sıcak presleme yöntemleriyle üretilmiştir. / In this study, a metal matrix composite material consisting of 80% bronze, 15% nickel (Ni), and 5% cobalt (Co) was fabricated by incorporating Ag-Cd alloys at proportions of 2%, 4%, and 6%.



Şekil A: Deney iş akışı / Figure A: Experimental Workflow

Önemli noktalar (Highlights)

- Sinterleme sıcaklığı (650, 700, 750°C) ve Ag-Cd katkı oranlarının malzemenin mikroyapı ve mekanik özellikleri üzerindeki etkileri incelenmiş, 750°C'de ve %4 AgCd katkısı ile en iyi sonuçlar elde edilmiştir. / The material was produced using liquid phase sintering and hot pressing techniques. The effects of varying sintering temperatures (650, 700, 750°C) and Ag-Cd addition ratios on the microstructural and mechanical properties of the composite were examined, revealing optimal results with 4% AgCd addition at 750°C.
- Mikroyapı analizleri (SEM, EDS) ve mekanik testler (sertlik, üç noktalı eğme) bu kompozitlerin dayanıklılık ve performansını optimize etmek için önemli veriler elde edilmiştir. / SEM, EDS analyses, hardness testing, and three-point bending tests provided critical insights into optimizing the material's mechanical strength and overall performance.

Amaç (Aim): Bu çalışmanın amacı, AgCd alaşımları eklenmiş metal matrisli kompozit bir malzeme üretilip mikroyapısal ve mekanik özelliklerini değerlendirmektir. / The aim of this study is to produce a metal matrix composite material with AgCd alloy additions and evaluate its microstructural and mechanical properties.

Özgünlük (Originality): metal matrisli bir kompozite AgCd alaşımlarının farklı oranlarda eklenerek malzemenin mikroyapısal ve mekanik özelliklerinin kapsamlı bir şekilde değerlendirilmesini sağlayan özgün bir yaklaşım sunmaktadır. / It presents an innovative approach by incorporating varying amounts of AgCd alloys into a metal matrix composite enabling a comprehensive evaluation of the material's microstructural and mechanical properties.

Bulgular (Results): sıcaklık değişimleri ve Ag-Cd katkı oranlarının kompozit malzemenin mikroyapısı ve mekanik özelliklerini iyileştirdiğini ortaya koymuştur. / The results have demonstrated that variations in temperature and Ag-Cd addition ratios improved the microstructure and mechanical properties of the composite material.

Sonuç (Conclusion): Sinterleme sıcaklığının artışı, tüm numunelerde eğilme dayanımını artırırken, AgCd miktarının artması da bu dayanım değerlerini iyileştirmiş ve matris içindeki gözenekleri doldurarak malzemenin yoğunluğunu artırmıştır. / The increase in sintering temperature enhanced the bending strength of all samples, while the higher AgCd content improved these strength values and increased the material's density by filling the pores within the matrix.



Sıcak Preslenmiş Bronz-Nikel-Kobalt'lı Matrislere Sıvı Fazın Etkisinin İncelenmesi

Büşra TUNÇ^{1*} Ertuğrul ÇELİK²

¹Artvin Çoruh Üniversitesi, Borçka Acarlar Meslek Yüksekokulu, Elektronik ve Otomasyon Bölümü, Artvin, Türkiye

²Munzur Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Tunceli, Türkiye

Makale Bilgisi

Research article
Received: 16/08/2024
Revision: 13/01/2025
Accepted: 15/01/2025

Anahtar Kelimeler

Metal matris kompozitleri
Toz metalürjisi
Sıvı faz sinterleme
Sıcak presleme

Öz

Bu çalışmada, %80 bronz, %15 nikel (Ni) ve %5 kobalt (Co) içeren bir metal matris kompozit malzeme üretilmiştir. Bronz, genellikle bakır ve kalay alaşımı olarak bilinir ve yüksek korozyon direnci ile mekanik dayanıklılık sunar. Nikel, metal matris kompozitlerde korozyon ve oksidasyon direncini artırırken, kobalt ise sertliği ve aşınma direncini iyileştirir. Bu kompozit malzeme, %2, %4 ve %6 oranlarında AgCd alaşımı ile zenginleştirilmiştir. Malzeme üretim sürecinde sıcak presleme yöntemiyle sıvı faz sinterleme tekniği uygulanmıştır. Bu yöntem, yüksek yoğunluk ve iyi mekanik özellikler elde edilmesine olanak tanır. Çalışmada farklı sıcaklıklar (650, 700, 750°C) kullanılarak sinterleme işlemi gerçekleştirilmiş ve malzemenin mikroyapısal özellikleri üzerinde sıcaklığın etkisi incelenmiştir. Analiz aşamasında SEM kullanılarak malzemenin mikro yapısı incelenmiş ve EDS ile elementel analizler yapılmıştır. Sertlik testi, malzemenin mekanik dayanıklılığını değerlendirmek için kullanılmıştır. Yoğunluk, malzemenin kütesinin hacmine oranı olarak belirlenmiş ve malzemenin içyapısı hakkında bilgi vermiştir. Üç noktalı eğme testi, malzemenin eğilme mukavemetini ölçerken, kırık yüzey analizi malzemenin kırılma davranışlarını ortaya koymuştur. Sonuçlar, sıcaklık değişimlerinin ve Ag-Cd katkı oranlarının, kompozit malzemenin mikro yapısı ve mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini göstermiştir. Sıvı faz sinterleme ve sıcak presleme süreçlerinin, malzemenin dayanıklılığı, sertliği ve diğer fiziksel özellikleri üzerinde önemli iyileşmeler sağladığı gözlemlenmiştir. Matris ağırlıkça %4 AgCd katkısı eklenerek ve 750°C'de sinterleme işlemi uygulanarak üretilen numunelerin, mekanik ve fiziksel özellikler açısından en iyi sonuçları verdiği belirlenmiştir.

Investigation of the Effect of Liquid Phase on Hot Pressed Bronze-Nickel-Cobalt Matrices

Article Info

Araştırma makalesi
Başvuru: 16/08/2024
Düzeltilme: 13/01/2025
Kabul: 15/01/2025

Keywords

Metal matrix composites
Powder metallurgy
Liquid phase sintering
Hot pressing

Abstract

In this study, a metal matrix composite material consisting of 80% bronze, 15% nickel (Ni), and 5% cobalt (Co) was produced. Bronze is commonly known as a copper-tin alloy and offers high corrosion resistance and mechanical durability. Nickel enhances corrosion and oxidation resistance in metal matrix composites, while cobalt improves hardness and wear resistance. The composite material was further enriched with AgCd alloy in proportions of 2%, 4%, and 6%. The material production process involved the application of the liquid phase sintering technique using hot pressing. This method enables the achievement of high density and good mechanical properties. Sintering was conducted at different temperatures (650, 700, 750°C), and the effect of temperature on the microstructural characteristics of the material was investigated. During the analysis phase, the microstructure of the material was examined using SEM and elemental analysis was performed using EDS. Hardness testing was employed to evaluate the mechanical durability of the material. Density, defined as the mass-to-volume ratio, provided information about the material's internal structure. Three-point bending tests measured the bending strength of the material, while fracture surface analysis revealed the material's fracture behavior. The results demonstrated the effects of temperature variations and Ag-Cd addition ratios on the microstructure and mechanical properties of the composite material. Significant improvements in the material's durability, hardness, and other physical properties were observed due to the liquid phase sintering and hot pressing processes. It has been determined that samples produced by adding 4 wt.% AgCd to the matrix and applying a sintering process at 750°C exhibit the best results in terms of mechanical and physical properties.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Kompozit malzemeler, birbirleri içinde çözünmeyen en az iki veya daha fazla malzemenin bir araya getirilerek oluşturulduğu malzemelerdir [1]. Bu malzemeler, yüksek dayanım, aşınma ve korozyon direnci, rijitlik, sıcaklık performansı, ısı iletkenlik, ses sönümlenme, düşük ağırlık ve estetik görünüm gibi çeşitli özelliklerin sağlanmasına olanak tanır [2,3]. Kompozitler, genellikle bir ana matris ve bir veya daha fazla takviye elemanından oluşur [3]. Matris malzemeleri, kompozitlerin kullanım amacına ve üretim yöntemine bağlı olarak metal, seramik veya polimer olabilir. Metal matrisli kompozitler (MMK'ler), sünek bir metal matris içine sert veya sünek takviye malzemeleri eklenerek üretilir [4].

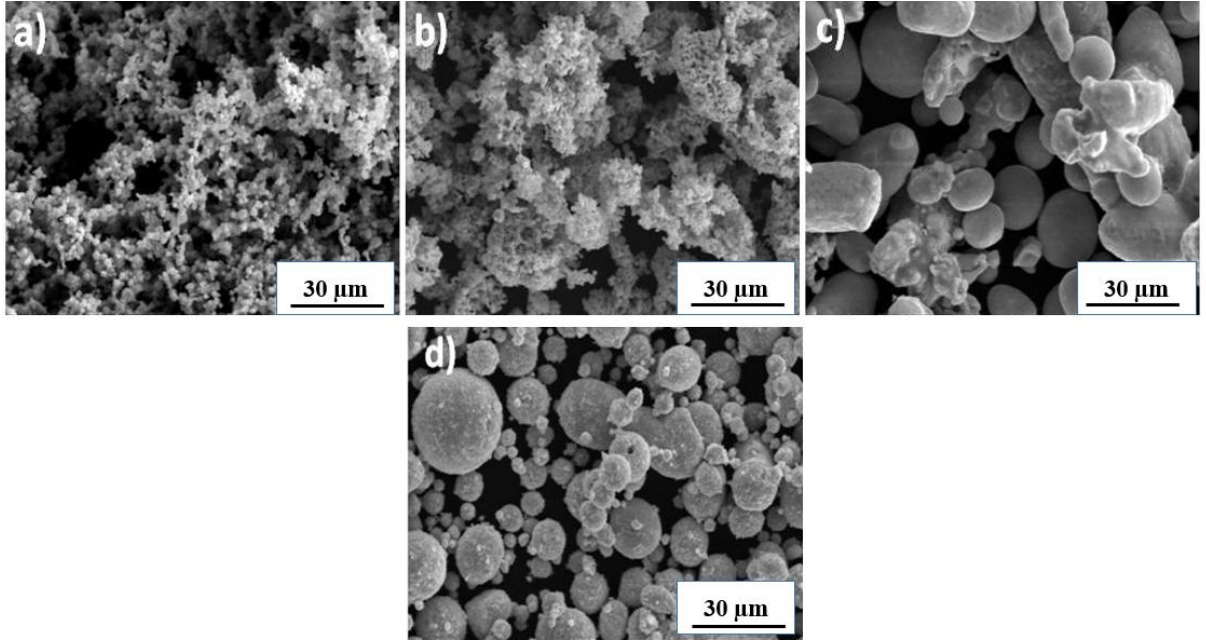
Geleneksel üretim yöntemleri, özellikle kaynak, döküm ve talaşlı imalat gibi teknikler, bazı durumlarda oldukça karmaşık geometriye sahip parçaların ve alaşımların üretimini zorlaştırabilir veya imkânsız hale getirebilir. Yüksek ergime sıcaklıklarına sahip metaller, örneğin molibden (W), tungsten (W) ve platin (Pt), bu geleneksel yöntemlerle işlenmesi genellikle tercih edilmez. Bu tür malzemelerin işlenmesinde toz metalurjisi tekniği, bu zorlukların üstesinden gelmesini sağlar. Toz metalurjisi, bu metallerin ve parçaların rahatlıkla şekillendirilmesine olanak tanırken, döküm ve talaşlı imalat sırasında ortaya çıkan malzeme kayıplarını ve işleme kayıplarını minimize eder. Bu nedenle, toz metalurjisi, malzeme kaybını azaltma ve işçilik maliyetlerini düşürme açısından ekonomik bir üretim yöntemi olarak öne çıkar [5]. Sıcak presleme, toz metalurjisi üretim yöntemlerinden biri olarak, yüksek yoğunluklu malzemelerin üretilmesi için yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu yöntemde, malzemelere izostatik basınç uygulanır ve işlem, koruyucu bir gaz ortamında gerçekleştirilir [6]. Yüksek sıcaklık ve basınç altında uygulanan süre, malzemenin plastik deformasyonuna, sürtünmeye ve difüzyona neden olur. Gözeneklerin ortadan kaldırılması ve malzemenin mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi amacıyla, toz metalurjisi uygulamalarında parçalar sıcak izostatik presleme işlemine tabi tutulur. Bu işlem, katı veya toz formundaki iki veya daha fazla malzemenin bir araya getirilmesine veya kaplanmasına olanak sağlar [7]. AgCd (gümüş-kadmiyum) takviyesi, metal matrisli kompozitlerin performansını artırmada önemli bir rol oynar. Kadmiyum, metal matrisin akışkanlığını artırarak

sıvı faz sinterleme sırasında daha homojen bir yapı sağlar, böylece yüksek sıcaklıklarda daha stabil bir performans gösterir. Gümüş ise yüksek elektriksel ve termal iletkenlik özellikleri sunarak kompozitin bu alanlarda performansını artırır ve korozyon direncini geliştirir. Bu iyileştirmeler, kompozitlerin elektriksel ve termal uygulamalarda daha etkili olmasını ve genel performansını artırmasını sağlar [8].

Çalışmada, bronzun ağırlıkça %80, nikelin %15 ve kobaltın %5 oranında kullanıldığı bir metal matris oluşturulmuş ve bu matrise, ağırlıkça farklı oranlarda AgCd alaşımları eklenerek metal matrisli kompozit (MMK) malzeme üretilmiştir. Bu kompozit malzeme, sıcak pres sinterleme tekniği kullanılarak imal edilmiştir. Elde edilen malzemenin mikroyapısı, faz bileşenleri ve kırık yüzey özellikleri, taramalı elektron mikroskobu (SEM) aracılığıyla detaylı bir şekilde incelenmiştir. SEM analizi, malzemenin mikro yapısal detaylarını ve faz dağılımını ortaya koyarken, malzemenin sertlik ve yoğunluk gibi mekanik özellikleri de ölçülerek performans değerlendirilmesi yapılmıştır.

2. MATERYAL VE METOD (MATERIALS AND METHODS)

Çalışma kapsamında kullanılan %99 saflıktaki CuSn15, Ni, Co tozları ve %95 saflıktaki AgCd alaşımı piyasadan ticari olarak temin edildi. Karışımı oluşturan malzemeler, 0.01 gram hassasiyetinde bir tartı kullanılarak (RADWAG, Kore) belirlenen oranlarda tartıldı. Hazırlanan toz karışımının kirlenmesini önlemek amacıyla, yüksek yoğunluklu polietilen bir kaptaki, turbula mikser (Çelmak TB7, Türkiye) ile 30 dakika süreyle 40 devir/dakika hızında kuru karıştırma işlemi gerçekleştirildi. Kuru karıştırma işleminin amacı, malzeme karışımının homojen bir ön karışımını sağlamaktır. Matristen beklenen performansı elde edebilmek için seçilen tozların düzgün bir şekilde karıştırılması ve matris içinde eşit olarak dağılması gerekmektedir. Toz partiküllerinin boyutlarını küçülterek karışımın homojenliğini artırmak ve matris içerisinde eşit dağılımını sağlamak amacıyla mikser kullanılmıştır. Deneyde kullanılan tozların Taramalı Elektron Mikroskobu görüntüleri Şekil 1'de gösterilmiştir. Deneyde kullanılan numune kodları ve numune içerikleri ise Tablo 1'de verilmiştir.



Şekil 1. Deneyde kullanılan malzemelerin SEM görüntüleri a)Nikel, b) Kobalt, c) CuSn15, d) AgCd (The SEM images of the materials used in the experiment are a) Nickel, b) Cobalt, c) CuSn15, d) AgCd)

Tablo 1. Numune kodları ve içerikleri (Sample codes and compositions)

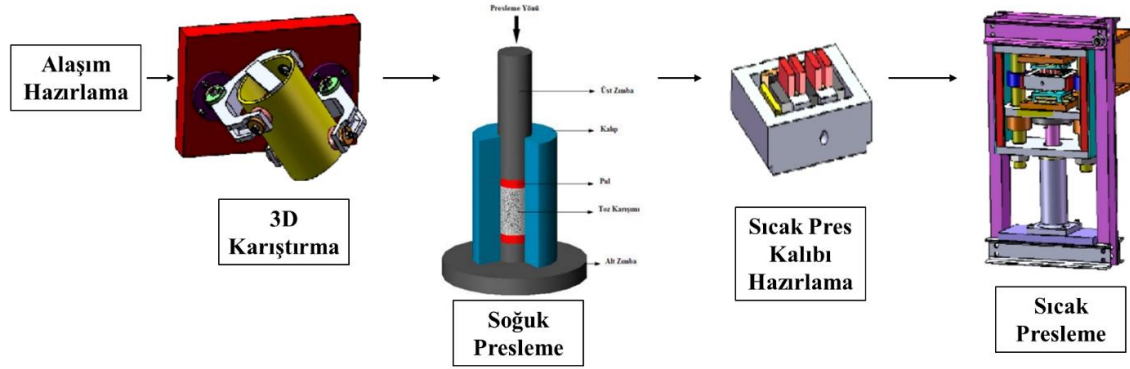
NUMUNE KODU	NUMUNE İÇERİĞİ (ağırlıkça)
S1	% 80 CuSn15+% 15 Ni+% 5 Co
S2	S1+% 2 AgCd
S3	S1+% 4 AgCd
S4	S1+% 6 AgCd

Ön karışımı yapılan malzemelere, homojen bir karışım elde etmek amacıyla %2 oranında polietilen glikol (PEG) eklendi. PEG'in topaklanma etkisini önlemek ve ıslatıcıyı karışım içinde eşit şekilde dağıtmak için, karışıma hacimce 3/1 oranında, aynı boyutta 55 HRC sertliğinde, taşlanmış ve etil alkol ile temizlenip kurutulmuş çelik bilyeler ilave edilerek karıştırıldı. Karışımın yapıldığı mikser kapalı tip bir hazneye sahiptir. Karışım hazneye konduktan sonra, dış ortam ile tozların teması kesilmek üzere haznenin kapağı sıkıca kapatılır. Mikser çalıştırıldığında, toz haznesi 360 derece dönebilme özelliğine sahip olup, bu hareket sayesinde tozlar homojen bir şekilde karışmaktadır. Karıştırılan malzemeler 20 gramlık gruplar halinde tartıldı ve çift etkili soğuk pres kullanılarak 300 MPa basınç altında 4 saniye süreyle preslendi. Bu yanmasını sağlamak için 480 °C'de 2 dakika süreyle bekleme yapıldı. Sinterleme tamamlandıktan sonra, numuneler 35 MPa basınç altında 200 °C'de

işlem sonucunda, 23×23×9 mm boyutlarında numuneler elde edildi. Soğuk preslenen malzemeler grafit kalıplara yerleştirildi. Malzemelerin kalıplara yapışmasını önlemek ve sıcak presleme sonrası kolayca çıkarılmasını sağlamak için, grafit kalıp yüzeylerine sıvı bor nitrür sürüldü. Grafit kalıptaki numuneler, PLC kontrollü ve doğrudan dirençli ısıtma tekniği kullanılarak sıcak presleme işlemi uygulandı. Numuneler, 120 °C/dak ısıtma oranında ve 35 MPa basınç altında, sırasıyla 650, 700 ve 750 °C sıcaklıklarda 4 dakika süreyle %99.9 saf azot (N₂) atmosferinde sıcak presleme işlemine tabi tutuldu. Sıcaklık ölçümü, grafit kalıbın merkezine yerleştirilen 1200 °C kapasiteli K tipi bir termokupl ile gerçekleştirildi. Sinterleme işleminin başlangıcında, matris karışımına eklenen PEG'in

soğutuldu ve oda sıcaklığına gelene kadar bekletildi. Her seriden 23×23×9 mm boyutlarında beş adet numune üretildi. Şekil 2'de deneyde

kullanılan sıcak presleme yöntemi aşamaları verilmiştir.



Şekil 2. Denede kullanılan sıcak presleme yöntemi [10, 24] (The hot pressing method used in the experiment [10, 24])

Malzemeleri metalografik işlemlere hazırlamak için yüzeyleri 300, 600, 800, 1000, 1200 ve 2000 Mesh'lik su zımparaları ile zımparalandı. Zımparalama işleminden sonra malzeme yüzeyleri sırasıyla 3 mikron ve 1 mikronluk elmas pastalar ile çuha üzerinde parlatılarak dağlama işlemine hazır hale getirildi. Parlatılan yüzeylerdeki kalıntıları temizlemek için, numuneler etil alkol ile temizlenip kurutuldu. Temizlenen yüzeyler, $5\text{HNO}_3 + 5$ asetik asit + $1\text{H}_3\text{PO}_4$ karışımının %50 oranını saf su ile seyrelterek hazırlanan çözeltide, daldırma yöntemi ile dağlama işlemine tabi tutuldu.

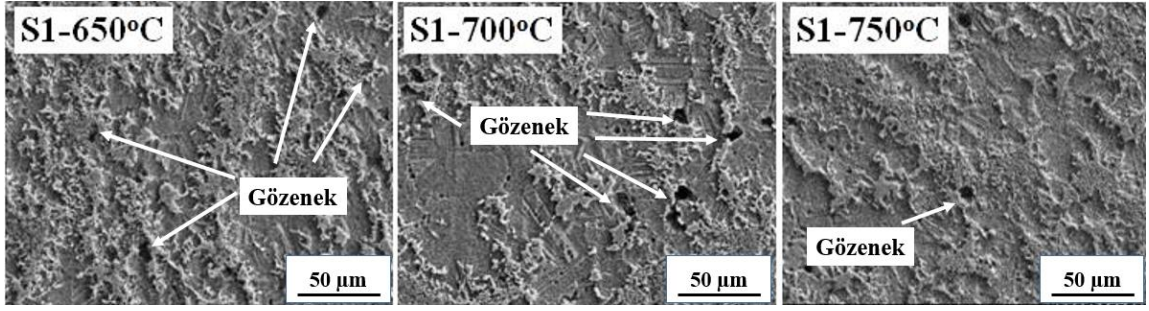
Numunelerin yoğunluğunu belirlemek için Arşimet prensibine dayalı yoğunluk ölçümü yapılmıştır. Bu işlem için ASTM B-311 standardı kullanılmıştır. Üretilen numunelerin makro sertliklerini belirlemek için, üçüncü nesil universal sertlik ölçme cihazı kullanılmıştır. Sertlik ölçümü, 187,5 kg yük ve 2,5 mm çapındaki ölçüm gücü ile Brinell (HB30) ölçeğinde gerçekleştirilmiştir. Her numune için 6 ayrı ölçüm yapılmış ve elde edilen sertlik değerlerinin aritmetik ortalaması alınarak sertlik değerleri hesaplanmıştır. Eğilme mukavemetini belirlemek için üç noktalı eğilme deneyi gerçekleştirilmiştir. Deneyler, ASTM B 528-83a standardına uygun olarak, 1 mm/dk hızda ve 30 mm alt destek boşluğunda yapılmıştır. Testler, 100 kN kapasiteli marka universal test cihazı ile ve TRAPEZIUMX yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. SEM ve EDS analizi, Hitachi SU3500 marka cihaz kullanılarak yüksek vakum altında gerçekleştirilmiştir.

3. BULGULAR (RESULTS)

Sıcak presleme yöntemiyle üretilen numunelerin sonuçları değerlendirilmiştir. Numunelerin mikroyapı, sertlik, yoğunluk, üç noktalı eğilme mukavemeti analizleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar, grafikler ve fotoğraflar ile sunulmuştur.

3.1. Mikroyapı Analizi (Microstructure Analysis)

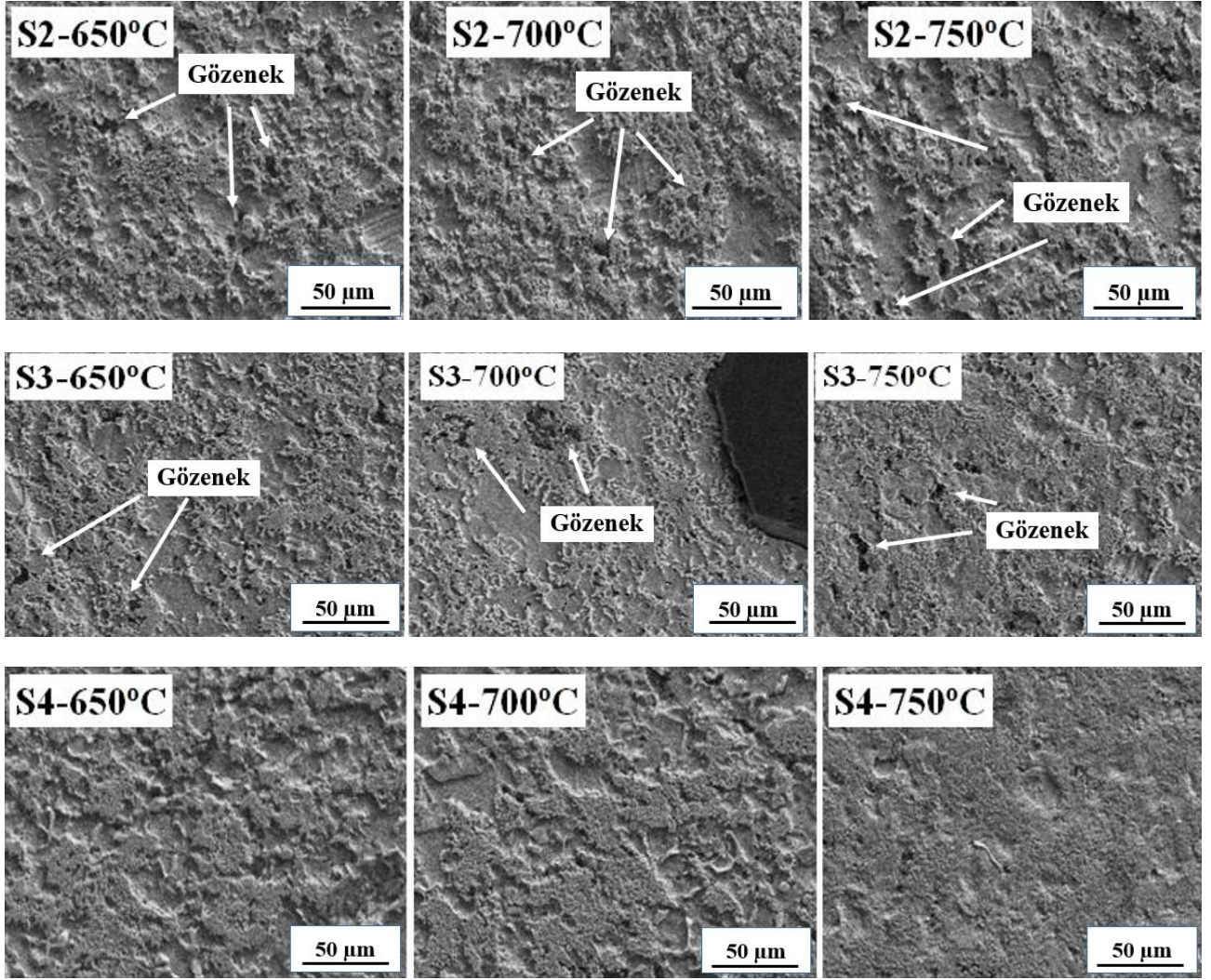
Şekil 3'te, S1 numunesinin 650, 700 ve 750 °C sıcaklıklarındaki sinterleme işlemi tamamlandıktan sonra elde edilen mikroyapının SEM fotoğrafları gösterilmiştir. Bu fotoğraflardan, matrisin %80'ini oluşturan bronzun yapıda homojen bir şekilde dağıldığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, matris içerisine eklenen Ni ve Co elementleri, tane sınırlarında bir araya gelerek makro gözenekleri doldurmuştur. S1 numunesinde 650 °C sinterleme sıcaklığında, genellikle mikro boyutta kısmi gözenekler gözlemlenmiştir. Sinterleme sıcaklığı arttıkça, mikro gözenekler birleşerek makro gözeneklere dönüşmüştür. 700 °C'de sinterlenen S1 numunesinde, gözenekler kısmen kaybolmuş ve yapı daha düzenli (homojen) hale gelmiştir. 750 °C'de sinterlenen S1 numunesinde ise, sinterleme sıcaklığının artmasıyla birlikte hem makro hem de mikro gözenekler azalmıştır. Artan sıcaklık ve basınç etkisiyle, bronz partikülleri yassılaştı ve bronz zengin bölgelerin varlığı azalmıştır [9]. 750 °C'de sinterleme ile yapı içerisindeki gözenekler daha da azalırken, malzemenin yapısında belirgin bir düzenlenme gözlemlenmiştir. Bu sonuçlar, sinterleme sıcaklığının artmasının malzemenin gözenekli yapısında gözle görülür bir azalmaya yol açtığını göstermektedir.



Şekil 3. Matris olarak kullanılan S1 numunesinin farklı sıcaklıklardaki SEM görüntüleri (SEM images of the S1 sample used as the matrix at different temperatures)

Şekil 4'te, AgCd içeren S2, S3 ve S4 numunelerinin SEM mikroyapı fotoğrafları sunulmuştur. Bu fotoğraflarda, AgCd eklenmesinin mikroyapı üzerindeki etkileri incelenmiştir. S2 numunesinde, kısmen mikro gözeneklerin azalmasına yol açmıştır. Artan sıcaklıkla birlikte, sıvı fazın yapı içinde daha iyi dağıldığı ve gözenekleri doldurduğu gözlemlenmiştir. Katkısız S1 numunesinin mikroyapısı ile karşılaştırıldığında, makro gözeneklerin belirgin şekilde azaldığı görülmüştür. Ayrıca, bronz zengin bölgelerinin azaldığı ve segregasyonun daha düşük olduğu bir mikroyapı elde edilmiştir. Bu bulgular, sıvı fazın sinterleme sırasında partikül hareketlerini kolaylaştırdığını ve böylece bölgesel tane irileşmesini engellediğini göstermektedir. 750°C'de yapılan sinterlemede, SEM görüntüleri AgCd sıvı fazının Ni-Co zengin bölgelerdeki mikro gözenekleri doldurduğunu ve yapıyı daha homojen hale getirdiğini ortaya koymuştur. S3 numunesinde, S2 numunesine göre daha homojen bir dağılım sağladığı gözlemlenmiştir. 650°C'de sinterlenen S3 numunesinde, artan sıvı fazın etkileri mikroyapı fotoğraflarında belirginleşmiştir. Mikro gözenek miktarındaki azalma ve bronz tanelerinin Ni-Co arasındaki birleşme gözle görülür şekilde artmıştır. 750 °C'de yapılan sinterleme işlemi, makro gözeneklerin boyutlarını küçültmüş ve sıvı faz etkisi ile partiküllerin hareketliliği artmış, böylece

segregasyonun azaldığı görülmüştür. S4 numunesinde ise, sıvı fazın tanecikler arasındaki difüzyonunu artırmış ve partiküller arasındaki bağlanmayı kolaylaştırmıştır [23]. Bu, matris içinde daha iyi çözünme sağlamıştır. Artan sıvı faz miktarı, 650°C'den itibaren mikroyapıda görülen makro gözenek miktarını önemli ölçüde azaltmıştır. Ayrıca, Ni-Co zengin bölgelerin yapı içinde daha homojen bir şekilde dağıldığı gözlemlenmiştir. 700°C'de sinterlenen numune ise Ni-Co adacıkları belirginleşmiştir. 750°C'de artan AgCd oranı ve sıcaklık etkisi ile oluşan sıvı faz miktarı, neredeyse tamamen gözeneklerden arınmış bir içyapı sağlamıştır. Bu sıcaklık ve ilave edilen AgCd miktarı, yapı içerisindeki fazların daha homojen bir şekilde dağılmasına yol açmıştır. Özellikle, %6 AgCd oranı, mikroyapıda AgCd zengin bölgelerin oluşumunu tetiklemiştir (Şekil 5). AgCd, matris içerisinde homojen bir şekilde dağılmış ve mikro ile makro gözenekleri doldurarak mikroyapının daha düzenli hale gelmesini sağlamıştır. 750°C'de sinterlenen S4 numunesinde, artan sinterleme sıcaklığı ve %6 AgCd ilavesinin, partiküller arası bağ oluşumunu sıvı faz etkisiyle iyileştirdiği gözlemlenmiştir. Genel olarak, mikroyapı incelemeleri, AgCd miktarının ve sinterleme sıcaklığının artmasının mikroyapılarda iyileştirici değişimlere yol açtığını göstermektedir [11].



Şekil 4. S2 (%2 AgCd), S3 (%4 AgCd) ve S4 (%6 AgCd) numunelerinin farklı sıcaklıklardaki SEM görüntüleri (SEM images of the S2 (2% AgCd), S3 (4% AgCd), and S4 (6% AgCd) samples at different temperatures)

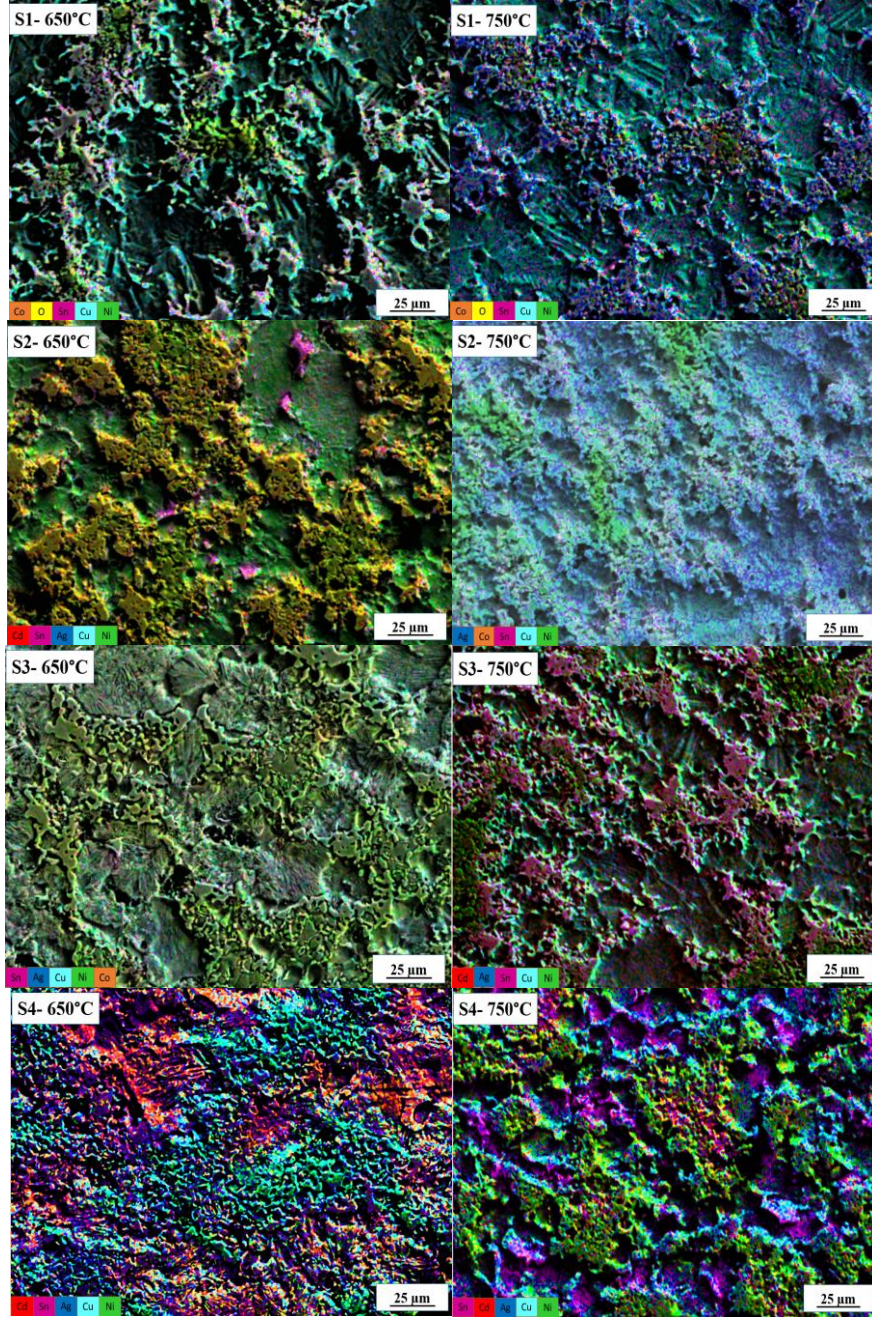
3.2. EDX-MAP Analizi (EDX- MAP Analysis)

Üretilen numunelerde toz karışımına katılan CuSn15, Ni, Co ve AgCd'in mikroyapı içerisindeki dağılımını daha iyi anlamak amacıyla 650°C ve 750°C'de sinterlenen numunelerin EDX-MAP analizleri yapılmıştır. 700°C sinterleme sıcaklığında analiz yapılmamıştır çünkü bu sıcaklıkta elde edilen mikroyapının yapısal değişiklikleri, 650°C ve 750°C sıcaklıklarındaki değişimlerle kıyaslandığında daha az belirgin ve anlamlı farklılıklar göstermiştir. 650°C ve 750°C sıcaklıkları, mikroyapısal özelliklerin daha belirgin değişikliklerini ortaya koyarak, bu sıcaklık noktalarında malzeme özelliklerinin detaylı bir şekilde incelenmesini sağlamıştır. Şekil 5'te, 650 C ve 750°C sinterleme sıcaklıklarında üretilen numunelere ait EDX-MAP analiz görüntüleri sunulmuştur. Bu analizler, katkı elemanlarının yapı içinde homojen bir şekilde dağıldığını ortaya

koymaktadır. Ni ve Co zengin bölgeler, Bronz tanelerinin sınırlarında belirgin olarak gözlemlenmiştir. 750°C sinterleme sıcaklığında, sıcaklığın etkisiyle Bronz tanelerinde belirgin bir büyüme meydana gelmiştir. Özellikle Ni'in CuSn15 tanelerinin sınırlarında yoğunlaştığı gözlemlenmiştir. S2 numunesinin EDX-MAP analizleri, S1 numunesi ile karşılaştırıldığında AgCd sıvı fazının yapıdaki gözenekleri kısmen azalttığını göstermektedir. Bu analizlerde, Bronz tanelerinde belirli bir irileşme gözlemlenmiştir. Ayrıca, Ni-Co zengin bölgelerinin daha homojen bir dağılım sergilediği belirlenmiştir. 750°C'de sinterlenen S2 numunesinde, S1 numunesine göre Bronz tanelerinin büyümesinin daha belirgin olduğu görülmüştür. Ayrıca, AgCd sıvı fazının kapiler etki nedeniyle Ni-Co bölgelerindeki gözeneklere nüfuz ettiği gözlemlenmiştir. S3 numunesinin sinterleme analizlerinde, AgCd

oranının artmasıyla Bronz tanelerindeki irileşme oranının da arttığı görülmüştür. S2 numunesine kıyasla, Ni-Co adacıklarının daha yoğun bir yapı oluşturduğu tespit edilmiştir. 750°C’de sinterlenen S3 numunesinde ise Bronz tanelerinde gözle görülür değişiklikler meydana gelmiştir; bu

durumun AgCd sıvı fazının Bronz tanelerini kısmen çözdürmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Sıvı fazın etkisiyle partiküller arasındaki hareketlerin, mikroyapısal değişimlere neden olduğu değerlendirilmiştir.

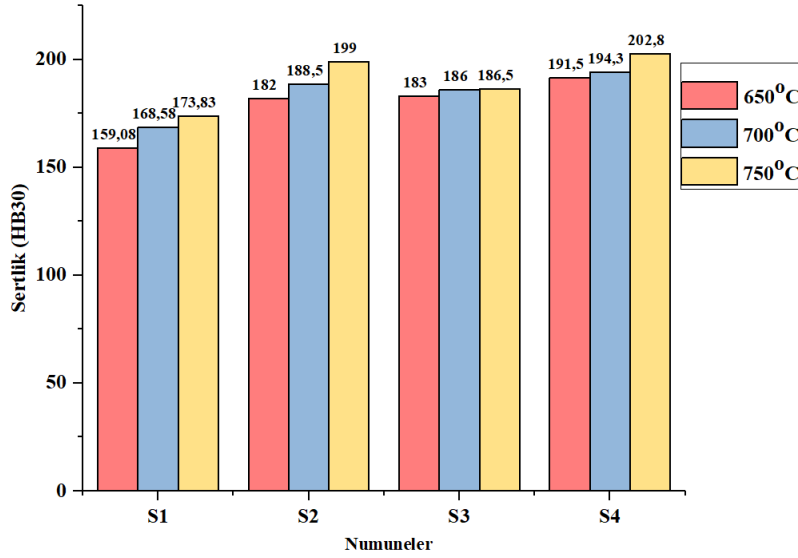


Şekil 5. S1 (CuSn15), S2 (%2 AgCd), S3 (%4 AgCd) ve S4 (%6 AgCd) numunelerinin 650°- 750° sıcaklıklardaki EDX-MAP görüntüleri (EDX-MAP images of the S1 (CuSn15), S2 (2% AgCd), S3 (4% AgCd), and S4 (6% AgCd) samples at temperatures of 650°C-750°C)

3.3. Sertlik Analizi (Hardness Analysis)

Üretilen numunelere ait sertlik ölçüm sonuçları Şekil 6'da sunulmuştur. Grafikten, AgCd katkısının artışıyla numunelerin sertlik değerlerinde belirgin bir artışa neden olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca, sinterleme sıcaklığındaki artışın, S1, S2, S3 ve S4 numunelerinin sertlik değerlerini artırdığı tespit edilmiştir. Sıcaklık yükseldikçe, gözenek miktarının azaldığı ve partiküller arasında daha sıkı bağların oluştuğu görülmüştür. Bu durum, sertlik değerlerinde artışa neden olmuştur. AgCd katkısının sıvı faza dönüşmesi, gözenekleri doldurmuş ve sinterleme sürecindeki partikül hareketlerini kolaylaştırmıştır [12]. Bu etki, sertlik değerlerinin artmasını sağlamıştır. Sertlikteki artışın bir diğer nedeni, sıcaklık artışı ile toz partikülleri arasında sıvı hal difüzyonu ve partikül hareketi yoluyla daha iyi bir bağlanmanın oluşmasıdır [13]. Grafik incelendiğinde, S3 numunelerindeki sertlik artışının S2 numunesine kıyasla beklenenin altında olduğu gözlemlenmiştir. Bu durumun, oluşan sıvı

fazın kapiler etki sonucu mikro gözenekleri doldurması ve artan sinterleme sıcaklığı ile makro gözeneklerin yol açtığı yapısal kusurlardan kaynaklandığı düşünülmektedir. Ayrıca, %4 oranındaki AgCd'nin sıvı faz miktarının mukavemet değerlerinde bir eşik değeri oluşturabileceği sonucuna varılmıştır. Elde edilen sonuçlara ve Şekil 6'da gösterilen verilere göre, sinterleme sıcaklığı ile numunelerin sertlik değerleri arasında genel bir doğru orantı görülmektedir. Ancak, bu doğrusal ilişki belirli bir sıcaklık aralığına kadar geçerlidir ve belirli bir sıcaklık noktasından sonra bu ilişki bozulabilir [14, 15]. Sonuç olarak, AgCd takviye elemanının matris içinde çözünerek numunelerin mukavemetine önemli katkılar sağladığı belirlenmiştir. Ayrıca, numune sertliklerinde sıcaklık artışının etkisiyle bir yükselme gözlemlenmiştir, bu da sıcaklık artışının sertlik üzerinde artırıcı bir rol oynadığını ortaya koymaktadır.



Şekil 6. Sinterleme sıcaklığı ve katkılama oranının numunelerin sertliğine etkisi (The effect of sintering temperature and addition ratio on the hardness of the samples)

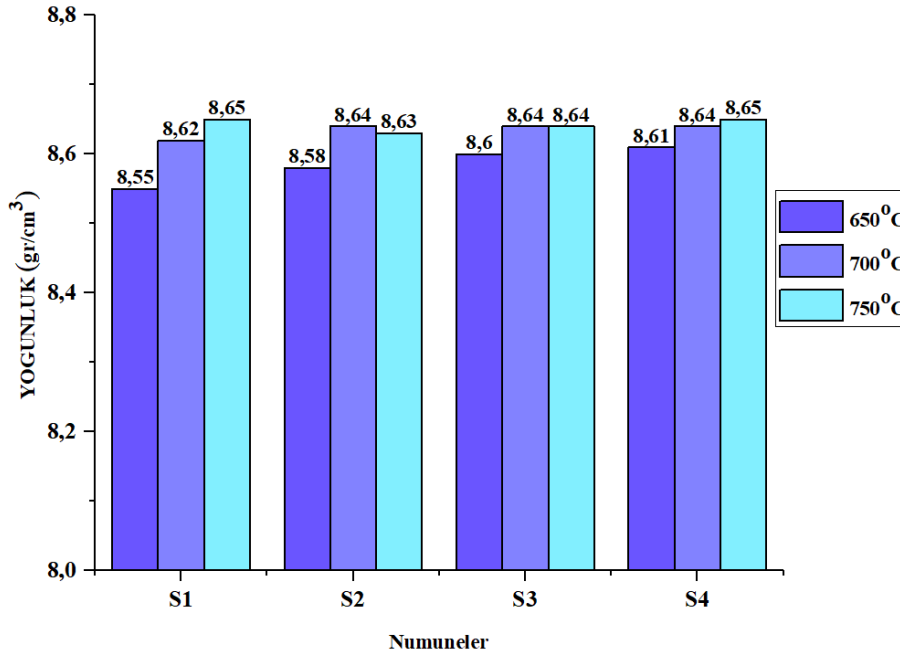
3.4. Yoğunluk Analizi (Density Analysis)

Şekil 7' de, 650, 700 ve 750 °C sinterleme sıcaklıklarında tüm numunelerin yoğunluk değişimleri sunulmuştur. Bu veriler, matris içerisine eklenen AgCd'nin artan sinterleme sıcaklıkları ile birlikte yoğunluk üzerinde belirgin bir artırıcı etki sağladığını göstermektedir. Artan AgCd oranı, matrisin tanecikler arasında daha etkili bir şekilde yayılmasını ve boşlukları doldurmasını sağlayarak yoğunluğu artırmaktadır [16, 17]. Ayrıca, sabit

sinterleme sıcaklıklarında AgCd ilavesinin bağlı yoğunlukları artırdığı ve bu durumun, artan AgCd oranının sıkıştırılabilirlik üzerindeki olumlu etkisi ile açıklanabileceği görülmektedir [18]. 750 °C'de sinterlenen S2 ve S3 numunelerinde yoğunluk değerlerinde bir miktar azalma gözlemlenmiştir. Bu azalma, sinterleme sırasında AgCd sıvı fazının kalıplardan sızması sonucu materyalin iç yapısında meydana gelen yoğunluk kaybına bağlanmaktadır.

Numunelerin teorik yoğunluk değerleri sırasıyla 8.67, 8.68, 8.69 ve 8.70 gr/cm³ olarak belirlenmiştir. Artan sıcaklığın etkisiyle, malzeme içinde daha homojen bir dağılım ve sıkışmış bir yapı gözlemlenmiştir. Yoğunluk verilerinde bu değişim doğrudan gözlemlenmemiş olsa da sertlik ve SEM görüntüleri bu yapısal iyileşmeyi desteklemektedir. Sinterleme sıcaklığındaki artışla birlikte, teorik ve deneysel yoğunluklar arasındaki farkın azaldığı gözlemlenmiştir. Bu durum, toz metal partiküllerinin birbirine olan difüzyonunun sinterleme sıcaklığına bağlı olarak iyileşmesinden

kaynaklanmaktadır ve sonuç olarak yoğunluğun artmasına neden olmaktadır [4]. Artan sinterleme sıcaklığı, partiküller arasında sıvı faz oluşumunu artırmakta ve bu da partiküller arasındaki difüzyon sürecini teşvik etmektedir [19]. Genel olarak, artan sinterleme sıcaklıklarında bağlı yoğunlukların arttığı, bu durumun ise sinterleme işleminin etkinliğini ve malzemenin yapısal bütünlüğünü güçlendirdiğini göstermektedir [20].



Şekil 7. Sinterleme sıcaklığı ve katkılama oranının numunelerin yoğunluğa etkisi (The effect of sintering temperature and addition ratio on the density of the samples)

3.5. 3 Noktalı Eğilme (TRS) Deneyi Sonuçları (3

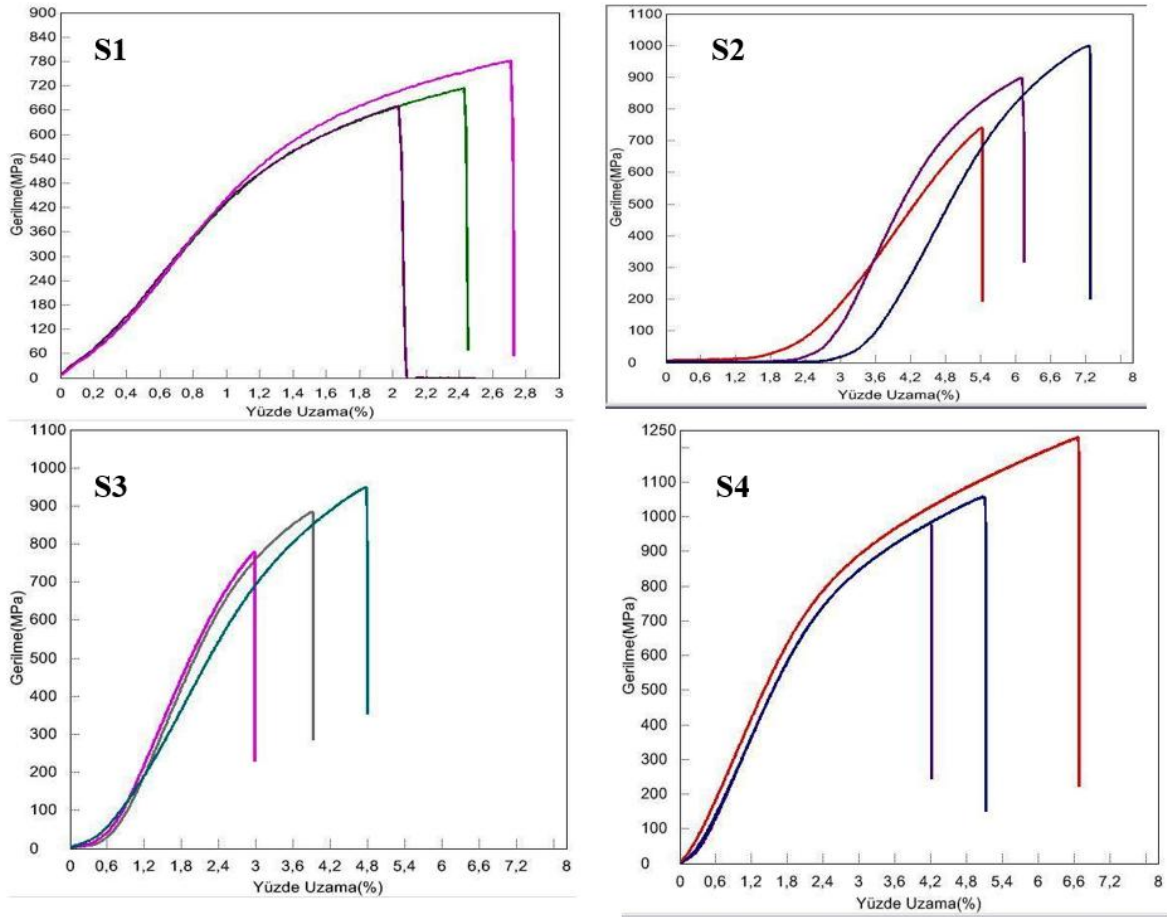
Point Bending (TRS) Test Results)

S1, S2, S3 ve S4 numunelerinde yapılan analizler, sinterleme sıcaklığındaki artışla birlikte eğme dayanımlarında gözle görülür bir artış sağlandığını göstermiştir. Bu bulgular, aşağıda sunulan grafiklerde detaylı olarak gözlemlenmiştir (Şekil 8). S1 numunelerinin eğme testi 650°C, 700°C ve 750°C sinterleme sıcaklıklarında üretilen numuneler sırasıyla 670 MPa, 713 MPa ve 780 MPa gerilme altında %2,1, %2,45 ve %2,72 oranında uzama göstererek kırılmıştır. Eğme dayanımı, sinterleme sıcaklığındaki artışla birlikte belirgin bir şekilde yükselmiştir; en yüksek eğme dayanımına 750°C'de, 780 MPa gerilme ile ulaşılmıştır. Ayrıca, sinterleme sıcaklığındaki artışın, eğilme mukavemeti ile birlikte numunelerin uzama miktarını da etkilediği gözlemlenmiştir. Bu bulgular, sinterleme sıcaklığının malzemenin

mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini açıkça ortaya koymaktadır. S2 numuneleri üzerinde gerçekleştirilen üç noktalı eğme testleri, sırasıyla 742 MPa, 892 MPa ve 988 MPa gerilmelerde %5,41, %6,09 ve %7,25 uzama ile kırılma göstermiştir. %2 AgCd katkısının S2 numunelerinin üç noktalı dayanımına olumlu bir etkisi olduğu ortaya konmuştur. %2 AgCd ilavesi sayesinde S2 numunelerinin üç noktalı dayanımları, S1 numunelerindekilerden daha yüksek değerler göstermiştir. Ayrıca, S2 numunelerinde sinterleme sıcaklığının artışı ile birlikte eğme dayanımlarında belirgin bir artış gözlemlenmiştir. Sinterleme sıcaklığı ile birlikte boyca uzamanın da etkilenmiş olduğu; düşük sinterleme sıcaklıklarında %5,41 olan uzamanın, yüksek sinterleme sıcaklıklarında %7,25'e yükseldiği ve bu artışın yaklaşık %1,84

olarak hesaplandığı belirlenmiştir [4]. Bu sonuçlar, sinterleme sıcaklığı ve AgCd katkısının numunelerin mekanik performansı üzerindeki etkilerini vurgulamaktadır. S3 numuneleri, sırasıyla 778 MPa, 884 MPa ve 948 MPa gerilmelerde %2,96, %3,9 ve %4,7 uzama ile kırılmıştır. %4 AgCd içeren S3 numunelerinin üç noktalı eğilme dayanımları, %2 AgCd eklenen S2 numunelerine kıyasla daha yüksek değerler göstermiştir. Bu artışın nedeni, matris içerisine eklenen AgCd miktarının artmasıyla sinterleme sürecinde sağlanan sıvı fazın, partiküller arasında daha iyi bir bağlanma ve homojenlik sağlayarak mekanik özellikleri iyileştirmesidir. AgCd'nin artan miktarı, matris içindeki gözenekleri daha etkin bir şekilde doldurarak ve partiküller arası bağları güçlendirerek eğilme dayanımını artırmıştır. S4 numuneleri, sırasıyla 980, 1057 ve 1228 MPa gerilmeleri altında, %4,19, %5,07 ve %6,66 uzama göstererek kırılmıştır. Ağırлықça %6 AgCd içeren S4

numuneleri, en yüksek 3 noktalı eğilme dayanımına sahip olan numunelerdir. Bu durum, S4 numunelerindeki AgCd oranının en yüksek olmasıyla açıklanmaktadır. Şekil 8'de gösterildiği üzere, S4 numunesi 750 °C'de 1228 MPa gerilme altında en yüksek eğilme dayanımına ulaşmıştır ve aynı zamanda bu sıcaklıkta boyca uzama miktarı %6,66'ya kadar çıkabilmiştir. AgCd eklenmesiyle, matris yüzeylerinde farklı genişleme katsayılarından kaynaklanan gerilim yoğunlaşmaları meydana gelmektedir. Bu durum, matrisin dayanımını artıran dislokasyonların yüzeyde birikmesine yol açar. Sıcaklık arttıkça, dislokasyon yoğunluğu da artmakta ve bu da matrisin dayanımını olumlu yönde etkilemektedir [21]. Artan AgCd oranı, matris içerisinde daha fazla yer alarak yapı içindeki gözenekleri doldurur ve böylece malzemenin yoğunluğunu artırır [22]. Elde edilen mikro yapı ve sertlik sonuçları da bu eğilimleri desteklemektedir.



Şekil 8. S1 (CuSn15), S2 (%2 AgCd), S3 (%4 AgCd) ve S4 (%6 AgCd) numunelerinin 650°- 750° sıcaklıklardaki 3 noktalı eğilme grafikleri (3 point bending graphs of the S1 (CuSn15), S2 (2% AgCd), S3 (4% AgCd), and S4 (6% AgCd) samples at temperatures of 650°C-750°C)

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

- Matrise eklenen ağırlıkça %2, %4 ve %6 AgCd'nin, matris içerisinde homojen bir dağılım göstermediği durumlarda, malzemenin mekanik ve fiziksel özelliklerinin olumsuz yönde etkilendiği belirlenmiştir. Mikroyapı incelemeleri, AgCd miktarının artışı ve sinterleme sıcaklığının yükselmesinin, mikroyapı üzerinde iyileştirici değişikliklere neden olduğunu göstermektedir.
- EDX-MAP analiz sonuçları, katkı elemanlarının yapı içinde homojen olarak dağıldığını ve Ni ile Co zengin bölgelerin Bronz tane sınırlarında yoğunlaştığını ortaya koymuştur. 750 °C'de sinterlenen numunelerde, sinterleme sıcaklığının etkisiyle Bronz tanelerinde belirgin bir irileşme gözlemlenmiştir. EDX analizleri, Nikel'in Bronz tane sınırlarında yoğunlaştığını da göstermektedir.
- Sinterleme sıcaklığının artması, Ni-Co adacıklarının boyutlarını büyütmüş, bu durumun yapının daha gevrek bir hale gelmesine yol açtığı sonucuna varılmıştır.
- Matrise eklenen AgCd miktarının artması, AgCd'nin sıvı faza dönüşerek gözenekleri doldurmasına ve sinterleme esnasında partikül hareketlerini kolaylaştırmasına neden olmuş, bu da numunelerin sertliğini artırmıştır. Sinterleme sıcaklığının artırılması, partiküller arası sıkı bağ oluşumunu sağlamış ve gözenek miktarını azaltmıştır. Bu durum, numunelerin sertlik değerlerinde artışa yol açmıştır.
- AgCd takviye elemanının matris içinde çözünmesi, numunelerin mukavemetini artıran bir katkı sağlamıştır. Sinterleme sıcaklığının yükselmesiyle, partiküller arasında sıvı faz oluşumunda artış gözlemlenmiştir.
- Matrise eklenen AgCd, tanecikler arasında kolaylıkla yayılmakta ve boşlukları doldurarak yoğunluk üzerinde olumlu bir etki yapmaktadır. 750 °C'de sinterlenen %2 ve %4 AgCd katkılı numunelerin, yoğunluk değerlerinde bir miktar azalma görülmüştür. Bu durumun, sıcak presleme işlemi sırasında AgCd sıvı fazının kalıplardan sızarak yoğunluğu azaltması ile ilişkili olduğu düşünülmektedir.
- Tüm numunelerin sinterleme sıcaklığının artışı, eğilme dayanımlarında belirgin bir artış

sağlamıştır. Ayrıca, AgCd miktarının artması, eğilme dayanım değerlerinde bir artışa neden olmuştur. AgCd'nin matris içinde daha fazla yer alması, yapı içindeki gözenekleri doldurmuş ve malzemeyi daha yoğun bir hale getirmiştir.

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)

Büşra TUNÇ: Deneyle yapılmış, sonuçlarını analiz etmiş ve makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

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

Ertuğrul ÇELİK: Deneyle yapılmış ve sonuçlarını analiz etmiştir.

He conducted the experiments and analyzed 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] Ersoy, H.Y.,2001. Kompozit Malzeme, iç. Kompozit Malzemeler, Savaş Ciltevi, 11-13, Edi. Özal, S., Literatür Kitabevi, İstanbul, Türkiye
- [2] Donald, R.A., 1988. Composite materials, The Science and Engineering of materials, SI edition, Van Nostrand Reinhold.Co.Ltd., 507-546
- [3] Kınayyigit, F., 2007. Cam Elyaf Takviyeli Plastik Kompozitler Ders Notları
- [4] Çelik E., Tunç B., 2024, Bronz-Nikel-Kobalt matrisli kompozitlerde SiC oranlarının mikroyapı ve mekanik özelliklerine etkisi, Munzur 6. Uluslararası Uygulamalı Bilimler Kongresi, Tunceli, 217-225.
- [5] Yavuz, N., Güner, R., 2002. Demir Esaslı Toz Metal Parçaların Elektrik Direnç Kaynağından Optimum Kaynak Şartlarının Belirlenmesi, Uludağ

- Üniversitesi Mühendislik- Mimarlık Fakültesi Dergisi, 7(1), 221-228
- [6] Kurgan, N., 2005. T/M Paslanmaz Çelik İmplantlarının Üretimi ve Teknolojik Özellikleri Üzerine Bir Araştırma, Celal Bayer Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Manisa, Doktora Tezi, 9, 25-46.
- [7] Nas, E., Gökkaya, H., ve Sur, G., 2013. Sıcak presleme yöntemi kullanılarak kompozit malzemelerin üretilebilirliği üzerine bir değerlendirme, Karaelmas Science and Engineering Journal 3 (2), 56-65.
- [8] Hussain, M., Mahmoud, M.H.H, Rasheed, A., H. El Azab, I., Anwar, M., M. El-Bahy, Z., 2024, Silver-doped cadmium aluminate and its MXene based composite for visible-light driven photocatalytic degradation of organic pollutants, Optical Materials, 155 115824,
- [9] Çelik E., Tunç B., 2024, Alan destekli sinterleme yöntemi (FAST) ile üretilen bronz esanslı matrisin mekanik ve mikroyapı özelliklerine SiC'in etkisi, Al Farabi 12th International Scientific Research and Innovation Congress, Kazakistan, 654-663.
- [10] Çelik, E., 2011. Elmaslı Kesici Takımlarda Alternatif Bağlayıcılar. Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
- [11] Lee, D. W., Ha, G.H., Kim, B.K., 2001. Synthesis of Cu-Al₂O₃ nano composite powder, Scripta Materialia, 44(8-9), 2137-2140.
- [12] Min, K.H., Lee, B.H., Chang, S.Y., Kim, Y.D., 2007. Mechanical properties of sintered 7xxx series Al/SiCp composites, Materials Letters, 61, 2544-2546.
- [13] Dewidar, D., Abdel-Jaber, G.T., Bakrey, M., Badry, H., 2010. Effect of Processing Parameters and amount of additives on the Mechanical Properties and Wear Resistance of Copper-based Composite, International Journal of Mechanical & Mechatronics Engineering, 10-3, 25-40.
- [14] Kim, H.S., 2000. On the rule of mixtures for the hardness of particle reinforced composites, Materials Science and Engineering A, 289, 30-33.
- [15] Kumar, G.B.V., Rao, C.S.P., Selvaraj, N., 2011. Mechanical and tribological behavior of particulate reinforced aluminum metal matrix composites—a review, Journal of Minerals & Materials Characterization & Engineering, 10, 59-91.
- [16] Efe, Ç.G., Altınsoy, İ., İpek, M., Zeytin, S., Bindal, C., 2011. Some properties of Cu- SiC composites produced by powder metallurgy method, Kovove Metallic Materials, 49(2), 131-136.
- [17] German, R.M., 2005. Powder metallurgy and particulate materials processing, Metal Powder Industries Federation, USA.
- [18] Rahaman, M. N., 2003. Ceramic Processing and Sintering, 2nd Ed. CRC, 880, New York.
- [19] Lima, W.M., Velasco, F.J., Abenojar, J., Torralba, J.M., 2003. Numerical approach for estimating the elastic modulus in MMCs as a function of sintering temperature, Journal of Materials Processing Technology, 143-144, 698-702.
- [20] Kang, S.J.L., 2005. Sintering, Butterworth-Heinemann, Oxford.
- [21] Ageev S. V. and Girshov V. L., (2015). Hot Isostatic Pressing of Metal Powders, Metallurgist, 59 (7-8), 647–652.
- [22] Dwan, J.D., 2007. Fracture toughness determination of diamond impregnated PM cobalt, Industrial Diamond Review, 1, 33-36.
- [23] Arık, H., Semerci, P., Kırmızı, G., 2017, Sıcak presleme ile alüminyum matrisli Al₂O₃ takviyeli toz metal kompozit malzeme üretimi ve aşınma davranışının araştırılması, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji, 5 (4): 87-97,
- [24] Çolak, N. Y., Turhan, H., 2016, Toz Metalurjisi yöntemi ile Al-Si/B₄C kompozit malzemenin mikroyapı ve mekanik özelliklerinin araştırılması, Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 28 (2): 259-266.

UV Weathering of Green Composites Based on Polyamide 6 (PA6) and Sunflower Seed (*Helianthus Annuus* L.) Husk, Pistachio (*Pistacia Vera* L.) Shell and Walnut (*Juglans Regia* L.) Shell Flour

Emel KURAM^{1*}  Fatih AYDINLI²  Omer Faruk AKKUZU¹  Babur OZCELIK¹ 

¹Gebze Technical University, Faculty of Engineering, Department of Mechanical Engineering, Kocaeli, Turkey

²Gebze Technical University, Graduate School, Department of Mechanical Engineering, Kocaeli, Turkey

Article Info

Research article

Received: 17/10/2024

Revision: 06/02/2025

Accepted: 06/02/2025

Keywords

Agricultural Shell
Waste Management
Polymer Composite
Mechanical Properties
Ageing

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi

Başvuru: 17/10/2024

Düzeltilme: 06/02/2025

Kabul: 06/02/2025

Anahtar Kelimeler

Tarımsal Kabuk
Atık Yönetimi
Polimer Kompozit
Mekanik Özellikler
Yaşlanma

Graphical/Tabular Abstract (Grafik Özet)

This research used powdered pistachio shell, sunflower seed husk, and walnut shell as natural fillers in PA6 to produce green composites. The study evaluated tensile strain, tensile strength, flexural strain, and flexural strength of PA6 and the green composites. Additionally, UV ageing effects on PA6 and the composites were investigated. / Bu araştırma, yeşil kompozitler üretmek için PA6'da doğal dolgu malzemesi olarak toz haline getirilmiş Antep fıstığı kabuğu, ayçiçeği çekirdeği kabuğu ve ceviz kabuğunu kullanmıştır. Çalışmada, PA6 ve yeşil kompozitlerin çekme gerinimi, çekme dayanımı, eğme gerinimi ve eğme dayanımı değerlendirilmiştir. Ayrıca, UV yaşlanma etkileri PA6 ve kompozitler üzerinde incelenmiştir.

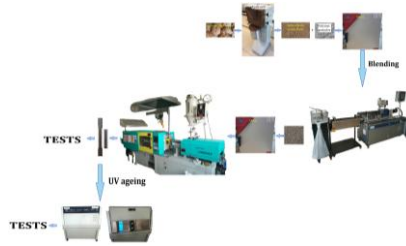


Figure A: Experimental setup /Şekil A: Deney düzeneği

Highlights (Önemli noktalar)

- Agricultural shells (sunflower seed husk, walnut shell, pistachio shell) were used as natural fillers in PA6-based composites for outdoor applications. / Tarımsal kabuklar (ayçiçeği çekirdeği kabuğu, ceviz kabuğu, Antep fıstığı kabuğu) dış mekan uygulamaları için PA6 bazlı kompozitlerde doğal dolgu malzemesi olarak kullanılmıştır.
- Despite decreased tensile strength, agricultural shell flour-filled PA6 composites remain feasible for certain applications due to their low cost. / Çekme dayanımındaki azalmaya rağmen, tarımsal kabuk unu dolgulu PA6 kompozitleri düşük maliyetleri nedeniyle bazı uygulamalar için uygun kalmaktadır.
- UV ageing slightly increased the tensile and flexural strength of agricultural shell flour-filled PA6 composites. / UV yaşlanma, tarımsal kabuk unu dolgulu PA6 kompozitlerinin çekme ve eğme dayanımını hafifçe artırmıştır.

Aim (Amaç): Current research aims to evaluate agricultural shells' potential for use at outdoor applications by determining the UV ageing of agricultural shell filled composites. / Mevcut araştırma, tarımsal kabuk dolgulu kompozitlerin UV yaşlanmasını belirleyerek, tarımsal kabukların dış mekan uygulamalarında kullanılma potansiyelini değerlendirmeyi amaçlamaktadır.

Originality (Özgünlük): Ageing behavior for pistachio shell, sunflower seed husk and walnut shell flour filled PA6 composites has not been investigated. The aim of current research was the emphasize relationships between mechanical properties as a function of agricultural shell kind and UV ageing time. / Antep fıstığı kabuğu, ayçiçeği çekirdeği kabuğu ve ceviz kabuğu unu dolgulu PA6 kompozitlerinin yaşlanma davranışı daha önce incelenmemiştir. Mevcut araştırmanın amacı, tarımsal kabuk türü ve UV yaşlanma süresine bağlı olarak mekanik özellikler arasındaki ilişkileri vurgulamaktır.

Results (Bulgular): UV ageing increased the tensile and flexural strength of agricultural shell flour filled PA6 composites. / UV yaşlanma, tarımsal kabuk unu dolgulu PA6 kompozitlerinin çekme ve eğme dayanımını artırmıştır.

Conclusion (Sonuç): The research suggests that agricultural shell-filled composites can be used in outdoor conditions due to their improved performance after UV ageing. / Araştırma, tarımsal kabuki dolgulu kompozitlerin, UV yaşlanma sonrasında iyileşen performansları nedeniyle dış mekan koşullarında kullanılabilirliğini önermektedir.



UV Weathering of Green Composites Based on Polyamide 6 (PA6) and Sunflower Seed (*Helianthus Annuus* L.) Husk, Pistachio (*Pistacia Vera* L.) Shell and Walnut (*Juglans Regia* L.) Shell Flour

Emel KURAM^{1*} Fatih AYDINLI² Omer Faruk AKKUZU¹ Babur OZCELİK¹

¹Gebze Technical University, Faculty of Engineering, Department of Mechanical Engineering, Kocaeli, Turkey

²Gebze Technical University, Graduate School, Department of Mechanical Engineering, Kocaeli, Turkey

Article Info

Research article
Received: 17/10/2024
Revision: 06/02/2025
Accepted: 06/02/2025

Keywords

Agricultural Shell
Waste Management
Polymer Composite
Mechanical Properties
Ageing

Abstract

Current research aims to evaluate agricultural shells' potential for use at outdoor applications by determining the ultraviolet (UV) ageing of agricultural shell filled composites. Therefore, in current work, three different agricultural shells were utilized as natural fillers in the production of polyamide 6 (PA6) based composites. Dakota type sunflower seed husk, walnut shell and pistachio shell were employed as natural fillers. It was concluded that the tensile behavior of PA6 altered from ductile to brittle after the loading of pistachio shell, sunflower seed husk and walnut shell flour. Although the agricultural shell flour decreased tensile strength of pure PA6 polymer, the strength values were still acceptable in some applications and low price of agricultural shell flour filled PA6 composites made them feasible. In general, tensile strength increased slightly after UV ageing in agricultural shell flour filled PA6 composites. The highest increase was found with the 24-hour UV aged walnut shell flour filled PA6 composite. Although agricultural shell loading led to decrement in tensile strength of PA6 polymer, fact that these composites cause little change or even an increment in the tensile strength after exposure to UV ageing indicated that agricultural shell filled composites can be utilized in outdoor conditions. UV ageing increased the flexural strength of all agricultural shell flour filled PA6 composites and this result indicated that agricultural shell filled composites can be used in outdoor conditions. Among green composites, the greatest flexural strength was achieved by the 24-hour UV aged walnut shell flour filled PA6 composite.

Poliamit 6 (PA6) ve Ayçiçeği Çekirdeği (*Helianthus Annuus* L.) Kabuğu, Antep Fıstığı (*Pistacia Vera* L.) Kabuğu ve Ceviz (*Juglans Regia* L.) Kabuğu Unu Bazlı Yeşil Kompozitlerin UV Yaşlanması

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 17/10/2024
Düzeltilme: 06/02/2025
Kabul: 06/02/2025

Anahtar Kelimeler

Tarımsal Kabuk
Atık Yönetimi
Polimer Kompozit
Mekanik Özellikler
Yaşlanma

Öz

Mevcut araştırma, tarımsal kabuk dolgulu kompozitlerin ultraviyole (UV) yaşlanmasını belirleyerek tarımsal kabukların dış mekan uygulamalarında kullanım potansiyelini değerlendirmeyi amaçlamaktadır. Bu nedenle mevcut çalışmada poliamit 6 (PA6) bazlı kompozitlerin üretiminde doğal dolgu maddesi olarak üç farklı tarımsal kabuk kullanılmıştır. Doğal dolgu maddesi olarak Dakota tipi ayçiçeği çekirdeği kabuğu, ceviz kabuğu ve Antep fıstığı kabuğu kullanılmıştır. Antep fıstığı kabuğu, ayçiçeği çekirdeği kabuğu ve ceviz kabuğu ununun eklenmesinden sonra PA6'nın çekme davranışının sünek durumdaki gevrek duruma doğru değiştiği sonucuna varılmıştır. Tarımsal kabuk unu, saf PA6 polimerinin çekme mukavemetini azaltmasına rağmen, bazı uygulamalarda mukavemet değerleri hala kabul edilebilir düzeydeydi ve tarımsal kabuklu un dolgulu PA6 kompozitlerinin düşük fiyatı bunları uygulanabilir kılmaktadır. Genel olarak tarımsal kabuk unu dolgulu PA6 kompozitlerinde UV yaşlandırma sonrasında çekme mukavemeti bir miktar artmıştır. En yüksek artış 24 saat UV ile yaşlandırılmış ceviz kabuğu unu dolgulu PA6 kompozitte görülmüştür. Tarımsal kabuk eklenmesi PA6 polimerinin çekme mukavemetinde azalmaya yol açsa da, bu kompozitlerin UV yaşlandırılmaya maruz kaldıktan sonra çekme mukavemetinde çok az değişikliğe veya hatta artışa neden olması, tarımsal kabuk dolgulu kompozitlerin dış mekan koşullarında kullanılabilirliğini göstermiştir. UV yaşlandırma, tarımsal kabuk unu dolgulu tüm PA6 kompozitlerin eğme mukavemetini arttırmıştır ve bu sonuç, tarımsal kabuk dolgulu kompozitlerin dış mekan koşullarında kullanılabilirliğini göstermiştir. Yeşil kompozitler arasında en büyük eğme mukavemeti, 24 saat UV ile yaşlandırılmış ceviz kabuğu unu dolgulu PA6 kompozit ile elde edilmiştir.

1. INTRODUCTION (GİRİŞ)

Inorganic fibers (aramid, carbon and glass fibers, etc.) are replaced by natural fillers in polymeric composites in recent years because of environmental awareness [1]. Addition of natural fillers to thermoplastics induce to develop renewable green composites [2]. Natural fiber filled polymeric composites are known as “green composites” [3]. They are eco-friendly materials and reduce pollution and cost. With the increment in environmental awareness, ecological concerns and novel regulations force composite sector to produce more environmentally friendly materials. With partially changing polymers by natural filler, low price materials were developed by diminishing amount of polymeric materials [4]. Usage of low-value agricultural residue to produce polymeric composites has high economic and environmental pros [5]. Incorporation of agricultural waste in polymeric material to produce composites is viable method to be gained additional value to agricultural waste. That endeavor also causes the decrement for usage of more expensive polymers [1]. Therefore, there is several attempts to produce composites filled with natural fillers such as agricultural waste flour [6].

Pistachio (*Pistacia Vera* L.), sunflower seed (*Helianthus Annuus* L.) and walnut (*Juglans Regia* L.) are important resources for nutrient food and vegetable oil. But after consuming pistachio, sunflower seed and walnut, the husks and shells of them are regarded as an agricultural waste. Generally, agricultural shells are disposed of by leaving them in the environment or by burning them. Both solutions lead to environment pollution. Another feasible solution could be to add additional value to agricultural waste by adding agricultural shells as fillers to the polymeric matrix to produce composites [7]. Loading of agricultural wastes in polymeric materials prevents environment from pollution and may provide additional income to farmers. These agricultural waste shell flours could provide wood like appearance to polymer composites thus could contribute to preserve forest sources [1].

Pistachio, sunflower seed and walnut productions in worldwide were 1026802.86, 54285948.66 and 3874024.7 tons from total harvested region of 1217974, 29257983 and 1247938 ha in 2022 in accordance with Food and Agricultural Organization of the United Nations (FAO), respectively. Turkey is the world’s third greatest producer of pistachio after the USA and Iran, with production of 239289 tons. With a production of

2550000 tons, Turkey is the fifth largest sunflower seed producer in the world after Russian Federation, Ukraine, Argentina and China. Turkey is the world’s fourth biggest walnut producer after China, the USA and Iran, with a production of 335000 tons [8]. The shells of pistachio constitute almost 47% of its total weight [9], accounting for approximately 483000 tons of pistachio shells worldwide each year. Major constituent of this agricultural waste is lignocellulosic material. Pistachio shells contain approximately 47.08% cellulose, 26.56% hemicellulose and 13.74% lignin [10]. Approximately 30% of sunflower seeds are husks [11]. This leads to approximately 16.3 million tons sunflower seed husk wastes worldwide each year. Sunflower seed husks contain about 37.3% cellulose, 35.0% hemicellulose and 22.9% lignin [12]. It is declared that walnut shells constitute 67% of total walnut crop weight [13]. Therefore, about 2.6 million tons of walnut shells are left behind every year, and the amount is rising every year. Walnut shell is lignocellulosic material composing of the thin husk or endocarp of walnut tree fruit and has no significant industrial use since it is an agricultural residue [14]. Chemical composition of walnut shells varies depending on area harvested and is found to contain about 36.90% lignin, 36.06% hemicellulose and 17.74% cellulose [15].

Due to cellulose and lignin content of these agricultural shells, they could be utilized as filler material in polymeric materials. For this reason, some works regarding the loading of pistachio shell [16-18], sunflower seed husk [12, 19, 20] and walnut shell [18, 21-23] flour to various polymers such as polyethylene (PE) [12, 19], epoxy [20-23], polypropylene (PP) [16, 18, 21-23] and poly(lactic acid) (PLA) [17] were seen in the literature. However, there is very rare attempt to combine PA6 with agricultural shell flour. Peanut shell [24] was employed to develop PA6 based green composites. Besides, to the best of authors’ knowledge, no research regarding addition of pistachio shell, sunflower seed husk and walnut shell flour to PA6 polymer to develop green composites has available.

Mechanical properties of agricultural shell flour filled polymeric composites should be evaluated at various weathering environments to understand their potential employing at indoor or outdoor applications. However, ageing behavior for pistachio shell, sunflower seed husk and walnut shell flour filled PA6 composites has not been investigated. The aim of current research was the emphasize relationships between mechanical properties as a function of agricultural shell kind and UV ageing time.

2. MATERIALS AND METHODS (MATERİYAL VE METOD)

2.1. Materials (Materyal)

Polyamide 6 (PA6, Rugopa M60 100 NC00) with 1.13 g/cm^3 density purchased from Politem (Turkey) was employed as polymeric matrix. PA 6 was chosen as the matrix material due to its high mechanical strength, thermal stability, chemical resistance, and ease of processing, making it ideal

for composite applications. Its wide usage in automotive, aerospace, textiles, electronics, and industrial sectors further supports its suitability for high-performance materials [25-29]. Pistachio shells were obtained from food industry in Sanliurfa, Turkey. Dakota type sunflower seed husks and walnut shells were purchased from market in Kocaeli, Turkey. Husks and shells were subjected to grinding process via knife mill with sieve size of $400 \mu\text{m}$ (Figure 1). Only particles passing the $400 \mu\text{m}$ sieve were used in the current study, so maximal particle size was smaller than $400 \mu\text{m}$.



Figure 1. Photos for ground agricultural waste flour (Öğütülmüş tarımsal atıkların fotoğrafları)

2.2. Compounding (Kariştirme)

Agricultural waste flour based PA6 composites development procedure, manufacturing of samples and UV ageing are demonstrated in Figure 2. Initially, husks and shells were subjected to grinding process via knife mill with sieve size of $400 \mu\text{m}$. Then PA6 pellets, shell and husk flours were mixed manually at fixed weight ratios (5 wt%), and the nomenclature of the produced composites are presented in Table 1. The choice of a 5 wt% reinforcement rate in a composite material

is often based on a balance between mechanical performance, processability, and material properties. After drying into oven (Binder FD 56) at $80 \text{ }^\circ\text{C}$ for 3 hours, PA6 pellets were blended with natural fillers using co-rotating twin-screw extruder (length/diameter (L/D) = 40) at temperature ranging from 129, 195, 195, 210, 215, 215, 220, 225, 225, $225 \text{ }^\circ\text{C}$ (from feed to die) and 12 rpm screw speed. The extruded rods were cooled at a water bath and granulated to 2-3 mm long pieces. The resulting pellets were dried again in oven at $80 \text{ }^\circ\text{C}$ for 3 hours prior to the injection molding stage.

Table 1. Nomenclature of PA6 and developed PA6 composites (PA6 ve geliştirilen PA6 kompozitlerinin isimlendirilmesi)

Name	PA6 (Weight %)	Pistachio Shell Flour (Weight %)	Sunflower (Dakota) Seed Husk Flour (Weight %)	Walnut Shell Flour (Weight %)
PA6	100	0	0	0
PA6+P	95	5	0	0
PA6+S	95	0	5	0
PA6+W	95	0	0	5

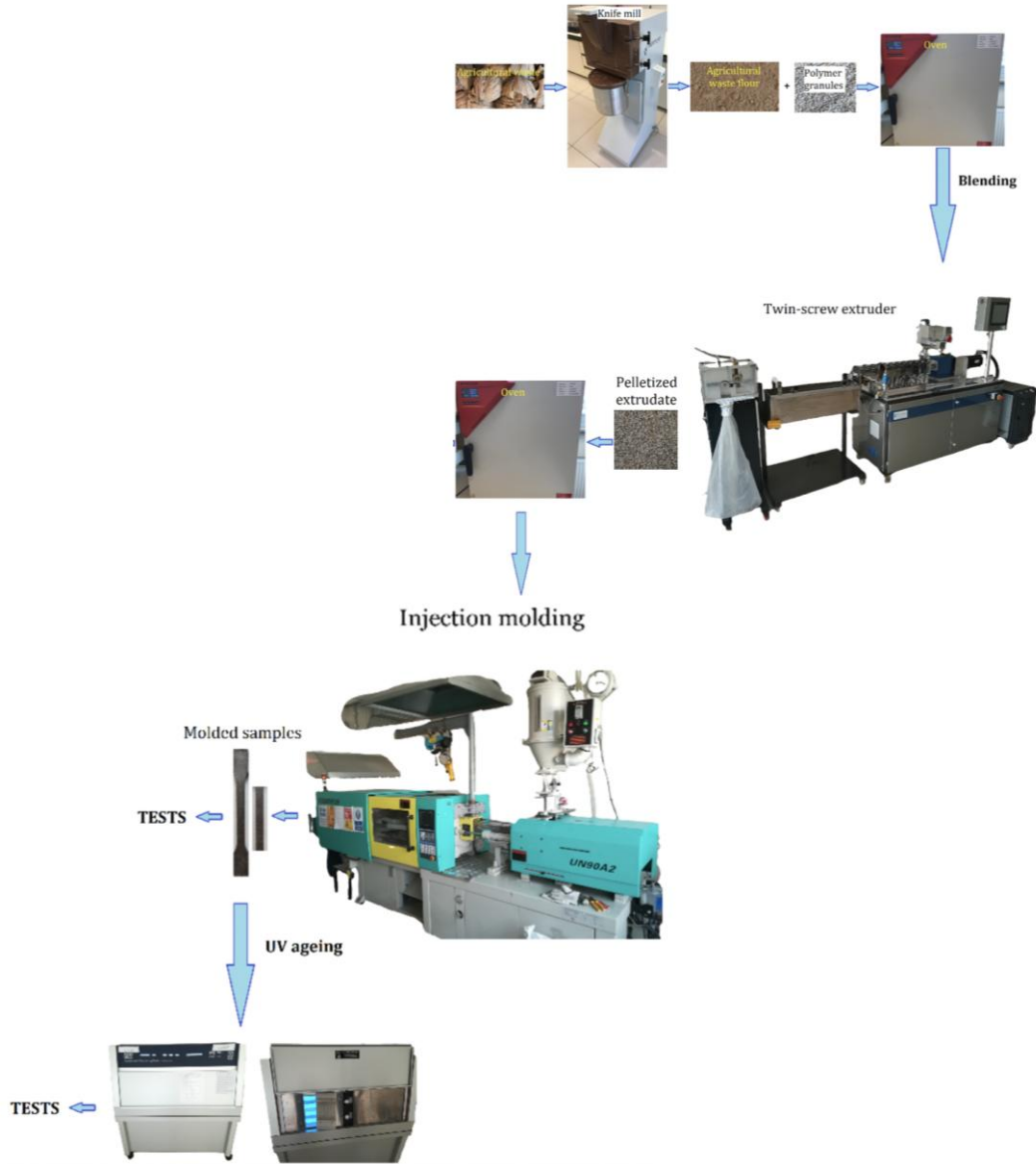


Figure 2. Procedure of developing agricultural waste flour filled PA6 composites, manufacturing test specimens and UV weathering (Tarımsal atık un dolgulu PA6 kompozitlerinin geliştirilmesi, test numunelerinin üretilmesi ve UV yaşlanmaya tabi tutulması prosedürü)

2.3. Manufacturing of Samples (Numunelerin İmalatı)

After drying, all produced PA6 composite pellets were molded in shape of dumbbell (Figure 3) in accordance with ISO 527 [30] and prismatic (Figure 3) according to ISO 178 [31] standards via

YIZUMI-UN90A2 plastic injection molding machine worked at constant injection conditions presented in Table 2. To fabricate the test samples, the four-cavity mold having a capability of producing double tensile specimens and double flexural samples was utilized.

Table 2. Values of injection parameters (Enjeksiyon parametrelerinin değerleri)

Parameters	Unit	Values
Melt temperature	°C	235
Mold temperature	°C	60
Injection pressure	bar	47
Holding pressure	bar	57
Holding time	s	5
Cooling time	s	15

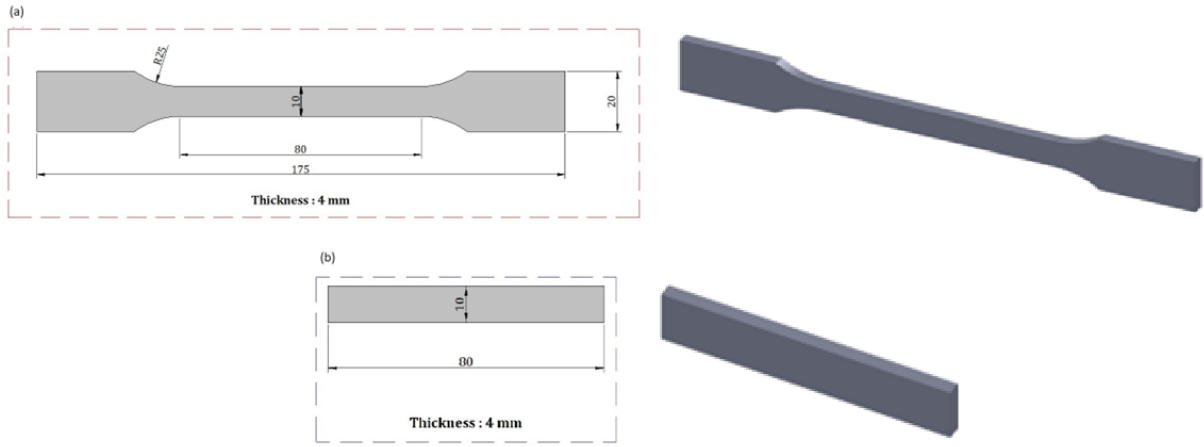


Figure 3. Dimensions for (a) tensile and (b) three-point flexural specimens (units are in mm) ((a) çekme ve (b) üç noktalı eğme numunelerinin boyutları (birimler mm cinsindedir))

2.4. Artificial (UV) Weathering Conditions

(Yapay (UV) Yaşlanma Koşulları)

UV weathering was performed using accelerated ageing device (QUV/se model). Fluorescent UV-A lamps providing 340 nm UV solar spectrum were used for UV weathering. Each 8-hour ageing cycle consists of 4 hours of dry UV exposure at 50 °C (irradiation level = 0.68 W/m²) followed by a 4-hour water spray phase (condensation exposure at 50 °C without UV exposure). The cycles were repeated 3, 9, 15 and 21 times for a total exposure time of 24, 72, 120 and 168 hours, respectively. After UV ageing, the specimens were discarded from tester. After specimens were dried with paper towels, they were kept at room temperature for at least 10 minutes prior to testing. All tests were then conducted on these specimens.

2.5. Tests (Testler)

Tensile behaviour of PA6 and developed composites was determined via universal testing device (Instron 5569) at laboratory condition. Fixed crosshead speed of 50 mm/min was utilized at tensile testing. Tensile strength and strain values were derived from tests.

Flexural properties were evaluated with three-point bending test at room temperature with Instron 5569 universal testing device. Flexural strain and strength were obtained at fixed crosshead speed of 10 mm/min and with supporting span of 60 mm.

After the tensile tests, scanning electron microscopy (SEM) examination was done with Philips XL 30 SFEG device with acceleration voltage of 15 kV to understand fracture surface of tensile specimens. Before examinations, surface of specimens was coated by thin layer of gold (approximately 30 nm thick) with Quorum SC7620 sputter coater to

prevent electrical charging at examination and to make them more conductive and visible. Samples kept fixed and placed rigidly in the circular metal specimen holder via adhesive carbon tape. SEM micrographs were derived at 65× magnifications in high vacuum for secondary electrons.

3. EXPERIMENTAL RESULTS AND DISCUSSION (DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA)

3.1. Tensile Test (Çekme Testi)

Figure 4 depicts typical tensile stress-strain curves for pure PA6 and PA6 filled by pistachio shell, sunflower seed (Dakota type) husk and walnut shell flour composites. Figures were given for unaged samples and samples of UV aged at various ageing time. Pure PA6 showed necking and cold drawing. The value of stress diminished after necking. After this, neck continued at approximately constant stress, but the stress value increased again until failure. UV ageing process and duration did not affect this typical tensile stress-strain behavior of pure PA6 much, but only changed the tensile strength and strain values, as explained later. Tensile stress-strain behavior of agricultural waste flour filled PA6 composites was different in comparison to pure PA6 polymer, showing brittle behavior. It was concluded that the tensile behavior of PA6 evolved from ductile to brittle after the loading of pistachio shell, sunflower seed (Dakota type) husk and walnut shell flour. As found in pure PA6 polymer, UV ageing process and duration did not affect typical tensile stress-strain behavior of agricultural waste flour filled PA6 composites much, but only changed the tensile strength and strain values.

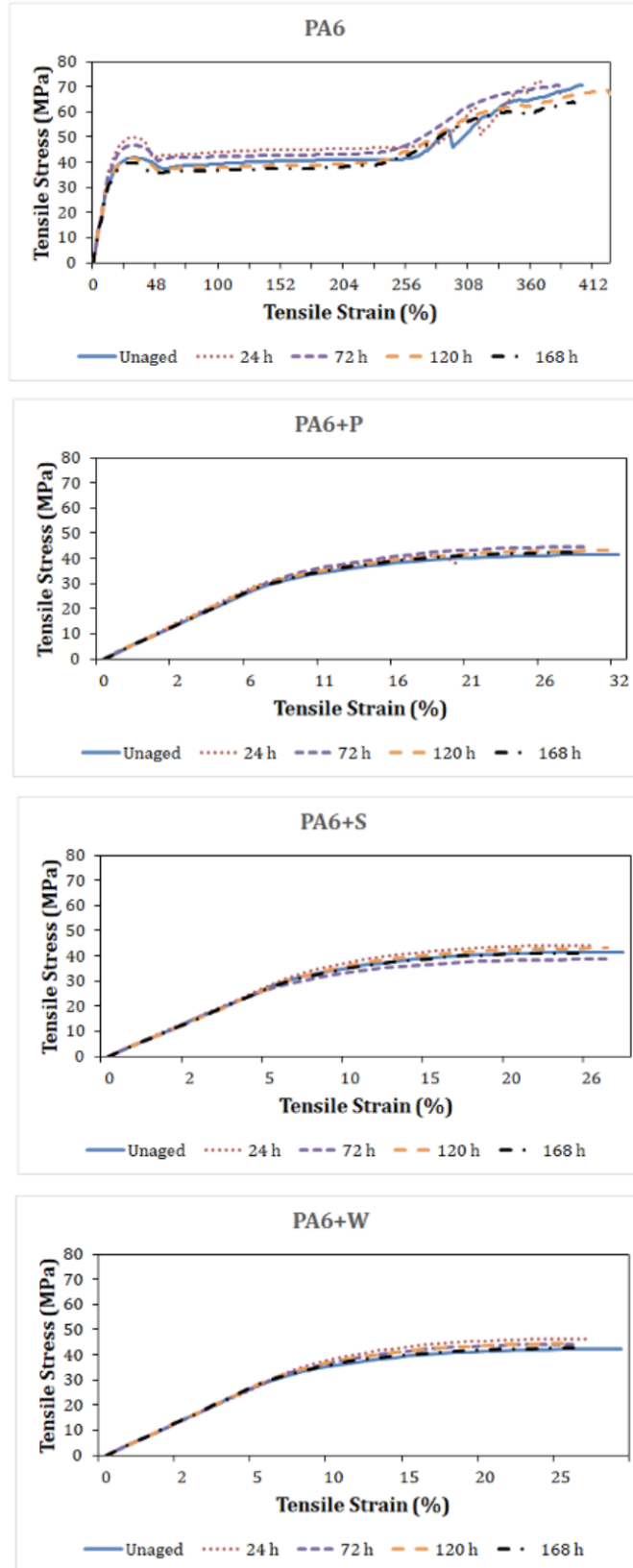


Figure 4. Typical tensile stress-strain graphs of agricultural waste flour based PA6 composites as a function of UV ageing time (UV yaşlanma süresinin bir fonksiyonu olarak tarımsal atık un bazlı PA6 kompozitlerinin tipik çekme gerilmesi-gerinimi grafikleri)

Tensile strength results of pure PA6 and PA6 filled by pistachio shell, sunflower seed (Dakota type) husk and walnut shell flour composites are given in Figure 5a. Results were given for unaged and aged samples. Tensile strength values of PA6 polymer were found to be between 68.02-69.87 MPa for unaged, 24 h, 72 h and 120 h aged specimens. After 168 h ageing, this value dropped to 64.08 MPa, giving a decrease of 5.79%. For unaged and aged samples, blending PA6 polymer with agricultural waste flour led to decrement in tensile strength compared to pure PA6 and drop in tensile strength by loading of pistachio shell flour in PP was declared in other study [32]. The capability to support stress transmitted from polymeric matrix was rather weak for natural filler and this was reason of smaller tensile strength by addition of natural filler into polymer [33]. It is assumed that because these agricultural shells, which are lignocellulosic filler, have highly polar groups, interphase adhesion of composite is negatively influenced. Difference between polarities of polymeric matrix and filler prevented proper load transfer and caused the tensile strength values to decrease [32]. Tensile strength of unaged PA6+P, PA6+S and PA6+W composites diminished by 39.41, 39.70 and 37.11%, respectively in comparison to unaged PA6. After UV weathering, changing at tensile strength of agricultural waste filled PA6 composites was smaller. Tensile strength values of PA6+P, PA6+S and PA6+W composites were between 40.54-43.57 MPa, 38.85-43.42 MPa and 42.28-46.18 MPa, respectively for unaged and aged samples. Generally, tensile strength increased slightly after UV ageing in PA6 composites with agricultural waste flour. The highest increase was obtained with the 24-hour UV aged walnut shell flour filled PA6 composite (PA6+W), which increased the tensile strength by 7.94% compared to the unaged version. Although the agricultural shell addition caused decrement in tensile strength of PA6 polymer, fact that these composites cause little change or even an increment in tensile strength after exposure to UV ageing showed that agricultural shell filled composites can be used in outdoor conditions. Before and after UV weathering the greatest tensile strength was obtained by walnut shell flour filled PA6 (PA6+W) composites among all green composites. Similar to our study, it was found in the literature that walnut shell filled PP composite gave higher tensile strength than pistachio shell filled PP composite [18]. After UV weathering, the greatest tensile strength values were achieved by PA6+W composite among all green composites. It was stated that greater lignin amount in green composites behaved as heat insulation agent and photostabilizer at the composites hence

providing the best UV and thermal stability [34]. Lignin amount of walnut shell (36.90%) was the greatest [15] among agricultural shell flour employed at present work.

Figure 5b demonstrates tensile strain results for pure PA6 and PA6 filled with pistachio shell, sunflower seed (Dakota type) husk and walnut shell flour composites as function of UV ageing time. Tensile strain values for PA6 polymer were obtained between 364.62-426.30% for unaged and aged samples. After 120 h ageing, tensile strain increased to 426.30%, giving an increase of 12.68%. Compounding PA6 polymer with agricultural shell flour caused an enormous decrement in tensile strain relative to pure PA6 and decrease was also found for sunflower seed husk flour filled PP composite [35]. Conclusion may be attributed to discontinuities (increase in material heterogeneity) with the addition of lignocellulosic fillers to polymer matrix [36], restricting deformability and mobility of PA6 matrix, leading to smaller tensile strain as compared to pure PA6. It was stated that higher lignin content led to the increase in brittleness of lignocellulosic material while higher cellulose content reduced brittleness [37]. The lowest lignin content of pistachio shell [10] was reason why pistachio shell flour filled PA6 presented the greatest tensile strain among all green composites. Tensile strain of unaged PA6+P, PA6+S and PA6+W composites decreased by 91.93, 92.69 and 92.59%, respectively with respect to unaged PA6. After UV weathering, changing at tensile strain of agricultural shell flour filled PA6 composites was found to be smaller. Tensile strain values of PA6+P, PA6+S and PA6+W composites were between 22.71-30.53%, 25.80-27.64% and 25.70-28.02%, respectively for unaged and aged samples.

3.2. Flexural Test (Eğme Testi)

Figure 6 demonstrates typical flexural stress-strain graphs for pure PA6 and PA6 filled by pistachio shell, sunflower seed (Dakota type) husk and walnut shell flour composites. The flexural behavior of pure PA6 and green composites was found to be similar, showing brittle failure. UV ageing process and duration did not affect typical flexural stress-strain behavior of pure PA6 polymer and agricultural waste flour filled PA6 composites much, but only changed the flexural strength and strain values.

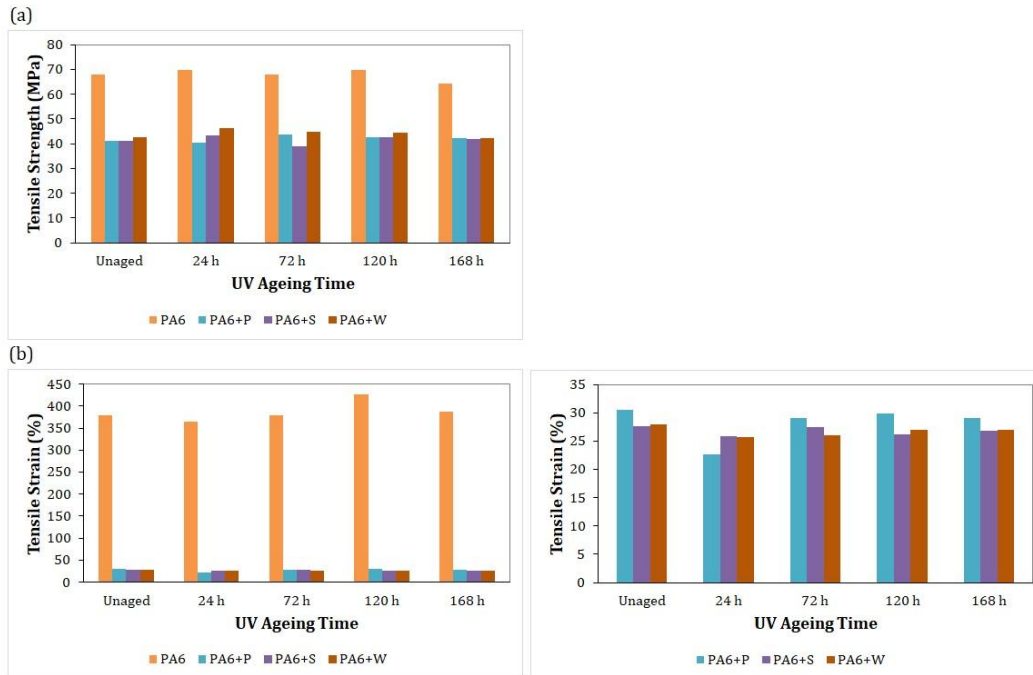


Figure 5. (a) Tensile strength and (b) tensile strain values of agricultural waste flour based PA6 composites as a function of UV ageing time ((a) Tarımsal atık un bazı PA6 kompozitlerinin UV yaşlanma süresinin bir fonksiyonu olarak çekme mukavemeti ve (b) çekme gerinimi değerleri)

Flexural strength results of unaged and aged pure PA6 and PA6 filled by pistachio shell, sunflower seed (Dakota type) husk and walnut shell flour composites are demonstrated in Figure 7a. Flexural strength values of PA6 polymer were found to be between 47.28-62.45 MPa for unaged and aged samples. UV ageing increased flexural strength of pure PA6 polymer. Flexural strength increased by 32.09% after 24 hours of UV ageing, 24.21% after 72 hours of UV ageing, 20.44% after 120 hours of UV ageing and 18.31% after 168 hours of UV ageing. That is, for pure PA6 polymer, the increase in flexural strength with UV ageing was less with the increase in UV ageing time. For unaged samples, blending PA6 polymer with sunflower seed husk and walnut shell flour led to decrement in flexural strength with respect to pure PA6. Flexural strength of unaged PA6+S and PA6+W composites reduced by 11.39 and 1.61%, respectively in comparison to unaged PA6. However, blending PA6 polymer with pistachio shell flour increased flexural strength in comparison to pure PA6. Flexural strength for unaged PA6+P composite increased by 10.64% with respect to unaged PA6 polymer. Lignocellulosic fiber strength determines the mechanical strength of the composite under the same matrix and production process. Cellulose has significant effects on the properties of agricultural shell flour filled polymer composites, and high cellulose content enhanced their mechanical

properties [38]. Therefore, the greatest flexural strength was achieved by PA6+P composite because of the greatest cellulose amount of pistachio shell (47.08%) [10]. UV ageing increased the flexural strength of all agricultural shell flour filled PA6 composites. For PA6+P composite, flexural strength increased by 7.55% after 24 hours of UV ageing, 3.85% after 72 hours of UV ageing, 7.60% after 120 hours of UV ageing and 0.72% after 168 hours of UV ageing. For PA6+S composite, increment in flexural strength with UV ageing was higher. After 24, 72, 120 and 168 hours of UV ageing, flexural strength increased by 38.11%, 30.40%, 31.07% and 26.76%, respectively. For PA6+W composite, flexural strength increased by 27.26% after 24 hours of UV ageing, 20.34% after 72 hours of UV ageing, 19.54% after 120 hours of UV ageing and 12.87% after 168 hours of UV ageing. An increase in the flexural strength after exposure to UV ageing indicated that agricultural shell filled composites can be used in outdoor conditions. Among green composites, the greatest flexural strength was achieved by the 24-hour UV aged walnut shell flour filled PA6 composite (PA6+W). Generally, it was concluded that pistachio shell, sunflower seed (Dakota type) husk and walnut shell flour filled PA6 composites can compete with pure PA6 when flexural strength was taken into consideration. Hence, more

environmentally friendly composites having moderate flexural strength were prepared.

Figure 7b depicts flexural strain values for pure PA6 and PA6 filled by pistachio shell, sunflower seed (Dakota type) husk and walnut shell flour composites as a function of UV ageing time. Flexural strain values of PA6 polymer were between 11.34-13.44% for unaged and aged

samples. UV ageing caused a decrease in flexural strain for pure PA6. Flexural strain for unaged PA6+S and PA6+W composites reduced by 5.66 and 3.57%, respectively with respect to unaged PA6 polymer. Flexural strain values for PA6+P, PA6+S and PA6+W composites were between 11.77-13.92%, 11.87-12.68% and 11.74-12.96%, respectively for unaged and aged samples.

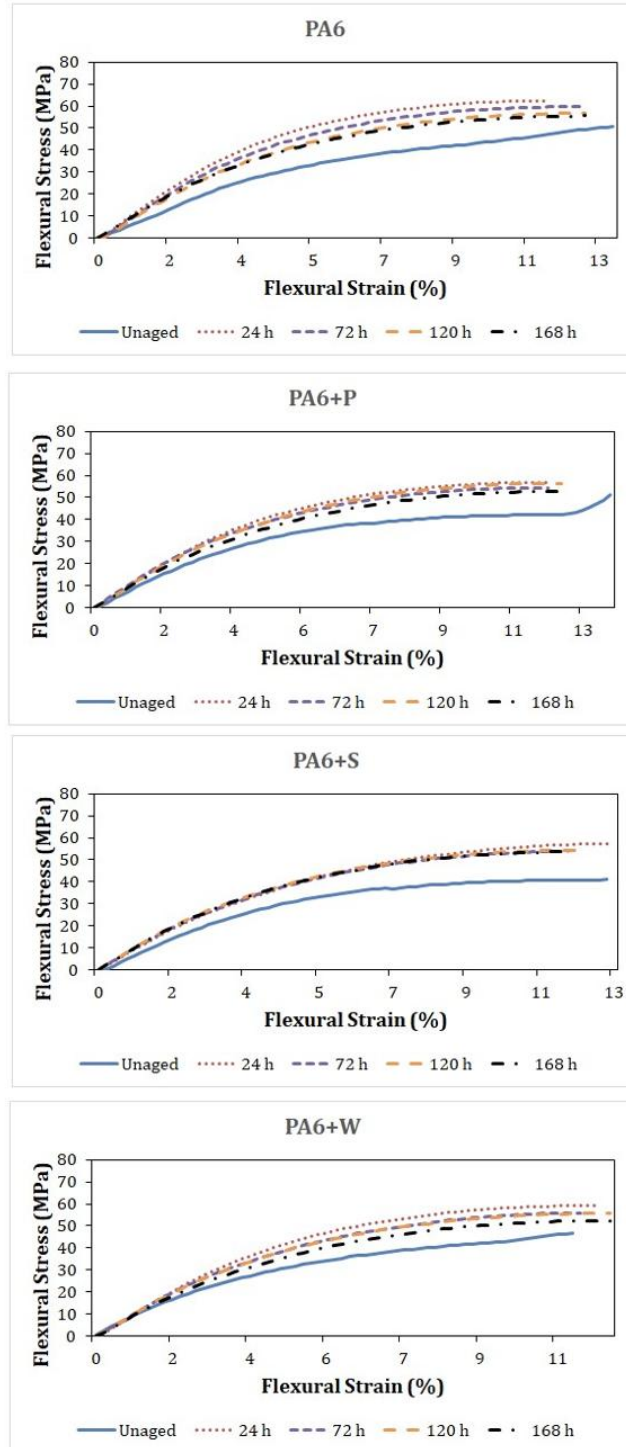


Figure 6. Typical flexural stress-strain graphs of agricultural waste flour based PA6 composites as a function of UV ageing time (UV yaşlanma süresinin bir fonksiyonu olarak tarımsal atık un bazlı PA6 kompozitlerinin tipik eğme gerilmesi-gerinimi grafikleri)

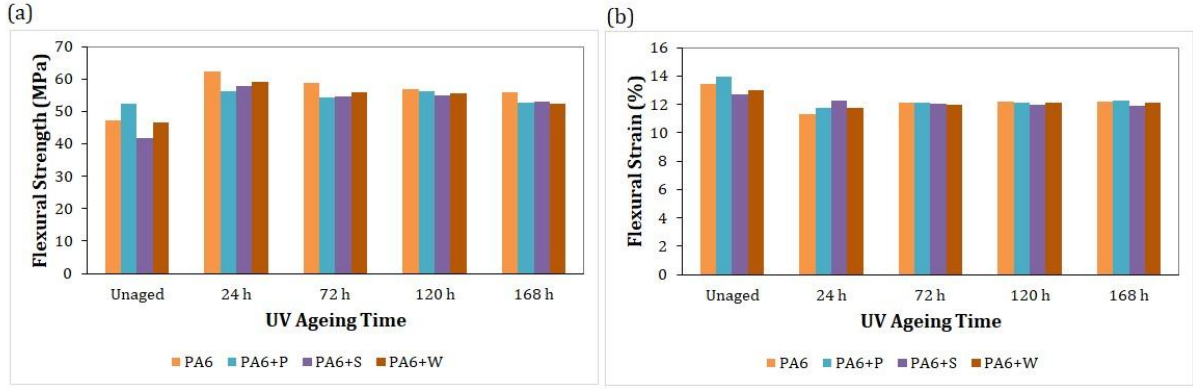


Figure 7. (a) Flexural strength and (b) flexural strain values of agricultural waste flour based PA6 composites as a function of UV ageing time ((a) UV yaşlanma süresinin bir fonksiyonu olarak tarımsal atık un bazı PA6 kompozitlerinin eğme mukavemeti ve (b) eğme gerinimi değerleri)

3.3. Morphological Examination (Morfolojik İnceleme)

Tensile fractured surface morphology for pure PA6, PA6+P, PA6+S and PA6+W composites after tensile tests are given in Figure 8 as a function of UV ageing time. Pull-out of pistachio shell, sunflower seed (Dakota type) husk and walnut shell flour were seen onto fractured surface of green

composites. Also, voids between matrix and agricultural shell flour were seen onto fractured surface of agricultural shell flour filled PA6 composites. It is thought that such situations would negatively affect mechanical properties of green composites [39]. No significant change was found on the fractured surface with UV ageing for pure PA6 polymer and agricultural shell flour filled PA6 composites.

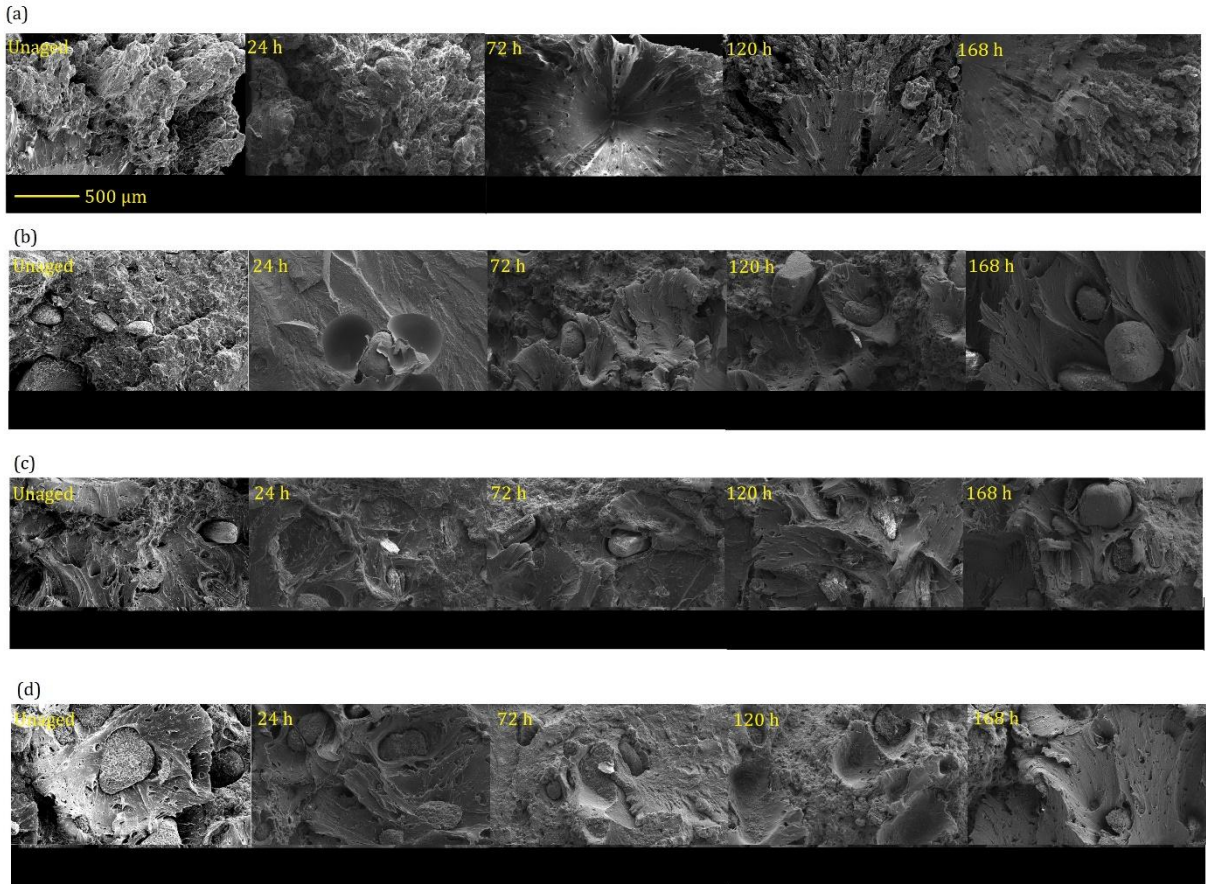


Figure 8. SEM results for (a) PA6, (b) PA6+P, (c) PA6+S and (d) PA6+W as a function of UV ageing time (UV yaşlanma süresinin bir fonksiyonu olarak (a) PA6, (b) PA6+P, (c) PA6+S ve (d) PA6+W için SEM sonuçları)

4. CONCLUSIONS (SONUÇLAR)

Pistachio shell, sunflower seed husk and walnut shell flour are cheap, readily available, and tends to be processed into several kinds of polymeric matrices as agricultural waste. Therefore, in this research, the powdered pistachio shell, sunflower seed husk (Dakota type) and walnut shell were employed as natural fillers with PA6 in order to produce green composites. Tensile strain, tensile strength, flexural strain and flexural strength were determined for pure PA6 and green composites. Besides, UV ageing for pure PA6 and produced green composites were investigated. It was concluded that the tensile behavior of PA6 changed from ductile to brittle after the loading of pistachio shell, sunflower seed (Dakota type) husk and walnut shell flour. UV ageing process and duration did not affect this typical tensile stress-strain behavior of pure PA6 and agricultural waste flour filled PA6 composites much, but only changed the tensile strength and strain values. For unaged and aged samples, blending PA6 polymer with agricultural waste flour caused decrease in tensile strength as compared to pure PA6. Tensile strength for unaged PA6+P, PA6+S and PA6+W composites decreased by 39.41, 39.70 and 37.11%, respectively in comparison to unaged PA6. After UV weathering, changing at tensile strength of agricultural flour filled PA6 composites was smaller. In general, tensile strength increased slightly after UV ageing in agricultural shell flour filled PA6 composites. The highest increase was found with the 24-hour UV aged walnut shell flour filled PA6 composite, which increased tensile strength by 7.94% in comparison to the unaged one. Although the agricultural shell loading led to decrement at tensile strength of PA6 polymer, fact that these composites cause little change or even an increment in the tensile strength after exposure to UV ageing indicated that agricultural shell filled composites can be utilized in outdoor conditions. Compounding PA6 polymer with agricultural shell flour resulted in an enormous decrease in tensile strain. Pistachio shell flour filled PA6 presented the greatest tensile strain among green composites. Tensile strain of unaged PA6+P, PA6+S and PA6+W composites reduced by 91.93, 92.69 and 92.59%, respectively as compared to unaged PA6. After UV weathering, changing in tensile strain of agricultural shell flour filled PA6 composites was found to be smaller. The flexural behavior of pure PA6 and green composites showed brittle failure. UV ageing process and duration did not affect typical flexural stress-strain behavior of pure PA6 and agricultural waste flour filled PA6 composites much, but only changed the flexural strength and strain values. UV ageing

increased the flexural strength by 32.09% after 24 hours of UV ageing, 24.21% after 72 hours of UV ageing, 20.44% after 120 hours of UV ageing and 18.31% after 168 hours of UV ageing for pure PA6 polymer. For unaged samples, blending PA6 polymer with sunflower seed husk and walnut shell flour caused decrement in flexural strength with respect to pure PA6, while blending PA6 polymer with pistachio shell flour increased flexural strength as compared to pure PA6. UV ageing increased the flexural strength of all agricultural shell flour filled PA6 composites and this result indicated that agricultural shell filled composites can be used in outdoor conditions. Among green composites, the greatest flexural strength was achieved by the 24-hour UV aged walnut shell flour filled PA6 composite. UV weathering resulted in decrease in flexural strain for pure PA6 polymer.

ACKNOWLEDGMENTS (TEŞEKKÜR)

Corresponding author (E.K.) would like to thank interventional neurologist Prof. Hasan Hüseyin Karadeli for saving her life, who performed her operation and treatment after her brain disease in August 2019 and provided a miracle to her life by giving second life opportunity. This research was supported by The Scientific and Technological Research Council of Turkey (TUBITAK), Project Number : 123M800. The authors thank to TUBITAK for support. The authors also thank Önder Gedik for helping with the injection and extrusion processes, Adem Şen for helping with the flexural and tensile tests and Ahmet Nazım for helping with the SEM observations. / Sorumlu yazar (E.K.), 2019 Ağustos ayında beyin hastalığı sonrası operasyonunu ve tedavisini gerçekleştirerek hayatını kurtaran, ikinci bir yaşam fırsatı vererek ona bir mucize sunan girişimsel nörolog Prof. Dr. Hasan Hüseyin Karadeli'ye teşekkür etmektedir. Bu araştırma, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından desteklenmiştir, Proje Numarası: 123M800. Yazarlar, TÜBİTAK'a destekleri için teşekkür eder. Yazarlar ayrıca, enjeksiyon ve ekstrüzyon işlemlerine yardımcı olan Önder Gedik'e, eğme ve çekme testlerine yardımcı olan Adem Şen'e ve SEM gözlemleri konusunda yardımcı olan Ahmet Nazım'a teşekkür eder.

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)

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

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

Fatih AYDINLI: He conducted the experiments and analyzed the results.

Deneyleri yapmış ve sonuçlarını analiz etmiştir.

Omer Faruk AKKUZU: He conducted the experiments and analyzed the results.

Deneyleri yapmış ve sonuçlarını analiz etmiştir.

Babur OZCELIK: He analyzed the results.

Sonuçları analiz etmiştir.

CONFLICT OF INTEREST (ÇIKAR ÇATIŞMASI)

There is no conflict of interest in this study.

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

REFERENCES (KAYNAKLAR)

- [1] E. Kuram, "Rheological, mechanical and morphological properties of hybrid hazelnut (*Corylus avellana* L.)/walnut (*Juglans regia* L.) shell flour-filled acrylonitrile butadiene styrene composite," *Journal of Material Cycles and Waste Management*, vol. 22, pp. 2107-2117, Nov 2020.
- [2] C. Badji, J. Beigbeder, H. Garay, A. Bergeret, J.-C. Benezet, V. Desauziers, "Natural weathering of hemp fibers reinforced polypropylene biocomposites: Relationships between visual and surface aspects, mechanical properties and microstructure based on statistical approach," *Composites Science and Technology*, vol.167, pp. 440-447, Oct 2018.
- [3] H. Q. Ali, M. A. Raza, A. Westwood, F. A. Ghauri, H. Asgar, "Development and mechanical characterization of composites based on unsaturated polyester reinforced with maleated high oleic sunflower oil-treated cellulose fiber," *Polymer Composites*, vol. 40, pp. 901-908, Mar 2019.
- [4] R. R. F. Ramos, D. D. Siqueira, R. M. R. Wellen, I. F. Leite, G. M. Glenn, E. S.

Medeiros, "Development of green composites based on polypropylene and corn cob agricultural residue," *Journal of Polymers and the Environment*, vol. 27, pp. 1677-1685, Aug 2019.

- [5] W. Liu, T. Liu, H. Liu, J. Xin, J. Zhang, Z. K. Muhidinov, L. Liu, "Properties of poly(butylene adipate-co-terephthalate) and sunflower head residue biocomposites," *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 134, 44644, Apr 2017.
- [6] S. Panthapulakkal, M. Sain, "Injection molded wheat straw and corn stem filled polypropylene composites," *Journal of Polymers and the Environment*, 14, pp. 265-272, Jul 2006.
- [7] E. Kuram, "Rheological, mechanical and morphological properties of acrylonitrile butadiene styrene composite filled with sunflower seed (*Helianthus annuus* L.) husk flour," *Journal of Polymer Research*, vol. 27, 219, Aug 2020.
- [8] Food and Agricultural Organization of the United Nations (FAO). (2024, Aug. 29). Available: <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL> URL.
- [9] M. Banerjee, R. K. Basu, S. K. Das, "Adsorptive removal of Cu(II) by pistachio shell: Isotherm study, kinetic modelling and scale-up designing — continuous mode," *Environmental Technology & Innovation*, vol. 15, 100419, Aug 2019.
- [10] P. Balasundar, P. Narayanasamy, S. Senthil, N. A. Al-Dhabi, R. Prithvirajan, R. S. Kumar, T. Ramkumar, K. S. Bhat, "Physico-chemical study of pistachio (*Pistacia vera*) nutshell particles as a bio-filler for eco-friendly composites," *Materials Research Express*, vol. 6, 105339, Oct 2019.
- [11] G. Demir, S. Nemlioglu, U. Yazgic, E. E. Dogan, C. Bayat, "Determination of some important emissions of sunflower oil production industrial wastes incineration," *Journal of Scientific & Industrial Research*, vol. 64, pp. 226-228, Mar 2005.
- [12] K. Salasinska, J. Ryszkowska, "The effect of filler chemical constitution and morphological properties on the mechanical properties of natural fiber composites," *Composite Interfaces*, vol. 22, pp. 39-50, 2015.
- [13] M. L. Martinez, L. Moiraghi, M. Agnese, C. Guzman, "Making and some properties of activated carbon produced from agricultural industrial residues from Argentina," *The Journal of the Argentine Chemical Society*, vol. 91, pp. 103-108, Jul 2003.
- [14] H. Pirayesh, H. Khanjanzadeh, A. Salari, "Effect of using walnut/almond shells on the

- physical, mechanical properties and formaldehyde emission of particleboard,” *Composites Part B Engineering*, vol. 45, pp. 858-863, Feb 2013.
- [15] A. Gungor, I. K. Akbay, T. Ozdemir, “Waste walnut shell as an alternative bio-based filler for the EPDM: mechanical, thermal, and kinetic studies,” *Journal of Material Cycles and Waste Management*, vol. 21, pp. 145-155, Jan 2019.
- [16] E. Kuram, “UV and thermal weathering of green composites: Comparing the effect of different agricultural waste as fillers,” *Journal of Composite Materials*, vol. 54, pp. 3683-3697, Oct 2020.
- [17] M. Altun, M. Celebi, S. Ovali, “Preparation of the pistachio shell reinforced PLA biocomposites: Effect of filler treatment and PLA maleation,” *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, vol. 35, pp. 1342-1357, Sep 2022.
- [18] A. E. Şahin, S. Fidan, B. Çetin, T. Sınmazçelik, “Comparison of the usage of nut shell, walnut shell, and pistachio shell as a reinforcement particle on the mechanical and wear performance of polypropylene,” *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 141, e55248, Apr 2024.
- [19] M. Barczewski, D. Matykiewicz, A. Piasecki, M. Szostak, “Polyethylene green composites modified with post agricultural waste filler: thermo-mechanical and damping properties,” *Composites Interfaces*, vol. 25, pp. 287-299, 2018.
- [20] M. Barczewski, K. Salasinska, J. Szulc, “Application of sunflower husk, hazelnut shell and walnut shell as waste agricultural fillers for epoxy-based composites: a study into mechanical behavior related to structural and rheological properties,” *Polymer Testing*, vol. 75, pp. 1-11, May 2019.
- [21] N. Ayrilmis, A. Kaymakci, F. Ozdemir, “Physical, mechanical, and thermal properties of polypropylene composites filled with walnut shell flour,” *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, vol. 19, pp. 908-914, May 2013.
- [22] V. K. Singh, “Mechanical behaviour of walnut (*Juglans L.*) shell particles reinforced bio-composite,” *Science and Engineering of Composite Materials*, vol. 22, pp. 383-390, Jul 2015.
- [23] K. Salasinska, M. Barczewski, R. Gorny, A. Klozinski, “Evaluation of highly filled epoxy composites modified with walnut shell waste filler,” *Polymer Bulletin*, vol. 75, pp. 2511-2528, Jun 2018.
- [24] O. Oulidi, A. Nakkabi, F. Boukhlifi, M. Fahim, H. Lgaz, A. A. Alrashdi, N. Elmoualij, “Peanut shell from agricultural wastes as a sustainable filler for polyamide biocomposites fabrication,” *Journal of King Saud University – Science*, vol. 34, pp. 102148, Aug 2022.
- [25] V. Unnikrishnan, O. Zabihi, Q. Li, M. Ahmadi, M. R. G. Ferdowsi, T. Kannangara, P. Blanchard, A. Kiziltas, P. Joseph, M. Naebe, “Multifunctional PA6 composites using waste glass fiber and green metal organic framework/graphene hybrids,” *Polymer Composites*, vol. 43, pp. 5877-5893, Sep 2022.
- [26] A. Ghorbankhan, M. R. Nakhaei, P. Safarpour, “Fracture behavior, microstructure, and mechanical properties of PA6/NBR nanocomposites,” *Polymer Composites*, vol. 43, pp. 6696-6708, Sep 2022.
- [27] L. Yu, Q. Hu, T. Li, J. Zhang, S. Chen, Z. Xu, S. Chen, D. Zhang, “Ultrahigh flowability and excellent mechanical performance of glass fiber/PA6 composites prepared by hyperbranched polymers,” *Macromolecular Materials and Engineering*, vol. 308, 2300012, Aug 2023.
- [28] A. E. Sahin, E. Yazar, H. Kara, E. B. Cep, M. O. Bora, T. Yilmaz, “Thermal aging effect of polyamide 6 matrix composites produced by Tailor Fiber Placement (TFP) under compression molding on sliding wear properties,” *Polymer Composites*, vol. 45, pp. 98-110, Jan 2024.
- [29] E. Yazar, A. E. Sahin, H. Kara, E. B. Cep, M. O. Bora, “Thermal aging effect on mechanical properties of polyamide 6 matrix composites produced by TFP and compression molding,” *Polymer Composites*, vol. 45, pp. 2869-2884, Feb 2024.
- [30] *Plastics: Determination of tensile properties, Part 1: General principles*, ISO 527-1:2012, 2012.
- [31] *Plastics: Determination of flexural properties*, ISO 178:2010, 2010.
- [32] M. Celebi, M. Altun, S. Ovali, “The effect of UV additives on thermos-oxidative and color stability of pistachio shell reinforced polypropylene,” *Polymers and Polymer Composites*, vol. 30, pp. 1-10, Jan-Dec 2022.
- [33] H. Ismail, J. M. Nizam, H. P. S. Abdul Khalil, “The effect of a compatibilizer on the mechanical properties and mass swell of white rice husk ash filled natural rubber/linear low density polyethylene blends,” *Polymer Testing*, vol. 20, pp. 125-133, Oct 2001.
- [34] Y. Peng, S. S. Nair, H. Chen, R. Farnood, N. Yan, J. Cao, “Application of different bark fractions in polypropylene composites: UV and

- thermal stability,” *Polymer Composites*, vol. 41, pp. 2198-2209, Jun 2020.
- [35] A. B. Irez, “Development of sunflower husk reinforced polypropylene based sustainable composites: An experimental investigation of mechanical and thermal performance,” *Journal of Polymer Science*, vol. 62, pp. 3471-3484, Aug 2024.
- [36] P. Pantyukhov, N. Kolesnikova, A. Popov, “Preparation, structure, and properties of biocomposites based on low-density polyethylene and lignocellulosic fillers,” *Polymer Composites*, vol. 37, pp. 1461-1472, May 2016.
- [37] M. Zahedi, H. Pirayesh, H. Khanjanzadeh, M. M. Tabar, “Organo-modified montmorillonite reinforced walnut shell/polypropylene composites,” *Materials and Design*, vol. 51, pp. 803-809, Oct 2013.
- [38] S. Zhu, Y. Guo, D. Tu, Y. Chen, S. Liu, W. Li, L. Wang, “Water absorption, mechanical, and crystallization properties of high-density polyethylene filled with corncob powder,” *BioResources*, vol. 13, pp. 3778-3792, 2018.
- [39] Y. H. Çelik, R. Yalcin, T. Topkaya, E. Başaran, E. Kilickap, “Characterization of hazelnut, pistachio, and apricot kernel shell particles and analysis of their composite properties,” *Journal of Natural Fibers*, vol. 18, pp. 1054-1068, 2021.

Effect of Processing Parameters on Cutting Torque in Boring of AISI P20 Plastic Mold Steel on Vertical Machining Machine

Aslan AKDULUM^{1*} , Mehmet SÜZGÜNOL² , Yunus KAYIR³ 

¹ Corresponding author. Department of Machinery and Metal Technologies, Başkent OSB Vocational School of Technical Sciences, Hacettepe University, Ankara, Türkiye

² Yeşilevler Vocational and Technical Anatolian High School, Adana, Türkiye

³ Department of Manufacturing Engineering, Faculty of Technology, Gazi University, Ankara, Türkiye

Article Info

Research article
Received: 16/09/2024
Revision: 20/12/2024
Accepted: 31/01/2025

Keywords

Boring
Torque
Optimization
Taguchi
Anova
Regression

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 16/09/2024
Düzeltilme: 20/12/2024
Kabul: 31/01/2025

Anahtar Kelimeler

Baralama
Tork
Optimizasyon
Taguchi
Anova
Regresyon

Graphical/Tabular Abstract (Grafik Özet)

In this study, an effective regression model was established by examining the effects of boring parameters on the torque generated during the precision boring process of AISI P20 steel on a milling machine. / Bu çalışmada AISI P20 çeliğinin freze tezgahında hassas baralanması işleminde meydana gelen tork üzerinde, baralama parametrelerinin etkileri incelenerek etkili bir regresyon modeli kurulmuştur.

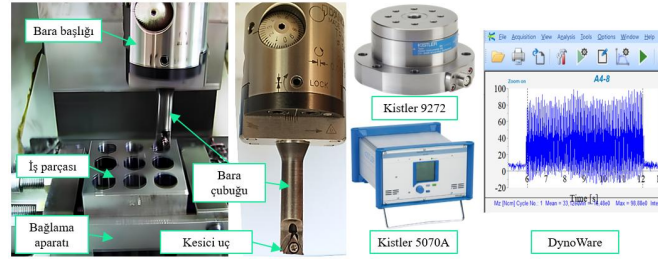


Figure A: Boring torque measurement setup /Şekil A: Baralama torku ölçüm düzeneği

Highlights (Önemli noktalar)

- The torque generated during the precision boring process of AISI P20 steel on the milling machine was investigated. / AISI P20 çeliğinin freze tezgahında hassas baralanması işleminde meydana gelen tork incelenmiştir.
- Radial depth of cut (40.23%) was determined as the most effective parameter. / Radyal kesme derinliği (%40,23) en etkili parametre olarak belirlenmiştir.
- The regression model provided highly accurate results with an R^2 value of 97.47%. / Regresyon modeli %97,47 R^2 değeri ile yüksek doğrulukta sonuçlar sunmuştur.

Aim (Amaç): The aim of this study is to determine the effects of boring parameters on boring torque in the precision boring process of AISI P20 plastic mold steel and to determine the most suitable machining conditions. / Bu çalışmanın amacı, AISI P20 plastik kalıp çeliğinin hassas baralanması işleminde baralama parametrelerinin baralama torku üzerindeki etkilerini belirlemek ve en uygun işleme koşullarını tespit etmektir.

Originality (Özgünlük): In this study, the parameters affecting torque generation during precision boring of AISI P20 steel on a milling machine were investigated. / Bu çalışma, AISI P20 çeliğinin freze tezgahında hassas baralanması sırasında tork oluşumunu etkileyen parametreler incelenmiştir.

Results (Bulgular): While the radial depth of cut was determined as the parameter with the greatest effect on the boring torque with 40.23%, the effect of the feed rate was found to be 18.26%. While coated inserts caused lower torque values, the regression model showed high accuracy with an R^2 value of 97.47%. / Baralama torku üzerinde radyal kesme derinliği %40,23 ile en büyük etkiye sahip parametre olarak belirlenirken ilerleme miktarının etkisi %18,26 olarak bulunmuştur. Kaplamalı kesici uçlar daha düşük tork değerlerine neden olurken regresyon modeli %97,47 oranında R^2 değeri ile yüksek doğruluk göstermiştir.

Conclusion (Sonuç): Radial depth of cut was determined as the most effective parameter on the torque generated during the precision boring of AISI P20 steel on the milling machine, and an effective regression model was established. / AISI P20 çeliğinin freze tezgahında hassas baralanması işleminde meydana gelen tork üzerinde en etkili parametre olarak radyal kesme derinliği belirlenirken etkili bir regresyon modeli kurulmuştur.



Effect of Processing Parameters on Cutting Torque in Boring of AISI P20 Plastic Mold Steel on Vertical Machining Machine

Aslan AKDULUM^{1*} , Mehmet SÜZGÜNOL² , Yunus KAYIR³ 

¹ Corresponding author. Department of Machinery and Metal Technologies, Başkent OSB Vocational School of Technical Sciences, Hacettepe University, Ankara, Türkiye

² Yeşilevler Vocational and Technical Anatolian High School, Adana, Türkiye

³ Department of Manufacturing Engineering, Faculty of Technology, Gazi University, Ankara, Türkiye

Article Info

Research article
Received: 16/09/2024
Revision: 20/12/2024
Accepted: 31/01/2025

Keywords

Boring
Torque
Optimization
Taguchi
Anova
Regression

Abstract

AISI P20 plastic mold steel is a material generally used in the mold industry. In mold manufacturing, quality holes are needed because continuity of product quality, high repetitive work, and maximum mold life are required. Additionally, boring tools are used in the manufacture of engine block cylinder housings in the automotive industry. Therefore, boring operations play a vital role in obtaining the final quality of pre-drilled holes. But the cutting insert of the boring tool contacts the hole wall at a single position relative to the hole axis. This situation causes the cutting torque to result in the highest force in the boring process. Therefore, one of the most critical indicators of hole quality is boring torque. For this reason the aim of the present study is to deeply analyze the impacts of coating type, cutting edge radius, feed rate, cutting speed, and radial depth of cut parameters on the boring torque in the precision boring process of AISI P20 material on a vertical machining machine. For this purpose, graphics, Taguchi, and Anova methods were used. As a result, while the radial depth of cut was determined as the most effective parameter on the boring torque, the coated cutting insert produced lower torque values. As a result of the calculated regression equations, an R^2 value of 97.47% was obtained. It was also found that the radial depth of cut had a 40.23% effect on torque, while the feed rate had an 18.26% effect.

AISI P20 Plastik Kalıp Çeliğinin Dik İşleme Tezgahında Baralanmasında İşleme Parametrelerinin Kesme Torkuna Etkisi

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 16/09/2024
Düzeltilme: 20/12/2024
Kabul: 31/01/2025

Anahtar Kelimeler

Baralama
Tork
Optimizasyon
Taguchi
Anova
Regresyon

Öz

AISI P20 plastik kalıp çeliği, genellikle kalıp sektöründe kullanılan bir malzemedir. Kalıp imalatında ise ürün kalitesinin sürekliliği, yüksek tekrarlı çalışma ve maksimum kalıp ömrü gerektiğinden kaliteli deliklere ihtiyaç bulunmaktadır. Ayrıca otomotiv sektöründe motor bloğu silindiri yuvalarının imalatında baralar kullanılmaktadır. Dolayısıyla önceden delinmiş deliklerin nihai kalitesinin elde edilmesinde baralama operasyonları önemli bir yer tutmaktadır. Ancak delik eksenine göre baranın kesici ucu tek noktada delik duvarı ile temas halindedir. Bu durum ise baralama işleminde kesme torkunun en yüksek kuvvet olarak sonuçlanmasına neden olmaktadır. Dolayısıyla delik kalitesinin en önemli göstergelerinden birisi baralama torkudur. Bu nedenle mevcut çalışmada AISI P20 malzemesinin dik işleme tezgahında hassas baralanması işleminde kaplama tipi, kesici uç radüsü, radyal kesme derinliği, kesme hızı ve ilerleme miktarı parametrelerinin baralama torkuna etkilerinin derinlemesine araştırılması amaçlanmıştır. Bunun için grafikler, Taguchi ve Anova yöntemleri kullanıldı. Sonuç olarak baralama torku üzerinde etkili parametre olarak radyal kesme derinliği tespit edilirken, kaplamalı kesici uç daha düşük tork değerleri meydana getirmiştir. Hesaplanan regresyon eşitlikleri sonucu %97,47 oranında bir R^2 değeri elde edilmiştir. Ayrıca tork üzerinde radyal kesme derinliğinin %40,23 etkisi varken ilerleme miktarının %18,26 etkili olduğu tespit edilmiştir.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

AISI P20 malzemesi genellikle plastik enjeksiyon ve kesme kalıplarında kullanılmaktadır [1]. Plastik

içerikli ürünlerin kullanımının günden güne artmasıyla plastik enjeksiyon kalıplarına daha fazla ihtiyaç duyulmaktadır [2]. Hazırlanan kalıplarda ürün kalitesinin devamlılığı, yüksek tekrarlı çalışma

süresi ve maksimum kalıp ömrü gerektiğinden kaliteli deliklere ihtiyaç bulunmaktadır [3]. Arzulanan delik kalitesini elde edebilmek için son işlem olarak baralama operasyonları uygulanmaktadır [4]. Ayrıca otomotiv sektöründe araçların motor bloğundaki silindir deliğinin genişletilmesinde baralama işlemi oldukça önemlidir [5]. İşlemin uygun yapılmaması durumunda, motor bloğunda silindir deliğinin eksantrikliği, yüzey kalitesi bozulmaları, kirletici gaz emisyonu, aşınma, yağ sızdırma, güç ve verimlilik kaybı, titreşim ve soğutma problemleri gibi ciddi sorunlar meydana gelebilir [6].

Freze tezgahlarında yapılan baralama işlemi, torna tezgahında yapılan delik içi tornalama operasyonlarından farklı özelliktedir. Freze tezgahlarında yapılan baralama işlemi, iş parçalarının sabit olduğu, bara kesicisinin ise hem dönme hem de ilerleme hareketi yapmasıyla gerçekleşmektedir [7]. Dolayısıyla freze tezgahında yapılan baralama işleminde bara çubuğu mekanik, dinamik ve merkezkaç kuvvetlerine daha fazla maruz kalmaktadır [8]. Bunun neticesinde yanıl ve burulma titreşimleri, tırlama, ucun geriye dönmesi, yüzey pürüzlülüğünün ve kuvvetlerin aşırı artması gibi olumsuzluklar meydana gelebilir [9]. Ayrıca delik için de çalışma, bara çubuğunun uzun ve ince olması, delik çapı gibi kısıtlılıklardan dolayı anılan problemlerin çözümü için baralama parametrelerinin derinlemesine incelenerek optimizasyonu gerekmektedir [10]. Delik kalitesinin elde edilmesinde önemli çıktı yanıtlarından biri baralama torkudur. Özellikle delik eksenine göre delik çevresine baralama ucu tek noktadan temas ettiği için delik kalitesinin oluşumunda baralama torku birincil öneme sahip olmaktadır.

Dik işleme tezgahında yapılan baralama işleminin incelenmesi için şimdiye kadar çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Yapılan çalışmalarda lazer kılavuzlu sistemler geliştirilerek delik derinliğine bağlı kesici uç sapması ve delik çapı sapması incelenmiştir [11, 12]. Önerilen sistem ile sapma değerlerinde azalma meydana gelmiştir. Diğer bir çalışmada kesme kuvvetleri takım geometrisi, ilerleme miktarı, radyal kesme derinliğinin bir fonksiyonu ile analitik olarak modellenmiştir [10, 13]. Baralama kuvvetinin talaş alanı ile doğrusal bir ilişkiye sahip olduğunu, ilerleme miktarı ve radyal kesme derinliğiyle ise doğrusal olmayan bir ilişkiye sahip olduğunu tespit etmişlerdir. Ayrıca baralama işlemi sonucu deliğin boyutsal hataları üzerinde merkezkaç kuvvetlerinin etkisini incelemişlerdir [8]. Baralama işleminde meydana gelen form hataları [14], titreşimler [15], dinamik kararlılık [9,

16], ilerleme kuvveti [17] gibi çıktı yanıtları incelenmiştir. Farklı soğutma yöntemlerinin kesme kuvvetlerine, sıcaklığa ve takım aşınmasına etkileri araştırılmıştır [18]. Kesme hızı, ilerleme miktarı ve kesme derinliğinin baralama sonucu elde edilen deliğin dikliğine etkileri deneysel olarak incelenmiştir [19]. İş mili hızı, soğutma sıvısı, kesici uç tipi ve ilerleme oranının yüzey kalitesi, deliklerin silindirikliği, daireselliği ve boyutsal tamlığı üzerindeki etkileri incelenmiştir [20]. Literatürde yapılan çalışmalar değerlendirildiğinde baralama işleminde meydana gelen kesme torku üzerinde işleme parametrelerinin etkisi tam anlamıyla araştırılmamıştır. Ancak baralama işleminde meydana gelen kesme torku oldukça önemli olup geometrik sapma, yüzey pürüzlülüğü oluşumu ve titreşimin nedenlerinden birisi olabilmektedir. Bu yüzden derinlemesine incelenmesi işlem planlaması ve verimlilik açısından oldukça gereklidir.

Mevcut çalışmanın amacı, AISI P20 plastik kalıp çeliğinin dik işleme tezgahında hassas baralanması işleminde kaplama tipi, kesici uç radüsü, ilerleme miktarı, kesme hızı ve radyal kesme derinliği parametrelerinin baralama torkuna etkilerinin derinlemesine araştırılmasıdır. Baralama işleminde meydana gelen kesme torku gerçek zamanlı olarak kaydedilmiştir. Baralama torku üzerinde baralama parametrelerinin etkileri normallik testi, ortalama etki grafiği, üç boyutlu yüzey grafiği, Taguchi ve Anova yöntemleriyle analiz edilmiştir. Daha sonra regresyon analizi ile matematiksel olarak modellenmiştir. Bu çalışma ile dik işleme tezgahlarında yapılan baralama torkuna hangi işleme parametrelerinin daha fazla etki ettiği belirlenerek literatüre katkı sağlanmıştır.

2. MATERYAL VE METOT (MATERIALS AND METHODS)

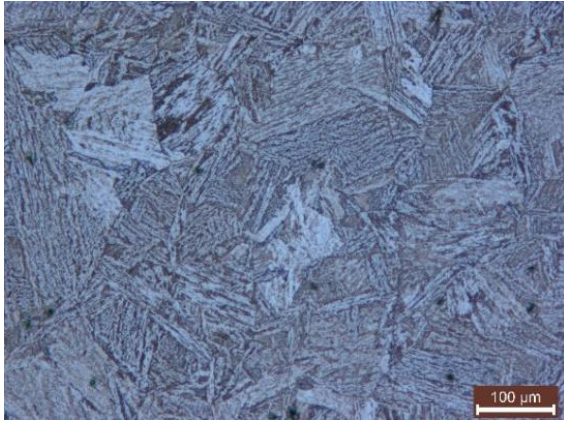
Deneysel kurulum, AISI P20 plastik kalıp çeliği malzemenin dik işleme tezgahında hassas bir şekilde baralanması ve baralama işleminde gerçek zamanlı olarak baralama torkunun ölçülmesi amacıyla gerçekleştirilmiştir. AISI P20 iş parçası 60 × 60 × 35 mm boyutlarında hazırlanarak kullanılmıştır. Kullanılan iş parçası malzemesinin mekanik özellikleri ve kimyasal bileşimi tablo 1'de yer almaktadır. Mekanik özellikler çekme testi ve sertlik ölçümü sonucu elde edilmiş olup üç defa tekrarlanan testlerin ortalamalarını göstermektedir.

Taramalı elektron mikroskopu ile mikroyapı Şekil 1'de ki gibi görüntülenmiştir. Baralama öncesi delikler uygun radyal kesme derinliğini elde edebilmek amacıyla farklı çapta normal helisel matkaplar kullanılarak boydan boya delinmiştir.

Delik büyütme işlemi olan baralama işlemi daha sonra boydan boya olacak şekilde gerçekleştirilmiştir.

Tablo 1. AISI P20 plastik kalıp çeliğinin temel özellikleri [17] (Main properties of AISI P20 plastic mold steel)

Kimyasal Bileşim, %	
Si	0.2
Mn	1.5
Cr	1.9
Mo	0.2
C	0.4
Fe	Kalan
Mekanik Özellikler	
Çekme dayanımı	971 MPa
Akma dayanımı	746 MPa
Uzama	% 6.23
Sertlik, Rockwell C	35.5 HRC



Şekil 1. AISI P20 plastik kalıp çeliğinin mikroyapı görüntüsü (Microstructure image of AISI P20 plastic mold steel)

Deneysel tasarım yöntemi olarak Taguchi L36 ($2^2 \times 3^3$) modeli dikkate alınmıştır. Taguchi yöntemi daha az deney sayısı ile optimal kesme parametrelerini belirlemek için kullanılan bir yöntemdir [21-23]. Birçok çalışmada optimum kesme parametrelerinin başarılı bir şekilde belirlenmesi amacıyla kullanılmıştır [24, 25]. Mevcut çalışmada toplamda beş adet baralama parametresi bulunmaktadır. Bu parametrelerin iki tanesi ikişer seviye, üç tanesi ise üçer seviye olacak şekilde belirlenmiştir. Tam faktöriyel deney tasarımı olması durumunda deney sayısı $2 \times 2 \times 3 \times 3 \times 3 = 108$ adet olması gerekirken Taguchi yöntemiyle bu sayı 36 adete düşmüştür. İşlenebilirlik deneylerindeki maliyet ve zaman kısıtlılıkları dikkate alındığında mevcut yöntemin avantajlı olduğu söylenebilir. Taguchi L36 için parametreler ve seviyeleri tablo 2’de yer almaktadır.

Delik baralama işlemleri bilgisayar kontrollü dik işleme tezgâhı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Takım tezgâhının kontrol paneli Fanuc ve ölçüm hassasiyeti 0,001mm’dir. Dandrea marka baralama çubuğu, baralama başlığı ve kesici uçlar kullanılmıştır. Baralama parametreleri, kesici takım katalog tavsiyeleri ve literatür dikkate alınarak belirlenmiştir [17]. Baralama torkunu ölçmek için üç adet ilerleme miktarı (0,04 – 0,06 ve 0,09 mm/dev), üç adet radyal kesme derinliği (0,2 – 0,3 ve 0,5 mm) ve üç adet kesme hızı (130, 162 ve 203 m/dak) belirlenmiştir. Kaplamalı ve kaplamasız olmak üzere iki türde sermet (cermet) kesici uç kullanılmıştır. Kesici uçların burun yarıçapı olarak 0,2 mm ve 0,4 mm değerleri belirlenmiştir. İş parçası sabit, kesici takım ise döner durumdadır. Soğutma sıvısı kullanılmamış olup deneyler kuru ortamda gerçekleştirilmiştir.

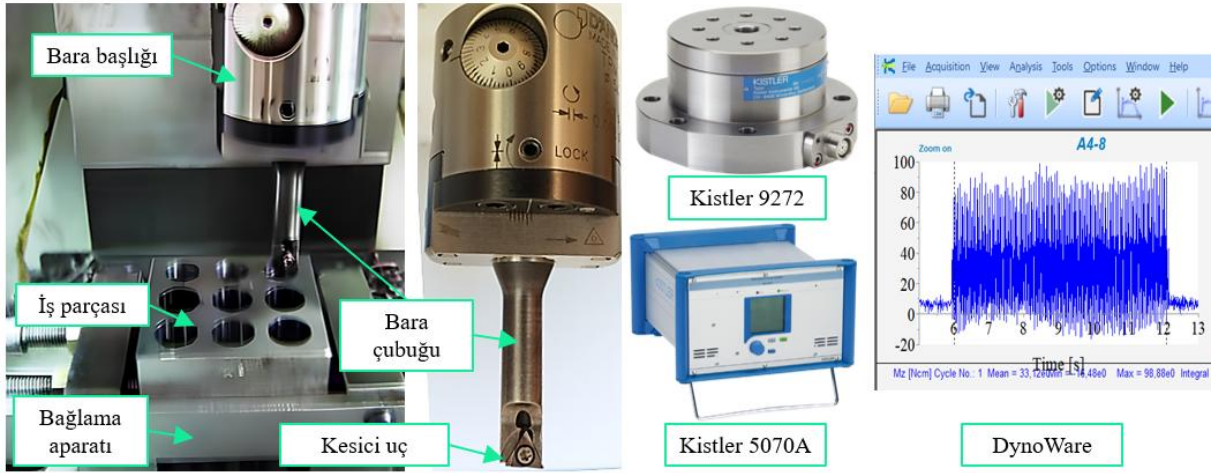
Tablo 2. Taguchi L36 için faktörler ve seviyeleri (Factors and levels for Taguchi L36)

Seviye	Faktörler				
	Kaplama Tipi (KT)	Uç yarıçapı (UR), mm	Kesme Hızı (Vc), m/dak	İlerleme Miktarı (f), mm/dev	Kesme Derinliği (KD), mm
1	Kaplamasız	0,2	130	0,04	0,2
2	Kaplamalı	0,4	162	0,06	0,3
3			203	0,09	0,5

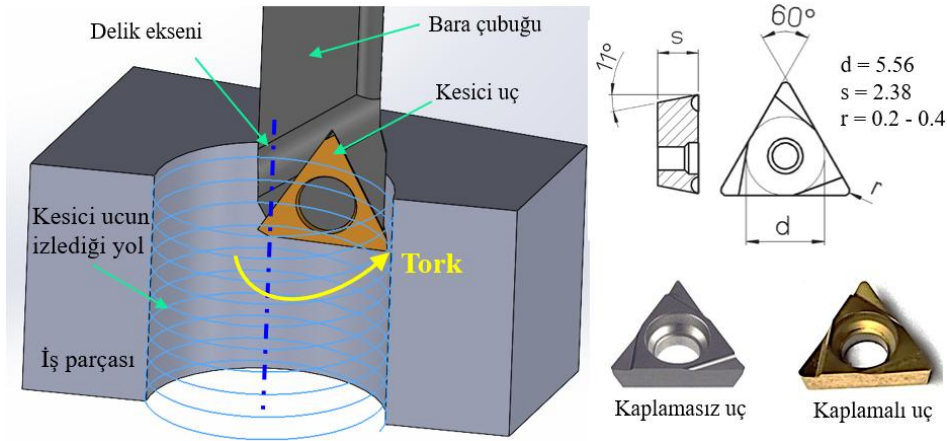
Deneysel kurulum Şekil 2’de gösterilmiştir. Delik barası ile deliği genişletirken baralama torkunu gerçek zamanlı olarak ölçmek ve kaydetmek için Kistler 9272 dinamometre ve Kistler 5070A amplifikatör kullanılmıştır. Toplanan sinyal bilgileri dynoware programı ile işlenerek ortalama baralama torku belirlenmiştir.

Nihai olarak 14 mm delik çapını elde etmek için uygun bara başlığı ve bara çubuğu kullanılmıştır. Bu aralıktaki baralama ucu Dandrea takım setinde B 3.11 (Ø11- Ø17mm) sınıfı içerisinde yer almaktadır. Kullanılan kesici uçların boyut bilgileri ve geometrisi Şekil 3’te bulunmaktadır. Kullanılan kesici uçların geometrisi TPGX090202L ve

TPGX090204L'dir. Kaplamasız ucun kodu DC100, kaplamalı ucun kodu ise DC100T'dir.



Şekil 2. Baralama torkunun ölçümü için hazırlanan düzenek (The apparatus prepared for measuring the boring torque)



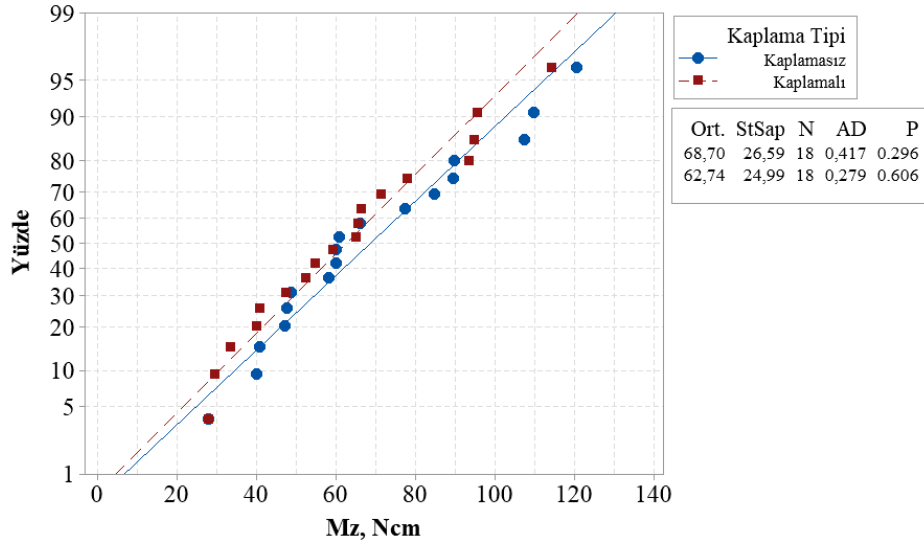
Şekil 3. Kullanılan bara ve kesici uçlar (Used boring bar and inserts)

3. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA (EXPERIMENTAL RESULTS AND DISCUSSION)

AISI P20 plastik kalıp çeliğinin dik işleme tezgahında hassas baralanması sonucu meydana gelen baralama torku üzerinde işleme parametrelerinin etkilerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Bunun için Taguchi L36 deney tasarımı yöntemi belirlenmiştir. Beş adet baralama parametresi belirlenerek bilgisayar kontrollü dik işleme tezgahında hassas baralama deneyleri gerçekleştirilmiştir. Gerçek zamanlı olarak dinamometre tarafından ölçülen baralama torku optimum işleme parametrelerinin belirlenmesi amacıyla çıktı yanıtı olarak belirlenmiştir. Çünkü delik merkezine göre çevrede ve tek noktada delik yüzeyine temas eden bara çubuğuna takılı kesici uç, dengesiz kuvvetlere maruz kalmaktadır. Kesme

sürecinde meydana gelen kuvvetlerin en büyüğü ise kesme torkudur.

Şekil 4'te bulunan baralama torku değerlerinin kesici tiplerine göre normallik testi incelendiğinde P değerleri 0,05 değerinden daha fazladır. Dolayısıyla verilerin normal dağılıma uyduğu söylenebilir [26]. Kaplamasız uç için P değeri 0,296 hesaplanmışken kaplamalı kesici uç için P değeri 0,606 olarak sonuçlanmıştır. Kaplamasız uç ile ortalama baralama torku 68,7 Ncm olarak ölçülürken, kaplamalı kesici uç için bu değer 62,74 Ncm olarak ölçülmüştür. Dolayısıyla kaplamalı kesici uç ile ortalama daha küçük baralama torku meydana gelmiştir. Kaplamalı kesici ucun standart sapma değeri (24,99), kaplamasız kesici ucun değerine (26,59) göre daha düşük hesaplanmıştır. Dolayısıyla kaplamalı ucun daha tercih edilebilir olduğu söylenebilir.



Şekil 4. Kaplama tipine göre baralama torku normallik testi (Boring torque normality test according to coating type)

Baralama torku üzerinde baralama parametreleri sinyalinin gürültüye oranları (S/N) tablo 3'te bulunmaktadır. En etkili parametre seviyeleri kalın olarak vurgulanmıştır. Taguchi analizi, baralama torku üzerinde işleme parametrelerinin etkilerini değerlendirmek için çıktı yanıtlarını S/N oranlarına dönüştürmektedir [27]. Minimum baralama torku daha arzulanan bir durumdur. Dolayısıyla küçük

daha iyidir yaklaşımına göre Taguchi analizi yapılmıştır. Taguchi analizinde daha yüksek S/N oranları daha iyi sonuç vermektedir. Delta değeri daha yüksek olan faktörün önem derecesi daha yüksektir. Dolayısıyla önem derecesine göre faktörler sıralandığında en önemli faktör radyal kesme derinliğiyken en az öneme sahip faktör kesme hızı olarak sonuçlanmıştır.

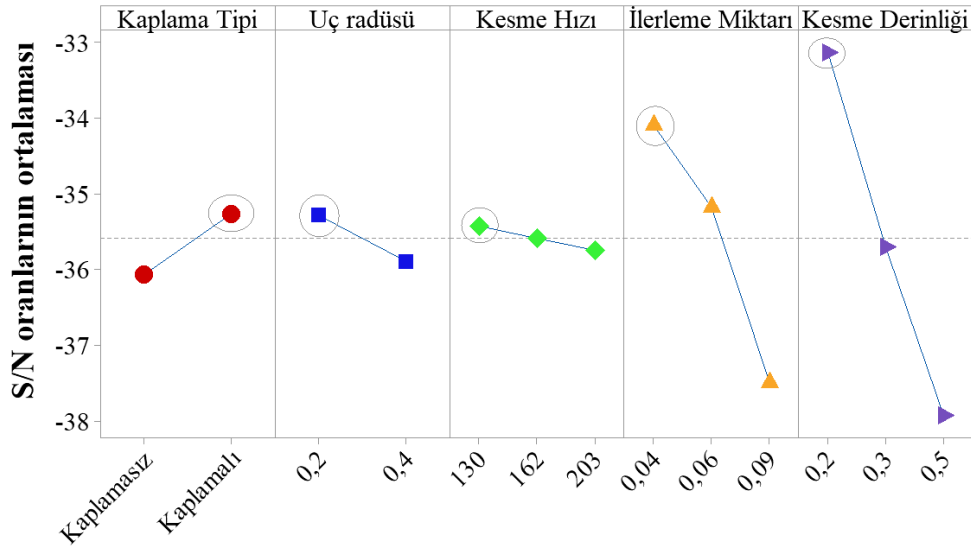
Tablo 3. S/N oranları yanıt tablosu (S/N ratios response table)

Seviye	Kaplama Tipi	Uç radüsü	Kesme Hızı	İlerleme Miktarı	Kesme Derinliği
1	-36,07	-35,28	-35,43	-34,09	-33,13
2	-35,26	-35,89	-35,59	-35,18	-35,70
3			-35,75	-37,49	-37,93
Delta	0,80	0,61	0,32	3,41	4,80
Sıra	3	4	5	2	1

S/N oranlarına göre elde edilen ortalama etki grafiği Şekil 5'te bulunmaktadır. Faktörlerin daha küçük S/N oranları daha iyi olduğu için optimal değerler elips içerisine alınmıştır. Daha büyük S/N oranlarına sahip faktör seviyeleri kaplama tipi faktörü için kaplamalı kesici uç, uç radüsü değeri 0,2mm, kesme hızı 130 m/dak, ilerleme miktarı 0,04mm/dev ve kesme derinliği ise 0,2 mm olarak belirlenmiştir.

Deney sonucu elde edilen veriler normal dağılım gösterdiği için Anova testi sonuçlara uygulanabilmektedir. Baralama torku için Anova sonuçları tablo 4'te bulunmaktadır. Anova tablosunda yer alan P değeri 0,05 değerinden küçükse sonuçların istatistiksel olarak anlamlı

olduğu sonucuna varılmaktadır. Mevcut çalışmada model için elde edilen 0,016 değeri modelin anlamlı olduğunu ifade etmektedir. Oluşturulan modelin R² değeri ise %90,5 olarak sonuçlanmış olup oldukça başarılıdır. P<0,05 değerine göre baralama torku üzerinde anlamlı istatistiksel etkiye sahip parametreler radyal kesme derinliği (0,003) ve ilerleme miktarı (0,011) olmuştur. Etkili olan parametrelerin katkı yüzdeleri ise radyal kesme derinliği için %40,23 olarak sonuçlanmışken, ilerleme miktarı için %18,26 olmuştur. Dolayısıyla baralama işlemlerinde parametreler belirlenirken radyal kesme derinliği ve ilerleme miktarı oldukça dikkatli bir şekilde seçilmelidir.



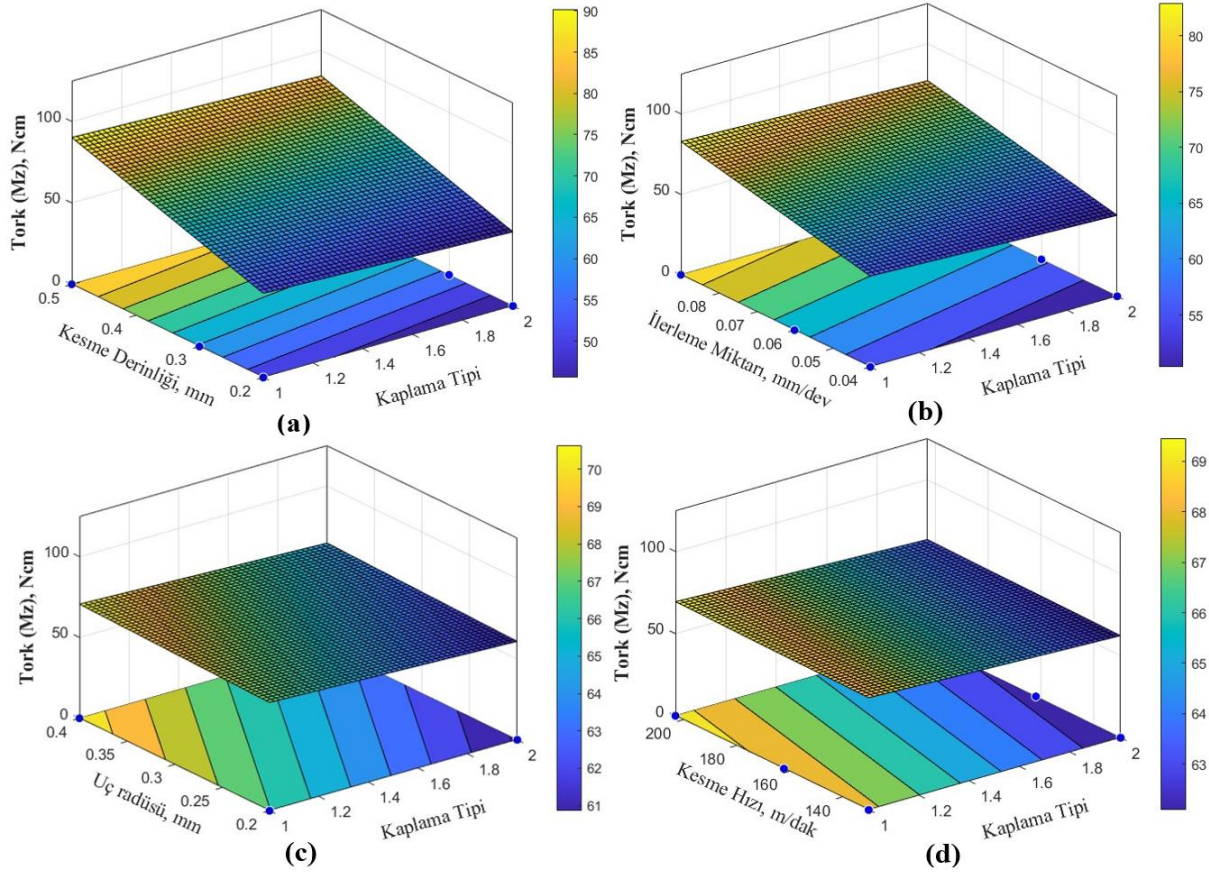
Şekil 5. Baralama torku için S/N oranlarının ortalamaları (Averages of S/N ratios for boring torque)

Tablo 4. Baralama torku için Anova tablosu (Anova table for boring torque)

Kaynak	Serbestlik derecesi	Hata kareleri toplamı	Katkı Yüzdesi	Ayarlanmış kareler toplamı	Ayarlanmış ortalama kareler	F-Değeri	P-Değeri
Model	25	20772,5	90,50%	20772,5	830,9	3,81	0,016
Lineer	8	14309	62,34%	8097,3	1012,17	4,64	0,014
Kaplama tipi	1	319,8	1,39%	194	194,01	0,89	0,368
Uç radüsü	1	113,5	0,49%	15,4	15,41	0,07	0,796
Kesme hızı	2	449,5	1,96%	366,9	183,46	0,84	0,46
İlerleme miktarı	2	4191,9	18,26%	3189,9	1594,94	7,31	0,011
Radyal kesme derinliği	2	9234,2	40,23%	4634	2316,99	10,62	0,003
İkinci derece	17	6463,5	28,16%	6463,5	380,21	1,74	0,187
Kaplama tipi*Uç radüsü	1	999,1	4,35%	788,1	788,08	3,61	0,087
Kaplama tipi*Kesme hızı	2	461,6	2,01%	1081,5	540,77	2,48	0,134
Kaplama tipi*İlerleme miktarı	2	154	0,67%	1038,1	519,07	2,38	0,143
Kaplama tipi*Radyal kesme derinliği	2	1557,6	6,79%	28,4	14,19	0,07	0,937
Uç radüsü*Kesme hızı	2	878,5	3,83%	1216,1	608,03	2,79	0,109
Uç radüsü*İlerleme miktarı	2	1956,5	8,52%	1168,8	584,38	2,68	0,117
Uç radüsü*Radyal kesme derinliği	2	94,8	0,41%	287,5	143,77	0,66	0,538
Kesme hızı*Radyal kesme derinliği	4	361,5	1,57%	361,5	90,38	0,41	0,795
Hata	10	2181,8	9,50%	2181,8	218,18		
Fit eksikliği	4	622,7	2,71%	622,7	155,67	0,6	0,677
Saf hata	6	1559,1	6,79%	1559,1	259,85		
Toplam	35	22954,3	100%				

Şekil 6'da kaplama tipi ile diğer baralama parametreleri arasındaki ilişkinin grafiği bulunmaktadır. 1 numara kaplamasız kesici ucu temsil ederken, 2 numara kaplamalı kesici ucu temsil etmektedir. Kaplamalı kesici uç, kaplamasız kesici uca kıyasla daha düşük baralama torku üretmektedir. Bu durum, kaplamalı ucun kesici ile malzeme arasındaki temas sürtünmesini azaltmasıyla açıklanabilir [5]. Şekil 6a'da kaplama tipi ile kesme derinliği arasındaki ilişki bulunmaktadır. Kesme derinliğindeki artış, kesme torkunun da yükselmesine neden olmaktadır. Bunun nedeni, birim zamanda kesilen talaş miktarının artmasıyla, malzemeyi şekillendirmek için daha fazla güce ihtiyaç duyulması olabilir [28]. Şekil 6b'de kaplama tipi ile ilerleme miktarı arasındaki ilişki bulunmaktadır. İlerleme miktarının büyümesiyle kesme torkunun değeri de büyüme eğilimindedir. İlerleme miktarının artan değerleri

ile kesici malzeme içerisinde daha hızlı ilerlemektedir. Kesiciye daha fazla talaşın teması da kesme işlemi için gereken tork miktarının artış göstermesinin nedeni olabilir [29]. Şekil 6c'de kaplama tipi ile uç radüsünün ilişkisi yer almaktadır. Maksimum kesme torku kaplamasız kesici uç ve maksimum radüs değerinde meydana gelmektedir. Uç radüsünün artışı kesme torkunu artırmıştır. Daha büyük kesici uç radüsü, takım-talaş temas uzunluğunu artırmakta ve baralama torkunun artmasına neden olmaktadır [10]. Şekil 6d'de kaplama tipi ile kesme hızı arasındaki ilişki bulunmaktadır. Kesme hızının artışı ile az da olsa kesme torkunda artış meydana gelmiştir. Kesme hızının artmasıyla baralama ucu ve delik duvarı arasındaki sürtünme sayısı artmakta bu durum ise kesme torkunun artmasına neden olabilmektedir [30].



Şekil 6. Kaplama tipi ile baralama parametreleri arasındaki ilişki (a) kesme derinliği, (b) ilerleme miktarı, (c) uç radüsü, (d) kesme hızı (Relationship between coating type and boring parameters (a) depth of cut, (b) feed rate, (c) insert radius, (d) cutting speed)

Kesme torku için kaplama tipine göre regresyon eşitlikleri eşitlik 1 ve 2'de bulunmaktadır. Kategorik değişken olarak kaplama tipi belirlenirken diğer baralama parametreleri sürekli faktör olarak belirlemiştir. İkinci dereceden regresyon eşitliği türetilmiş olup R^2 değeri %97,47

olarak sonuçlanmıştır. Ayrıca mutlak ortalama sapma değeri 8,55 olarak hesaplanmıştır. En küçük sapma 1 Ncm, en büyük sapma ise 31 Ncm olarak hesaplanmıştır. Literatür ile karşılaştırıldığında elde edilen değerler oldukça kabul edilebilir sınırlar içinde olduğu açıktır [26].

Kaplamasız uç için tork;

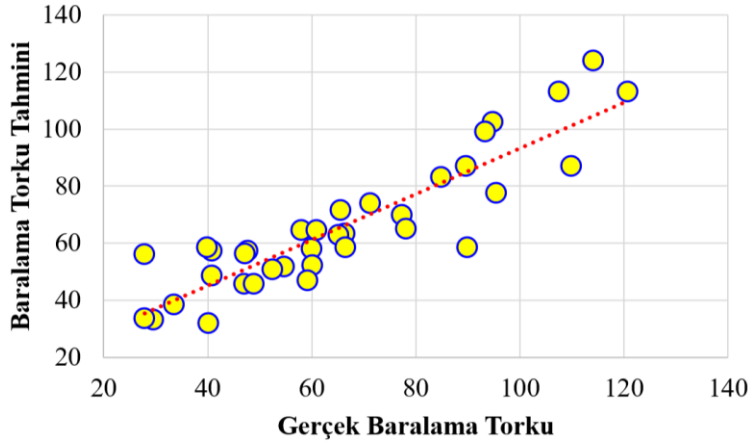
$$\begin{aligned} \text{Tork} = & 0,0 + 2669 \text{ UR} - 3,95 \text{ Vc} + 291 \text{ f} + 45 \text{ KD} - 4344 \text{ UR*UR} + 0,01103 \text{ Vc*Vc} \\ & - 2335 \text{ f*f} - 187 \text{ KD*KD} + 0,07 \text{ UR*Vc} + 22 \text{ UR*f} - 211 \text{ UR*KD} - 1,13 \text{ Vc*f} \\ & + 0,080 \text{ Vc*KD} + 3286 \text{ f*KD} \end{aligned} \quad (1)$$

Kaplamalı uç için tork;

$$\begin{aligned} \text{Tork} = & -76,2 + 2732 \text{ UR} - 3,65 \text{ Vc} - 282 \text{ f} + 160 \text{ KD} - 4344 \text{ UR*UR} + 0,01103 \text{ Vc*Vc} \\ & - 2335 \text{ f*f} - 187 \text{ KD*KD} + 0,07 \text{ UR*Vc} + 22 \text{ UR*f} - 211 \text{ UR*KD} - 1,13 \text{ Vc*f} \\ & + 0,080 \text{ Vc*KD} + 3286 \text{ f*KD} \end{aligned} \quad (2)$$

Regresyon eşitliklerine göre baralama torkunun gerçek değerleri ile tahmin değerleri arasındaki ilişki Şekil 7'de bulunmaktadır. Kırmızı kesikli çizgiler optimum tahmin eğilimini gösterirken, sarı

noktalar veri noktalarının gerçek ve tahmin dağılımını göstermektedir. Şekle göre kurulan regresyon eşitliklerinin başarılı tahminler yaptığı açıktır.



Şekil 7. Baralama torkunun gerçek ve tahmini değerleri (Actual and estimated values of boring torque)

4. SONUÇLAR (CONCLUSION)

Bu çalışmada AISI P20 plastik kalıp çeliğinin dik işleme tezgahında hassas baralanması sonucu meydana gelen baralama torku üzerinde işleme parametrelerinin etkilerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Baralama torku üzerinde baralama parametrelerinin etkileri normallik testi, ortalama etki grafiği, üç boyutlu yüzey grafiği, Taguchi ve Anova yöntemleriyle analiz edilmiştir. Daha sonra regresyon analizi ile matematiksel olarak modellenmiştir. Mevcut çalışma ile elde edilen önemli bulgular aşağıda listelenmiştir.

- Yapılan deneylerin normallik testi normal dağılıma uygun olarak sonuçlanmıştır. Kaplamasız kesici uç ile karşılaştırıldığında kaplamalı kesici uç daha küçük baralama torkunun meydana gelmesini sağlamıştır.
- S/N oranları tablosuna göre baralama torku üzerinde en etkili parametrelerin sıralaması kesme

derinliği, ilerleme miktarı, kaplama tipi, uç radüsü ve kesme hızı olarak belirlenmiştir.

- Ortalama etki grafiğine göre en optimal baralama parametreleri kaplamalı uç, 0,2 mm kesici uç radüsü, 130 m/dak kesme hızı, 0,04 mm/dev ilerleme miktarı ve 0,2 mm radyal kesme derinliği ile elde edilmiştir.
- Anova tablosuna göre modelin belirleme katsayısı %90,5 olarak hesaplanmış olup baralama torku üzerinde istatistiksel olarak anlamlı olan parametreler radyal kesme derinliği ve ilerleme miktarı olmuştur.
- Üç boyutlu yüzey grafiklerine göre uç radüsünün, kesme hızının, kesme derinliğinin ve ilerleme miktarının artışı ile baralama torku artış göstermiştir. Kaplamalı kesici uç daha düşük baralama torku meydana getirmiştir.
- Kurulan regresyon eşitliğinin R² değeri %97,47 olarak hesaplanmış olup elde edilen matematiksel

modelin başarılı bir şekilde baralama torkunu tahmin ettiği söylenebilir.

Gelecek çalışmalarda baralama torkuna etkiyen işleme parametrelerini daha ileri analiz etmek için yanıt yüzey yöntemi veya makine öğrenmesi gibi çeşitli yöntemler kullanılabilir. Baralama işleminde meydana gelen yüzey pürüzlülüğü, delik kalitesi gibi diğer çıktı yanıtları incelenebilir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

Bu çalışma, Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından 07/2011-70 kodlu proje ile desteklenmiştir. Desteklerinden dolayı yazarlar Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimine teşekkür ederler.

This study was supported by Gazi University Scientific Research Projects Unit with project code 07/2011-70. The authors thank Gazi University Scientific Research Projects Unit for their support.

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 authors of this article declare that the materials and methods they used in their work do not require ethics committee approval and/or legal-special permission.

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

Aslan AKDULUM: Deneysel sonuçları analiz ederek makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

He analyzed the experimental results and completed the writing process of the article.

Mehmet SÜZGÜNOL: Literatür taraması. Deneysel kurulumun hazırlanması.

Literature review. Preparation of experimental setup.

Yunus KAYIR: Deneylerin gerçekleştirilmesi işlemlerini yürütmüştür. Verileri analiz ederek makale metnini düzenlemiştir. Deneyler için gereken fonu proje kapsamında sağlamıştır.

He carried out the processes of carrying out the experiments. He analyzed the data and edited the text of the article. He provided the necessary funds for the experiments within the scope of the project.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

There is no conflict of interest in this study.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Kayır Y. and Süzgül M., Optimization of cutting parameters for drilling AISI P20 die mold alloy steel with Taguchi and GRA methods. Gazi University Journal of Science, 31(3): (2018) 898-910.
- [2] Stoić A., Kopač J., and Cukor G., Testing of machinability of mould steel 40CrMnMo7 using genetic algorithm. Journal of materials processing technology, 164: (2005) 1624-1630.
- [3] Zeilmann R.P., Nicola G.L., Vacaro T., Teixeira C.R., and Heiler R., Implications of the reduction of cutting fluid in drilling AISI P20 steel with carbide tools. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 58: (2012) 431-441.
- [4] Slamani M., Mayer R., Balazinski M., and Engin S., Identification and compensation of dynamic scale mismatches in high-speed end mill boring trajectory on CNC machines. J. Manuf. Sci. Eng., 132(034501): (2010)
- [5] Lazoglu I., Atabey F., and Altintas Y., Dynamics of boring processes: Part III-time domain modeling. International journal of machine tools and manufacture, 42(14): (2002) 1567-1576.
- [6] Lacerda H.B. and Siqueira I.L., Blade geometry effects on the boring of valve seats of internal combustion engines. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 63: (2012) 269-280.
- [7] Del Taglia A. and Tani G., A method for measuring cutting forces in boring operations. International Journal of Machine Tool Design and Research, 22(1): (1982) 23-30.
- [8] Arsuaga M., de Lacalle L.L., Lobato R., Urbikain G., and Campa F. Effect of centrifugal forces on dimensional error of bored shapes. in AIP Conference Proceedings. 2012. American Institute of Physics
- [9] Parsian A., Stability Prediction of Multiple-Teeth Boring Operations. 2013
- [10] Atabey F., Lazoglu I., and Altintas Y., Mechanics of boring processes—Part I. International journal of machine tools and manufacture, 43(5): (2003) 463-476.
- [11] Katsuki A., Onikura H., Sajima T., Takei T., and Thiele D., Development of a high-performance laser-guided deep-hole boring tool:: Optimal determination of reference origin

- for precise guiding. Precision engineering, 24(1): (2000) 9-14.
- [12] Katsuki A., Onikura H., Sajima T., Mohri A., Moriyama T., Hamano Y., and Murakami H., Development of a practical high-performance laser-guided deep-hole boring tool: improvement in guiding strategy. Precision Engineering, 35(2): (2011) 221-227.
- [13] Atabey F., Lazoglu I., and Altintas Y., Mechanics of boring processes—Part II—multi-insert boring heads. International journal of machine tools and manufacture, 43(5): (2003) 477-484.
- [14] Slamani M., Mayer R., Balazinski M., Carrier B., and Engin S., Improvement to high-speed end mill boring accuracy by a simple compensation strategy. Machining science and technology, 16(1): (2012) 1-19.
- [15] Valdivielso F., Instrumentation and Control Methodology For Zero Defect Manufacturing In Boring Operations. Annals of Daaam & Proceedings, 23(1): (2012)
- [16] Barzegar R., Mahboubkhah M., Zakeri V., Matin R., HOSSEINGHOLI P.H., and ABDOLLAHZADEH B.F., Finite Element Prediction on the Machining Stability of Boring Machine with Experimental Verification. (2015)
- [17] Akdulum A., Süzgünol M., and Kayır Y., Prediction of feed force with machine learning algorithms in boring of AISI P20 plastic mold steel. Materials Today Communications, 41: (2024) 110704.
- [18] Cheng H., Zhao J., Sun R., Liu S., and Yang Z., Finish boring process of hard alloy cutter based on electrostatic cooling-aided machining. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 111: (2020) 2999-3013.
- [19] Zhou H., Yang W., Sun L., Jing X., Li G., and Cao L., Reliability optimization of process parameters for marine diesel engine block hole system machining using improved PSO. Scientific reports, 11(1): (2021) 21983.
- [20] Dağlı H., Baralama operasyonunda kesme şartlarının ve kesici takım kaplama tipinin etkisinin araştırılması ve şartlarının optimizasyonu. 2020, Fen Bilimleri Enstitüsü
- [21] Demirer E. and Kayır Y., Analysis By Taguchi and ANOVA Methods For The Effect Of The Cutting Tool Height Adjustment On Cutting Forces In Turning AISI304 Stainless Steel Material. Gazi Journal of Engineering Sciences (GJES)/Gazi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 8(1): (2022)
- [22] Kurt M., Bağcı E., and Kaynak Y., Application of Taguchi methods in the optimization of cutting parameters for surface finish and hole diameter accuracy in dry drilling processes. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 40: (2009) 458-469.
- [23] Başar G. and Kahraman F. Analysis and Optimization of Ball Burnishing Process Parameters of AA 7075 Aluminium Alloy with Taguchi Method. in International Advanced Researches & Engineering Congress 2017 Proceeding Book. 2017. Dr. R. HALICIOĞLU
- [24] Adin M.Ş., İşcan B., and Baday Ş., Optimization of welding parameters of AISI 431 and AISI 1020 joints joined by friction welding using taguchi method. Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 9(1): (2022) 453-470.
- [25] Kafkas F., Gürbüz H., and Şeker U., Analysis of The Effect of Tool Geometry and Machining Parameters on Surface Integrity Properties in Turning of AISI 316L Stainless Steel by Taguchi Method. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji, 10(3): (2022)
- [26] Akdulum A. and Kayır Y., Investigation of the effect of u drills with different properties on thrust force, torque and spindle load. Politeknik Dergisi, 26(1): (2023) 387-400.
- [27] Siyambaş Y., Bayraktar Ş., and Turgut Y., Investigation of the effects of cutting parameters on diameter deviation in drilling of HSLA steel. Turkish Journal of Electromechanics & Energy, 2(1): (2017) 3-8.
- [28] Uçun İ., 3D finite element modelling of drilling process of Al7075-T6 alloy and experimental validation. Journal of Mechanical Science and Technology, 30: (2016) 1843-1850.
- [29] Çaydaş U. and Çelik M., AA 7075-T6 alaşımının delinmesinde kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü, takım sıcaklığı ve ilerleme kuvvetine etkilerinin araştırılması. Politeknik Dergisi, 20(2): (2017) 419-425.
- [30] Akdulum A. and Kayır Y., Farklı özelliklere sahip U matkaplar ile AA2024-T351'in delinmesinde çaptan sapma, dairesellik ve silindirikliğin incelenmesi. Gazi Üniversitesi

Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi,
39(2): (2024) 1167-1178.

Alümina (Al_2O_3) Takviyeli Petek Çekirdekli Sandviç Panellerin Yüksek Hızlı Darbe Tepkisi: Sayısal Analiz Çalışması

İsmail TÜRKDÖNMEZ¹  Yusuf Tansel İÇ^{2*} 

¹Fen Bilimleri Enstitüsü, Savunma Teknolojileri ve Sistemleri Bölümü, Başkent Üniversitesi, Ankara, Türkiye

²Endüstri Mühendisliği Bölümü, Başkent Üniversitesi, Ankara, Türkiye

Article Info

Research article
Received: 08/12/2024
Revision: 02/01/2025
Accepted: 06/01/2025

Keywords

Honeycomb sandwich panels, High velocity impact resistance, Core material behavior, Perforation resistance, Penetrator behavior, Finite element analysis (FEM).

Makale Bilgisi

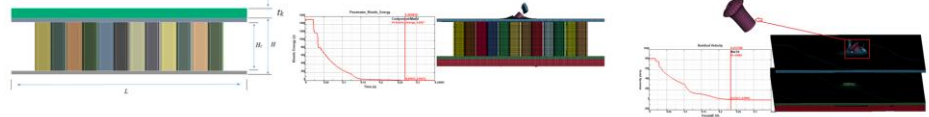
Araştırma makalesi
Başvuru:08/12/2024
Düzeltilme: 02/01/2025
Kabul: 06/01/2025

Anahtar Kelimeler

Petek sandviç paneller,
Yüksek hızlı darbe direnci,
Çekirdek malzeme davranışı,
Perforasyon direnci,
Penetratör davranışı,
Sonlu elemanlar analizi (FEM).

Grafik Özet (Graphical/Tabular Abstract)

Bu çalışma, Alümina (Al_2O_3) kaplamalı petek çekirdekli sandviç panellerin yüksek hızlı darbe tepkisini analiz etmektedir. Sayısal analizler LS-DYNA kullanılarak gerçekleştirilmiş ve çekirdek malzemelerinin performans üzerindeki etkisi incelenmiştir. / This study analyzes the high-speed impact response of alumina (Al_2O_3) coated honeycomb core sandwich panels. Numerical simulations were performed using LS-DYNA, and the effect of core materials on performance was investigated.



Şekil A: Sandviç panel yüksek hızlı penetratör çarpma etkileri / **Figure A:** Effects of high-velocity penetrator impact on sandwich panel

Önemli noktalar (Highlights)

- Alümina (Al_2O_3) kaplamalı sandviç panellerin yüksek hızlı darbe tepkisi sayısal olarak analiz edilmiştir. / The high-speed impact response of alumina (Al_2O_3) coated sandwich panels was numerically analyzed.
- 304 paslanmaz çelik ve AA 3003 çekirdek malzemeleri karşılaştırılmıştır. / 304 stainless steel and AA 3003 core materials were compared.
- Sonlu elemanlar analizleri LS-DYNA kullanılarak gerçekleştirilmiştir. / Finite element analyses were performed using LS-DYNA.

Amaç (Aim): Yüksek hızlı darbelere karşı petek çekirdekli sandviç panellerin mekanik performansını analiz etmek. / To analyze the mechanical performance of honeycomb core sandwich panels against high-speed impacts.

Özgünlük (Originality): Alümina kaplamalı ve farklı çekirdek malzemelerine sahip panellerin yüksek hızlı darbe direncine etkisi ilk kez incelenmiştir. / The effect of alumina-coated panels with different core materials on high-speed impact resistance was investigated for the first time.

Bulgular (Results): 304 paslanmaz çelik çekirdekli paneller daha yüksek balistik direnç gösterirken, AA 3003 çekirdekli paneller daha fazla enerji emme kapasitesine sahiptir. / 304 stainless steel core panels exhibited higher ballistic resistance, while AA 3003 core panels had a greater energy absorption capacity.

Sonuç (Conclusion): Alümina kaplamalı petek çekirdekli sandviç panellerin balistik performansı çekirdek malzemesine bağlıdır ve paslanmaz çelik çekirdek, daha yüksek direnç sunmaktadır. / The ballistic performance of alumina-coated honeycomb core sandwich panels depends on the core material, with a stainless-steel core providing higher resistance.



Alümina (Al₂O₃) Takviyeli Petek Çekirdekli Sandviç Panellerin Yüksek Hızlı Darbe Tepkisi: Sayısal Analiz Çalışması

İsmail TÜRKDÖNMEZ^{1*} Yusuf Tansel İÇ^{2*}

¹Fen Bilimleri Enstitüsü, Savunma Teknolojileri ve Sistemleri Bölümü, Başkent Üniversitesi, Ankara, Türkiye

²Endüstri Mühendisliği Bölümü, Başkent Üniversitesi, Ankara, Türkiye

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 08/12/2024
Düzeltilme: 02/01/2025
Kabul: 06/01/2025

Anahtar Kelimeler

Petek sandviç paneller,
Yüksek hızlı darbe direnci,
Çekirdek malzeme
davranışı, Perforasyon
direnci, Penetratör
davranışı, Sonlu
elemanlar analizi (FEM).

Öz

Balistik koruyucu tasarımında, çok sayıda faktörün yanı sıra, sağlamlık ve hafiflik iki temel ve vazgeçilmez unsur olarak öne çıkmaktadır. Özellikle savunma sanayine yönelik araçlarda, dış tehditlere karşı koruma sağlamak amacıyla geliştirilen zırh tasarımlarında bu iki faktörün önemi daha da artmaktadır. Hareketli ve dinamik yapılarda olduğu kadar, statik yapıların tasarımında da zırh özelliklerinin dikkate alınması büyük bir gerekliliktir. Farklı modellerde, kalınlıklarda ve geometrilere üretilen bu sandviç paneller, performans ve etkinlik açısından geniş bir araştırma konusu oluşturmuş, literatürde bu konuda çok sayıda detaylı çalışma yapılmıştır. Sandviç panellerin sunduğu çözümler, yalnızca mekanik dayanıklılığı artırmakla kalmaz, aynı zamanda yapıların ağırlık yükünü minimize ederek enerji verimliliğine ve kullanım ömrüne de önemli katkılarda bulunur. Bu nedenle, zırh sistemlerinde kullanılan sandviç panellerin optimizasyonu, mühendislikte hem teorik, hem de pratik açıdan yenilikçi bir çalışma alanı olarak kabul edilmektedir. Bu makalede, Alümina (Al₂O₃) plaka kaplamalı, 304 paslanmaz çelik yüzey tabakaları ile 304 paslanmaz çelik ve Alüminyum Alaşım (AA 3003) çekirdeklerden oluşan balpeteği sandviç panellerin yüksek hızlı penetratör çarpmasına karşı mekanik davranışları incelenmiştir. Ayrıca, farklı çekirdek malzemelerinin performansa etkisi vurgulanmıştır.

High Speed Impact Response of Alumina (Al₂O₃) Reinforced Honeycomb Core Sandwich Panels: Numerical Analysis Study

Article Info

Research article
Received: 08/12/2024
Revision: 02/01/2025
Accepted: 06/01/2025

Keywords

Honeycomb sandwich
panels, High velocity
impact resistance, Core
material behavior,
Perforation resistance,
Penetrator behavior,
Finite element analysis
(FEM).

Abstract

In addition to many other factors, robustness, and lightness are two fundamental and indispensable elements in the design of ballistic protection. The importance of these two factors increases even more in armor designs developed to protect against external threats, especially in vehicles for the defense industry. It is a great necessity to consider armor properties in the design of static structures as well as in moving and dynamic structures. These sandwich panels, which are produced in different models, thicknesses, and geometries, have been the subject of extensive research in terms of performance and effectiveness, and many detailed studies have been conducted in the literature. The solutions offered by sandwich panels not only increase mechanical durability but also make significant contributions to energy efficiency and lifetime by minimizing the weight load of structures. Therefore, the optimization of sandwich panels used in armor systems is considered an innovative field of study in engineering, both theoretically and practically. In this paper, the mechanical behavior of honeycomb sandwich panels consisting of 304 stainless steel surface layers and 304 stainless steel and Aluminum Alloy (AA 3003) cores against high-speed penetrator impact is investigated. Also, the effect of different core materials on the performance is emphasized.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Balpeteği sandviç paneller, hafiflik ve yüksek mukavemet dengesini sağlayan yenilikçi yapısal bileşenlerdir. Yüksek hızlı çarpma senaryolarında özellikle savunma, havacılık ve otomotiv

sektörlerinde kritik öneme sahiptirler [1-3]. Bu makale, 304 paslanmaz çelik yüzey tabakaları ve çekirdekler ile alüminyum çekirdekler arasındaki performans farklarını ortaya koymayı hedeflemektedir.

Literatür incelendiğinde, darbe yüzeyine yerleştirilecek malzemelerin özelliklerinin, sandviç panellerin balistik performansı üzerinde kritik bir rol oynadığı görülmektedir. Özellikle, mukavemet, sertlik ve kırılma tokluğu gibi mekanik parametreleri yüksek olan hafif malzemelerin kullanımı, çekirdek materyalden bağımsız olarak panelin darbe dayanımını önemli ölçüde artırmaktadır. Bu tür malzemelerin eklenmesi, yapının enerji absorpsiyon kapasitesini ve darbe sonrası bütünlüğünü iyileştirerek, panellerin yüksek hızlı çarpma koşullarında performansını optimize etmektedir. Literatür bulguları, bu stratejinin yalnızca ağırlık avantajı sağlamakla kalmayıp, aynı zamanda panelin genel balistik direnç ve deformasyon kontrolünü de geliştirdiğini ortaya koymaktadır [4,5].

Alümina (Al_2O_3) seramikler, yüksek sertlik, aşınma direnci ve düşük yoğunluk gibi üstün mekanik özellikleri nedeniyle balistik koruma sistemlerinde sıkça tercih edilmektedir. Özellikle savunma sanayinde hafif, yüksek mukavemetli ve darbe dayanımı yüksek malzemelere duyulan ihtiyaç alümina seramiklerin kullanımını artırmıştır. Bu çalışmada maliyet ve ulaşılabilirlik anlamında büyük avantajları olan yüzey plakası olarak 304 paslanmaz çelik, çekirdek malzemesi olarak 304 Paslanmaz çelik ve alüminyum alaşım (AA 3008) ve yüzey kaplama malzemesi olarak da Alümina (Al_2O_3) seramik plaka tercih edilmiştir.

Balpeteği paneller, iki ince ve sert yüzey tabakası ile hafif bir çekirdek katmandan oluşur. Çekirdek katmanının petek (balpeteği) yapısı, darbe enerjisini yaymada ve sönmülemde etkilidir. Çekirdek malzemesi olarak alüminyum ve 304 paslanmaz çelik gibi malzemeler sıkça kullanılmaktadır.

Sandviç panellerin performans spektrumunu oluşturmak için önerilen protokol, bu yapıların karmaşık mekanik davranışlarını kapsamlı bir şekilde anlamayı ve optimize etmeyi hedeflemektedir.

Balpeteği çekirdeklerin yoğunluğu, çarpma sonrası enerji sönmüleme performansını doğrudan etkiler. Yüksek yoğunluklu çekirdekler, daha fazla sertlik sağlayarak penetrasyona karşı direnç gösterir. Buna karşılık, düşük yoğunluklu çekirdekler daha geniş yüzeyde deformasyon oluşturarak enerji dağıtımını artırır. Araştırmalar, yoğunluk gradyanı uygulamalarının, çekirdeğin farklı bölgelerinde enerjiyi daha verimli şekilde dağıtabileceğini göstermektedir [6]. Mikroyapısal özellikler deformasyon mekanizmalarının türünü belirler. Paslanmaz çelik çekirdeklerde, hücre duvarlarında

çatlak ve kırılmalar baskınken, alüminyum çekirdekler daha esnek yapısıyla hücrelerin burkulma ve katlanma modunda enerji absorbe eder. Mikroyapıdaki tanelerin boyutu ve yönelimi, deformasyon direncini etkileyen kritik faktörlerdir [7].

Yüksek hızlı çarpmalar için en yaygın kullanılan yöntemlerden biri Sonlu Elemanlar Analizi (FEA)'dir. Bu analizlerde, çekirdek ve yüzey tabakalarının etkileşimleri simüle edilerek deformasyon modları ve enerji absorpsiyon mekanizmaları incelenir. Explicit dinamik analizler, kısa süreli ve yüksek şiddetli çarpmalar için tercih edilir [6].

Yüksek hızlı çarpma gibi karmaşık ve ani değişimlerin yaşandığı olaylarda, explicit sonlu elemanlar analizi (FEA), geçici (transient) ve yüksek hızdaki fenomenlerin simülasyonu için daha uygundur. Bu yöntemde zaman adımları çok küçük tutulur ve dinamik denklemler doğrudan çözülür. Çarpma sırasında malzemelerin deformasyonu, gerilme dağılımı ve enerji absorpsiyonu gibi kritik parametreleri çözmek için explicit analiz gereklidir [13].

Bu yöntem özellikle, yüksek oranda doğrusal olmayan malzeme davranışlarının (örneğin, plastik deformasyon ve kopma) ve büyük geometrik deformasyonların analiz edilmesinde tercih edilir. Ek olarak, hesaplama sürecinde, global matrislerin türetilmesine ihtiyaç duyulmadığı için çözüm daha kararlı ve hızlıdır [32].

Explicit dinamik analizler, hareket denklemlerinin doğrudan zaman integrasyonu yöntemiyle çözümlenmesini ifade eder. Bu yöntem, çarpışma, patlama, ve balistik test gibi çok kısa süreli olayların modellenmesinde kullanılır. Her bir zaman adımında, sistemin durumunu tanımlayan kuvvetler ve hızlar hesaplanır. Bu analizler, küçük zaman aralıklarında çözümlenme yaparak, sistemdeki hızlı enerji aktarımını ve ani deformasyonları doğru bir şekilde tahmin edebilir. Sonuç olarak explicit yöntem, yüksek hızda çarpma durumlarının analizinde ani enerji aktarımını, gerilme dalgası yayılımını ve malzeme hasarını modellemek için daha uygundur. Implicit yöntem ise genellikle uzun süreli ya da düşük hızlı olaylarda enerji dengelemeleri açısından avantajlıdır [13].

Bu çalışmada 304 paslanmaz çelik yüzey tabakaları ile 304 paslanmaz çelik ve Alüminyum Alaşım (AA 3003) çekirdeklerden oluşan balpeteği sandviç panellerin yüksek hızlı penetratör çarpmasına karşı mekanik davranışları incelenmiştir. Gerçekleştirilen

çalışmalara ilişkin detaylar ilerleyen bölümlerde sunulmuştur.

Son yirmi yılda, yarı statik yüklemeler için monolitik yapıya göre yapısal avantaj gösteren sandviç paneller için bir dizi yeni çekirdek topolojisi ortaya çıkmıştır [4]. Bunlara metalik köpükler [8], piramidal ve dörtyüzlü düzenlemenin kafes malzemeleri [9], dokuma malzeme [10] ve yumurta kutusu [11] dâhildir. Metalik sandviç yapılar 2000'li yılların başında hafif ve çok işlevli özellikleri ile patlamaya karşı dirençleri için araştırılmıştır. Literatüre sunulan çalışmalardan birinde Zok vd. [3] metalik sandviç panellerin yapısal performansını karakterize etmek için bir protokol önermiştir. Yaklaşımın faydaları, piramidal kafes çekirdekli paneller için gösterilmiştir. Ölçümleri, mekanizma haritalarını, sonlu eleman simülasyonlarını ve optimizasyonu birleştirmiştir. Zhu vd. [18] çalışmalarında, çeşitli yükleme koşulları altında hücre malzemelerin çekirdeğine sahip sandviç yapıların davranışı hakkında bir inceleme sunmaktadır. Mikro yapıların türüne bağlı olarak, burada ele alınan hücre malzemeler arasında metal köpükler, petek ve prizmatik malzemeler ile kafes ve tekstil malzemeleri yer alır. Yükler, yarı statik sıkıştırma veya girinti, düşük hızlı darbe veya oldukça yoğun, yani balistik perforasyon, yüksek hızlı sıkıştırma ve patlama etkisi olabilir. Her tür yükleme koşulunda, plastik deformasyon modları ve mekanizmaları, arıza gelişimi ve enerji sönmüleme kabiliyetine odaklanılarak sandviç yapıların tepkisi gözden geçirilmiştir. Bu konuda uygulanan ana metodolojiler, yani deneysel araştırmalar, analitik modelleme ve sayısal simülasyonlar da özetlenmiştir. Imbalzano vd. [21] lokal darbe direnci uygulamaları için metalik yüzeyler arasında sınırlandırılmış kafes çekirdekli sandviç panellerin performanslarını, hıza bağlı etkileri dikkate alarak sayısal olarak incelemiştir. Li vd. [1] çalışmalarında burulma yüküne maruz kalan sandviç yapı için bir minimum ağırlık optimizasyon yöntemi geliştirmiştir. Bu makalede sunulan optimizasyon çalışması, minimum burulma rijitliği seviyesine ulaşması gereken sandviç yapıların ağırlığını azaltmayı amaçlamaktadır. Optimum tasarım sonuçları, verilen burulma sertliğine göre çekirdek ağırlığının tatmin edici ağırlık koşulunun tüm sandviç yapının ağırlığının %66,7'si olduğunu göstermektedir. Evans vd. [2], köpük hücre malzemeleri, panellerin, tüplerin ve kabukların çekirdekleri olarak yapılandırılmış periyodik hücrelere sahip malzemelerin öngörülen yetenekleriyle karşılaştırmıştır. Fleck ve Deshpande [12] yaptıkları çalışmada temel amaçlarının, suda

veya havada yüksek yüklemeye maruz kalan bir sandviç kirişin yapısal tepkisini karakterize etmek için analitik formüller geliştirmek olduğunu ifade etmişlerdir. Ashby vd. [8] çalışmalarında, metal köpüklerin yeni mekanik, fiziksel, termal ve akustik özellikleri, performansları, imalatları ve çeşitli endüstrilerde ağırlığa bağlı uygulamalarda kullanımları hakkında bilgi sağlamışlardır.

Petek sandviç paneller, hafiflik ile dayanıklılığı birleştiren yapıları sayesinde enerji emme performansı gerektiren uygulamalarda kritik bir çözüm sunar. Biyolojik esinli tasarımlar, hiyerarşik yapılar ve köpük takviyeleri gibi yenilikçi yaklaşımlar, bu panellerin gelecekte daha geniş bir yelpazede kullanılmasını sağlayacaktır. Performansı optimize etmek için geliştirilen protokoller ve yeni malzeme teknolojileri, özellikle savunma, uzay ve otomotiv sektörlerinde çığır açıcı gelişmelere olanak tanıyacaktır. Bu çalışmada da petek sandviç paneller üzerine bir çalışma yapılması ve mekanik davranışlarının analizi hedeflenmektedir.

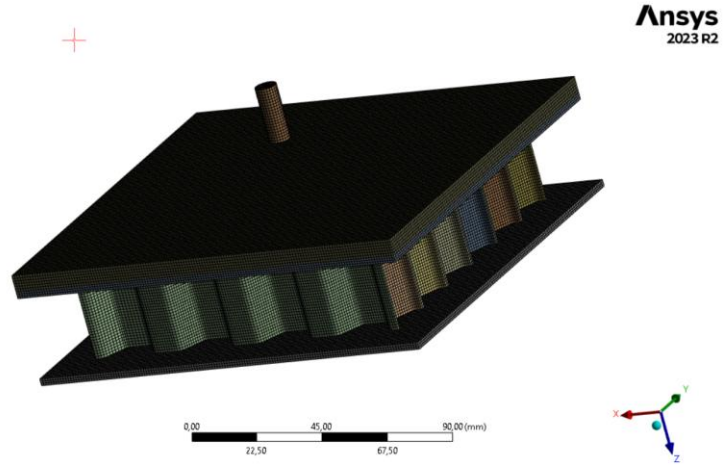
2. MALZEME VE YÖNTEMLER (MATERIALS AND METHODS)

Bu çalışmada, basit bir yapı olan ve literatürde darbe enerjisini plastik deformasyonla dağıtmak için enerji emici sistemlerde yaygın olarak kullanılan sandviç paneller, darbe yüzü Alümina seramik (Al_2O_3) kaplı olarak, künt uçlu penetratörün hızına bağlı etkiler göz önünde bulundurulup, bal peteği şeklindeki çekirdek tipinin 304 paslanmaz çelik ve Alüminyum alaşımından (AA 3003) üretilmiş şekli sayısal olarak incelenecektir. Burada amaç farklı tipte malzemedan üretilen çekirdeklerin yüksek hızlı çarpma etkisi karşısında gösterdikleri tepkiyi tespit etmektir. İki farklı tipte sandviç panel modeli bulunmakta olup, çalışmada kullanılmak üzere verilen kodlar şu şekildedir:

Al_2O_3 Kaplamalı, 304 paslanmaz çelik çekirdekli balpeteği sandviç panel: **SP304**

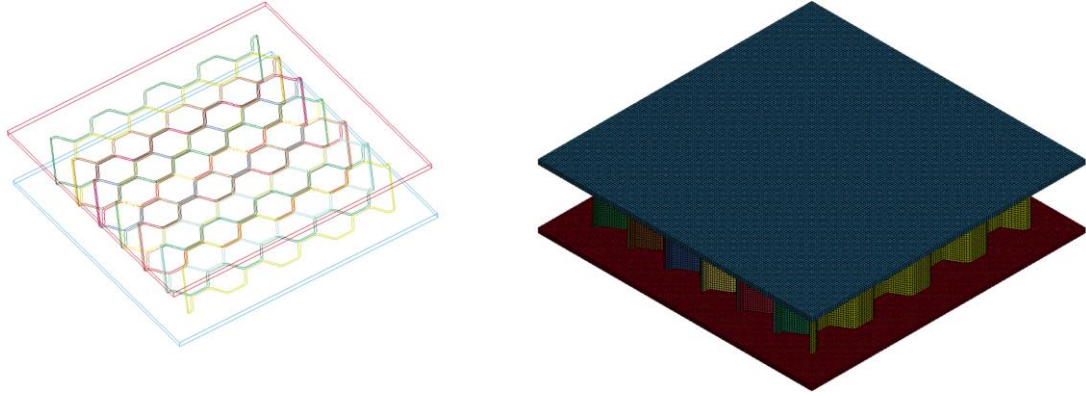
Al_2O_3 Kaplamalı, Alüminyum alaşım (AA 3003) çekirdekli balpeteği sandviç panel: **SP3003**

Sandviç paneller için modeller CATIA 3D Modelleme araçları kullanılarak oluşturulmuş ve ilgili modeller için penetrasyon simülasyonları 2023R2 Ansys Workbench LS-DYNA kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 1). Numune boyutları simülasyon zaman maliyeti (eleman sayıları) ve literatürdeki boyutlar [14] göz önüne alınarak belirlenmiştir.

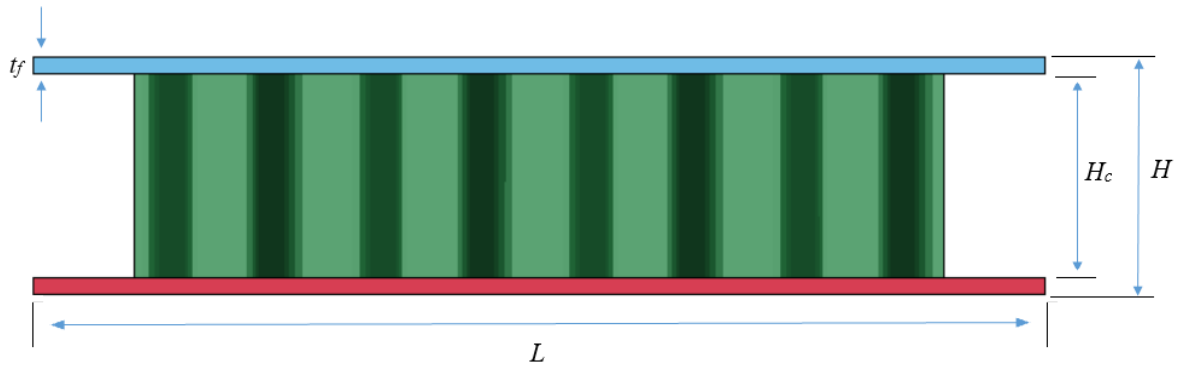


Şekil 1. LS-DYNA ortamında sandviç panel ve penetratör eleman yapısının görünümü

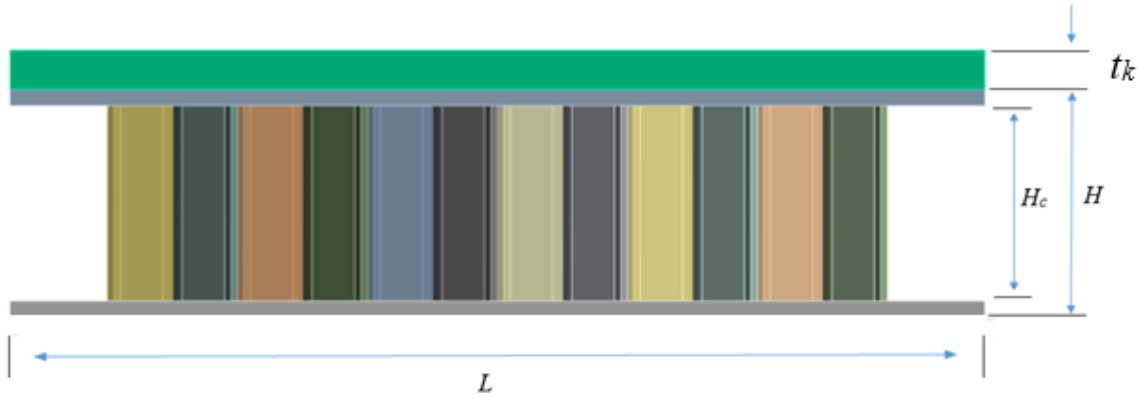
(View of sandwich panel and penetrator element structure in LS-DYNA environment)



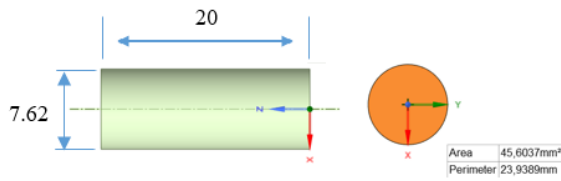
Şekil 2. a) Sandviç panelin çizgi modunda gösterimi b) Sandviç yapı elemanlarının izometrik görünümü (a) Representation of sandwich panel in line mode b) Isometric view of sandwich structural elements)



Şekil 3. Sandviç panelin geometrik gösterimi (Geometric representation of the sandwich panel)



Şekil 4. Al₂O₃ Kaplı Sandviç Panel Gösterimi (Al₂O₃ Coated Sandwich Panel Illustration)



Şekil 5. Künt burunlu delici [14] (Blunt nose penetrator [14])

Tamamen özgün olarak belirlenen bal peteği yapısına sahip çekirdeğin yüksekliği (H_c) 30 mm, et kalınlığı (t_c) ise 1 mm olarak tasarlanmıştır. Ön ve arka levhaların kalınlığı (t_f) 2,5 mm, en x boy ölçüsü ise 150x150 mm olarak belirlenmiştir. Yüzey panelleri ve çekirdek et kalınlıkları belirlenirken literatürde kullanılan malzeme kalınlıkları [14] dikkate alınmış olup, çekirdek yapıyı oluşturan sinüzoidal bileşenler üretim kolaylığı (abkant kalıp büküm özellikleri vb.) göz önüne alınarak tasarlanmıştır. Çarpma yüzeyine ilave edilen Al₂O₃ kaplamanın kalınlığı (t_k) 6 mm olarak seçilmiş ve testlerde bu kaplama da değerlendirilmiştir. Sandviç panel tüm kenarlarından sabitlenmiş olup, simülasyonda tüm kenarlara ait yüzeyler “fixed

support” olarak belirlenmiştir. Penetratörün sandviç panelde oluşturduğu hasarın incelenmesi için penetratör “rijit”, penetratörde yaşanan değişiklik sonucunda gerçekleşecek etkileşim için ise penetratör ‘flexible’ olarak seçilmiştir. Deforme olabilen sandviç plakanın kenarlarında serbestlik dereceleri kısıtlanmıştır, ilk adımda rijit/flexible mermi için sadece numuneye doğru hareket ($V_x = V_y = 0; V_z = V$) sağlanmıştır. Penetratörün çarpma hızı ile ilk hızı birbirine eşittir.

Çelik malzemeler için Johnson-Cook (J-C) malzeme modeli gerinim oranını yakalamak için seçilmiştir. 304 ve 4340 çeliklerinin mekanik özellikleri ve J-C malzeme parametreleri Tablo 1’de gösterilmiştir. LS-DYNA’da ilgili atamalar MAT_015 *MAT_JOHNSON_COOK kodu ile sağlanmıştır. Hem 4340 çeliği (delici) hem de 304 paslanmaz çelikleri (sandviç panel) ve alüminyum alaşımlı çekirdeğe sahip sandviç paneli tanımlamak için elastoplastik bir kurucu denklem kullanılmıştır. Johnson-Cook malzeme modeli, izotropik malzemeler için penetrasyon problemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır [13]. Modelde kullanılan parametre değerleri Tablo 1 ve 2’de sunulmuştur.

Tablo.1 304 paslanmaz çelik, 4340 çelik [14] ve AA 3003 [6] için malzeme modeli parametre değerleri
(Material model parameter values for 304 stainless steel, 4340 steel [14], and AA 3003 [6])

Parametre (Parameter)	304 paslanmaz çelik (304 stainless steel)		AA 3003 (AA 3003 aluminum alloy)
	4340 çeliği (4340steel)		
Young modülü E (GPa) (Young's modulus, E (GPa))	200	200	67.6
Yoğunluk, ρ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$) (Density, ρ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$))	7800	7830	2680
Poisson oranı, μ (Poisson's ratio, μ)	0.3	0.29	0.3
Statik akma gerilmesi, A (MPa) (Static yield stress, A (MPa))	310	792	214
Şekil değiştirme sabiti, B (MPa) (Strain hardening coefficient, B (MPa))	1000	510	143
Specifik ısı, C_r ($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$) (Specific heat, C_r ($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\text{K}^{-1}$))	440	477	893
Şekil değiştirme üsteli, n (Strain hardening exponent, n)	0.65	0.26	0.36
Erime sıcaklığı, T_m ($^{\circ}\text{C}$) (Melting temperature, T_m ($^{\circ}\text{C}$))	1673	1793	775
Referans şekil değiştirme hızı, $\dot{\epsilon}_0$ (s^{-1}) (Reference strain rate, $\dot{\epsilon}_0$ (s^{-1}))	1	1	1
Şekil değiştirme sabiti, C (Strain rate sensitivity coefficient, C)	0.07	0.014	0.02
Termal yumuşama üsteli, m (Thermal softening exponent, m)	1	1,03	1.7
Hasar sabiti, D_1 (Damage constant, D_1)	0.6	0.05	0.096
Hasar sabiti, D_2 (Damage constant, D_2)	0	3,44	0.049
Hasar sabiti, D_3 (Damage constant, D_3)	0	-2,12	-3.463
Hasar sabiti, D_4 (Damage constant, D_4)	0	0.002	0.016
Hasar sabiti, D_5 (Damage constant, D_5)	0	0.61	1.09

Tablo.2 Al_2O_3 için malzeme modeli parametre değerleri[15][16] (Material model parameter values for Al_2O_3 [15][16])

Parametre (Parameter)	Al_2O_3
Yoğunluk, ρ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$) (Density, ρ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$))	3715
Kayma Modülü G [MPa] (Shear modulus, G [MPa])	152,400
Normalize gerilme parametresi a [-] (Normalized stress parameter, a [-])	0,93
Kırılma normalize gerilme parametresi b (Fracture normalized stress parameter, b)	0,31
Dayanım parametresi c [-] (Strength parameter, c [-])	0
Basınç genleşme parametreleri, m ve n [-] (Pressure expansion parameters, m and n [-])	0,6
Referans şekil değişim hızı EPS0 (Reference strain rate, EPS0)	1
Maksimum çekme gerilmesi dayanımı T [MPa] (Maximum tensile strength, T [MPa])	200
Maksimum normalize kırılma dayanımı SFMAX [-] (Maximum normalized fracture strength, SFMAX [-])	0,2
Hugoniot elastik limit HEL [MPa] (Hugoniot elastic limit HEL, [MPa])	19,000
Hugoniot elastik limit basıncı PHEL [MPa] (Hugoniot elastic limit pressure, PHEL [MPa])	1460
Enerji kaybının hidrostatik enerjiye dönüşmesiyle oluşan kırılma β [-] (Fracture due to conversion of energy dissipation into hydrostatic energy, β [-])	1
Kırılmaya karşı plastik gerilme parametresi $d1$ [-] (Plastic stress parameter for fracture, $d1$ [-])	0,005
Kırılmaya kadar plastik gerinim parametresi (üstel) $d2$ [-] (Plastic strain parameter until fracture (exponential), $d2$ [-])	1
İlk basınç katsayısı (hacim modülü) $k1$ [MPa] (First pressure coefficient (bulk modulus), $k1$ [MPa])	254,000
İkinci ve üçüncü basınç katsayıları, $k2$ ve $k3$ [MPa] (Second and third pressure coefficients, $k2$ and $k3$ [MPa])	0

Bu çalışmada, Alümina (Al_2O_3) seramiklerin balistik performansı, LS-DYNA'da Johnson-Holmquist-2 (JH-2) malzeme modeli kullanılarak simüle edilmiştir. JH-2 modeli, özellikle kırılma ve seramik malzemeler için geliştirilmiş bir plastisite ve hasar modelidir. Bu model, yüksek hızda çarpma durumlarında malzemenin davranışını simüle etmek için etkili olup, hasar birikimi ve kırılma mekanizmalarını dikkate alır. JH-2 modelinin özellikleri aşağıda sıralanmıştır [13]:

- **Hasar Birikimi:** Model, malzemenin maruz kaldığı gerilmeye bağlı olarak ilerleyen bir hasar birikim mekanizması içerir.
- **Plastisite ve Kırılma:** JH-2, malzemenin plastisite özelliklerini ve çarpma sırasında oluşan kırılma süreçlerini hesaplar.
- **Dinamik Gerilme-Eğilme İlişkisi:** Çarpma hızı ve yükleme koşullarına göre malzeme sertliğindeki değişimleri dikkate alır.

LS-DYNA'da, JH-2 modeli MAT_110 (*MAT_JOHNSON_HOLMQUIST_CERAMICS) kartı kullanılarak tanımlanır. Bu parametreler arasında malzemenin başlangıç dayanımı, maksimum hasar seviyeleri ve kırılma enerjisi gibi veriler bulunur. Özellikle, çarpma simülasyonlarında Alümina'nın delici aşındırma ve şekil değiştirme etkisini artırmak için doğru parametrelerin kullanımı kritik önem taşır. İlgili kurucu model için girdi değerleri Tablo 2'de verilmiştir (Tablo 2).

Alümina seramikler, sandviç panelin ön yüzeyine entegre edilerek deliciye karşı bir bariyer görevi görür. Alümina'nın yüksek sertliği (15-20 GPa) ve aşınma direnci, delicinin aşınmasını ve deformasyonunu sağlar ve böylece delme derinliğini önemli ölçüde azaltır. Bu strateji, panelin genel balistik performansını artırmayı hedefler. Gerçekleştirilen simülasyonla ilgili detaylı olarak açıklanan yöntemler şunlardır:

i. Mesh Yapısı ve Eleman Tipleri: (i. Mesh Structure and Element Types:)

Dengeli hesaplama maliyeti ve doğruluk için, her panel için darbe/arka yüz, honeycomb çekirdek, düz uçlu mermi ve kaplama seramiği için Solid Element (Hexahedral), ELFORM 2 elemanlar kullanılarak modellenmiştir [14]. Eleman boyutları belirlenirken tüm bileşenler bazında eleman kaliteleri ve aspect ratio oranları dikkate alınarak mesh optimizasyon çalışması yapılmıştır. Yapılan bu çalışma neticesinde dengeli hesaplama maliyeti ve doğruluk

için en uygun olan eleman boyutları tercih edilmiştir. Eleman kalitesi maksimum 1 minimum da 0,82 olarak tespit edilmiş olup, ağırlıklı kısmı 0.98-0.96 düzeylerinde gözlemlenmiştir. Penetratör için Multizone method tercih edilmiş olup, linear element order belirlenmiştir. Eleman boyutları ortalama 1 mm-0.6 mm arasında tercih edilmiş ve diğer boyutlara göre daha doğru ve hızlı sonuç verdiği teyit edilmiştir. Kaplamalı modelde toplam 330.560 adet eleman ile mesh yapısı oluşturulmuştur. Ayrıca çözümün doğruluğu hourglass energy ve contact enerji grafikleri ile de teyit edilmiştir. Tüm enerji grafiklerinde doğruluğun sağlanması adına hourglass enerjinin, internal enerjinin %10'undan az olması kontrol edilmiştir.

Hexa Elemanlar: Panellerin düzlemsel ve çok bölgeli yapısından dolayı hexa (altı yüzlü) elemanlar tercih edilmiştir. Bu tür elemanlar, özellikle doğrusal olmayan analizlerde ve çarpma simülasyonlarında daha istikrarlı sonuçlar verir.

Eleman Boyutu: Simülasyon doğruluğunu artırmak amacıyla, mesh boyutu 1 mm ile 0,6 mm arasında değişen ince detaylara uygun şekilde oluşturulmuştur.

Çok Bölgeli Yöntem: Penetratörün künt uçlu yapısı nedeniyle, farklı bölgelerde farklı yoğunlukta mesh kullanılması gerekmiştir [13].

ii. Temas Tipleri ve Temas Koşulları: (ii. Contact Types and Contact Conditions:)

Literatürde çarpma sırasında kritik olan temas tipleri uygulanmıştır:

Penetratör ile Al_2O_3 Teması: “Yüzeyden Yüzeye Aşınan Temas” (Eroding Contact) türü kullanılmıştır. Bu temas tipi, malzemenin aşındığı ve elemanların arızalandığı durumlarda temasın yeniden düzenlenmesine izin verir. LS-DYNA'da bu tip temas, çarpma sonrası materyal kopmasını simüle etmek için idealdir.

Bağlı Temas (Tied Contact): Yüzey tabakaları, çekirdek ve Al_2O_3 arasındaki temas için kullanılmıştır. Bu temas türü, temas düğümlerini birbirine bağlayarak bağıl hareketi sınırlar. Özellikle yüksek deformasyonlara rağmen temas yüzeylerinin birbirine sabit kalması gereken durumlarda etkilidir. Eroding Contact ve Tied Contact gibi farklı temas türleri, yüksek hızda çarpma ve deformasyon analizlerinde LS-

DYNA'nın sıkça kullandığı araçlardır. Bu yöntemler, eleman arızalarını ve malzeme kopmalarını simüle etmek için idealdir ve sayısal analizlerin doğruluğunu artırır [17].

Bu parametrelerin seçimi, çarpma simülasyonlarının gerçekçi sonuçlar vermesi için kritik öneme sahiptir. Balistik direnci artırmak için tasarım ve malzeme seçiminde bu simülasyonlardan elde edilen sonuçlar büyük rol oynar.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

3.1. 304 SS Çelik Çekirdekli ve AA 3003 Çekirdekli Sandviç Panel Darbe Sonuçları (3.1. Impact Results of Sandwich Panel with 304 SS Steel Core and AA 3003 Core)

Penetratör tipi Wang et.al.[14] çalışması referans alınarak, farklı çekirdek tiplerinin aynı penetratör

karşısında tepkisini tespit etmek amacıyla tercih edilmiştir. Hazırlanan test ortamında, künt burunlu penetratörler, sandviç panellere 428 m/s ile 828 m/s arasında değişen hızlarla ateşlenmiştir. Bu hızlar literatürde yapılan çalışmalarda [14] gerçekleştirilen atış hızları referans kabul edilerek, balistik limit hızın tespiti amacıyla seçilmiştir. Bu hızlar, balistik limit hızın altında olduğunda, mermiler paneli germiş ancak delme gerçekleşmeden panel içinde kalmıştır. Balistik limit hız, malzemenin delinme eşiğini temsil eder ve zırh performansı için kritik bir parametredir. Çalışmada iki farklı delici tipi analiz edilmiştir:

Penetratörün sandviç panelde oluşturduğu hasarın incelenmesi için penetratör "rijit", penetratörde yaşanan değişiklik sonucunda gerçekleşecek etkileşim için ise penetratör flexible olarak seçilmiştir [14].

Tablo.3 Rigid/Flexible Mermi Karşılaştırması (Rigid/Flexible Projectile Comparison)

Kriter	Rigid Mermi	Flexible Mermi
Hesaplama Süresi	Daha hızlı	Daha yavaş
Fiziksel Gerçekçilik	Mermi deformasyonu göz ardı edilir	Mermi deformasyonu ve kırılması dikkate alınır
Zırh Davranışı	Zırh deformasyonuna odaklanır	Zırh ve mermi arasındaki çift taraflı etkileşimi inceler
Kullanım Durumu	Sert çekirdekli mühimmat (ör. tungsten)	Yumuşak çekirdekli mühimmat (ör. kurşun)
Zırha Etkisi	Enerji absorpsiyon kapasitesi değerlendirir	Zırh ve merminin karşılıklı etkilerini analiz eder

Rijit Penetratör (Rigid penetrator) : Yapısal deformasyona uğramadan çarpan penetratörler.

Deforme Olabilen Penetratör (Flexible penetrator): Çarpma sırasında şekil değiştiren penetratörler.

Bu modeller, LS-DYNA yazılımında Explicit Dynamics yöntemi kullanılarak analiz edilmiştir. Sayısal modellerde, mesh kalitesinin kontrolü için hourglass enerjisinin toplam enerjinin %10'u ile sınırlı tutulması önemli bir kriterdir. Simülasyon sonuçları, enerji dengeleme kriterlerinin bu sınırlar içinde olduğunu ve modellerin doğruluğunu teyit etmiştir.

Temas ve Enerji Modellemesi olarak sürtünmesiz gövde etkileşim modeli kullanılmıştır. Wang ve diğerlerinin [14] çalışmalarına dayalı olarak benimsenen bu

model, çarpma anında sürtünmenin etkisini ihmal eder ve simülasyon çözümleri bu yaklaşıma göre elde edilmiştir. Enerji grafikleri, toplam enerji ve kum saati enerjisi arasında dengeli bir dağılım göstererek model doğruluğunu desteklemektedir.

3.2. Rijit Penetratör Darbe Sonuçları (Rigid Penetrator Impact Results)

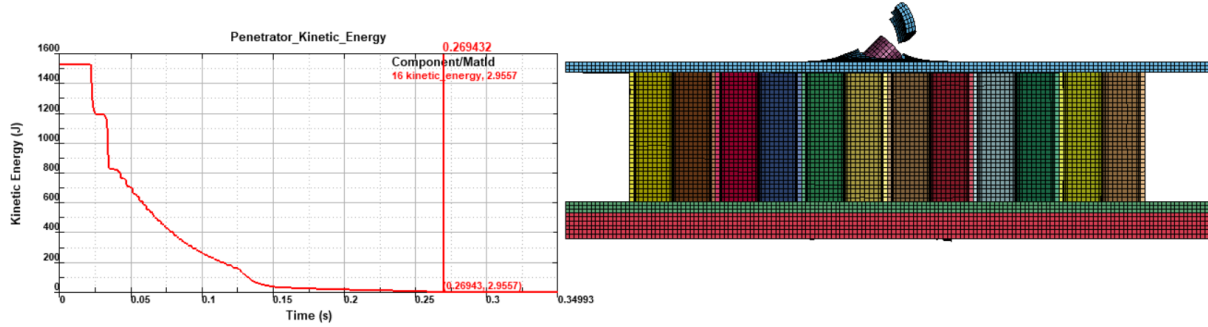
LS-DYNA ortamında, Johnson-Cook malzeme modeli kullanılarak eşdeğer plastik gerilme hesaplanmıştır. Johnson-Cook modeli, özellikle yüksek hızda çarpma analizlerinde, sıcaklık ve şekil değiştirme oranını dikkate alarak gerilme davranışlarını tahmin eden bir modeldir.

Şekil 6'dan görülebileceği gibi, penetratör sandviç panele ilk çarpmasından sonra kinetik enerjisi 1532 J'den yaklaşık 1175 J'e geriler. Yaklaşık olarak 357 J'lük enerjisini seramik

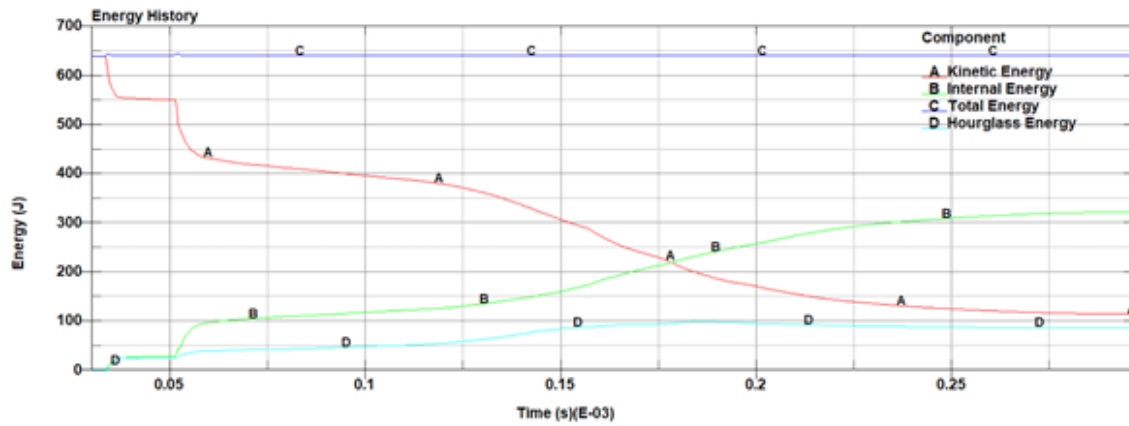
plakadan çıkana kadar kaybeder. Penetratör ön çelik yüzeye nüfuz ettikten sonra $t=0.04E-03$ sn'de yaklaşık 781 J'lük enerji ile çekirdek bölgesine girer. Rijit penetratör yaklaşık $t=0.12E-03$ sn'de 163 J kinetik enerji ile sandviç panelin arka yüzeyine çarpar ve arka yüzeyi perfore ederek taç yapraklanma yapar. Ancak enerjisinin tamamını bu aşamada

kaybederek panel içerisinde kalır. (Şekil 6). Bu analizle birlikte söz konusu konfigrasyona ait balistik limit hızı yaklaşık olarak $V_{bl}=658$ m/s olarak tespit edilmiştir.

Sonraki analiz SP3003 alüminyum alaşım çekirdeğe sahip model için yapılmış olup, sonuçları Şekil 7'te verilmiştir.



Şekil 6. Penetratör konumuna göre enerji/zaman grafikleri (Zaman (s) (E-03)) (Energy/time plots according to penetrator position (Time (s) (E-03)))



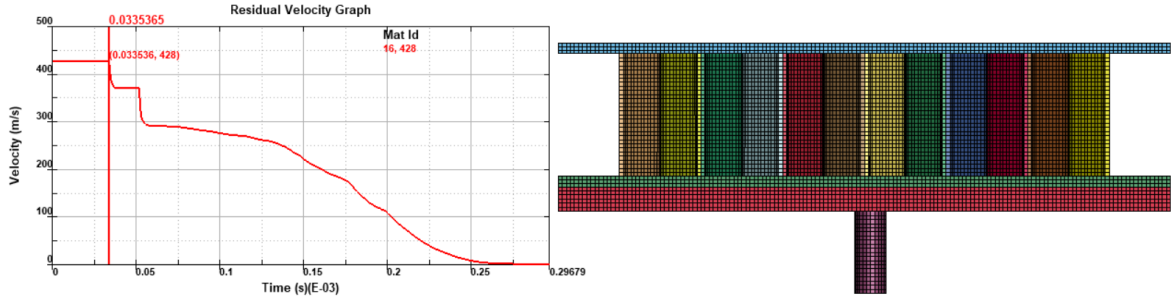
Şekil 7. SP3003 için sayısal olarak tahmin edilen enerji geçmişleri ($V_1 = 428$ m/s, Rigid Penetrator)

(Numerically estimated energy histories for SP3003 ($V_1 = 428$ m/s, Rigid Penetrator))

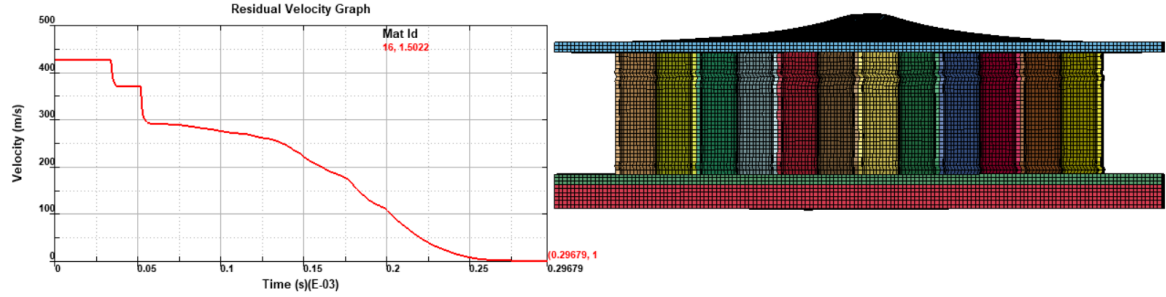
Şekil 8'den görülebileceği gibi, penetratör sandviç panele $t=0.03(E-03)$ sn'de çarpmakta, seramik bölgeyi tamamen geçtiğinde hızı yaklaşık olarak 370 m/s' ye düşmekte olup, çekirdek bölgeye girdiğinde hızı yaklaşık 289 m/s seviyesindedir. Yaklaşık $t=0.16(E-03)$ sn'de arka plakaya yaklaşık $v=187$ m/s hızla çarpmakta ancak tam perforasyon yapmadan arka yüzeyde şişkinlik oluşturarak durmaktadır (Şekil 9).

Penetratör ilk çarpmasından sonra kinetik enerjisi 640 J'den yaklaşık 480 J'e geriler. Yaklaşık olarak

160 J'lük enerjisini seramik plakadan çıkana kadar kaybeder. Penetratör ön çelik yüzeye nüfuz ettikten sonra $t=0.05E-03$ sn'de yaklaşık 306 J'lük enerji ile çekirdek bölgesine girer. Rijit penetratör yaklaşık $t=0.16E-03$ sn'de 142 J kinetik enerji ile sandviç panelin arka yüzeyine çarpar ve arka yüzeyde şişkinlik oluşturur ancak perfore edemeden durur. Bu analizle birlikte söz konusu konfigrasyona ait balistik limit hızı yaklaşık olarak $V_{bl}=450$ m/s olarak tespit edilmiştir.



Şekil 8. Penetrator Hız/Zaman Grafiği/Ön yüzeye çarpma (Penetrator Velocity/Time Graph/Front surface impact)

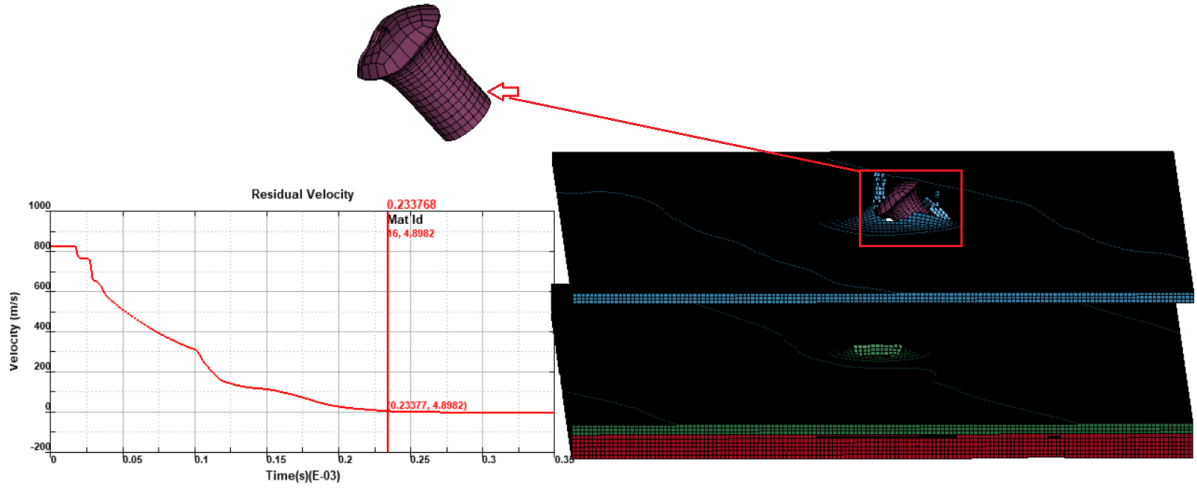


Şekil 9. Penetrator Hız/Zaman Grafiği/Arka yüzeye çarpma ve durma anı (Penetrator Velocity/Time Plot/Moment of impact on the back surface and stopping)

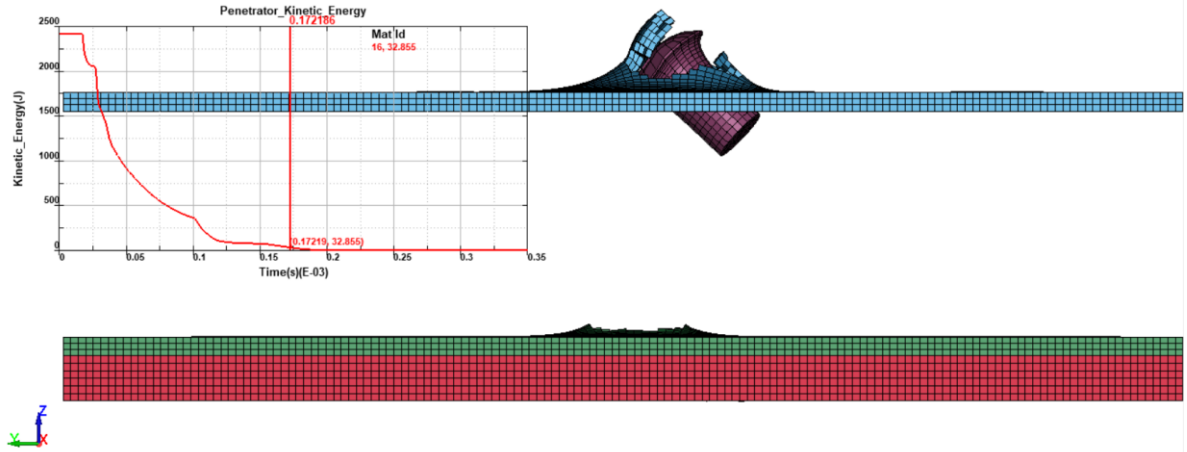
3.3. Deforme Olabilen Penetratör (Flexible) Darbe Sonuçları (Deformable Penetrator (Flexible) Impact Results)

Simülasyon, delicinin z yönünde hareket ederek başlangıç hızında sandviç panele çarpmasını modellemektedir. Delici, çarpma anında oluşan kuvvetler nedeniyle şekil değiştirir ve bu deformasyon, panel tarafından emilen enerji miktarını artırabilir. Delicinin esnek olması, kinetik enerjisinin bir kısmını deformasyon enerjisine dönüştürerek panele aktarılan enerjiyi azaltır. Böylece, sandviç panelin enerji emme kapasitesinde artış sağlanır ve penetrasyon derinliği düşer. Deforme olabilen penetratörler, rijit penetratörlere kıyasla daha az penetrasyon derinliğine neden olur. Bunun nedeni, darbe sırasında enerjinin bir kısmının delicinin iç deformasyonuna harcanmasıdır. Sandviç panel, delicinin deformasyonundan kaynaklanan ek enerji emilimi ile daha verimli bir şekilde darbe enerjisini absorbe eder. Bu durum, panelin balistik dayanımını artırır ve hasar seviyesini düşürür. SP304 sayısal analizinde, penetratör sandviç panele $t=0.017(E-03)$ sn'de 828 m/s hız ile çarpmakta, seramik bölgeyi tamamen geçtiğinde hızı yaklaşık olarak 751 m/s'ye düşmekte ve penetratör büyük oranda erozyona uğramış hale gelmektedir. Penetratör çekirdek

bölgeye girdiğinde hızı yaklaşık 615 m/s seviyesindedir. Yaklaşık $t=0.09(E-03)$ sn'de arka plakaya penetratör hem büyük oranda erozyona uğramış hem de dik yörüngesinden büyük ölçüde yataya kayacak şekilde sekme açısıyla yaklaşık $v=316$ m/s hızla çarpmaktadır. Penetratör yan dönerek arka paneli perfore etmiş ancak paneli tamamen terk edememiştir (Şekil 10). Penetratör ilk çarpmasından sonra kinetik enerjisi 2420 J'den yaklaşık 1628 J'e geriler. Yaklaşık olarak 792 J'lük enerjisini seramik plakadan çıkana kadar kaybeder aynı zamanda sert seramik bölgeden büyük deformasyona uğrayarak ayrılır. Penetratör ön çelik yüzeye nüfuz ettikten sonra $t=0.03E-03$ sn'de yaklaşık 1460 J'lük enerji ile çekirdek bölgesine girer. Flexible penetratör yaklaşık $t=0.10E-03$ sn'de 368 J kinetik enerji ile sandviç panelin arka yüzeyine bozulmuş şekliyle yaklaşık 80° 'lik açıyla çarpar. Erozyona uğramış uç kısmının da etkisiyle sapma açısının arka yüzeye etkileşim esnasında giderek artması sonucu yan bölgesiyle arka sac yüzeyi perfore etmekte ancak perforasyon neticesinde tamamen enerjisini tüketerek panel içerisinde kalmaktadır (Şekil 11). Bu analizle birlikte söz konusu konfigürasyona ait balistik limit hızı yaklaşık olarak $V_{bl}=828$ m/s olarak tespit edilmiştir.



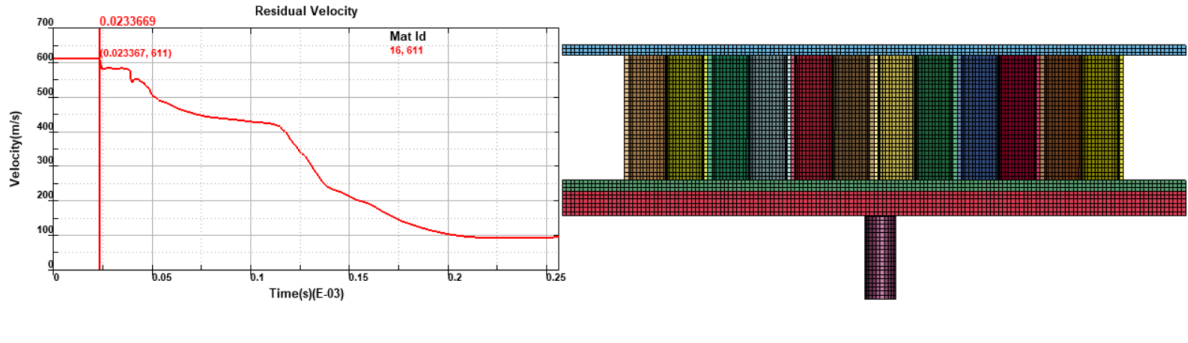
Şekil 10. Penetrator Hız/Zaman Grafiği/Arka yüzeye çarpma-durma (çekirdekler kaldırılarak görüntü alınmıştır) (Penetrator Velocity/Time Graphic / Rear surface impact-stop (image taken by removing the cores))



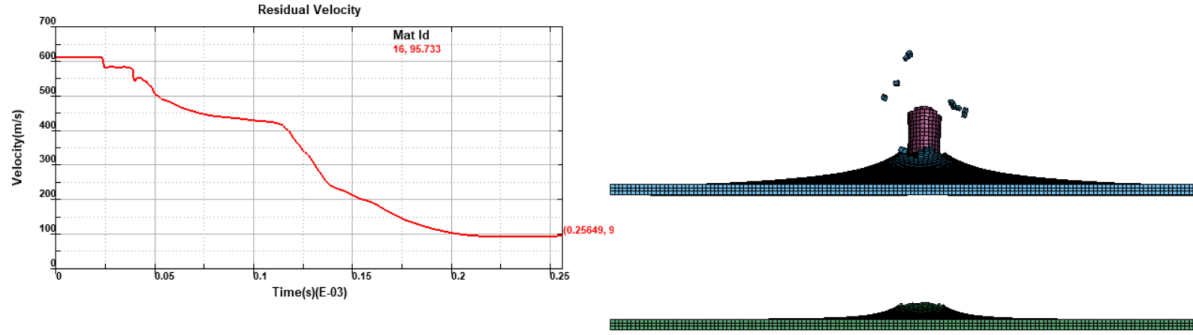
Şekil 11. Penetrator Enerji Grafiği- Arka yüzeye çarpma-durma (çekirdekler kaldırılarak görüntü alınmıştır) (Penetrator Energy Graph - Back surface impact-stop (image taken by removing the cores))

Şekil 12'den görülebileceği gibi, penetratör sandviç panele $t=0.02(E-03)$ sn'de 611 m/s hız ile çarpmakta, seramik bölgeyi tamamen geçtiğinde hızı yaklaşık olarak 549 m/s' ye düşmektedir, aynı zamanda penetratör büyük ölçüde erozyona uğramıştır. Penetratör çekirdek bölgeye girdiğinde hızı yaklaşık 503 m/s seviyesindedir. Yaklaşık $t=0.11(E-03)$ sn'de arka plakaya penetratör hem büyük oranda erozyona uğramış hem de dik

yörüngesinden büyük ölçüde yataya kayacak şekilde sekme açısıyla yaklaşık $v=417$ m/s hızla çarpmaktadır. Penetratör yan dönerek arka paneli perfore etmiş ve yaklaşık $v=90$ m/s hızla arka sac yüzeyi perfore ederek panelden ayrılmıştır (Şekil 13).



Şekil 12. Penetrator Hız/Zaman Grafiği (Penetrator Speed/Time Graph)

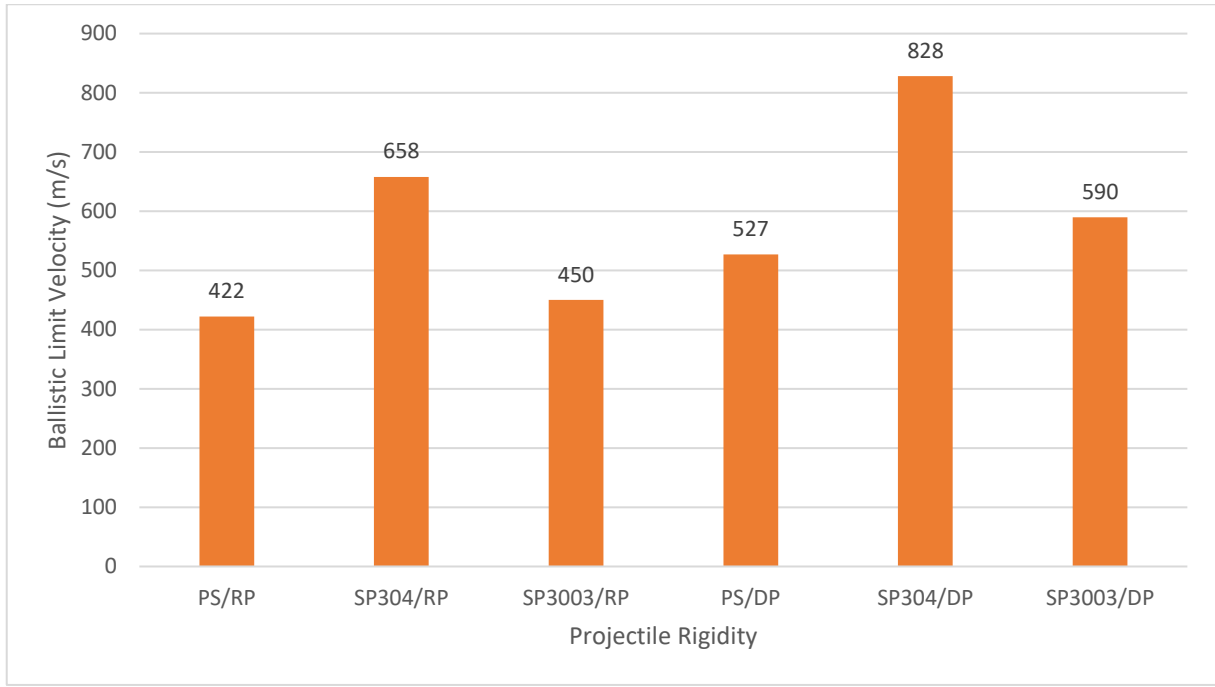


Şekil 13. Penetrator Hız/Zaman Grafiği (çekirdekler kaldırılarak görüntü alınmıştır) (Penetrator Speed/Time Graph (image taken by removing the cores))

Penetratör ilk çarpmasından sonra kinetik enerjisi 1312 J'den yaklaşık 1070 J'e geriler. Yaklaşık olarak 242 J'lük enerjisini seramik plakadan çıkana kadar kaybeder aynı zamanda sert seramik bölgeden büyük deformasyona uğrayarak ayrılır. Penetratör ön çelik yüzeye nüfuz ettikten sonra yaklaşık 600 J'lük enerji ile çekirdek bölgesine girer. Flexible penetratör yaklaşık 390 J kinetik enerji ile sandviç panelin arka yüzeyine bozulmuş şekliyle yaklaşık 75-80°'lik açıyla çarpar. Erozyona uğramış uç kısmının da etkisiyle sapma açısının arka yüzeye etkileşim esnasında giderek artması sonucu yan bölgesiyle arka sac yüzeyi perfore etmiştir. Yaklaşık 27 J enerji ile paneli terk etmiştir. Bu analizle birlikte söz konusu konfigürasyona ait

balistik limit hızı yaklaşık olarak $V_{bl}=590$ m/s olarak tespit edilmiştir.

Elde edilen simülasyon verileri toplu olarak Şekil 14'de verilmiştir. Esnek penetratörlerin kullanıldığı durumlarda sandviç panelin darbe direncinin önemli ölçüde arttığını ve penetrasyon derinliğinin azaldığını göstermektedir. Deformasyon sırasında oluşan enerji kaybı, panelin koruyucu performansını olumlu yönde etkiler ve enerji soğurma mekanizmalarını destekler. Bu bulgular, farklı delici tiplerinin balistik performansa etkisini analiz etmek için kritik öneme sahiptir.



RP: Rigid projectile, DP: Deformable projectile

PS: Corrugated core sandwich panel with 15 mm polyurea coating (Wang et al., 2023)[14]

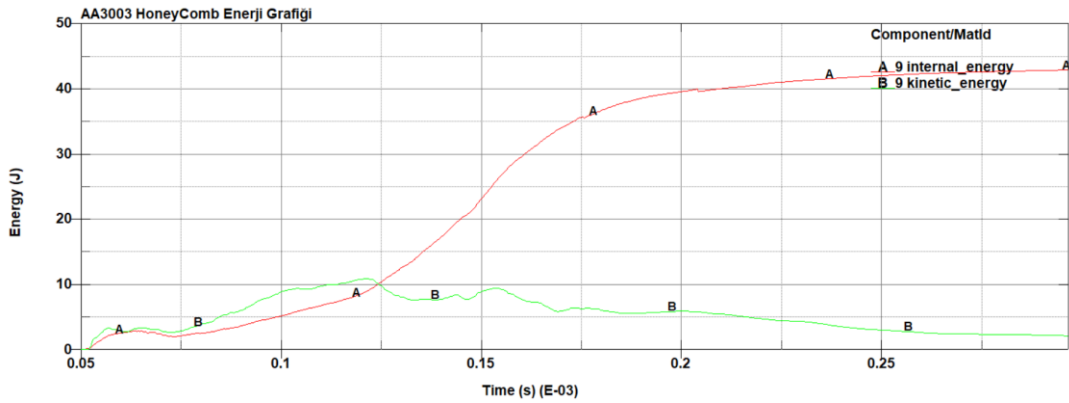
SP304: 304 paslanmaz çelik çekirdekli honeycomb sandviç panel,

SP3003: AA 3003 alüminyum alaşımlı çekirdekli honeycomb sandviç panel

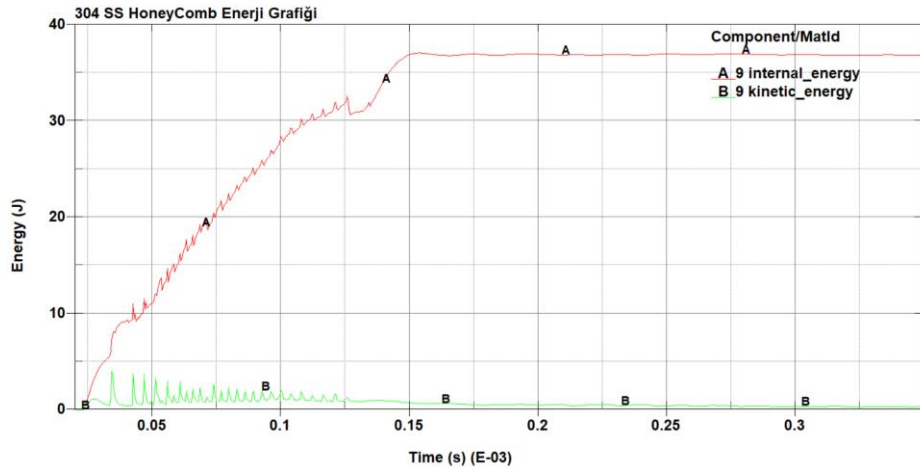
Şekil 14. Tüm konfigürasyonların balistik limit hızının karşılaştırılması (Comparison of ballistic limit speed of all configurations)

AA3003 Alüminyum Çekirdeğe Sahip Sandviç Panelde iç enerji (internal energy), zamanla sürekli artış göstermekte ve 0.25 ms'de 42 Joule'e ulaşmaktadır. Bu durum, AA3003 çekirdeğin çarpma sırasında enerji absorpsiyon kapasitesinin yüksek olduğunu ve bu enerjiyi plastik deformasyon yoluyla sönümlediğini göstermektedir. Kinetik enerji 11 Joule'den başlayıp hızla 3 Joule'e kadar düşmektedir. Bu da, çarpma sırasında kinetik enerjinin büyük kısmının malzeme tarafından absorbe edilerek şekil değiştirme enerjisine dönüştüğünü işaret eder.

Johnson-Cook malzeme modeline göre, AA3003 alüminyum alaşımı düşük akma gerilmesi ve daha düşük sertleşme katsayısına sahiptir. Bu, malzemenin daha kolay plastik deformasyona uğrayarak enerjiyi absorbe ettiğini açıklar. Akma gerilmesi ve sertleşme katsayısı nedeniyle malzeme, çarpma sırasında şekil değiştirme hızına duyarlıdır. Şekil 15, alüminyumun çarpma sırasında kinetik enerjiyi iç enerjiye etkin bir şekilde dönüştürdüğünü ve bu nedenle çarpma sonrası hasarın daha geniş bir alana yayıldığını göstermektedir.



Şekil 15. AA3003 Alüminyum çekirdeğin enerji-zaman grafiği (Energy-time graph of AA3003 Aluminum core)



Şekil 16. 304SS Alüminyum çekirdeğin enerji-zaman grafiği (Energy-time plot of 304SS Aluminum core)

Şekil 16.'ya göre 304 Paslanmaz Çelik Çekirdeğe Sahip Sandviç Panel iç enerji, 0.12 ms'de 31.3 Joule, 0.15 ms'de 36.8 Joule, ve 0.25 ms'de 37 Joule olarak sabitlenmektedir. Bu, paslanmaz çelik çekirdeğin enerji absorpsiyon kapasitesinin daha düşük olduğunu ancak deformasyona karşı daha dirençli olduğunu gösterir. Kinetik enerji, 4 Joule ile 0.9 Joule arasında dalgalanmaktadır. Bu durum, paslanmaz çeliğin enerjisi daha yavaş absorbe ettiğini ve daha yüksek elastik geri tepme (rebound) davranışı gösterdiğini ifade eder.

Johnson-Cook malzeme modeline göre, 304 paslanmaz çelik daha yüksek akma gerilmesine ve sertleşme katsayısına sahiptir. Bu, malzemenin çarpma sırasında daha fazla direndiğini ve plastik deformasyona daha zor geçtiğini açıklar. Sertleşme etkisi nedeniyle malzeme, çarpma sırasında kinetik enerjisi daha az iç enerjiye dönüştürmektedir. Bu, malzemenin yüksek dayanımını ve düşük deformasyon kabiliyetini ortaya koyar. Şekil değiştirme hızına duyarlılık çeliğin davranışında önemli bir rol oynar; bu durum, kinetik enerjinin dalgalanmasıyla uyumludur.

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada, Alümina (Al_2O_3) seramik kaplamalı, 304 paslanmaz çelik balpeteği çekirdekli ve alüminyum alaşım (AA 3003) balpeteği çekirdekli sandviç panellerin, rijit ve flexible penetratör darbesi altındaki balistik performansları incelenmiştir. Yüksek hızlı penetrasyon simülasyonlarından elde edilen veriler, her iki konfigürasyonun enerji emme kapasitesi, darbe dayanımı ve penetrasyon davranışları açısından önemli farklar gösterdiğini ortaya koymaktadır. Penetratörlerin esnek yapısı nedeniyle yaşanan

deformasyon, enerji kayıpları ve çarpma sonrası davranışlar detaylı bir şekilde değerlendirilmiştir.

Rijit Penetratör Darbeleri için 304 paslanmaz Çelik Çekirdekli Panelin Performansı değerlendirildiğinde, penetratörün seramik tabakaya çarpması sonrası, kinetik enerjisi 1532 J'den 1175 J'e düşerek yaklaşık 357 J'lik bir enerji kaybı yaşamıştır. Bu enerji kaybı, seramiğin yüksek sertlik ve kırılabilirlik özellikleri sayesinde penetratörün hızını ve etkinliğini azaltmıştır. Penetratör, ön çelik yüzeyi aştıktan sonra çekirdek bölgeye 781 J enerjiyle giriş yapmış ve $t=0.12E-03$ sn'de arka yüzeye 163 J enerji ile çarpmıştır. Panelin arka yüzeyinde taş yapraklanma meydana gelmiş, ancak penetratör enerjisini tamamen kaybederek panel içinde kalmıştır. Bu yapı için balistik limit hızı yaklaşık 658 m/s olarak tespit edilmiştir. Yüksek mukavemetli paslanmaz çelik çekirdek, darbe direncini artırarak panelin genel balistik performansını güçlendirmiştir.

Rijit Penetratör Darbeleri için alüminyum alaşım AA 3003 balpeteği çekirdekli panelin performansı değerlendirildiğinde penetratör, ilk çarpma sonrası enerjisini 640 J'den 480 J'e düşürmüş ve seramik tabakadan çıkana kadar 160 J'lik bir enerji kaybı yaşamıştır. Çekirdek bölgesine girişte enerji seviyesi 306 J'ye düşmüş ve arka yüzeye 142 J ile çarpmıştır. Ancak bu durumda tam perforasyon gerçekleşmemiş, yalnızca panelin arka yüzeyinde bir şişkinlik oluşmuştur.

AA 3003 Alüminyum çekirdekli yapı için balistik limit hızı yaklaşık 450 m/s olarak belirlenmiştir. Alüminyum çekirdeğin hafif ve enerji emme kapasitesinin yüksek olması, darbe sonrası oluşan deformasyonu artırmış, ancak penetrasyon derinliğini sınırlamıştır.

Esnek Penetratör Darbeleri kapsamında 304 paslanmaz Çelik Çekirdekli Panelin Performansı değerlendirildiğinde penetratör, panele 828 m/s hızla çarptıktan sonra seramik tabakayı geçtiğinde hızı 751 m/s'ye düşmüş ve yaklaşık 792 J'lik bir enerji kaybı yaşamıştır. Çekirdek bölgesine girişte penetratör hızı 615 m/s seviyesine gerilemiş, bu sırada büyük ölçüde erozyona uğramıştır. Yaklaşık 316 m/s hızla ve 80°'lik bir açıyla arka plakaya çarparak sekmiş, fakat tamamen perforasyonu gerçekleştirilmeden panel içinde kalmıştır. Bu yapı için balistik limit hızı 828 m/s olarak tespit edilmiştir. Paslanmaz çelik çekirdeğin yüksek mukavemeti, penetratörün hızını yavaşlatmış ve perforasyonu sınırlandırmıştır.

Esnek Penetratör Darbeleri kapsamında AA 3003 Alüminyum Petek Çekirdekli Panelin Performansı değerlendirildiğinde esnek penetratör, panele 611 m/s hızla çarptıktan sonra seramik bölgeyi geçerken hızı 549 m/s'ye düşmüş ve yaklaşık 242 J enerji kaybı yaşamıştır. Çekirdek bölgesine 503 m/s hızla giriş yapan penetratör, erozyon nedeniyle sapma açısı kazanmış ve yaklaşık 75-80° açıyla arka plakayı perfore etmiştir. Paneli terk ederken penetratör hızı 27 m/s'ye kadar düşmüştür. Bu yapı için balistik limit hızı 590 m/s olarak ölçülmüştür. Alüminyum petek çekirdek, penetratörün enerjisini daha fazla dağıtarak deformasyonu artırmış, ancak perforasyonu tamamen engelleyememiştir.

Sonuç olarak, esnek penetratörlerin erozyon ve sapma eğilimleri, enerji dağılımını doğrudan etkileyerek arka plakada farklı deformasyonlar oluşturmuştur. 304 paslanmaz çelik çekirdek, penetratörü daha etkin bir şekilde yavaşlatmış, ancak tam perforasyonu önleyememiştir. Alüminyum çekirdek ise hafif yapısıyla enerji yayılımını artırmış, penetratör paneli düşük hızla terk etmiştir. Paslanmaz çelik çekirdekli panelin daha yüksek balistik limit hızı, sert çekirdeklerin darbe dayanımını artırma potansiyelini göstermektedir. Buna karşılık, Alüminyum çekirdekli panel hafifliği ile enerji emme kapasitesini yükseltmiş, ancak tam perforasyonu engelleme konusunda yetersiz kalmıştır. Esnek penetratörler, sert seramik yüzeyle etkileşim sonrası büyük ölçüde erozyona uğrayarak sapma açısını artırmış ve bu durum, arka plakanın perforasyonunda farklı mekanizmalar doğurmuştur. Paslanmaz çelik çekirdekli panel, daha yüksek mukavemet özellikleri sayesinde darbe enerjisini

daha iyi absorbe ederek penetratörün paneli delme yeteneğini sınırlandırmıştır. Buna karşılık, Alüminyum alaşımlı çekirdek hafifliği ile öne çıkmış, ancak deformasyon etkisine daha duyarlı olduğu için penetrasyon derinliğini tam olarak engelleyememiştir.

Rijit penetratör etkisinde paslanmaz çelik çekirdekli panelin balistik limit hızı (658 m/s), alüminyum alaşımlı çekirdekli panele (450 m/s) göre belirgin şekilde daha yüksektir. Bu sonuç, paslanmaz çelik çekirdeğin daha yüksek darbe dayanımı sunduğunu göstermektedir.

Bu bulgular, sandviç panellerin çekirdek malzemesinin balistik performans üzerinde kritik bir etkiye sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Hafiflik ve maliyet açısından avantaj sunan alüminyum alaşım (AA 3003) çekirdek, orta seviyede balistik koruma sağlarken, 304 paslanmaz çelik çekirdek daha üstün balistik direnç sunmuştur. Alümina seramik kaplamanın delinmeye karşı sağladığı katkı, her iki konfigürasyonda da belirgin olmuş, ancak çarpma sonrası enerji yönetimi, çekirdek malzemesine bağlı olarak değişmiştir.

Esnek penetratörlerin çarpma sonrası deformasyonu ve erozyonu, sandviç panellerin balistik performansında kritik bir rol oynamaktadır. 304 paslanmaz çelik çekirdekli paneller, daha yüksek balistik direnç sağlarken, Alüminyum çekirdekli paneller hafiflik avantajı sunarak enerji emme kapasitesini artırmıştır.

AA3003 Alüminyum Alaşım ve 304 paslanmaz çelik çekirdeklere ilişkin bir karşılaştırma yapacak olursak;

a. Enerji absorpsiyonu (Energy absorption):

- AA3003 alüminyum çekirdek daha fazla enerji absorbe etmektedir. Bu, malzemenin daha düşük akma gerilmesine ve yüksek deformasyon kapasitesine sahip olduğunu gösterir.

b. Kinetik enerji davranışı (Kinetic energy behavior):

- 304 paslanmaz çelik çekirdek ise enerjiyi daha az absorbe eder, çünkü yüksek dayanımı nedeniyle plastik deformasyona daha geç ulaşır.

- AA3003 kinetik enerjiyi hızlı bir şekilde iç enerjiye dönüştürürken, 304 paslanmaz çelik kinetik enerjiyi daha az sönmekte ve elastik geri tepme eğilimi göstermektedir.
- Alüminyumun daha düşük akma gerilmesi, sertleşme katsayısı ve şekil değiştirme hızına duyarlılık değerleri, şekil değiştirme hızı ve sıcaklığa daha duyarlı bir enerji absorpsiyon kapasitesine yol açar.
- Paslanmaz çeliğin daha yüksek akma gerilmesi ve sertleşme katsayısı değerleri, daha yüksek dayanım ve daha düşük deformasyon kapasitesini temsil eder.

AA3003 alüminyum çekirdeğe sahip sandviç paneller, çarpma sırasında enerjiyi daha etkili bir şekilde absorbe ederek darbe dayanımı açısından daha avantajlıdır. Öte yandan, 304 paslanmaz çelik çekirdek, deformasyona daha dirençli bir yapı sergileyerek yüksek dayanım gerektiren uygulamalar için uygundur. Johnson-Cook modeli, bu farklılıkları malzeme parametreleri üzerinden doğru bir şekilde açıklayabilir.

Son olarak, yapılan simülasyon çalışmasında önerilen her iki konfigürasyon, daha önce aynı penetratör tipiyle yüksek hızlı çarpma etkisinin incelendiği çalışmada sunulan oluklu sandviç panel tasarımına [14] kıyasla daha üstün bir performans sergilemiştir. Bu bulgular, gelecekte yapılacak deneysel çalışmalarla doğrulanabilir ve önerilen tasarımların etkisi, gerçek testlerle desteklenerek daha sağlam bir şekilde ortaya konulabilir.

Elde edilen simülasyon sonuçları ileri zırh tasarımlarında çekirdek ve kaplama malzemelerinin seçimine yönelik önemli ipuçları sunmaktadır. Gelecekteki tasarımlarda bu tür konfigürasyonların optimizasyonu için daha fazla sayısal ve deneysel çalışma yapılmasının yararlı olacağı 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)

İsmail TÜRKDÖNMEZ: Bu çalışma yayınlanmamış Doktora tezinin bir bölümünü oluşturmakta olup, ilk yazar tez sahibidir. Deneysel çalışmanın planlanması, veri analizi ve deneysel çalışmanın yürütülmesinden sorumludur.

This study constitutes a part of an unpublished PhD dissertation, with the first author being the dissertation's author. The corresponding author is responsible for the planning of the experimental study, data analysis, and execution of the experiments.

Yusuf Tansel İÇ: Tez çalışması danışmanı olup, deney sonuçlarının analizi ve ilgili makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

He was the thesis advisor, analyzed the experimental results, and wrote the related manuscript.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST) Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

There is no conflict of interest in this study.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] X. Li, G. Li, C.H. Wang, M. You, "Minimum-weight sandwich structure optimum design subjected to torsional loading", *Applied Composite Materials*, 19 (2): 117–126, 2010
- [2] A.G. Evans, J.W. Hutchinson, N.A. Fleck, M.F. Ashby, "The topological design of multifunctional cellular metals", *Progress in Materials Science* 46, 309–327 : H.N.G., 2001
- [3] F.W. Zok, S.A. Waltner, Z. Wei, H.J. Rathbun, R.M. McMeeking and A.G. Evans, "A protocol for characterizing the structural performance of metallic sandwich panels: application to pyramidal truss cores" *Int. Journal of Solid and Structures*, 41 (22–23) , pp. 6249-6271, 2004
- [4] V. Madhu, K. Ramanjaneyulu, T. Bhat, N. Gupta, "An experimental study of penetration resistance of ceramic armour subjected to projectile impact", *International Journal of Impact Engineering*, 32, 337-350, 2005
- [5] M. Vural, M. Erim, C. Bindal, S. Zeytin, A. Ucisik, "Traumatological and Ballistic Aspects of Alumina Ceramics", *Key Engineering Materials*, 240-242, 623 – 628, 2002

- [6] A.U. Haq, S.K.R. Narala, , “Dynamic response of honeycomb cored sandwich panels under high velocity impact: A numerical study”, *Materials Today: Proceedings*, Article in Press
- [7] Y.Yao, J. Waters, A. Shneidman, J. Cui, X. Wang, N. Mandsberg, S. Li, A. Balazs, J. Aizenberg, “Multiresponsive polymeric microstructures with encoded predetermined and self-regulated deformability”, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 115, 12950 – 12955, 2018
- [8] M. F. Ashby, A. G. Evans, N. A. Fleck, L. J. Gibson, J. W. Hutchinson, H. Wadley, “*Metal Foams: A Design Guide*”, Butterworth Heinemann, London, 2000
- [9] G. Sun, D. Chen, H. Wang, P. Hazell, Q. Li, “High-velocity impact behaviour of aluminium honeycomb sandwich panels with different structural configurations”, *International Journal of Impact Engineering*, 2018
- [10] N. Ha, G. Lu, X. Xiang, “Energy absorption of a bio-inspired honeycomb sandwich panel”, *Journal of Materials Science*, 54, 6286-6300, 2019
- [11] H. Tan, Z. He, E. Li, X. Tan, A. Cheng, Q. Li, “Energy absorption characteristics of three-layered sandwich panels with graded re-entrant hierarchical honeycombs cores”, *Aerospace Science and Technology*, 2020
- [12] N.A. Fleck, , V.S. Deshpande, “The resistance of clamped sandwich beams to shock loading”, *Journal of Applied Mechanics* 71(3), 386–401, 2004
- [13] Livermore Software Technology Corporation (Lstc), *Ls-Dyna® Keyword User's Manual Volume II Material Models, LS-DYNA R13*, Michigan, 2014
- [14] X. Wang, Z. Yue, X. Xu, Z. Zhao, H. Ji, M. Zhu, P. Wan, Q. Zhang, , T.J. Lu , "Ballistic impact response of elastomer-retrofitted corrugated core sandwich panels", *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 175, 104545, 2023
- [15] R. Scazzosi et al., “Experimental and numerical evaluation of the perforation resistance of multi-layered alumina/aramid fiber ballistic shield impacted by an armor piercing projectile”, *Composites Part B: Engineering*, Volume 230, 109488, ISSN 1359-8368, 2022
- [16] H. A. Abou-Elela et al., “Numerical Investigation of Projectile Penetration into Ceramic/Steel Targets”, *Conference Paper in the International Conference on Applied Mechanics and Mechanical Engineering*, May 2010
- [17] M. M. Shokrieh,, G. H. Javadpour, "Penetration analysis of a projectile in ceramic composite armour," *Composite Structures*, Vol. 82 No.2, pp. 269-276, 2008
- [18] F. Zhu, G. Lu, D. Ruan, Z. Wang, "Plastic deformation, failure and energy absorption of sandwich structures with metallic cellular cores", *International Journal of Protective Structures*, 1 (4): 507–541, 2010
- [19] T. Bitzer, “Introduction: History”, in *Honeycomb Technology: Materials, Design, Manufacturing, Applications and Testing*, 1st ed. Springer-Science+Business Media, pp. 1–3, 1997
- [20] H.J. Rathbun, Z. Wei, M.Y. He, F.W. Zok, A.G. Evans, D.J. Sypeck, H.N.G. Wadley, “Measurements and simulations of the performance of metallic sandwich structures with a near optimal tetrahedral truss core”, *Journal of Applied Mechanics*, 2004
- [21] G. Imbalzano, P. Tran, T.D. Ngo, P.V.S. Lee, "Three-dimensional modelling of auxetic sandwich panels for localised impact resistance", *Journal of Sandwich Structures and Materials*, 19 (3): 291–316, 2017
- [22] M. Khan, M. Iqbal, V. Bratov, N. Morozov, N. Gupta, “An investigation of the ballistic performance of independent ceramic target”, *Thin-walled Structures*, 154, 106784, 2020
- [23] J. Liu, G. Wang, Z. Lei, “Comparisons on the Local Impact Response of Sandwich Panels with In-Plane and Out-Of-Plane Honeycomb Cores. Sustainability”, 2023
- [24] A. Ferreira, B. Buitrago, C. Santiuste, S. Sanchez-Saez, E. Barbero, C. Navarro, “Modelling of composite sandwich structures with honeycomb core subjected to high-velocity impact”, *Composite Structures*, 92, 2090-2096, 2010
- [25] Y. Yasui, “Dynamic axial crushing of multi-layer honeycomb panels and impact tensile behavior of the component members”, *International Journal of Impact Engineering*, 24, 659-671, 2000

- [26] F. Roudbeneh, G. Liaghat, H. Sabouri, H. Hadavinia, "High-velocity impact loading in honeycomb sandwich panels reinforced with polymer foam: a numerical approach study" *Iranian Polymer Journal*, 29, 707-721, 2020
- [27] M. Mahmoudabadi, M. Sadighi, "Experimental investigation on the energy absorption characteristics of honeycomb sandwich panels under quasi-static punch loading", *Aerospace Science and Technology*, 2019
- [28] L. Vargas-Gonzalez, R.F. Speyer, J. Campbell, "Flexural strength, fracture toughness, and hardness of silicon carbide and boron carbide armour ceramics", *International Journal of Applied Ceramic Technology*, Vol. 7 No. 5, pp. 643-651, 2010
- [29] D.L Orphal, R.R. Franzen, A.C. Charters, T.L. Menna, A.J. Piekutowski, "Penetration of confined boron carbide targets by tungsten long rods at impact velocities from 1.5 to 5.0 km/s", *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 19 No.1, pp. 15-29, 1997
- [30] R. Scazzosi, M.Giglio, A. Manes, "FE coupled to SPH numerical model for the simulation of high-velocity impact on ceramic based ballistic shields", *Ceramics International*, 46, 23760-23772, 2020
- [31] F. Grace, N. Rupert, "Analysis of long rods impacting ceramic targets at high velocity", *International Journal of Impact Engineering*, 20, 281-292, 1997
- [32] T. Belytschko, W. K. Liu, B. Moran, K. Elkhodary, "Nonlinear finite elements for continua and structures", John wiley & sons, 2nd edition 2014



Akarsu Ortalama Akımlarının Çeşitli Makine Öğrenme Algoritmaları Kullanılarak Tahmini: Köprüçay Örneği

Yunus Ziya KAYA^{1*}

¹Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Merkez/Osmaniye, 80100

Article Info

Research article
Received: 24/09/2024
Revision: 23/11/2024
Accepted: 24/12/2024

Keywords

Ortalama Akımlar
MLP
DVM
Random Forest
Tahmin

Makale Bilgisi

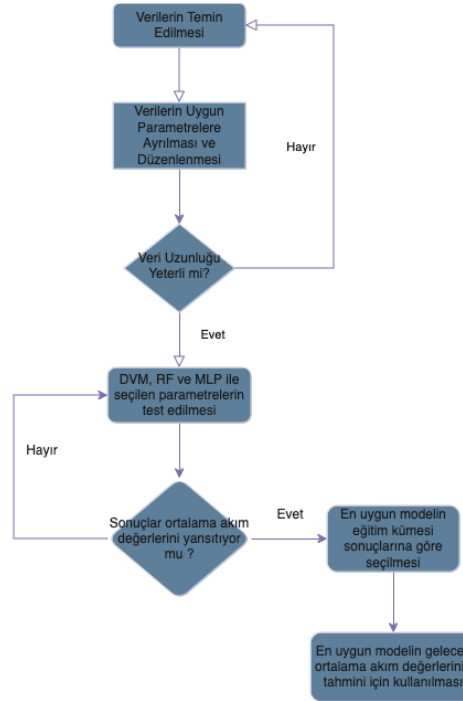
Araştırma makalesi
Başvuru: 24/09/2024
Düzeltilme: 23/11/2024
Kabul: 24/12/2024

Anahtar Kelimeler

Average Flows
MLP
SVM
RF
Prediction

Grafik Özet (Graphical/Tabular Abstract)

Köprüçay istasyonuna ait ortalama akım değerleri Multi-Layer Perceptron (MLP), Destek Vektör Makinaları (DVM) ve Random Forest (RF) makine öğrenme algoritmaları ile tahmin edilmiştir. Algoritmaların performansları karşılaştırılarak en uygun yöntem belirlenmiştir. / The average flow values of the Köprüçay station were estimated with Multi-Layer Perceptron (MLP), Support Vector Machines (SVM) and Random Forest (RF) machine learning algorithms. The performances of the algorithms were compared..



Şekil A: Köprüçay Ortalama Akımlarının Modelleme Aşamaları Flows/ Figure A: Modeling Processes of Köprüçay Average Stream Flow

Önemli noktalar (Highlights)

- Akarsu ortalama akımları üç popüler makine öğrenme algoritması kullanılarak tahmin edilmiştir. / River average flows were predicted by using three popular machine learning algorithms.
- Random Forest algoritması en başarılı algoritma olmuştur. / RF algorithm was detected as the best algorithm.
- Gelecek değerler RF algoritması kullanılarak tahmin edilmiştir. / Future values were predicted by using RF.

Amaç (Aim): Köprüçay ortalama akımlarını tahmin etmek. / Prediction of average stream flows.

Özgünlük (Originality): Verilen algoritmalar bu akarsu için ilk defa test edilmiştir. / The given algorithms were tested for the first time for this stream according to the knowledge of the author.

Bulgular (Results): Çalışmada RF en iyi sonucu veren algoritma olurken DVM en yetersiz sonucu vermiştir. / In this study, the RF algorithm was found to be the best, while the SVM was found to be the most insufficient.

Sonuç (Conclusion): Köprüçay ortalama akım tahmininde RF algoritmasının kullanılabilirliği gösterilmiştir. / The usability of the RF algorithm in the Köprüçay average stream prediction has been showed.



Akarsu Ortalama Akımlarının Çeşitli Makine Öğrenme Algoritmaları Kullanılarak Tahmini: Köprüçay Örneği

Yunus Ziya KAYA ^{1*}

¹Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Merkez/Osmaniye, 80100

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 24/09/2024
Düzeltilme: 23/11/2024
Kabul: 24/12/2024

Anahtar Kelimeler

Ortalama Akımlar
MLP
DVM
Random Forest
Tahmin

Öz

Akarsu ortalama akımları havzanın su kaynaklarının yeterliliği hakkında önemli ipuçları barındırmaktadır. İklim değişikliği ile birlikte yağış ve sıcaklık gibi akarsu akımlarını doğrudan ilgilendiren parametrelerde bölgesel değişimler yaşanmaktadır. Yaşanan bu değişimler ortalama akımlarda da bölgesel farklılıklar görülmesine neden olmaktadır. Bu çalışmada Elektrik İdaresinin kayıtlarını paylaştığı Antalya ili Serik İlçesi Beşkonak Bucağında yer alan Köprüçay istasyonuna ait ortalama akımlar incelenmiştir. İstasyona ait 1957-2011 yılları arasındaki ortalama akımlar Multi-Layer Perceptron (MLP), Destek Vektör Makinaları (DVM) ve Random Forest (RF) makine öğrenme algoritmaları ile modellenmiştir. Çalışma iki kısımdan oluşmaktadır. İlk kısımda 1957-2011 yılları arasındaki veriler (55 yıllık kayıtlar) hem eğitim hem test kümesi olarak kullanılmış en uygun algoritmaya bu şekilde karar verilmiştir. İkinci kısımda algoritma seçiminden sonra kayıtları mevcut olmayan 2012-2022 yılları arasındaki ortalama akımlar tahmin edilmiştir. Modellemelerde ülkemize ait yıllık ortalama maksimum, minimum, ortalama sıcaklık ve ortalama yağış verileri girdi olarak kullanılmıştır. Analizler neticesinde en yüksek determinasyon katsayısı (R²) değeri iki numaralı Random Forest modeli için 0.947 en düşük R² değeri ise 0.222 olarak bir numaralı DVM modeli için hesaplanmıştır. En düşük hata modelleri iki numaralı RF modeli için hesaplanmıştır. Buna göre RF2 modelinin Ortalama Mutlak Hata (OMH) değeri 4.31 Göreli Mutlak Hata (GMH) değeri ise %30.31 olarak hesaplanmıştır. Sonuç olarak Köprüçay özelinde ortalama akım tahmininde en uygun algoritmanın RF olacağı görülmüştür.

Estimation of Average Stream Flows Using Various Machine Learning Algorithms: A Case Study of Köprüçay

Article Info

Research article
Received: 24/09/2024
Revision: 23/11/2024
Accepted: 24/12/2024

Keywords

Average Flows
MLP
SVM
RF
Prediction

Abstract

The average stream flows contain important clues about the adequacy of the basin's water resources. Along with climate change, there are regional changes in parameters that directly concern stream flows, such as precipitation and temperature. These changes also cause regional differences in average flows. In this study, the average flows of the Köprüçay station located in the Beşkonak district of the Serik district of Antalya province, whose records are shared by the Electricity Administration, were examined. The average flow of the station between the years 1957 and 2011 was modeled using Multi-Layer Perceptron (MLP), Support Vector Machines (SVM), and Random Forest (RF) machine learning algorithms. The study consists of two parts. In the first part, the data between the years 1957-2011 were used as both training and test sets, and the most appropriate algorithm was decided in this way. In the second part, after the algorithm selection, the average flows between the years 2012-2022, for which records were not available, were estimated. In the models, the annual average maximum, minimum, average temperature and average precipitation data of Türkiye were used as input. As an output of the analysis, the highest coefficient of determination (R²) value was calculated as 0.947 for the Random Forest model number two, and the lowest R² value was calculated as 0.222 for the SVM model number one. The lowest error models were calculated for RF model number two. Accordingly, the Mean Absolute Error (MAE) value of the RF2 model was calculated as 4.31, and the Relative Absolute Error (RMA) value was calculated as 30.31%. Briefly, it was seen that the most suitable algorithm for estimating the average flow in Köprüçay would be RF.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Akarsuların ortalama akımlarının değişimi iklim değişikliğine bağlı yağış ve sıcaklık parametrelerindeki değişimler ile doğrudan ilişkilidir. Ortalama akımlardaki ani artışlar akarsuyun bulunduğu havza için taşkın tehlikesi oluşturabilecekken ani düşüşler de bölgede kuraklık tehlikesine işaret edebilmektedir [1]. Akarsu ortalama akımlarının düzenli olarak ölçümü bölgenin su kaynaklarının planlanması, arz ve talep dengesinin kurulabilmesi için önemlidir. Ancak akarsu ölçümlerinin karmaşıklığı ve bazı bölgelerde yaşanan dönemsel aksaklıklar nedeniyle ülkemizdeki her akarsu için kesintisiz veri temini mümkün olamayabilmektedir. Bu durumda elde edilen veriler ile makine öğrenme (ML) teknikleri kullanılarak farklı zaman ölçekleri için debi veya ortalama akım tahminlerinin yapılabilirliği araştırma konusu olmuştur. Kızılırmak özelinde yapılan bir çalışmada Uyarlamalı Ağ Tabanlı Bulanık Mantık Çıkarım Sistemi (ANFIS) kullanılarak iki akım gözlem istasyonu için günlük ortalama debi tahmini mekânsal yağış verileri ile yapılmıştır [2]. Sözü edilen çalışmada ANFIS bilgisayar tabanlı tahmin yaklaşımı günlük debi tahmininde başarılı bulunmuştur [2]. Başka bir çalışmada Karadeniz de bulunan Aksu deresi için yağış ve buhar basıncı parametreleri kullanılarak gelecek akım tahmininde bulunulmuştur [3]. Çalışmada Yapay Sinir Ağları (YSA) ile Klasik Regresyon yaklaşımları tercih edilmiş model çıktıları farklı istatistikler hata hesaplamaları yapılarak karşılaştırılmış, sonuç olarak modellerde gecikmeli veri seti kullanımının modelleme performansını arttırdığı vurgulanmıştır [3]. Mersin Lamas Nehri için yapılan bir ML performansı araştırmasında Destek Vektör Makinaları (DVM), YSA ve Derin Öğrenme yaklaşımları kullanılmıştır ve istatistiksel karşılaştırmalar sonucunda Lamas Nehri özelinde en uygun sonucu veren ML yaklaşımının Derin Öğrenme olduğu belirtilmiştir [4]. Aksu deresi gelecek akım tahmini için yapılan bir diğer çalışmada ise YSA, ANFIS, DVM ve farklı regresyon yöntemleri ile geliştirilen yağış akış modellerinin performansları kıyaslanmıştır, sonuç olarak Çok Değişkenli Uyarlanabilir Regresyon Eğrileri yaklaşımının diğer ML algoritmalarından daha iyi performans verdiği belirtilmiştir [5]. Birleşik Devletlerde bulunan dört farklı nehrin akım verilerinin tahmininde yağış, maksimum ve minimum hava sıcaklığı parametreleri girdi olarak seçilmiş ve DVM, YSA ve Extreme Learning Machine (ELM) algoritmalarının akım tahminlerindeki başarısı araştırılmıştır [6]. Hindistan da bulunan Narmada Nehri akım değerlerinin tahmini için yapılan bir diğer

araştırmada ise Light Gradient Boosting Machine, Random Forest, XGBoost ve CatBoost yaklaşımları kullanılmıştır [7]. Çalışmada model performansları istatistiksel hata hesaplarına dayanarak yapılmış, araştırılan algoritmalar içerisinde en uygun performansı veren algoritmanın Random Forest algoritması olduğu vurgulanmıştır [7]. İlgili literatürde farklı zaman ölçeğinde akım değerleri için de çalışmalar mevcuttur. Benzer makine öğrenme algoritmaları kullanılarak yapılan bir çalışmada Pakistan da bulunan Hunza Nehri aylık akım değerleri incelenmiştir [8]. Des Moines ve Raccoon Nehirleri için yapılan analizlerde ise Random Subspace, M5 Karar Ağacı (M5P), Random Forest ve Bagging yaklaşımları kullanılmış ve günlük debi değerleri araştırılmıştır [9]. Bu çalışmada en uygun sonuçları veren algoritmanın M5P olduğu sonucuna varılmıştır [9]. Nehir akımlarının çevresel akış, hidroelektrik üretim, su potansiyeli gibi birçok bakımdan önem taşıdığını belirten bir başka çalışmada [31], Türkiye’den iki Irak’tan iki farklı akım gözlem istasyonuna ait veriler çeşitli regresyon yaklaşımları ile tahmin edilmiştir. Çalışmada least square support vector regression (LSSVR), multivariate adaptive regression splines (MARS) and M5 Model Tree (M5-Tree) ve doğrusal regresyon yaklaşımları iki aşamalı olarak test edilmiş sonuç itibarıyla genellikle LSSVR yönteminin diğer yöntemlere kıyasla tahmin başarısının daha üstün olduğu vurgulanmıştır. Yakın zamanda yapılan bir çalışmada ise nehri akımlarının tahmininde hibrit model seçiminin önemine vurgu yapılmıştır [32]. Çalışmada GA-CatBoost yaklaşımını kombine eden bir model önerilmiş, akım tahmininde önerilen modelin performansı CatBoost, Long-Short Term Memory (LSTM) ve doğrusal regresyon yaklaşımları ile karşılaştırılmıştır. Bahsedilen çalışmada elde edilen sonuçlara göre önerilen yöntemin doğrusal olmayan nehir akımı değerlerini iyi derecede yakaladığı anlatılmıştır.

Yukarıda pek çok farklı makine öğrenme algoritmasının akarsu akımlarının tahminindeki kullanımı özetlenmiştir. Bu popüler algoritmaların hidrolojideki kullanımı ortalama akımlar ile sınırlı değildir. Hidrolojik tahmin analizlerinde bu algoritmalar evapotranspirasyon tahmini [10-12], sediment taşınımı [13] gibi pek çok spesifik olayda kullanılmıştır. Bunun yanı sıra söz edilen algoritmalar inşaat mühendisliğinin farklı alanlarında da özel kullanımlara sahiptir [14-17].

Bu çalışmada hem hidrolojik tahminlerde hem de inşaat mühendisliğinin farklı alanlarında etkinliği test edilmiş ve kanıtlanmış üç farklı makine öğrenme algoritması seçilmiştir. Bu yaklaşımlar

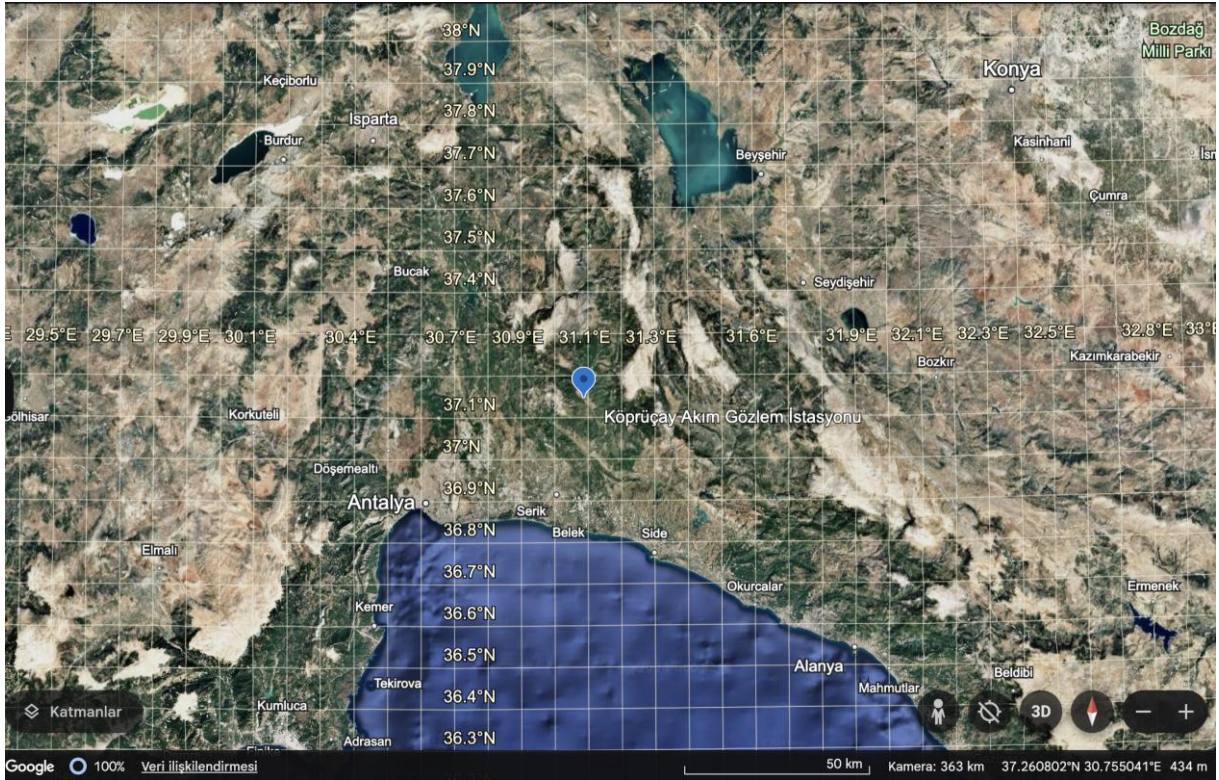
Multi-Layer Perceptron (MLP), Destek Vektör Makinaları (DVM) ve Random Forest (RF) algoritmalarıdır. Antalya il sınırları içerisinde yer alan Köprüçay akım gözlem istasyonuna ait verilerin çalışıldığı bu araştırma iki kısımdan oluşmaktadır. Çalışmanın ilk kısmında elde edilen veriler ile en uygun algoritmanın bulunması amaçlanmıştır. İkinci kısımda ise en uygun algoritma kullanılarak ortalama akım verisi mevcut olmayan (veya açık erişim olarak henüz paylaşılmayan) 2012-2022 yıllarına ait ortalama akım tahminleri yapılmıştır. Çalışmada ülkemize ait yağış, ortalama, minimum ve maksimum hava sıcaklığı parametreleri modellerde girdi olarak kullanılmıştır. Ayrıca model performanslarının iyileştirilmesi için her bir algoritma ile oluşturulan model için ötelenmiş zaman serilerinin kullanıldığı durumda incelenmiştir. Model sonuçları ortalama mutlak hata (OMH), ortalama karesel hata kökü (OKHK), göreceli mutlak hata (GMH) ve göreceli karesel hata kökü (GKHK) istatistikleri hesaplanarak karşılaştırılmıştır.

2. YÖNTEM (METHODOLOGY)

Bu bölüm dört alt başlıktan oluşmaktadır. Çalışma bölgesi, veri seti ve kullanılan algoritmalara ait açıklamalar alt başlıklar halinde verilmiştir.

2.1. Çalışma Bölgesi ve Veri Seti (Study Area and the Data Set)

Bu çalışmada kullanılan ortalama akım verileri Devlet Su İşleri web sitesinden indirilmiştir [18]. Veriler Akım Gözlem Yıllıklarından alınmıştır. Ortalama akım verilerinin Elektrik İşleri Etüt İdaresi (EİE) tarafından tutulduğu bilinmektedir. Akım verileri 2011 yılında son bulmaktadır. Yağış ve Sıcaklık parametreleri veri seti ise Dünya Bankası İklim Değişikliği Portalından temin edilmiştir [19]. Akım gözlem istasyonunun konumu Şekil 1 üzerinde gösterilmiştir.



Şekil 1. Akım Gözlem İstasyonunun Konumu (Google Earth) (Location of observation station)

Şekil 1 ile gösterilen EİE'ye ait 902 numaralı Akım Gözlem İstasyonu Antalya İli Serik İlçesinin kuzeyinde yer alan Beşkonak bucağında bulunmaktadır. Akım Gözlem İstasyonunun yaklaşık

yüksektisi 116 metredir. İstasyonda ortalama akımlar su yılı baz alınarak gerçekleştirilmektedir. Yani ortalama akım değerleri her bir su yılı için 1 Ekim-30 Eylül dönemini kapsamaktadır.

Tablo 1: Eğitim verisi istatistikleri (Training data set statistics)

Parametre	Veri Uzunluğu	Eksik Veri	Min.	Maks.	Ortalama	Standart	
						Sapma	Çarpıklık Katsayısı
Tmin.	1957-2011	-	4.04	7.36	5.44	0.62	0.36
Tmaks.	1957-2011	-	15.15	18.99	16.88	0.73	0.35
Tort.	1957-2011	-	9.58	13.15	11.14	0.66	0.41
Yağış	1957-2011	-	456.42	742.32	596.13	67.38	0.11
Ortalama Debi	1957-2011	1979	50.00	120.00	80.88	17.66	0.22

Destek Vektör Makinaları, Multi-Layer Perceptron ve Random Forest modellerinde kullanılan eğitim verilerine ait minimum, maksimum, ortalama, standart sapma ve çarpıklık katsayısı istatistikleri Tablo 1 ile verilmiştir. Bu istatistiksel veriler kullanılan veri setinin kendi içerisindeki dağılımını

göstermek için verilmiştir. Ortalama akım verisi olarak sadece 1979 yılına ait veri mevcut değildir. Bu veri bir önceki ve bir sonraki yıllara ait ortalama akım verilerinin basit ortalaması alınarak tamamlanmıştır.

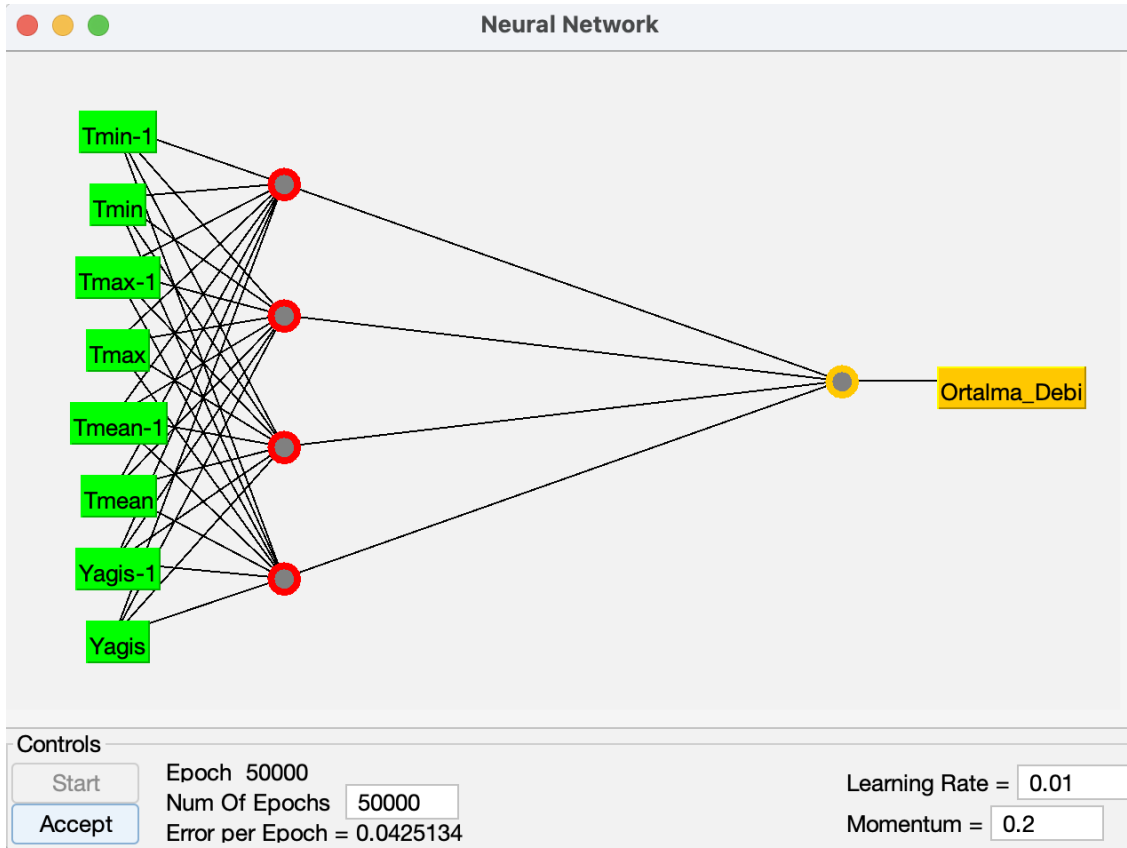
Tablo 2: Test verisi istatistikleri (Test data set statistics)

Parametre	Veri Uzunluğu	Eksik Veri	Min.	Maks.	Ortalama	Standart	
						Sapma	Çarpıklık Katsayısı
Tmin.	2012-2022	-	5.89	7.40	6.44	0.45	0.78
Tmaks.	2012-2022	-	17.50	18.86	18.15	0.42	0.15
Tort.	2012-2022	-	11.72	13.11	12.28	0.42	0.56
Yağış	2012-2022	-	518.49	711.00	604.87	68.85	0.29
Ortalama Akım	-	-	-	-	-	-	-

Tablo 2 ile çalışmanın ikinci kısmını oluşturan gelecek ortalama akım tahmininde kullanılan veri setine ait istatistikler verilmiştir. Tablo 2 de görüleceği üzere ilgili yıllara ait ortalama akım değerleri mevcut olmadığından bu veriler ile ilgili istatistikler hesaplanmamıştır. Özetle, en uygun modelin seçiminde kullanılan eğitim kümesi 55 yıllık ortalama akım değerlerini içermektedir. Kayıtların mevcut olmadığı 2012 ve sonrasında ise 11 yıllık hava sıcaklığı ve yağış verileri kullanılarak ortalama akım tahmini yapılmıştır. Eğitim amacıyla kullanılan veri setinde minimum, maksimum, ortalama hava sıcaklığı değerleri, yağış ve ortalama akım değerleri yer almakta iken test amacıyla kullanılan veri setinde eğitim kümesinden farklı olarak ortalama akım veriler mevcut değildir.

2.2. Multi-Layer Perceptron (MLP)

Multi-Layer Perceptron bazı çalışmalarda dilimize çok katmanlı algılayıcılar olarak çevrilmiştir [20, 21]. Bu çalışmada yapay sinir ağlarının özel bir uygulaması olan MLP orijinal ismi ile anılacaktır. MLP yaklaşımı eğitim için Bayesian regülarizasyonunu kullanır. Bayesian regülarizasyonu ise Levenberg-Marquardt algoritması ile ağırlık ve bias değerlerini optimize eder [22]. MLP yaklaşımında ilk adım girdi parametrelerinin gizli katmana bağlandığı ve ağırlıklarının hesaplandığı ileri besleme adımdır. Bir sonraki adım, ağırlıkları ayarlayan ters yayılım sürecidir. Son aşama ise tahmin ve gözlem arasındaki farklara uygun olarak ağırlıkları değiştiren geri yayılım sürecidir. MLP ile ilgili daha kapsamlı bilgiler ilgili literatürden [23,24] bulunabilir.



Şekil 2. Multi-Layer Perceptron Model Yapısı (MLP model structure)

Şekil 2 ile bu çalışmada kullanılan MLP yapılarından bir tanesi verilmiştir. Verilen bu MLP yapısında bütün parametrelerin mevcut ve bir önceki yıllara ait kayıtlarının girdi olarak kullanıldığı görülmektedir. Çıktı parametresi ise ortalama debi değeridir. Şekil 2 ML analizlerinin yapıldığı WEKA yazılımı ile oluşturulmuştur.

2.3. Destek Vektör Makinaları (Support Vector Machines)

Sınıflama ve regresyon konularındaki başarısı destek vektör makinalarını makine öğrenme alanındaki en popüler algoritmalarından biri yapmıştır. Cortes ve Vapnik tarafından 1995 yılında tanıtılan DVM pek çok farklı doğrusal olmayan sınıflama ya da tahmin çalışmasında kullanılmıştır [25]. Temelde bu ML yaklaşımı farklı elemanlardan oluşan bir kümedeki elemanları en doğru şekilde ayırt etmek için destek vektörleri kullanmaya dayanan bir yaklaşımdır. En uygun sınıflamayı yapmak amacıyla hiper düzlem veya karar sınırlarının belirlenmesi gerekir [26]. Ancak, destek vektörleri kullanılarak doğrusal olmayan bir veri kümesinde doğrusal bir hiper düzlem çizilemez. Bu dezavantajı çözmek için Kernel fonksiyonları kullanılır. Kernel metodu DVM tahmin ifadesi denklem 1 ile verilmiştir.

WEKA yazılımı Java programlama dilini kullanan Waikato Üniversitesinde geliştirilmiş açık kaynak kodlu bir yazılımdır. MLP modellemelerinde devir sayısı (epochs) 50000 olarak belirlenmiştir. Ayrıca öğrenme oranı (learning rate) 0.01 ve momentum değeri 0.2 olarak alınmıştır.

$$y = (K_{xi} \cdot W_{jk}) + \quad (1)$$

Denklem 1 ile verilen ifade de “b” bias terimini, “ W_{jk} ” parametre ağırlığını, “ K_{xi} ” girdi parametrelerini çok boyutlu bir düzleme aktaran doğrusal olmayan fonksiyonu tanımlamaktadır. Genel olarak bir DVM yapısı girdiler, Kernel fonksiyonu (Çekirdek Fonksiyonu olarak da adlandırılmaktadır) ve çıktılar olmak üzere üç katmandan oluşmaktadır. Belli başlı Kernel fonksiyonları Doğrusal, PolyKernel ve Radial tabanlı Kernel şeklindedir.

2.4. Random Forest

Karar ağaçları algoritmaları makine öğrenme algoritmalarındandır. Random Forest (RF) algoritması regresyon ağaçları ve kanıtsal özellikleri (evidential features) ayarlayarak tahmin modelleri oluşturur [27,28]. RF yaklaşımında araştırılan parametrenin karmaşıklığına bağlı olarak çok fazla karar ağacı oluşturulur ve çıktı

olarak karar ağaçlarının çıktılarının ortalaması alınır [29]. Karar ağaçları parametrik olmayan yaklaşımlardır ve sınıf ayırımları ve yoğunlukları için herhangi bir varsayımda bulunmaz. Bu istatistiksel karar ağaçlarında tahmin sürecinin karmaşıklığına bağlı olarak öğrenme süreci devam ettiği sürece ağaç büyür. RF tekniğinde karar ağaç sayısının artırılmasının genelleme hata oranını yakınsadığı ve bu sayede aşırı öğrenmenin bir sorun olmayacağı belirtilmektedir [30].

2.5. İş Akışı ve Hata Hesaplamaları (Flow Chart and Error Calculations)

Çalışmada bölge seçimi yapıldıktan sonra yeterli uzunluğa sahip veri (kesintisiz ve eksik veri içermeyen veri setine sahip akım gözlem istasyonu) DSİ'nin resmi websitesinden araştırılarak bulunmuştur. Akım verilerine ilaveten aynı yıllara ait ülkemizin minimum, maksimum ve ortalama hava sıcaklığı ile yağış verileri de Dünya Bankası İklim Değişikliği Portalından (Climate Change Portal) bulunarak zaman serileri halinde veriler düzenlenmiştir. Sonrasında en uygun model seçimine ve modelin kullanımına kadar olan süreci içeren iş akışı şeması Şekil 3 ile verilmiştir.

DVM analizlerinde çekirdek fonksiyonu olarak PolyKernel çekirdek fonksiyonu seçilmiştir. MLP analizlerinde öğrenme algoritması devir sayısı 50000 alınmıştır. MLP analizlerinde öğrenme oranı (learning rate) ve momentum değerleri deneme yanılma yaklaşımı ile tespit edilmiştir.

Model sonuçlarının değerlendirilmesinde kullanılan ortalama mutlak hata (OMH), ortalama karesel hata kökü (OKHK), göreceli mutlak hata (GMH) ve göreceli karesel hata kökü (GKHK) istatistiklerinin hesaplanması denklem 2-5 ile verilmiştir.

$$OMH = \frac{\sum_{i=1}^n |y_i - x_i|}{n} \quad (2)$$

$$OKHK = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}{n}} \quad (3)$$

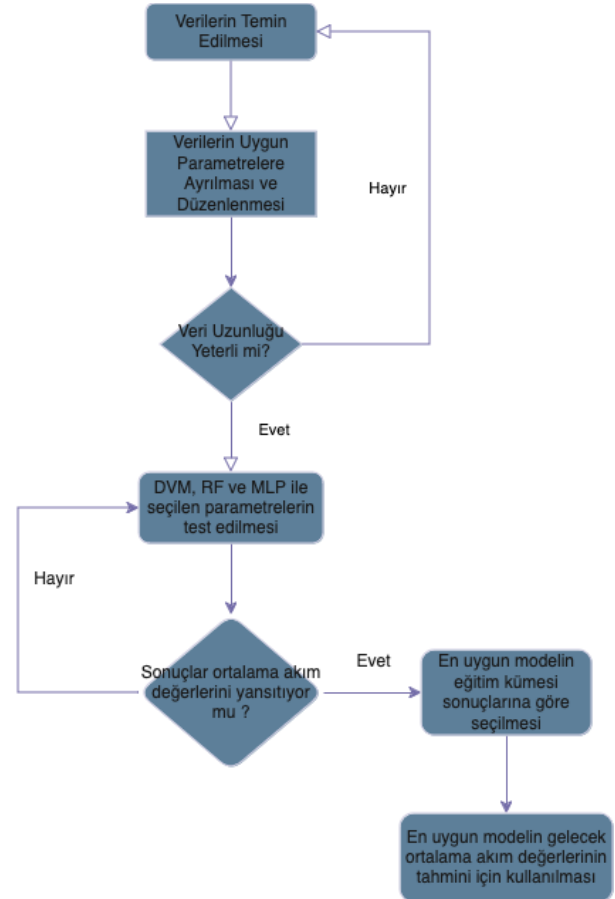
$$GMH = \frac{[\sum_{i=1}^n (y_i - x_i)^2]^{1/2}}{[\sum_{i=1}^n x_i^2]^{1/2}} \quad (4)$$

3. SONUÇLAR (RESULTS)

Bu çalışmada MLP, DVM ve RF teknikleri kullanılarak Köprüçay Akım Gözlem İstasyonunun verileri tahmin edilmiştir. Çalışmanın ilk kısmında yapılan analizlerde hangi yöntemin Köprüçay özelinde en uygun sonuçları verdiği araştırılmıştır. Bu kısımda toplamda altı adet analiz yapılmıştır. Modeller yukarıda belirtilen ML algoritmaları ve farklı girdi parametreleri kullanılarak

$$GKHK = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - x_i)^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i)^2}} \quad (5)$$

Denklem 2-5 ile verilen ifadelerde “n” veri seti uzunluğunu, “x_i” i’inci ortalama akım kayıt değerini, “y_i” ise i’inci ortalama akım tahmin değerini ifade etmektedir. Bilindiği üzere verilen ifadelerle hesaplanan istatistiksel hata değerleri düştükçe model performanslarının arttığı söylenebilir.



Şekil 3. Ortalama akım tahmini iş akışı şeması

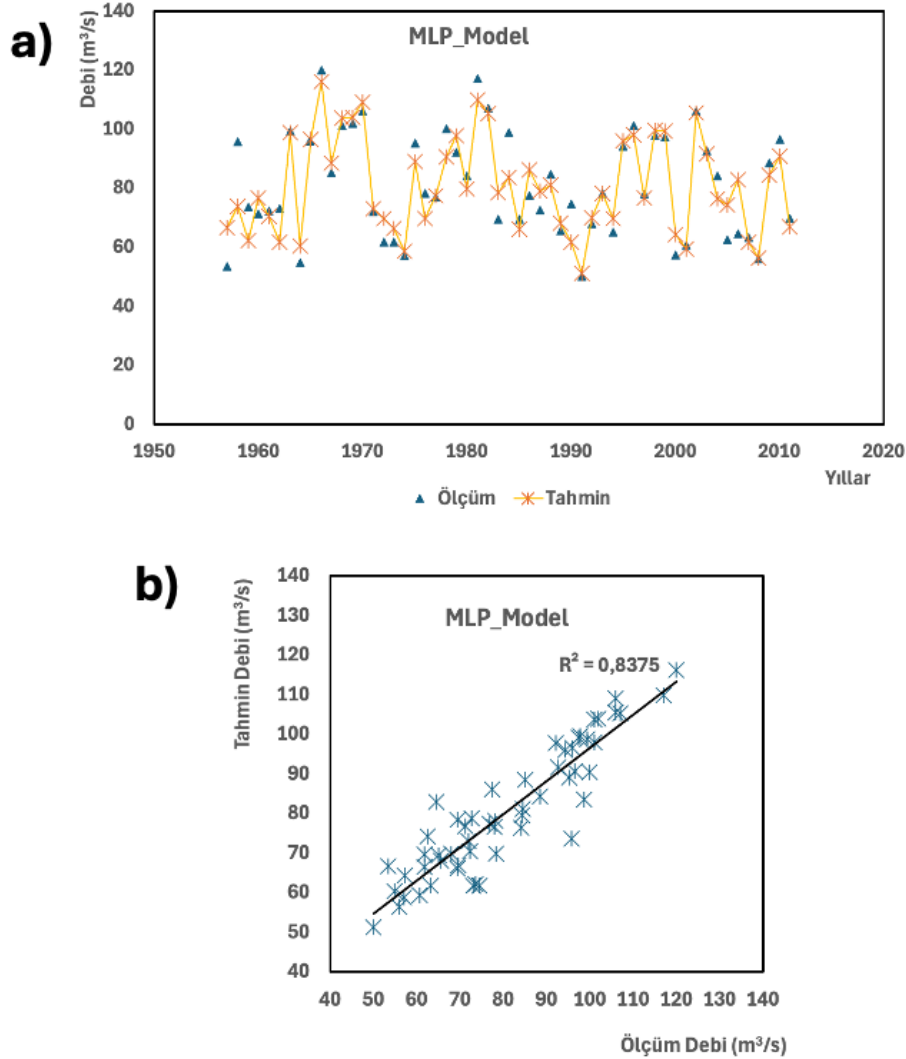
(Average flow prediction work flow)

oluşturulmuştur. Model numaraları ve girdi parametreleri Tablo 3 ile verilmiştir.

Şekil 4 ile MLP₂ model sonuçlarına ait dağılım ve saçılım grafikleri verilmiştir. MLP analizlerinde diğer bütün analizlerde olduğu gibi veriler eğitim kümesi üzerinde test edilmiştir. Bu kısımda yeni bir test kümesi kullanılmasının nedeni yeterli veri uzunluğu olmamasıdır. MLP₂ modelinde yağış ve

hava sıcaklığı parametreleri ve bu parametrelerin önceki yıllara ait kayıtları girdi olarak kullanılmıştır. Önceki yıllara ait verilerin MLP

modelinde kullanımı model performansını önemli ölçüde arttırmıştır.

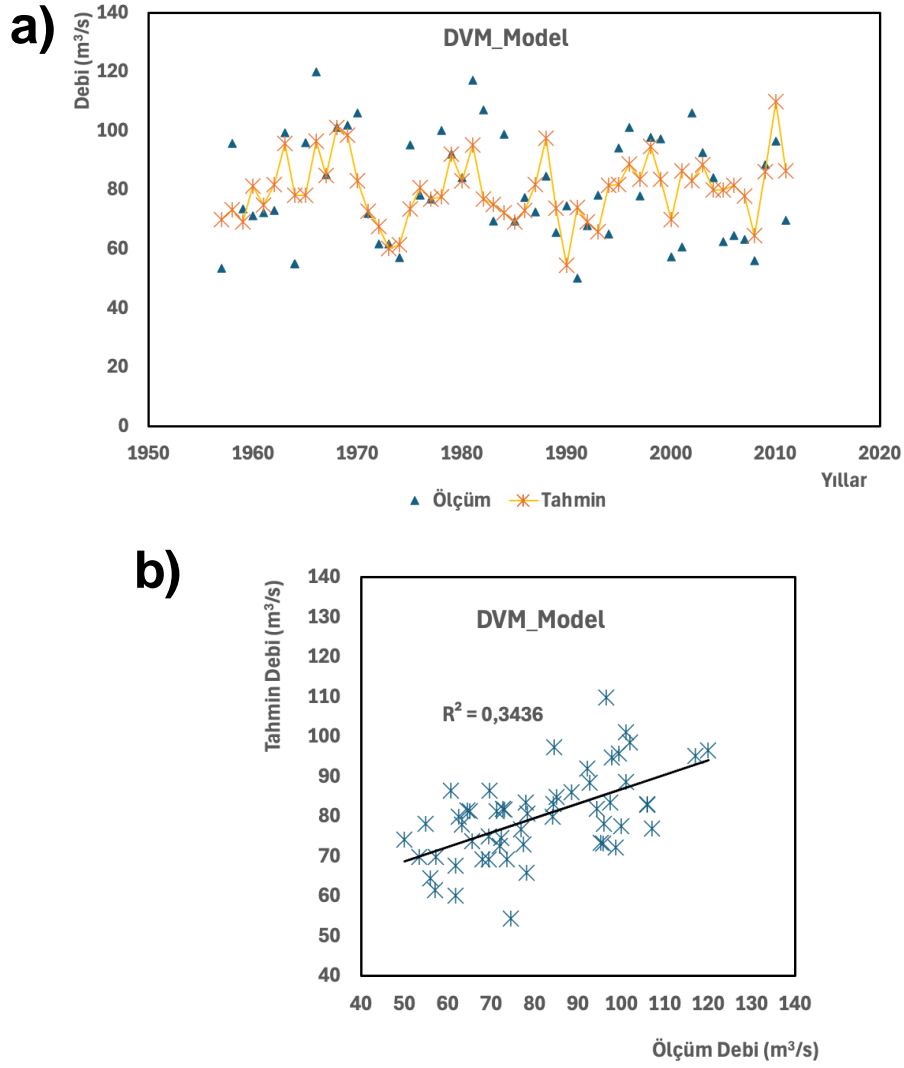


Şekil 4.a) MLP model dağılım grafiği **b)** MLP saçılım grafiği (MLP model distribution and scatter plots)

Şekil 4a ile verilen dağılım grafiğinde tahmin değerlerinin ölçüm değerlerine oldukça yakın olduğu görülmektedir. MLP modeli için saçılım grafiği üzerinde verildiği üzere determinasyon katsayısı 0.8375 olarak hesaplanmıştır. Hesaplanan determinasyon katsayısı eğitim kümesi için yapılan bu analizde tahmin ve ölçüm değerleri arasında yüksek bir ilişki olduğunu ortaya koymaktadır.

MLP₂ modelinde tahmin ve ölçüm değerleri dağılım grafiği üzerinden okunduğunda önemli ölçüde örtüşmeler olduğu anlaşılmaktadır. Ancak saçılım grafiği etrafındaki dağılım tahmin değerlerinde çok da düşük olmayan hatalara işaret etmektedir.

Şekil 5 ile DVM₂ model sonuçları dağılım ve saçılım grafikleri ile verilmiştir. DVM₂ modeli de MLP₂ modelinde olduğu gibi yağış ve sıcaklık parametreleri ile bir önceki yıllara ait kayıtların girdi olarak kullanılması ile oluşturulmuştur. Bu model de elde edilen sonuçlar kullanılabilir düzeyde anlamlı bulunmamıştır. Şekil 5 ile verilen dağılım grafiğinden tahmin ve ölçüm değerleri arasındaki uyumsuzluk anlaşılmaktadır. Ayrıca bu model için determinasyon katsayısı 0.3436 olarak hesaplanmıştır. Bu değer tahmin ve ölçüm değerleri arasındaki yakınsamanın düşük olduğunu göstermektedir. DVM₂ modeli ötelenmiş zaman serilerinin kullanıldığı DVM modeli olmasına rağmen sonuçlar kullanılabilir düzeyde değildir

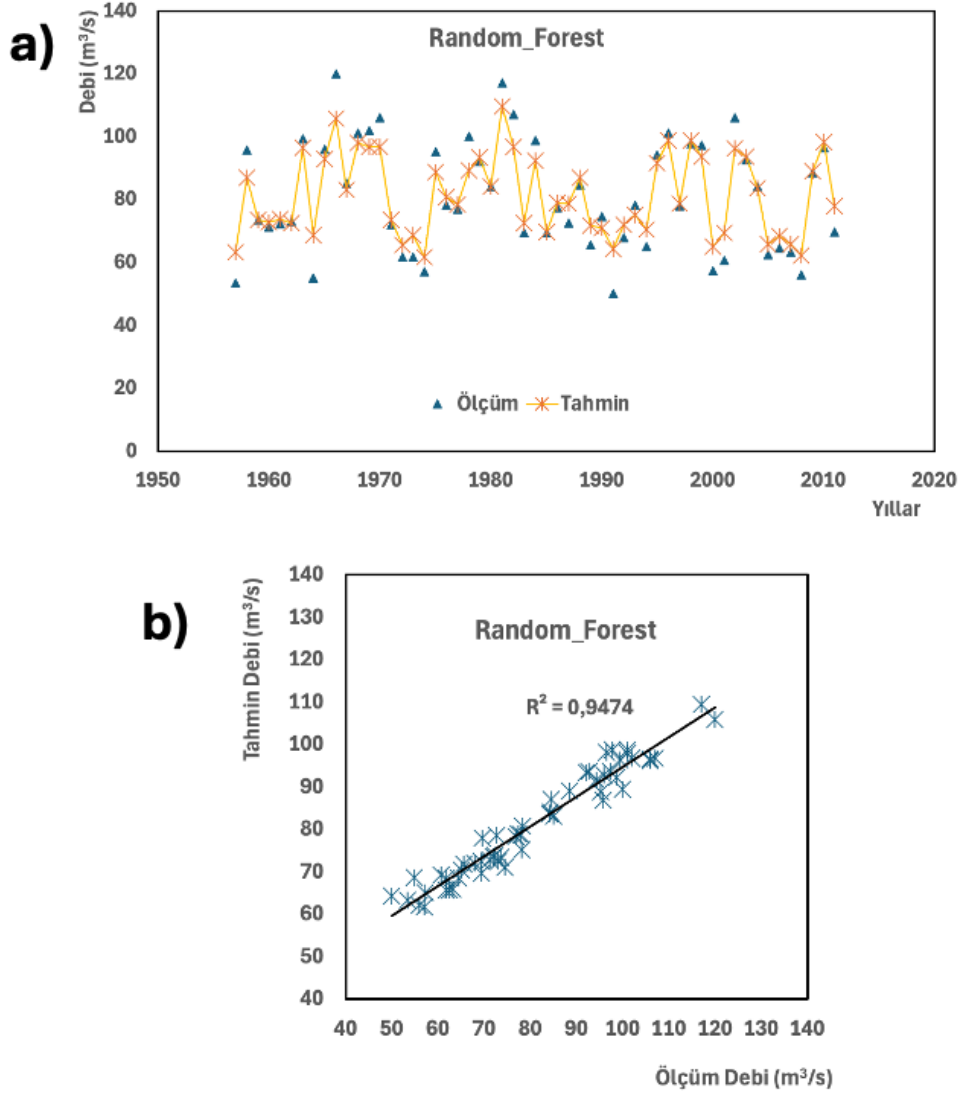


Şekil 5: a) DVM model dağılım grafiği b) DVM saçılım grafiği (SVM model distribution and scatter plots)

Şekil 6 ile iki numaralı Random Forest yaklaşımına ait sonuçlar verilmiştir. Bu modelde de önceki modellerde olduğu gibi önceki yıllara ait ötelenmiş veriler girdi olarak kullanılmıştır. RF ile yapılan analizlerde eğitim verisi için en uygun sonuçlar elde edilmiştir. RF₂ dağılım sonuçlarının verildiği Şekil 6'da tahmin ve ölçüm değerleri arasındaki uyum görülmektedir. Ayrıca Şekil 6'da verilen saçılım grafiğinden determinasyon katsayısının 0,9474 olarak hesaplandığı ve saçılımın yakınsaması görülmektedir. Bu modelde hesaplanan determinasyon katsayısı bütün modellerde hesaplanan en yüksek determinasyon katsayısı olmuştur. Oluşturulan bütün modellere ait korelasyon katsayıları ve hata hesapları Tablo 3 ile verilmiştir. Tablo 3'te girdi parametreleri kısmında "-1" ile ifade edilen girdi parametreleri bir zaman adımı önceki kayıtları ifade etmektedir. Kullanılan

girdi parametreleri ve ortalama akım değerleri yıllık verilerden olduğundan "-1" ile ifade edilen girdi parametreleri bir yıl önceki kayıtlar kullanılarak oluşturulan zaman serilerinin yeni bir parametre olarak kullanılmasını göstermektedir.

Tablo 3 ile verilen girdi parametreleri her bir makine öğrenme algoritması için aynı olacak şekilde seçilmiştir. Modeller öncelikle ötelenmiş zaman serilerinin olmadığı durum için test edilmiştir. Ötelenmiş zaman serilerinin olmadığı durum için hiçbir algoritmanın sonuçları yeterince iyi bulunmadığından sonuç grafikleri sadece ötelenmiş serilerin eklenmesi ile oluşturulan modeller için verilmiştir. Oluşturulan modellerde ortalama akım parametresi çıktı parametresi olduğundan bu parametre için ötelenmiş zaman serisi tercih edilmemiştir.



Şekil 6: a) RF model dağılım grafiği b) RF saçılım grafiği (RF model distribution and scatter plots)

Tablo 3 incelendiğinde en yüksek korelasyon katsayısının RF₂ modeli için elde edildiği görülecektir. RF₂ modelinde yağış ve sıcaklık parametreleri ve bunlara ait ötelenmiş zaman serileri birlikte girdi olarak kullanılmıştır. En düşük korelasyon katsayısı ötelenmiş zaman serilerinin kullanılmadığı DVM₁ modeli için hesaplanmıştır. Her üç ML yaklaşımında da ötelenmiş zaman serilerinin korelasyon katsayısını önemli ölçüde arttırdığı saptanmıştır. En düşük OMH, OKHK,

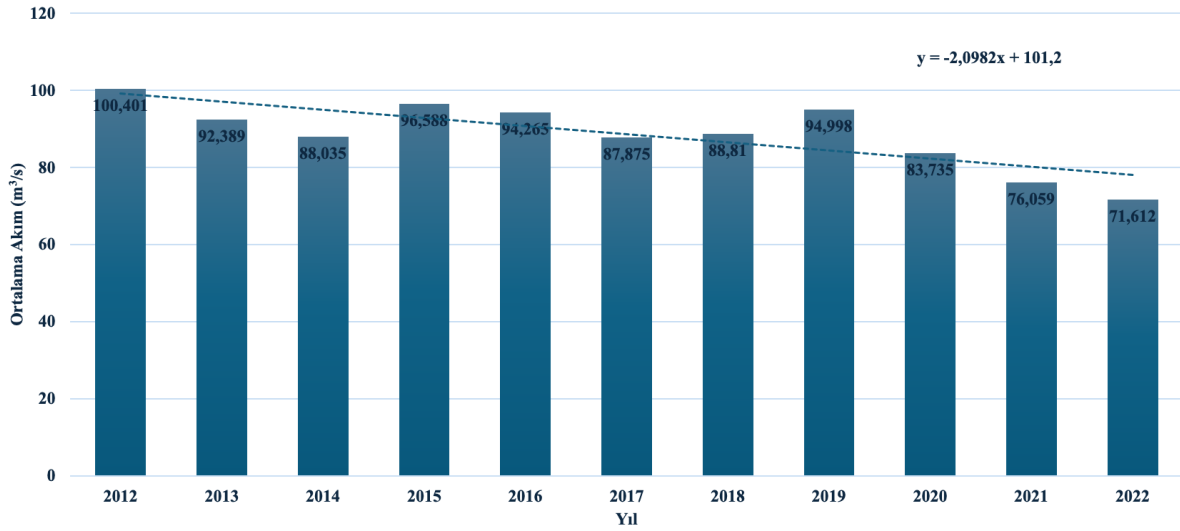
GMH ve GKHK değerleri RF₂ modeline aittir. En yüksek hata oranları ise DM₁ modeli için bulunmuştur. Hesaplanan hata değerleri ve korelasyon katsayıları RF₂ modelinin seçilen modeller içerisinde en uygun performansı verdiğini ortaya koymuştur. Tablo 3 ile verilen MLP modelleri incelendiğinde ise MLP₂ model sonuçlarının tahmin süreçlerinde kullanılabilir düzeyde anlamlı olduğunu göstermiştir.

Tablo 3. Model sonuçları ve performans analizleri (Models results and performance analyses)

Algoritma	Girdi Parametreleri	Korelasyon Katsayısı	OMH	OKHK	GMH (%)	GKHK (%)
DVM₁	Tmin, Tmax, Tort., Yağış,	0.4714	12.43	15.49	81.47	88.54
DVM₂	Tmin, Tmin-1, Tmax, Tmax-1, Tort., Tort.-1, Yağış, Yağış-1	0.5861	11.28	14.21	73.91	81.25
MLP₁	Tmin, Tmax, Tort., Yağış,	0.6207	11.11	13.72	72.79	78.42
MLP₂	Tmin, Tmin-1, Tmax, Tmax-1, Tort., Tmean-1, Yağış, Yağış-1	0.9152	5.22	7.00	34.23	40.35
RF₁	Tmin, Tmax, Tort., Yağış,	0.9536	5.31	6.91	34.78	39.49
RF₂	Tmin, Tmin-1, Tmax, Tmax-1, Tort., Tort.-1, Yağış, Yağış-1	0.9733	4.62	5.95	30.31	34.00

Çalışmanın ikinci kısmında en uygun sonuçları veren RF₂ yaklaşımı kullanılarak sonraki yılların yağış ve sıcaklık parametreleri ile ortalama akım tahmini yapılmıştır. Yağış ve sıcaklık parametrelerine ait veriler 2022 yılında son

bulduğundan tahminler ortalama akım verilerinin bittiği 2011 yılından 2022 yılına kadar olan süre için yapılmıştır. Şekil 7 ile yıllara göre tahmin sonuçları histogram ile verilmiştir.



Şekil 7. 2012- 2022 yıllarına ait ortalama debi tahmini sonuçları (Average flows prediction results of 2012-2022)

Şekil 7’de verilen grafiğe eklenen doğrusal eğilim çizgisinin yıllar içerisinde ortalama akımda bir düşüşe işaret ettiği anlaşılmaktadır. Özellikle 2021 ve 2022 yıllarına ait tahminlerde ciddi oranda düşüşler gözlemlenmiştir. Bu sonuçlar küresel sıcaklık artışlarına bağlı değişimler nedeniyle özellikle son yıllarda kırılan sıcaklık rekorları ve değişen yağış rejimleri düşünüldüğünde anlamlı sonuçlar olarak değerlendirilmiştir.

4. DEĞERLENDİRME (CONCLUSIONS)

Akarsular buldukları bölgenin içme ve sulama suyu ihtiyacını karşılayan önemli su kaynaklarıdır. Son yıllarında değişen iklim koşulları ile birlikte akarsu debilerinde önemli değişiklikler olduğu bilinmektedir. Bu çalışmada EİE kayıtları kullanılarak Köprüçay özelinde ortalama akımlara ait değerler çeşitli makine öğrenme algoritmalarından faydalanılarak tahmin edilmeye çalışılmıştır. Yağış, minimum hava sıcaklığı, maksimum hava sıcaklığı, ortalama hava sıcaklığı parametreleri ile bu parametrelerin ötelenmiş zaman serilerini içeren 55 yıllık bir veri seti kullanılmıştır. Veri setinin ML araştırmaları için yeterli uzunluğa sahip olmadığı düşünüldüğünden DVM, RF ve MLP algoritmalarının eğitim performansları ilk etapta değerlendirmeye tabi tutulmuştur. Çalışmanın bu ilk kısmında elde edilen hata değerleri RF yaklaşımının en uygun sonuçları verdiğini göstermiştir. Çalışmanın ikinci kısmında ise RF modeli kullanılarak 2012-2022 yılları için ortalama akımlar tahmin edilmiştir. Çalışmada bölgesel hava sıcaklığı ve yağış verileri temin edilemediğinden, açık erişim ile ulaşılabilen uzun yıllara ait ülkemizin sıcaklık ve yağış verileri tercih edilmiştir ve ülkemiz özelinde iklim değişikliğinin önemli bir

göstergesi olan bu parametrelerin model sonuçları üzerinde de etkili olduğu tespit edilmiştir. 2012 yılı ve sonrası için yapılan tahmin sonuçları ortalama akımların azalma eğiliminde olduğunu göstermiştir. Benzer bir yaklaşımla havzadaki diğer akarsu ortalama akımlarının incelenebileceği ve sonuçlarının su yönetimi planları için kullanılabileceği düşünülmektedir. Bu çalışmada kullanılan bütün makine öğrenme algoritmalarında ötelenmiş zaman serilerinin sonuçlar üzerinde olumlu etkileri olduğu görülmüştür. Çalışmada çıktı parametresi olan ortalama akım parametresine ait ötelenmiş zaman serisi kullanılmamıştır. Ötelenmiş zaman serileri kullanılmasına rağmen DVM yaklaşımının Köprüçay özelinde ortalama akım tahmininde yetersiz kaldığı anlaşılmıştır. MLP ve RF yaklaşımlarının ortalama akım tahmininde başarılı olduğu ancak hesaplanan istatistiksel hata değerlerinin düşüklüğü nedeniyle RF modelinin daha iyi sonuçlar verdiği tespit edilmiştir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

Yazar akım verilerini toplayıp, düzenleyip paylaşan Elektrik İdaresi ve Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğüne (DSİ) teşekkür eder. / The author would like to thank the Electricity Administration and the General Directorate of State Hydraulic Works (DSI) for collecting, organizing and sharing the flow data.

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 they use in their work do not require ethical committee approval and/or legal-specific permission.

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

Yunus Ziya KAYA: Modellerin oluşturulmasında, sonuçlarının analizinde ve makalenin yazımında görev almıştır. / He generated models, 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] Çubukçu, E. A., Demir, V., & Sevimli, M. F. (2022). Estimating streamflow data with machine learning techniques. *Gazi Journal of Engineering Sciences*, 8(2), 257-272.

[2] Demir, H. N., Korkmaz, M. S., & Arıman, S. (2023). Akım Gözlem İstasyonlarında ANFIS Yöntemi ile Günlük Ortalama Debi Tahmini: Kızılırmak Örneği. *Journal of the Institute of Science and Technology*, 13(4), 2565-2582. <https://doi.org/10.21597/jist.1323346>

[3] Babacan, H. T., & Saka, F. (2022). Makine Öğrenmesi İle Aksu Deresi'nde Akış Tahmin Modeli Geliştirilmesi. *Türk Hidrolik Dergisi*, 6(1), 1-11.

[4] Çubukçu, E. A., Demir, V., & Sevimli, M. F. (2022). Akım Verilerinin Makine Öğrenmesi Teknikleriyle Tahmin Edilmesi. *Gazi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 8(2), 257-272.

[5] Babacan, H. T., Yüksek, Ö., & Saka, F. (2022). Yapay zeka ve sezgisel regresyon yöntemlerinin yağış-akış modellemesi için performans değerlendirmesi: Aksu Deresi için bir uygulama. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 11(3), 744-751. <https://doi.org/10.28948/ngumuh.1079616>

[6] Parisouj, P., Mohebzadeh, H., & Lee, T. (2020). Employing machine learning algorithms for streamflow prediction: a case study of four river basins with different climatic zones in the United States. *Water Resources Management*, 34(13), 4113-4131.

[7] Kedam, N., Tiwari, D. K., Kumar, V., Khedher, K. M., & Salem, M. A. (2024). River stream flow prediction through advanced machine learning models for enhanced accuracy. *Results in Engineering*, 22, 102215.

[8] Hussain, D., & Khan, A. A. (2020). Machine learning techniques for monthly river flow forecasting of Hunza River, Pakistan. *Earth Science Informatics*, 13(3), 939-949.

[9] Elbeltagi, A., Di Nunno, F., Kushwaha, N. L., De Marinis, G., & Granata, F. (2022). River flow rate prediction in the Des Moines watershed (Iowa, USA): A machine learning approach. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 36(11), 3835-3855.

[10] Kaya, Y. Z., Zelenakova, M., Üneş, F., Demirci, M., Hlavata, H., & Mesaros, P. (2021). Estimation of daily evapotranspiration in Košice City (Slovakia) using several soft computing techniques. *Theoretical and Applied Climatology*, 144, 287-298.

[11] Amani, S., & Shafizadeh-Moghadam, H. (2023). A review of machine learning models and influential factors for estimating evapotranspiration using remote sensing and ground-based data. *Agricultural Water Management*, 284, 108324.

[12] Sharafi, S., & Mohammadi Ghaleni, M. (2024). Revealing accuracy in climate dynamics: enhancing evapotranspiration estimation using advanced quantile regression and machine learning models. *Applied Water Science*, 14(7), 162.

[13] Üneş, F., Taşar, B., Demirci, M., Zelenakova, M., Kaya, Y. Z., & Varçin, H. (2021). Daily suspended sediment prediction using seasonal time series and artificial intelligence techniques. *Rocznik Ochrona Środowiska*, 23.

[14] Avcı, Y., & Ekmen, A. B. (2023, October). Artificial intelligence assisted optimization of rammed aggregate pier supported raft foundation systems based on parametric three-dimensional finite element analysis. In *Structures* (Vol. 56, p. 105031). Elsevier.

[15] Altay, G., Kayadelen, C., & Kara, M. (2024). Model selection for prediction of strong ground motion peaks in Türkiye. *Natural Hazards*, 120(2), 1443-1461.

[16] Karatas, I. & Budak, A. (2024), "Development and comparative of a new meta-ensemble machine learning model in predicting construction labor productivity", *Engineering, Construction and Architectural Management*, Vol. 31 No. 3, pp. 1123-1144. <https://doi.org/10.1108/ECAM-08-2021-0692>

- [17] Murad, Y., Hajar, H. A., & Azim, I. (Eds.). (2022). Machine learning applications in Civil engineering (Vol. 16648714). Frontiers Media SA.
- [18] DSİ, (2024). Url: <https://www.dsi.gov.tr/Sayfa/Detay/744> Erişim Tarihi: 17.09.2024.
- [19] World Bank, Climate Change Knowledge Portal (2024). URL: <https://climateknowledgeportal.worldbank.org/>. Erişim Tarihi: 17.08.2024.
- [20] Moralı, İ. A., & Aygün, F. F. (2007). Çok Katmanlı Algılayıcı Ve Geriye Yayılım Algoritması İle Konuşmacı Ayırt Etme. Akademik Bilişim, 7, 57-62.
- [21] İşeri, İ., & Arıman, S. (2019). Sedimandaki Ağır Metal Konsantrasyonunun Çoklu Değişken Regresyon Modelleri ve Çok Katmanlı Algılayıcı Ağ Modeli ile Tahmini. Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, 389-397.
- [22] Toprak ZF, Cigizoglu HK (2008) Predicting longitudinal dispersion coefficient in natural streams by artificial intelligence methods. Hydrol. Process. 22:4106–4129. <https://doi.org/10.1002/hyp.7012>
- [23] Bishop C (1995) Neural networks for pattern recognition. Oxford:University Press
- [24] Haykin S (1999) Neural networks: a comprehensive. Pearson Education.13:409–412. <https://doi.org/10.1017/S0269888998214044>
- [25] Cortes, C., Vapnik, V., 1995. Support-Vector Cortes, C., & Vapnik, V..Support-vector networks. Machine Learning, 20(3), 273–297. doi:<https://doi.org/10.1023/A:1022627411411>
- [26] Turan, A. K., & Polat, H. (2024). Yarı denetimli makine öğrenmesi yöntemini kullanarak müzik türlerinin tespiti. Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology, 1-1.
- [27] Breiman, L. (2001). Random forests. Machine learning, 45, 5-32.
- [28] Rodriguez-Galiano, V. F., Ghimire, B., Rogan, J., Chica-Olmo, M., & Rigol-Sanchez, J. P. (2012). An assessment of the effectiveness of a random forest classifier for land-cover classification. ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing, 67, 93-104.
- [29] Li, Y., Zou, C., Berecibar, M., Nanini-Maury, E., Chan, J. C. W., Van den Bossche, P., ... & Omar, N. (2018). Random forest regression for online capacity estimation of lithium-ion batteries. Applied energy, 232, 197-210.
- [30]. Rodriguez-Galiano, V., Sanchez-Castillo, M., Chica-Olmo, M., & Chica-Rivas, M. (2015). Machine learning predictive models for mineral prospectivity: An evaluation of neural networks, random forest, regression trees and support vector machines. Ore Geology Reviews, 71, 804-818. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2015.01.001>
- [31] Yaseen, Z. M., Kisi, O., & Demir, V. (2016). Enhancing long-term streamflow forecasting and predicting using periodicity data component: application of artificial intelligence. Water resources management, 30, 4125-4151.
- [32] Ahmadianfar, I., Demir, V., Heddami, S., Al-Areeq, A. M., Abba, S. I., Tan, M. L., ... & Yaseen, Z. M. (2023). Daily scale streamflow forecasting based-hybrid gradient boosting machine learning model.

Common Aperture DSLR Camera Design Approach with Diffractive Lens

Ahmet ÜNAL^{1*} 

¹Middle East Technical University, Department of Electrical and Electronics Engineering, Ankara, Turkey

Article Info

Research article
Received: 10/10/2024
Revision: 28/12/2024
Accepted: 28/12/2024

Keywords

Digital Single Lens Reflex
Camera
Optical System Design
Diffractive Optical
Element

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 10/10/2024
Düzeltilme: 28/12/2024
Kabul: 28/12/2024

Anahtar Kelimeler

Sayısal Tek Mercek
Yansımali Kamera
Optik Sistem Tasarım
Kırınımlı Optik Eleman

Graphical/Tabular Abstract (Grafik Özet)

Digital Single-Lens Reflex (DSLR) cameras are widely used across various fields; however, their dependence on eyepieces imposes functional limitations. To overcome this constraint, this study introduces a comprehensive optical system approach incorporating specialized diffractive optical elements, enabling simultaneous focusing on both the viewfinder and the image sensor (Figure A). / Sayısal Tek Lensli Refleks (DSLR) kameralar çeşitli alanlarda yaygın olarak kullanılır; ancak, göz merceğine olan bağımlılıkları işlevsel sınırlamalar getirir. Bu kısıtlamanın üstesinden gelmek için, bu çalışma, hem vizöre hem de görüntü sensörüne aynı anda odaklanmayı sağlayan özel kırınımlı optik elemanları içeren kapsamlı bir optik sistem yaklaşımı sunar (Figür A).

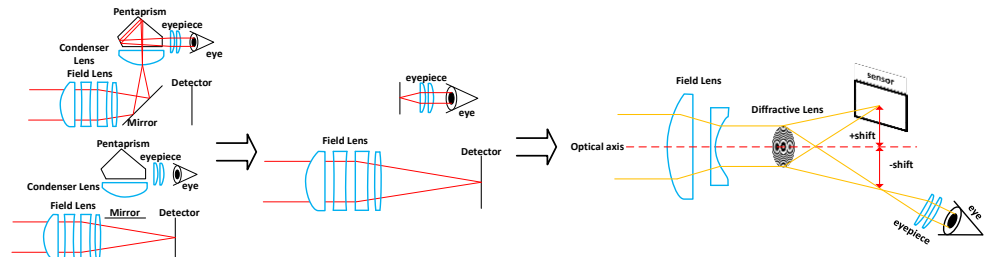


Figure A: General Structure of DSLR cameras and the proposed structure / DSLR kameraların genel yapısı ve önerilen yapı

Highlights (Önemli noktalar)

- Diffractive optical element design that can focus the scene radiation on two different points on the focal plane simultaneously / Sahne ışınımını aynı anda odak düzlemindeki iki farklı noktaya odaklayabilen kırınımlı optik eleman tasarımı.
- Validation of the two-regional diffractive lens design by comparison with equivalent ideal lenses. / İki bölgeli kırınımlı mercek tasarımının, eşdeğer ideal merceklerle karşılaştırılarak doğrulanması
- A new DSLR camera structure that uses two-regional diffractive optical element. / İki bölgeli kırınımlı optik eleman kullanan yeni bir DSLR kamera yapısı.

Aim (Amaç): In this study, it is aimed to design a diffractive optical element that can simultaneously transmit the scene radiation to both the sensor and the eyepiece for use in DSLR cameras. / Bu çalışmada, DSLR kameralarında kullanılmak üzere sahne ışınımını eş zamanlı olarak hem sensöre hem de göz merceğine iletebilen kırınımlı bir optik elemanın tasarlanması amaçlanmıştır.

Originality (Özgünlük): A new design methodology for DSLR cameras is presented using a two regional diffractive optical element for the first time. / DSLR fotoğraf makineleri için ilk kez iki bölgeli kırınımlı optik eleman kullanan yeni bir tasarım metodolojisi sunulmaktadır.

Results (Bulgular): Intensity distributions generated using optical wave propagation simulations have shown that the two regional diffractive optical element can focus scene radiation on both the sensor and the eyepiece simultaneously. / Optik dalga yayılım simülasyonları kullanılarak oluşturulan şiddet dağılımları, iki bölgeli kırınımlı optik elemanın sahne radyasyonunu aynı anda hem sensöre hem de göz merceğine odaklayabileceğini göstermiştir.

Conclusion (Sonuç): The innovative optical design method for DSLR cameras proposed in this study eliminates the need for complex lens systems traditionally used in eyepieces, offering a novel alternative. The effectiveness of the proposed designs was validated through comparisons with ideal lenses possessing similar optical parameters. / Bu çalışmada önerilen DSLR kameralar için yenilikçi optik tasarım yöntemi, geleneksel olarak göz merceğinde kullanılan karmaşık lens sistemlerine olan ihtiyacı ortadan kaldırarak yeni bir alternatif sunar. Önerilen tasarımların etkinliği, benzer optik parametrelere sahip ideal lenslerle yapılan karşılaştırmalar yoluyla doğrulanmıştır.



Common Aperture DSLR Camera Design Approach with Diffractive Lens

Ahmet ÜNAL^{1*}

¹Middle East Technical University, Department of Electrical and Electronics Engineering, Ankara, Turkey

Article Info

Research article
Received: 10/10/2024
Revision: 28/12/2024
Accepted: 28/12/2024

Keywords

Digital Single Lens Reflex
Camera
Optical System Design
Diffractive Optical
Element

Abstract

Digital Single-Lens Reflex (DSLR) cameras have widespread applications across various fields. Yet, their reliance on eyepieces poses limitations on their functionality. To address this constraint, a comprehensive optical system approach utilizing specialized diffractive optical elements, enabling concurrent focusing on both the viewfinder and the image sensor has been developed in this study. The effectiveness of this innovative design approach has been verified through comparative analysis with conventional separated ideal lenses. The outcome of the simulations was shared, and this study is expected to pave the way for advanced optical system designs and inspire novel approaches in camera technology development.

Kırınımlı Lens ile Ortak Açıklık DSLR Kamera Tasarım Yaklaşımı

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 10/10/2024
Düzeltilme: 28/12/2024
Kabul: 28/12/2024

Anahtar Kelimeler

Sayısal Tek Mercek
Yansımali Kamera
Optik Sistem Tasarım
Kırınımlı Optik Eleman

Öz

Sayısal Tek Mercek Yansımali (DSLR) kameralar çeşitli alanlarda yaygın uygulamalara sahiptir. Ancak göz merceğine olan bağımlılıkları, işlevselliğine sınırlamalar getirmektedir. Bu kısıtlamayı gidermek için, bu çalışmada hem vizöre hem de görüntü sensörüne eşzamanlı odaklanmayı mümkün kılan, özel kırınımlı optik elemanları kullanan kapsamlı bir optik sistem yaklaşımı geliştirilmiştir. Bu yenilikçi tasarım yaklaşımının etkinliği, geleneksel ayrılmış ideal merceklerle karşılaştırmalı analiz yoluyla doğrulanmıştır. Simülasyon sonuçlarının paylaşıldığı bu çalışmanın, ileri optik sistem tasarımlarının önünü açması ve kamera teknolojisi geliştirmede yeni yaklaşımlara ilham vermesi beklenmektedir.

1. INTRODUCTION (GİRİŞ)

Technological progress has introduced new possibilities in camera design. The evolution has seen a transition from traditional single-lens reflex cameras to digital versions (DSLRs), with a current shift toward mirrorless models. Despite this evolution, the unique capability of interchangeable lenses continues to make DSLR cameras indispensable in both scientific and industrial applications.

The core design of DSLR cameras incorporated a mirror system that enabled users to view scenes directly through an eyepiece before redirecting light to the image sensor. While this traditional design had limitations, particularly for video capture, the advent of mirrorless systems offered a solution by providing simultaneous scene capture and digital preview capabilities. However, despite the

advantages of mirrorless technology, it has not entirely replaced mirror-based systems.

Though eliminating the mirror simplifies the DSLR camera structure, it presents new challenges. Digital previews cannot perfectly replicate the optical viewing scene, with limitations in conveying scene characteristics such as contrast accurately. Additionally, mirrorless systems face difficulties in viewing in bright sunlight. These limitations highlight the need for an innovative optical solution that combines the benefits of mirrorless design while maintaining true optical viewing capabilities [1-6].

Diffractive optical elements have begun to be used in many applications due to their design freedoms and advantages over refractive lenses. It is expected to replace refractive optics in the future. Diffractive optics in common aperture optical systems have begun to be designed and - have the potential to

create solutions for many electro-optical systems soon. DSLR camera design is a well-known common aperture design problem in the literature. Although optical structures such as beam splitters or mirrors are used in common aperture designs, better solutions may be produced with the advantages of diffractive optics [7-12].

Based on the literature, Bauer et al. [1] explored the design of electronic viewfinders using freeform optics, focusing on a mirrorless configuration with an OLED-based (organic light-emitting diode) display. In a follow-up study, Bauer et al. [2] developed a similar viewfinder with an OLED-based display and five reflective surfaces, also in a mirrorless configuration. Hamed et al. [6] examined optical viewfinders, presenting a detailed table of the limitations of digital optical viewfinders. Lim et al. [13] investigated mechanical mirror systems aimed at improving mirror speed. Additionally, Yoon et al. [14] compared DSLRs and digital cameras, analyzing image capture through mirrored structures versus faster digital systems. While both mirrorless and mirrored approaches have their respective advantages and drawbacks, a gap exists in the literature. This study aims to address that gap by proposing a design approach that combines the fast scene-capturing capability of mirrorless DSLRs with the ability to produce an exact image of the scene, without conversion, as seen in mirrored DSLRs. In this study, a novel DSLR camera design approach is proposed, using a common aperture with a diffractive optical element. With this proposed design approach, a mirrorless DSLR camera with an eyepiece design has been developed without any mirror or OLED components.

2. THEORETICAL BACKGROUND (TEORİK ALTYAPI)

Fresnel Zone Plates (FZPs) consist of alternating opaque and transparent concentric rings. When designed precisely, each ring contributes to achieving the desired focus, enabling FZPs to operate similarly to refractive lenses. FZPs can be classified as Phase FZPs (PFZPs) and Amplitude FZPs (AFZPs) depending on how these concentric rings interact at the focal point. Because they have

a higher diffraction efficiency than amplitude types, PFZPs are favored in many applications and are good substitutes for conventional refractive lenses. A 2-level PFZP was chosen for this study due to its higher diffraction efficiency and less computational time [8-12].

The simple working principle of a DSLR camera is shown in Figure 1. The scene is common in both the eyepiece and sensor. While taking a photograph, the mirror closes the eyepiece and the radiation coming from the scene directly falls onto the sensor. The picture of the scene seen by the eye is captured on the sensor.

The mirror configuration can be redesigned by using the two regional diffractive optical elements. The two regional behaviors of the diffractive lens make it possible to focus the scene into two different paths. With this method, scene radiation will be able to reach both the sensor and the eye at the same time. The application of this method offers a new design approach for DSLR cameras [5, 6].

2.1. Optical Model Of DSLR Design Approach

(DSLR Tasarım Yaklaşımının Optik Modeli)

The proposed design approach modifies the traditional DSLR camera configuration in several key ways. The first is the pentaprism and mirror are removed. Second, the diffractive lens is inserted into the optical system. The advantages of the new design modification offer several benefits. First, it eliminates the need for complex optical elements like the pentaprism and second, it removes design constraints associated with the traditional mirror structure in DSLR cameras.

The new configuration maintains similar functionality to a standard DSLR camera while potentially offering a more streamlined and simplified design. By replacing conventional optical components with diffractive optical elements, the approach may lead to more compact or efficient camera systems. The simplified working diagram is shown in Figure 2.

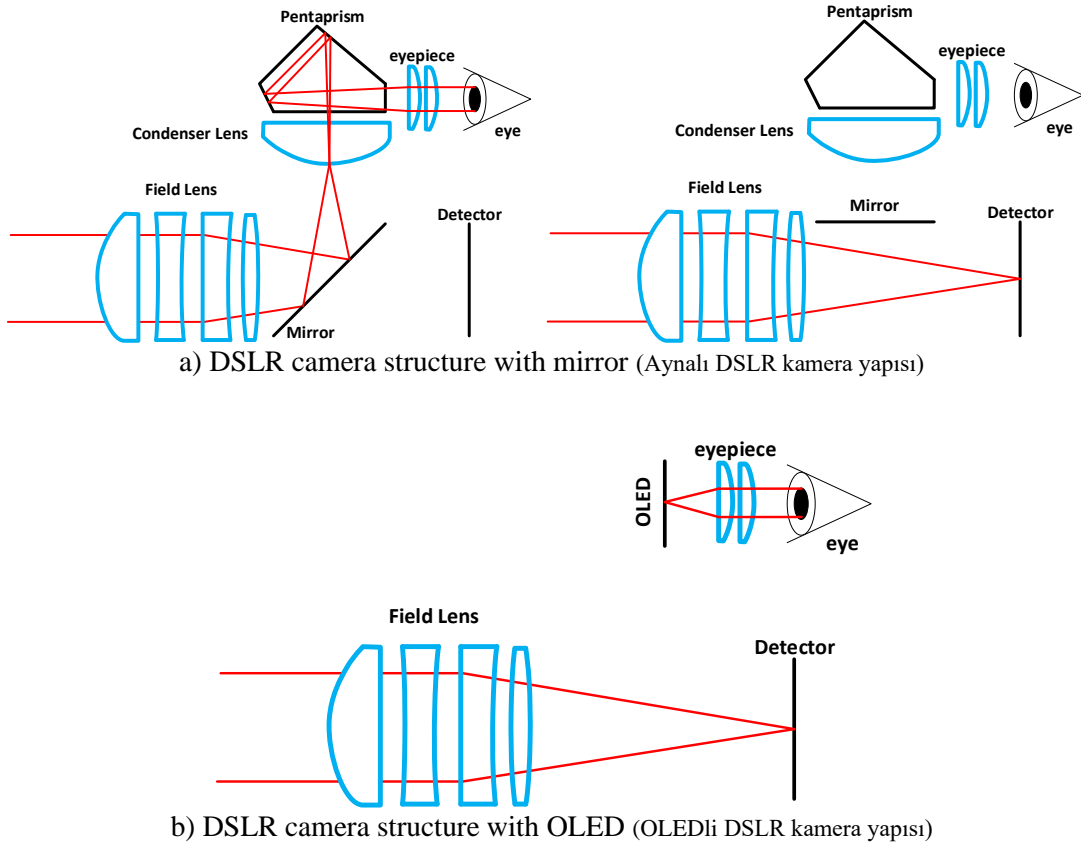


Figure 1. Optical configuration of the DSLR camera. Scene radiation falls directly onto the mirror after passing the field lens. According to the position of the mirror, the radiation falls on the sensor or eyepiece. By the moving mirror, the field seen by the eye is directly saved on the sensor. Based on the mirror's position in the system, the left in a) image represents the scene as viewed through the viewfinder, while the right image in a) represents the scene as captured by the sensor. b) depicts the mirrorless DSLR configuration. The scene is generated digitally on the OLED display and seen by the eye with the eyepiece. (DSLR kameranın optik yapılandırması. Sahne radyasyonu, alan merceğinden geçtikten sonra doğrudan aynaya düşer. Aynanın konumuna göre radyasyon, sensör veya göz merceğine düşer. Hareket eden ayna sayesinde, gözün gördüğü alan doğrudan sensöre kaydedilir. Sistemdeki aynanın konumuna bağlı olarak, a)'daki soldaki görüntü, vizörden görülen sahneyi temsil ederken, a)'daki sağdaki görüntü, sensör tarafından yakalanan sahneyi temsil eder. b) aynasız DSLR yapılandırmasını tasvir eder. Sahne, OLED ekranda dijital olarak üretilir ve göz merceğiyle göz tarafından görülür.)

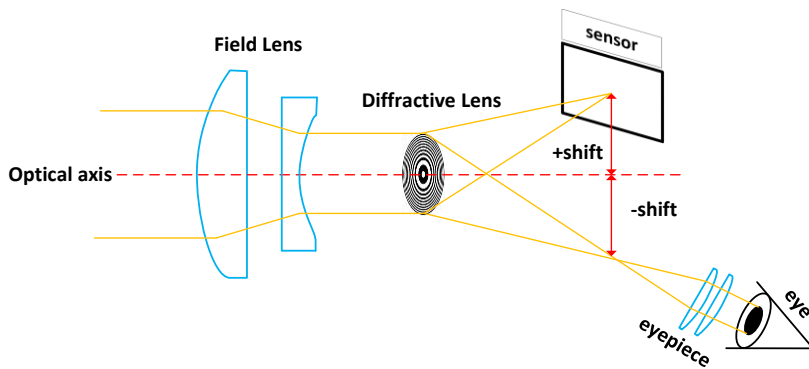


Figure 2. Working principle of the proposed DSLR camera design approach with two regional diffractive lens. The scene radiation directly falls on the field lens. After passing the field lens the radiation falls directly on the diffractive lens. The diffractive lens splits the beam in two ways. One directly falls on the sensor. The second way falls directly on the eye. By this method, the beam is split into two ways. The diffractive lens behaves like a focusing beam splitter. (Önerilen iki bölgesel kırınımlı lensli DSLR kamera tasarım yaklaşımının çalışma prensibi. Sahne radyasyonu doğrudan alan lensine düşer. Alan lensini geçtikten sonra radyasyon doğrudan

kırınımlı lense düşer. Kırınımlı lens ışını iki şekilde böler. Biri doğrudan sensöre düşer. İkinci yol doğrudan göze düşer. Bu yöntemle ışın iki şekilde bölünür. Kırınımlı lens odaklama ışın ayırıcı gibi davranır.)

2.2. Optical Model of Diffractive Lens

(Kırınımlı Lensin Optik Modeli)

Scalar diffraction theory offers two key approximations, Fresnel and Fraunhofer which are widely applicable across various optical systems. These approximations provide analytical and numerical methods for studying wave distributions in both near-field (Fresnel) and far-field conditions (Fraunhofer). The mathematical foundation for these analyses is the Huygens-Fresnel integral, which can be expressed in terms of a Fourier Transform when using the Fresnel approximation. The approximation is defined as follows [7, 20].

$$I(x, y) = \frac{e^{ikd}}{i\lambda d} e^{i\pi \frac{x^2+y^2}{\lambda d}} \mathfrak{F} \left\{ I'(x', y') e^{i\frac{\pi}{\lambda d}((x')^2+(y')^2)} \right\} \quad (1)$$

In the case of uniform plane wave illumination, the amplitude distribution remains the same between the source plane and the lens plane, with only a phase difference present. Over typical propagation distances, this phase difference becomes insignificant as the wave travels through and before the lens plane. The propagation geometry is shown in Figure 3 with source, lens, and image planes [19,20].

The thickness of each phase level corresponds roughly to the wavelength of the light. This property allows for a simplified calculation method using an aperture function, enabling a one-step propagation approach. Mathematically, this can be expressed using the Fourier Transform and the diffractive optical element's aperture function [21].

By applying this one-step propagation method to the optical system's geometry, we can efficiently calculate both the amplitude distribution in the image plane (using the Fresnel approximation) and its corresponding angular spectrum.

$$I(x, y) = \frac{1}{i\lambda d} \mathfrak{F}^{-1} \left[\mathfrak{F} \{ A(x', y') \} e^{ikd \sqrt{1-(\lambda x')^2-(\lambda y')^2}} \right] \quad (2)$$

The Huygens-Fresnel integral operates within specific constraints defined by the Fresnel approximation. The applicability of this approximation is determined by the Fresnel number, which serves as a quantitative measure for the validity range of the approximation in optical wave propagation scenarios [7, 11, 22].

$$N_F = \frac{a^2}{\lambda d} \quad (3)$$

The applicability of the Fresnel approximation is determined by the Fresnel number. A Fresnel number below 1 indicates ideal conditions for applying the approximation. However, the approximation remains reliable for Fresnel numbers as high as 20 or 30. The phase Fresnel zone plate is designed with varying material thicknesses in different regions. These thicknesses can be calculated using the following formula and the structure of the phase Fresnel zone is defined in Figure 4 [7, 11].

$$t_l = \frac{(l-1/2)}{L} \frac{\lambda}{(n-1)} \quad (4)$$

In equations 1, 2, 3, and 4, the following symbols are used.

$\mathfrak{F}\{ \}$	: 2D Fourier Transform
$I'(x', y')$	: amplitude distribution in the source plane
$I(x, y)$	: amplitude distribution in the image plane
d	: distance between source and image plane
λ	: wavelength
N_F	: Fresnel number
a	: radius of a circular lens aperture
t_l	: lth level thickness
n	: refractive index of the material
l	: phase Fresnel subzone level
L	: total level of the phase Fresnel zone plate

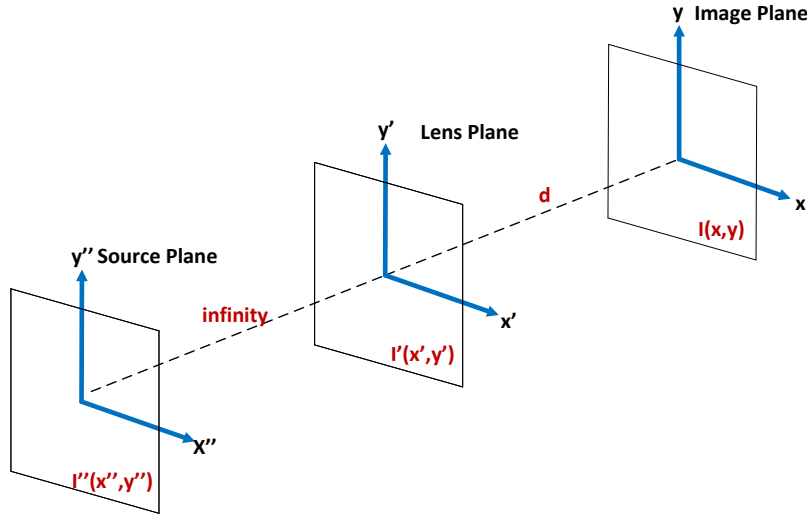


Figure 3. Optical wave propagation geometry. The geometry is the two step wave propagation geometry.

In the first propagation, the beam propagates from the source plane to the lens plane. In the second propagation, the beam propagates from the lens plane to the image plane. $I(x, y)$, $I'(x', y')$, and $I''(x'', y'')$ are the amplitude distribution in the image plane, in the lens plane, and in the source plane respectively.

(Optik dalga yayılım geometrisi. Geometri iki adımlı dalga yayılım geometrisidir. İlk yayılımda, ışın kaynak düzleminde mercek düzlemine doğru yayılır. İkinci yayılımda, ışın mercek düzleminde görüntü düzlemine doğru yayılır. $I(x, y)$, $I'(x', y')$, ve $I''(x'', y'')$ sırasıyla görüntü düzlemindeki, mercek düzlemindeki ve kaynak düzlemindeki genlik dağılımıdır.)

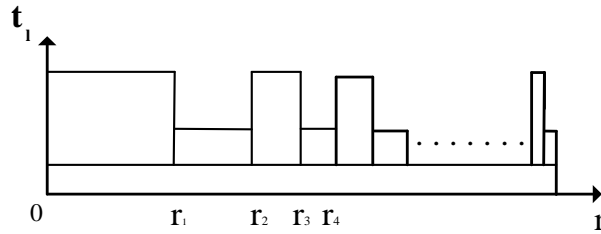


Figure 4. 2-Level Phase Fresnel zone plate material structure. The structure has been showed on a substrate material. (2-Seviyeli Faz Fresnel bölge plaka malzeme yapısı. Yapı bir alttaş malzemesinde gösterilmiştir.)

2.3. Optical Model Of Combined Diffractive

Lens

(Birleştirilmiş Kırınımlı Lensin Optik Modeli)

The regional diffractive lens consists of two separate regions: a central region corresponding to the sensor and an outer region corresponding to the eye. Each region requires distinct parameter calculations to define its aperture function. These parameters depend on the specific focal lengths, wavelengths, and the number of phase Fresnel zones and subzones. Consequently, the overall aperture function is obtained by combining the individual aperture functions of the central and outer regions. The mathematical expressions for the aperture functions of these regions are presented in Equations 5 and 6.

In the equations 5 and 6, the following symbols are used.

$A_{central}(x', y')$	: aperture function of the central region
$A_{outer}(x', y')$	: aperture function of the outer region
S	: total number of phase Fresnel zones of the outer region
N	: total number of phase Fresnel zones of the central region
$shift$	: focus shift in the x direction
r_l	: 1 th phase Fresnel zone radius
r_{l-1}	: (l-1)th phase Fresnel zone radius
D_{out}	: diameter of the outer region
D_{cen}	: diameter of the central region
$circ(x', y')$	: circular function [10,11]

$$A_{central}(x', y') = \left[\sum_{l=1}^{N \times L} \exp\left(-i2\pi \frac{l-1/2}{L}\right) \left\{ \text{circ}\left(\frac{x'+\text{shift}}{r_l}, \frac{y'}{r_l}\right) - \text{circ}\left(\frac{x'+\text{shift}}{r_{l-1}}, \frac{y'}{r_{l-1}}\right) \right\} \right] \left[\text{circ}\left(\frac{x'}{D_{cen}/2}, \frac{y'}{D_{cen}/2}\right) \right] \quad (5)$$

$$A_{outer}(x', y') = \left[\sum_{l=N \times L}^{S \times L} \exp\left(-i2\pi \frac{l-1/2}{L}\right) \left\{ \text{circ}\left(\frac{x'-\text{shift}}{r_l}, \frac{y'}{r_l}\right) - \text{circ}\left(\frac{x'-\text{shift}}{r_{l-1}}, \frac{y'}{r_{l-1}}\right) \right\} \right] \left[\text{circ}\left(\frac{x'}{D_{out}/2}, \frac{y'}{D_{out}/2}\right) - \text{circ}\left(\frac{x'}{D_{cen}/2}, \frac{y'}{D_{cen}/2}\right) \right] \quad (6)$$

3.SIMULATIONS AND RESULTS (SİMÜLASYONLAR ve BULGULAR)

The analysis of two regional (central and outer) diffractive optical elements was conducted using MATLAB software, employing optical wave propagation techniques. Rather than using a two-step wave propagation approach, the simulation applied propagation methods directly to the lens structures. The investigation was limited to a single wavelength for verification purposes. Tables 1 and 2 provide a comparison between the diffractive

optical lens parameters and their equivalent ideal lens counterparts.

The sampling parameters were carefully selected to comply with the Nyquist sampling criteria, ensuring appropriate sampling parameters in both the spatial domain for the lens and the spatial frequency domain for the image planes. To evaluate the effectiveness of the design, comparisons were made between the proposed approach and discrete ideal lenses with matching optical characteristics. The simulation results are shown in Figure 5 and Figure 6.

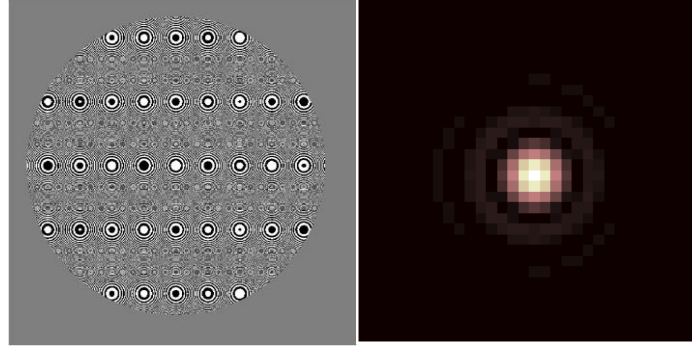
Table 1. Optical parameters of the central region with equivalent ideal lens (Eşdeğer ideal mercek ile merkezi bölgenin optik parametreleri)

	Parameters	Value
Central Region	Focal length (f)	100 mm
	Wavelength (λ)	550 nm
	Distance (d)	100 mm
	Fresnel Number (N_F)	454
	Number of Phase Fresnel Zones (N)	1536
	shift	8 mm
Ideal Lens	Focal length (f)	100 mm
	Wavelength (λ)	550 nm
	Distance (d)	100 mm
	Diameter (D_{cen})	10 mm

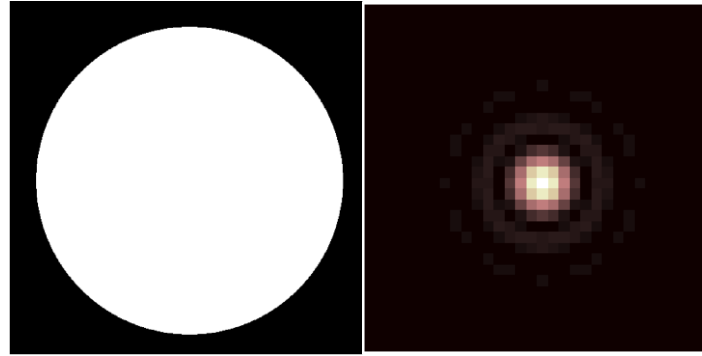
Table 2. Optical parameters of the outer region with equivalent ideal lens (Eşdeğer ideal mercek ile dış bölgenin optik parametreleri)

	Parameters	Value
Outer Region	Focal length (f)	100 mm
	Wavelength (λ)	550 nm
	Distance (d)	100 mm

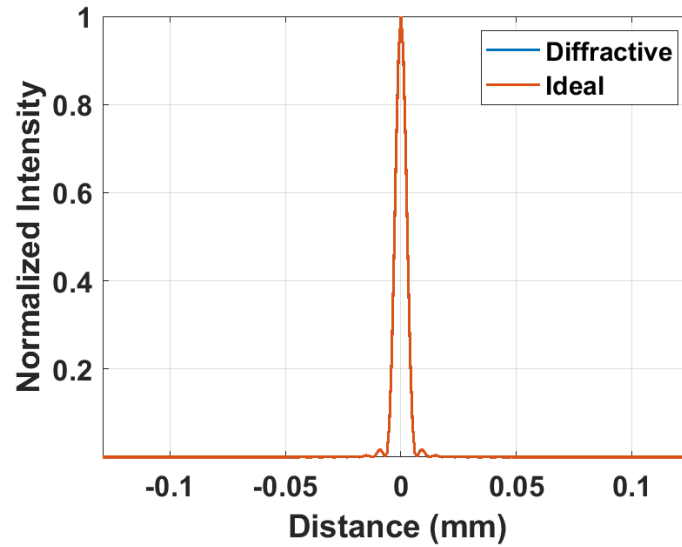
	Fresnel Number (N_F)	891
	Number of Phase Fresnel Zones (S)	2045
	shift	-8 mm
Ideal Lens	Focal length (f)	100 mm
	Wavelength (λ)	550 nm
	Distance (d)	100 mm
	Diameter (D_{out})	14 mm



a) The aperture function of the central region and its shifted focus. (Merkezi bölgenin açıklık fonksiyonu ve kaydırılmış odak noktası.)

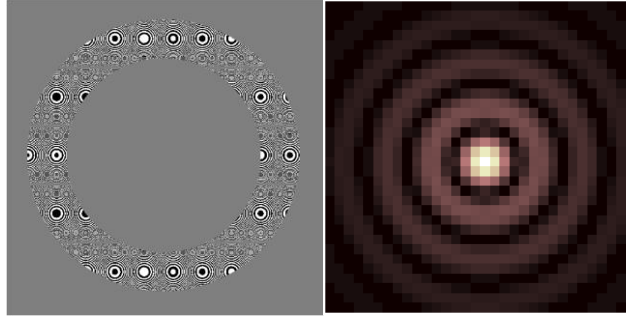


b) The aperture function of the equivalent ideal lens and its on axis focus. (Eşdeğer ideal merceğin açıklık fonksiyonu ve eksen üzerindeki odak noktası.)

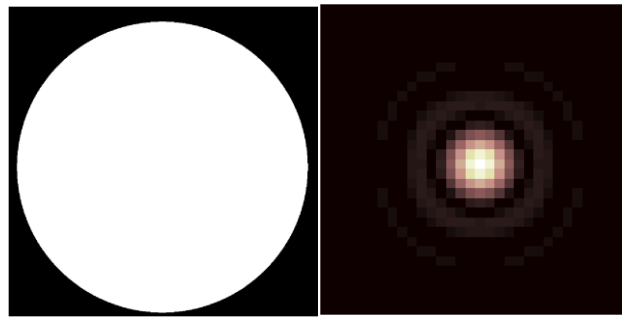


c) Comparison of the 1D intensity distributions of the diffractive lens and its equivalent ideal lens. (Kırınımlı mercek ve eşdeğer ideal merceğin 1D yoğunluk dağılımlarının karşılaştırılması.)

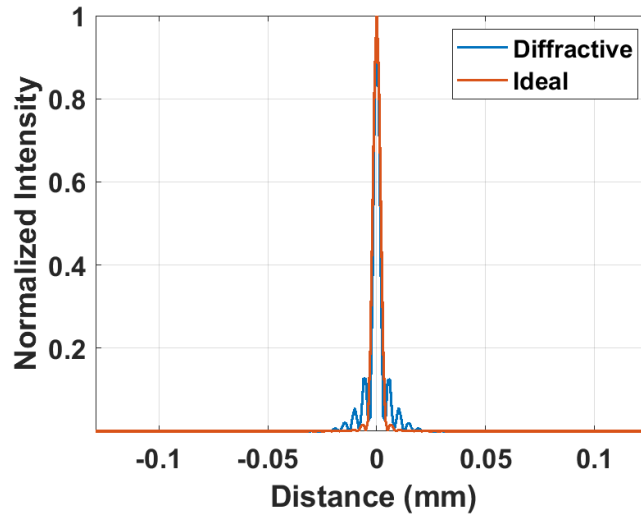
Figure 5. Simulation results of the central region and its equivalent on axis ideal lens. The ideal lens parameters were taken similarly with the diffractive lens in order to make a reasonable comparison as shown in Table 1. (Merkez bölgenin ve eksen üzerindeki ideal eşdeğer merceğin simülasyon sonuçları. İdeal merceğin parametreleri, Tablo 1'de gösterildiği gibi makul bir karşılaştırma yapmak için kırınımlı mercekle benzer şekilde alındı.)



a) Aperture function of the outer region and its focus. (Dış bölgenin açıklık fonksiyonu ve odağı.)



b) Aperture function of the equivalent ideal lens and its on axis focus. (Eşdeğer ideal merceğin açıklık fonksiyonu ve eksen üzerindeki odak noktası)



c) Comparison of the 1D intensity distributions of the diffractive lens and its equivalent ideal lens.

(Kırınımlı mercekle ve eşdeğer ideal merceğin 1D şiddet dağılımlarının karşılaştırılması)

Figure 6. Simulation results of the outer region with equivalent ideal lens. The ideal lens parameters were taken similarly with the diffractive lens in order to make a reasonable comparison as shown in Table 2. (Eşdeğer ideal mercekle dış bölgenin simülasyon sonuçları. İdeal merceğin parametreleri, Tablo 2'de gösterildiği gibi makul bir karşılaştırma yapmak için kırınımlı mercekle benzer şekilde alındı.)

4. DISCUSSION (TARTIŞMA)

Simulation results are presented in two figures: one depicting the central sensor focus region of the DSLR camera design, and another showing the outer eyepiece region (Figures 5 and 6 respectively)

Analysis reveals that the diffractive lens's central region performs comparably to an ideal lens with similar characteristics. However, the outer region exhibits different behavior, notably an increase in secondary maxima within the intensity distribution pattern. This divergence can be attributed to the circular obstruction present in the lens design, which amplifies these secondary maxima effects. The spatial resolution of both the sensor and the eye-view component of the optical system can be determined using the Rayleigh resolution criterion [15]. The radius of the airy disc sets the spatial resolution limit of an electro-optical system, as expressed by the following formula.

$$r_R = 1.22\lambda F_{\#} \quad (7)$$

Using the equation, the spatial resolution of the inner part of the DOE at the focal point is 6.7 μm , while the outer part achieves a spatial resolution of 4.8 μm . The spatial resolution is directly related to the F# of the DOE. To achieve lower spatial resolution, either the diameter of the DOE can be increased, or the focal length can be reduced. The parameters in this study are determined to validate the accuracy of the proposed design approach for this novel DSLR camera. Additionally, adjustments can be made for different sensor sizes or spatial resolutions by modifying the "shift" parameters listed in Tables 1 and 2 accordingly and F#. For high-resolution sensors, such as those with a pixel size of 2–3 μm , an F# of 3 or 4 can be achieved by increasing the diameter to approximately 30 mm or decreasing the focal length to 30 mm as an example. Therefore the parameters of the diffractive lens can be adjusted according to the sensor.

The research focused on demonstrating the viability of a common aperture DSLR design using just one wavelength as a simplified test case. While this initial proof of concept was limited to a single wavelength, the optical system can be adjusted and enhanced for different wavelengths across the visible spectrum. The same design principles with optimization techniques could be applied to accommodate other visible wavelengths [23-25]. In this research, it is chosen to verify the design

approach with only one wavelength to reduce complexity and provide a clear initial validation.

The methodology developed in this research extends beyond DSLR cameras to potentially benefit various devices, including smartphones, ultimately enhancing user experience. Although the verification process specifically focused on DSLR cameras, the principles can be adapted for any optical system requiring an eyepiece. Besides these, the common aperture design proposed here can also be generalized for applications where different spectral bands are used together [26].

This study successfully validated a novel design approach for DSLR cameras incorporating diffractive optical elements, overcoming previous limitations. The versatility of this design methodology makes it applicable to a broad range of electro-optical systems that utilize eyepieces, demonstrating its potential impact beyond just camera technology.

5. CONCLUSION (SONUÇ)

The novel optical design method for Digital Single Lens Reflex Camera (DSLR) introduced in this research removes the need for complicated lens systems typically associated with eyepieces, presenting an innovative alternative. The results of the designs were verified by comparing them with ideal lenses with similar optical parameters.

The proposed design approach eliminates the drawbacks of mirrored and digital structures that recreate the image used in eyepieces.

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)

Ahmet ÜNAL: He conducted the simulations, analyzed the results and performed the writing process.

Simülasyonları 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] A. Bauer and J. P. Rolland, "Design of a freeform electronic viewfinder coupled to aberration fields of freeform optics," (2015), *Opt. Express* 23, 28141-28153 <https://doi.org/10.1364/OE.23.028141>
- [2] A. Bauer, M. Pesch, J. Muschaweck, F. Leupelt, and J. P. Rolland, (2019), "All-reflective electronic viewfinder enabled by freeform optics," *Opt. Express* 27, 30597-30605 <https://doi.org/10.1364/OE.27.030597>
- [3] A. Bauer and J. P. Rolland, (2014), "Visual space assessment of two all-reflective, freeform, optical see-through head-worn displays," *Opt. Express* 22, 13155-13163 <https://doi.org/10.1364/OE.22.013155>
- [4] A. H. Incekara, D. Z. Seker, A. Delen, and A. Acar, Investigating The Suitability Of Mirrorless Cameras In Terrestrial Photogrammetric Applications, (2017), "ISPRS Annals of the Photogrammetry", Remote Sensing and Spatial Information Sciences, IV-4/W4, 259--262, DOI 10.5194/isprs-annals-IV-4-W4-259-2017
- [5] J. M. Ryu, G. M. Gang, H. K. Lee, K. Lee, M. Heu, and J. H. Jo, (2015), "Optical Design and Fabrication of a Large Telephoto Zoom Lens with Fixed f/2.8 and Light Autofocus Lens", *J. Opt. Soc. Korea* 19, 629-637, <https://opg.optica.org/josk/abstract.cfm?URI=josk-19-6-629>
- [6] S. Hamed, M. J. A. A. Salama, and M. M. M. Hassan, (2022), "Developments of the viewfinder system in digital photographic cameras", 7, 4, 834-849, Arab Association for Islamic Civilization and Art, DOI : 10.21608/mjaf.2021.91869.2464
- [7] A. Ünal, (2023), "Frequency selective diffractive optical element (FSDOE)", *Proc. SPIE* 12518, Window and Dome Technologies and Materials XVII, 125180C; <https://doi.org/10.1117/12.2657048>
- [8] A. Ünal, (2024), "Analytical and numerical fresnel models of phase diffractive optical elements for imaging applications.", *Opt Quant Electron* 56, 960 <https://doi.org/10.1007/s11082-024-06906-6>
- [9] A. Ünal, (2024), "Electro-optical system, imaging infrared and laser range finder, design with dual squinted combined lens for aerial targets". *J Opt.* <https://doi.org/10.1007/s12596-024-02057-9>
- [10] A. Ünal, (2023), "Semi-active laser seeker design with combined diffractive optical element (CDOE)". *J Opt* 52, 956–968 <https://doi.org/10.1007/s12596-022-00954-5>
- [11] A. Ünal, (2023), "Laser seeker design with multi-focal diffractive lens", *Eng. Res. Express* 5 045014, DOI 10.1088/2631-8695/ad0024
- [12] A. Ünal, (2024), "Dual mode, imaging infrared and semi-active laser, seeker design with squinted combined diffractive optical element". *J Opt* <https://doi.org/10.1007/s12596-024-01657-9>
- [13] S. Lim, B. H. Ko, K. S. Park, et al. (2012), "Design of mirror system in digital single lens reflex camera for high-speed continuous shooting", *Microsyst Technol* 18, 1487–1496. <https://doi.org/10.1007/s00542-012-1578-x>
- [14] B. S. Yoon, and T.R. Anderson, (2014), "Comparison of Technological Performance between Digital Single-Lens Reflex Cameras and Mirrorless Cameras", *Advances in Business and Management Forecasting (Advances in Business and Management Forecasting, Vol. 10)*, Emerald Group Publishing Limited, Leeds, pp. 55-71, <https://doi.org/10.1108/S1477-407020140000010015>
- [15] D. Atwood, (2000) *Soft X-Rays and Extreme Ultraviolet*, Cambridge University Press
- [16] L. N. Hazra, Y. Han, C.A. Delisle, Kinoform lenses: (1995), "Sweatt model and phase function", *Optics Communications*, Volume 117, Issues 1–2, Pages 31-36, [https://doi.org/10.1016/0030-4018\(95\)00071-F](https://doi.org/10.1016/0030-4018(95)00071-F)
- [17] L. Hazra and C. A. Delisle, (1997), "Higher order kinoform lenses: diffraction efficiency and aberrational properties," *Optical Engineering* 36(5), <https://doi.org/10.1117/1.601375>
- [18] L. N. Hazra, Y. Han, C. Delisle, (1992), "Curved kinoform lenses for stigmatic imaging of an axial object at infinity", *Optics Communications*, Volume 90, Issues 4–6, Pages 201-206, [https://doi.org/10.1016/0030-4018\(92\)90260-X](https://doi.org/10.1016/0030-4018(92)90260-X)
- [19] J. W. Goodman, (1996), *Introduction to Fourier Optics*, Second Edition, McGraw-Hill Series
- [20] R. E. Blahut, (2004), *Theory of Remote Image Formation*, Cambridge University Press

- [21] J. D. Schmidt, (2010), "Numerical Simulation of Optical Wave Propagation With examples in MATLAB", SPIE Press
- [22] T. W. N. Dickinson, (2016), "Simulation, Design, and Test of Square, Apodized Photon Sieves for High-Contrast, Exoplanet Imaging". Theses and Dissertations. <https://scholar.afit.edu/etd/336>
- [23] Y. Peng, (2018), "Computational Imaging with Diffractive Optics", A Thesis Submitted In Partial Fulfillment Of The Requirements For the Degree Of Doctor Of Philosophy, The University of British Columbia April DOI : 10.14288/1.0365608
- [24] Y. Peng, Q. Fu, F. Heide, W. Heidrich, (2016), "The Diffractive Achromat: Full Spectrum Computational Imaging with Diffractive Optics" ACM Trans. Graph. 35, 4, Article 31 (July 2016), <https://doi.org/10.1145/2897824.2925941>
- [25] X. Zhang, Z. Yang, T. Sun, H. Yang, K. Han, B. Hu, (2017), "Optical system design with common aperture for mid-infrared and laser composite guidance," Proc. SPIE 10256, Second International Conference on Photonics and Optical Engineering, 102560S doi: 10.1117/12.2256433
- [26] Barış, M., Metin, F. C., Karabulut, N. K., Özyücel, F. Ö. (2018). 8-125 MM KOLEMANİT CEVHERİNİN NIR/CCD OPTİK AYIRICI İLE ZENGİNLEŞTİRİLMESİ. Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology, 6(2), 414-425. <https://doi.org/10.29109/http-gujsc-gazi-edu-tr.344767>



An Arbitrage Study with Wind-Solar-BESS Hybrid Power Plant

Eren GÜZ¹ , Kübra Nur AKPINAR^{1*} 

¹Marmara University, Vocational School of Technical Sciences, Department of Electrical&Energy, Istanbul, Türkiye

Article Info

Research article
Received: 23/05/2024
Revision: 22/10/2024
Accepted: 04/02/2025

Keywords

Battery energy storage
system (BESS)
Energy arbitrage
Energy storage
Hybrid energy systems

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 23/05/2024
Düzeltilme: 22/10/2024
Kabul: 04/02/2025

Anahtar Kelimeler

Batarya Enerji Depolama
Sistemleri (BESS)
Enerji Arbitrajı
Enerji Depolama
Melez Enerji Sistemleri

Graphical/Tabular Abstract (Grafik Özet)

This study analyzes the economic feasibility of integrating a Battery Energy Storage System (BESS) into a wind-solar hybrid power plant in Türkiye, demonstrating that energy arbitrage enhances profitability with an 8-year amortization period. / Bu çalışma, Türkiye'de bir rüzgar-güneş hibrit santraline BESS entegrasyonunun ekonomik uygulanabilirliğini analiz etmekte ve enerji arbitrajının 8 yıllık geri ödeme süresi ile kârlılığını artırdığını göstermektedir.

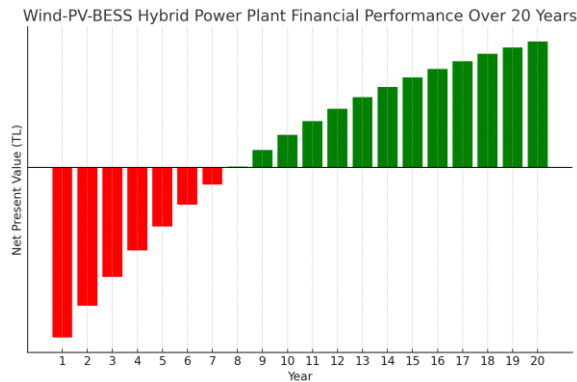


Figure A: Wind-Solar-BESS Hybrid Power Plant Financial Performance Over 20 Years / Şekil A: Rüzgar-Güneş-BESS Melez Güç Santrali 20 Yıllık Finansal Performansı

Highlights (Önemli noktalar)

- The integration of a Battery Energy Storage System (BESS) with a hybrid wind-solar power plant enhances profitability by enabling energy arbitrage. / Batarya Enerji Depolama Sistemi (BESS) ile hibrit rüzgar-güneş santralinin entegrasyonu, enerji arbitrajı yoluyla kârlılığını artırmaktadır.
- Market Clearing Price (MCP) analyses indicate that storing energy during low-price hours and selling during peak-price hours optimizes financial returns. / Piyasa Takas Fiyatı (PTF) analizleri, düşük fiyatlı saatlerde enerji depolamanın ve yüksek fiyatlı saatlerde satış yapmanın finansal getirileri optimize ettiğini göstermektedir.
- A one-year analysis of arbitrage scenarios resulted in an additional revenue of 5,872,081 TL, with an overall impact of 1.81%. / Bir yıllık arbitraj senaryoları analizi, 5.872.081 TL ek gelir sağlamış ve toplamda %1,81'lik bir etki yaratmıştır.
- Net Present Value (NPV) analysis confirms an amortization period of 8 years for the 40 MWh BESS. / Net Bugünkü Değer analizi, 40 MWh BESS için 8 yıllık bir amortisman süresini doğrulamaktadır.

Aim (Amaç): This study aims to analyze the economic impact of integrating a BESS into a wind-solar hybrid power plant for energy arbitrage in Türkiye. / Bu çalışma, Türkiye'de bir rüzgar-güneş hibrit santraline BESS entegrasyonunun enerji arbitrajı açısından ekonomik etkisini analiz etmeyi amaçlamaktadır.



Originality (Özgünlük): This research provides one of the first detailed analyses of BESS-based arbitrage in Türkiye's hybrid renewable energy market. / Bu çalışma, Türkiye'nin hibrit yenilenebilir enerji piyasasında BESS tabanlı arbitraj üzerine yapılan ilk detaylı analizlerden birini sunmaktadır.

Results (Bulgular): The study demonstrates that arbitrage with a BESS increases the profitability of hybrid power plants, with revenue gains varying by season. / Çalışma, BESS ile yapılan arbitrajın hibrit enerji santrallerinin kârlılığını artırdığını ve gelir artışlarının mevsimsel olarak değiştiğini göstermektedir.

Conclusion (Sonuç): Integrating BESS into hybrid wind-solar power plants in Türkiye proves economically viable, with a payback period of 8 years and a positive revenue impact. / Türkiye'de hibrit rüzgar-güneş santrallerine BESS entegrasyonu ekonomik olarak uygulanabilir olup, 8 yıllık geri ödeme süresi ve olumlu bir gelir etkisi sağlamaktadır.



An Arbitrage Study with Wind-Solar-BESS Hybrid Power Plant

Eren GÜZ¹ , Kübra Nur AKPINAR^{1*} 

¹Marmara University, Vocational School of Technical Sciences, Department of Electrical&Energy, Istanbul, Türkiye

Article Info

Research article
Received: 23/05/2024
Revision: 22/10/2024
Accepted: 04/02/2025

Keywords

Battery energy storage
system (BESS)
Energy arbitrage
Energy storage
Hybrid energy systems

Abstract

Today, the demand for energy is increasing due to reasons such as technological advancements, population growth, industrialization, and globalization. The insufficiency and exhaustibility of fossil resources are enhancing the use and importance of renewable energy sources. Hybrid energy systems have been developed to make better use of renewable energy sources. Solutions that effectively employ several sources are known as hybrid systems. In many areas with sufficient potential for wind and solar energy, the implementation of hybrid energy systems is of great importance. In this study, under the conditions in Türkiye, scenarios will be examined in which a battery energy storage system (BESS) is installed in a wind-solar hybrid power plant. The scenarios involve storing energy during hours when energy prices are low and selling both the production from the hybrid plant and the energy stored in the BESS to the electricity market during hours when energy prices are high. It is shown that, the integration of the BESS significantly enhanced the profitability of the hybrid power plant, yielding an additional 5,872,081 TL in revenue over nearly a year, with an overall revenue impact of 1.81%. Specifically, the BESS contributed 1,745,374 TL in summer (2.11% impact), 1,420,917 TL in autumn (1.54%), 1,814,786 TL in winter (2.15%), and 891,004 TL in spring for just 2 months (1.38%). With a 20-year battery lifespan, the Net Present Value (NPV) analysis confirms an 8-year amortization period.

Rüzgâr-Güneş-BEDS Melez Güç Santrali ile Bir Arbitraj Çalışması

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 23/05/2024
Düzeltilme: 22/10/2024
Kabul: 04/02/2025

Anahtar Kelimeler

Batarya Enerji Depolama
Sistemleri (BEDS)
Enerji Arbitrajı
Enerji Depolama
Melez Enerji Sistemleri

Öz

Günümüzde teknolojik gelişmeler, nüfus artışı, sanayileşme ve küreselleşme gibi faktörler nedeniyle enerji talebi artmaktadır. Fosil kaynakların yetersizliği ve tükenebilirliği, yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımını ve önemini artırmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynaklarının daha verimli kullanılmasını sağlamak amacıyla melez enerji sistemleri geliştirilmiştir. Birden fazla kaynağın etkin bir şekilde kullanıldığı çözümler melez sistemler olarak adlandırılmaktadır. Rüzgâr ve güneş enerjisi potansiyelinin yeterli olduğu birçok bölgede melez enerji sistemlerinin uygulanması büyük önem taşımaktadır. Bu çalışmada, Türkiye koşulları altında, bir rüzgâr-güneş melez enerji santraline batarya enerji depolama sistemi (BEDS) entegrasyonu senaryoları incelenmiştir. Senaryolar, enerji fiyatlarının düşük olduğu saatlerde enerjinin depolanması ve melez santral üretimi ile birlikte BEDS'te depolanan enerjinin, enerji fiyatlarının yüksek olduğu saatlerde elektrik piyasasına satılmasını içermektedir. Çalışma sonucunda, BEDS entegrasyonunun melez santralin kârlılığını önemli ölçüde artırdığı gösterilmiş, yaklaşık bir yıl içinde ek 5.872.081 TL gelir elde edilmiş ve toplam gelir üzerinde %1,81 oranında bir etki sağlanmıştır. Özellikle BEDS'in katkısı yaz aylarında 1.745.374 TL (%2,11), sonbaharda 1.420.917 TL (%1,54), kış aylarında 1.814.786 TL (%2,15) ve ilkbaharda yalnızca 2 ayda 891.004 TL (%1,38) olarak gerçekleşmiştir. Yirmi yıllık batarya ömrü dikkate alındığında, Net Bugünkü Değer (NPV) analizi, 8 yıllık bir amortisman süresini doğrulamaktadır.

1. INTRODUCTION (GİRİŞ)

According to the report by the International Energy Agency (IEA), while the world currently has a primary energy demand expressed as 14 million tons of oil equivalent (Mtoe), this demand is expected to increase by 45% over the next 20 years, reaching 20.3 billion Mtoe [1-3]. The depletion of fossil fuel energy sources, their environmental

impacts, and concerns over global warming have led the world to seek innovative energy sources. Developing countries are increasing their interest in renewable energy sources to reduce their dependency on external energy. Renewable energy sources are becoming increasingly attractive due to their environmental friendliness and inexhaustibility compared to fossil fuels. According to statistical data, the average annual increase in

demand for renewable energy over the past fifty years is approximately five times higher compared to other energy sources [4].

Although each country's energy demand varies, the global demand for energy is increasing year by year [1]. Türkiye's installed capacity has also increased over the years, in line with the global trend. While Türkiye's installed capacity has increased over the years, there has also been an increase in installed capacity by primary sources [5]. This increase in installed power capacity has been rapid due to factors such as the rise in private sector investments, the removal of bureaucratic barriers, the provision of necessary incentive mechanisms, the reduction of energy dependency, and government policies, and it is expected to continue to increase in the future. In the Turkish National Energy Plan report by the Ministry of Energy and Natural Resources, it is stated that the share of renewable energy sources is projected to gradually increase to 61.4% by 2053, within the forecasts for 2035-2053 [6].

The Regulation on Storage Activities in the Electricity Market, published in the Official Gazette on May 9, 2021, and numbered 31479, has paved the way for storage investments in Türkiye [7]. Within the scope of the regulation, a total of 5,968 pre-license applications for wind and solar with storage, exceeding 260,000 MW in installed capacity, were received for the 2023-2028 connection capacities announced by TEIAS. Regulation on Storage Activities in the Electricity Market states, "The amount of energy that integrated electricity storage units within power plants with storage-based electricity generation facilities will provide to the system on a settlement period basis cannot exceed the production amount that can be made with the electrical installed capacity stated in the license of the power plant". While the storage of electrical energy is beneficial, it also presents a high-cost investment. Since there is no precedent in Türkiye, our study has been concluded based on the assumption that a BESS installation suitable for the example hybrid energy system and the clause stating that it will not exceed the existing installed capacity in the regulation has been made.

A hybrid power plant is a facility where two or more power generation plants provide energy to the grid together. Renewable energy sources, due to generating energy from natural phenomena, cannot provide continuous and uninterrupted energy supply to the system. In wind turbines, since the wind does not blow at the same speed and direction continuously, electricity production will not be the

same every hour at the existing capacity. In solar power plants, solar radiation will not be provided consistently to the grid due to various parameters such as the angle of sunlight, sunshine durations, day and night conditions, and summer and winter variations.

In today's world, due to high energy demand, studies on storing energy and supplying it to the grid from this storage system when needed are increasing both in Türkiye and globally. Especially the irregularity of energy produced from renewable sources has highlighted the necessity of providing energy to the grid in a more regular and suitable manner. While a wind power plant has the capacity to generate electricity even when it is not needed, instead of cut-off the plant and decreasing the energy production, storing it in a BESS during non-essential times and supplying it to the grid when needed would be a more optimal solution.

Energy arbitrage involves purchasing electricity during periods of low prices and selling it when prices are high. Specifically, the Battery Energy Storage System (BESS) is charged during times of low demand, leading to lower prices, and discharged during periods of high demand, which results in higher prices. This service relies on the BESS to store energy for extended periods [8]. Consequently, BESS can provide benefits both to the system owner and the grid by mitigating high electricity prices by supplying energy during peak demand periods, which typically correspond to higher energy costs [9].

The suitability of different Energy Storage System (ESS) types varies based on the specific application. For instance, the effectiveness of various storage methods may depend on the timescale of storage (short-term versus long-term) and the energy return on investment. [10] Lithium-ion batteries are generally the most suitable type of BESS for arbitrage due to several key factors [11]. They have a high energy density, allowing them to store more energy compared to other battery types and feature a more compact design [12]. Additionally, their long cycle life enables them to withstand numerous charge-discharge cycles, making them more economical in the long run [13]. Lithium-ion batteries also offer high efficiency in energy conversion processes, which aids in achieving greater profits from arbitrage strategies [14]. Their fast charging and discharging capabilities allow them to quickly respond to rapid price changes in the energy market, making them ideal for arbitrage [15]. Furthermore, they are flexible and suitable for both small and large-scale energy storage projects,

with applications across various scenarios. These attributes make lithium-ion batteries the most advantageous option for arbitrage applications. In this study Li-ion battery type is preferred to integrate to the hybrid power plant. However, investment decisions should always consider project requirements, cost analysis, and long-term strategic goals.

One of the main challenges in integrating renewable energy into the power system is its inconsistency and variability due to weather conditions. Solar energy production fluctuates with sunlight, while wind energy varies with wind speed, leading to irregular power output. BESS for energy arbitrage provide a crucial solution by enabling the purchase of electricity at low prices and its sale at high prices. This approach maximizes economic benefits, supports grid stability, and enhances the integration of solar and wind energy sources. Many researches have been made recently with the common aim of demonstrating the positive effects of BESS on energy arbitrage. In [16] techno-economic analysis of a grid-scale battery providing energy arbitrage is performed. By applying a cycle-counting degradation model, they found that battery degradation significantly impacts the profitability of BESS, leading to a yearly net profit reduction in the range of 13–24%. In [17], a grid-connected hybrid energy system was designed to meet the electricity needs of the industrial zone in İzmir. Considering annual emission values and unit electricity cost criteria, it was concluded that the most efficient system is the battery-integrated hybrid energy system design. The system design reduced the unit electricity cost to \$0.0730 and decreased annual emission values related to electricity consumption by 82%. In [18] different arbitrage strategies from the literature, such as seasonal, statistical, and neural networks-based models are compared for Colombian electricity market. In the study conducted by Hu et al, the aim was to analyze the potential utilization of BESS in the major European electricity markets. According to their results battery systems with a 1 MWh capacity are currently not feasible for energy arbitrage in European electricity markets. [19]. In [20], it is demonstrated that participating in the Single Electricity Market (SEM) alone is not profitable for BESS on the island of Ireland. However, the

proposed methodology under a stacked revenues arrangement can enhance BESS revenues. This study aims to explore the benefits of BESS arbitrage within Türkiye's specific conditions and regulatory framework. The contribution of this study is its pioneering research on energy arbitrage in Türkiye using solar, wind, and BESS. It provides practical information for BESS arbitrage by leveraging Türkiye's energy market regulations. The study delivers a comprehensive analysis of integrating solar and wind energy with BESS for effective energy arbitrage, assessing the economic benefits specific to Türkiye's energy market. This research will benefit various stakeholders by enhancing revenue opportunities for energy producers, informing regulatory authorities on supportive frameworks, improving reliability and potentially reducing costs for energy consumers, offering investment insights to investors.

2. EXAMINATION OF TÜRKİYE MARKET CLEARING PRICES (MCP) (TÜRKİYE PİYASA TAKAS FİYATLARININ (PTF) İNCELENMESİ)

In the study, it is assumed that a hybrid power plant with 44.4 MW wind energy, 40 MW solar energy, and an 80 MW battery energy storage system is established under the conditions in Türkiye. An arbitrage study will be applied to the hybrid power plant to examine its effects on costs. According to the regulation, the amount of energy provided from the BESS cannot exceed the total installed capacity of wind and solar power stated in the power plant's license, so a BESS with the same installed capacity as the existing hybrid power plant is chosen. All calculations in the continuation of the study are based on these installed capacities.

Firstly, the production trend of the hybrid power plant is examined. The energy data for the PV-Wind hybrid power plant system, downloaded from Türkiye open-source electricity market transparency platform, is shown in Figure 1 [21]. A sample production graph for 3 months is shown below. The production of the solar power plant starts at 07:00, reaches its peak at 12:00, and then decreases until 18:00. The production graph of the wind power plant, on the other hand, does not show significant fluctuations, and it is determined that it provides stable production.

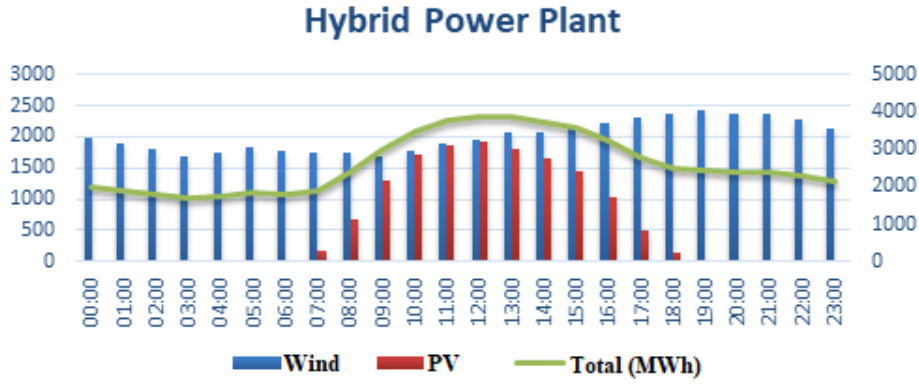


Figure 1. An Example of a Hybrid Power Plant Production Graph (Melez Bir Güç Santraline Ait Üretim Grafiği Örneği)

Secondly, an analysis of market clearing prices was conducted. An essential factor in executing energy arbitrage is predicting future market behavior to maximize potential profits. As seen in Figure 2, prices in the free market are always higher during peak hours [22]. This is due to the high level of demand between 18:00 and 23:00, when energy consumption from industrial and commercial establishments is complemented by household energy demand. Daytime and nighttime prices are relatively close to each other, with one sometimes being slightly lower or higher than the other.

month period should be stored and the hours during which it should be sold [22]. (Figure 2) By storing the energy produced during the day or night and selling both the generated and stored energy during high-demand hours, it is possible to maximize profits. To support the argument mentioned above, average energy prices since 2019 have been examined, broken down by daytime, peak, and night periods. In Figure 3, it is observed that in 2019, unlike in previous years, the prices during the peak period exceeded the average daytime prices [22]. Nighttime prices remained below both the daytime and peak period prices.

Based on the analyses, it is forecasted the hours during which the energy produced over a four-

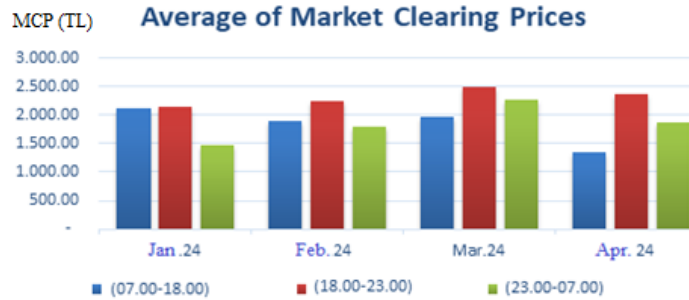


Figure 2. EPIAS, Market Clearing Prices Day-Peak-Night Price Formation Examination (EPIAŞ Piyasa Takas Fiyatları (PTF) Gündüz-Tepe-Gece Fiyat Oluşumunun İncelenmesi)

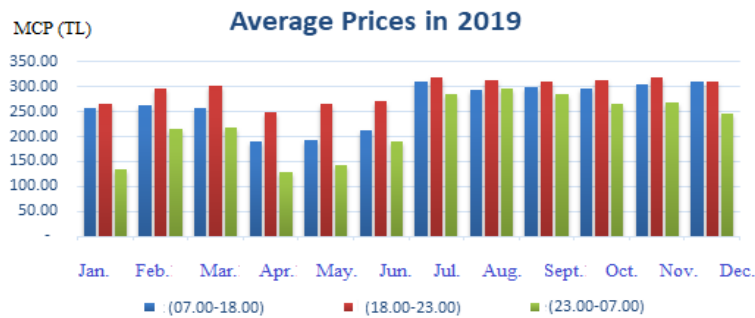


Figure 3. Average Market Clearing Prices in 2019 received from EPIAS Transparency Platform (2019 Yılı Ortalama Piyasa Takas Fiyatları (PTF) – EPIAŞ Şeffaflık Platformu Verileri)

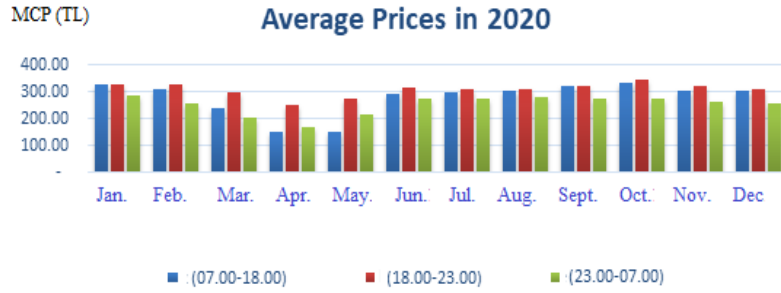


Figure 4. Average Market Clearing Prices in 2020 received from EPIAS Transparency Platform (2020 Yılı Ortalama Piyasa Takas Fiyatları (PTF) – EPIAŞ Şeffaflık Platformu Verileri)

In Figure 4, the effect observed in 2019 is also seen in 2020 [22]. Peak period prices exceeded the average daytime prices, while nighttime prices remained below both the daytime and peak period prices. However, due to the impact of the pandemic in 2020, nighttime prices were observed to be higher than daytime prices. Nonetheless, peak period prices were higher than both daytime and nighttime prices.

In Figure 5, the impact of the pandemic is also observed in 2021 [22]. However, starting from the summer months, increases in energy demand, inflation, and exchange rates led to a rise in energy prices. Nonetheless, the primary area of focus is the consistent pattern of high peak prices and low nighttime prices, supporting the above argument. Therefore, storing energy at night and selling it during peak hours will maximize profits.

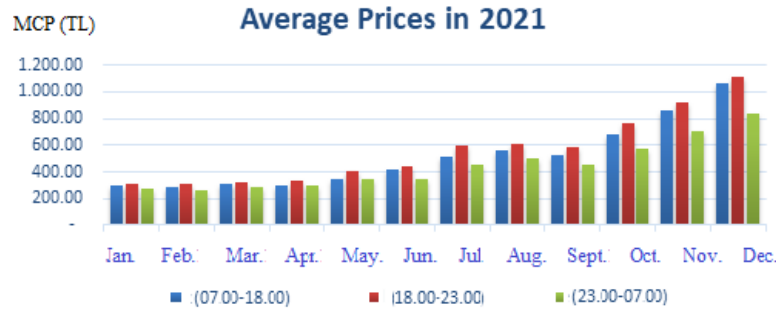


Figure 5. Average Market Clearing Prices in 2021 received from EPIAS Transparency Platform (2021 Yılı Ortalama Piyasa Takas Fiyatları (PTF) – EPIAŞ Şeffaflık Platformu Verileri)

In Figure 6, the global impacts, and inflationary pressures in 2022 led to even higher energy prices [22]. Despite this, as seen in the graph, daytime

prices remain lower than peak period prices. Nighttime prices are consistently the lowest.

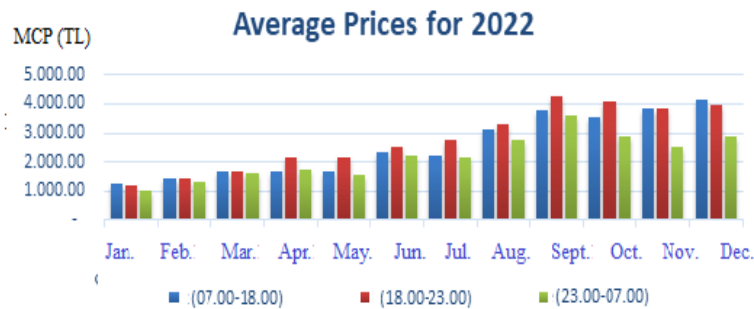


Figure 6. Average Market Clearing Prices in 2022 received from EPIAS Transparency Platform (2022 Yılı Ortalama Piyasa Takas Fiyatları (PTF) – EPIAŞ Şeffaflık Platformu Verileri)

In Figure 7, the resolution of the crisis in natural gas power plants in 2023 led to a relaxation in prices [22]. However, as always, nighttime prices remain low, and peak period prices are high.

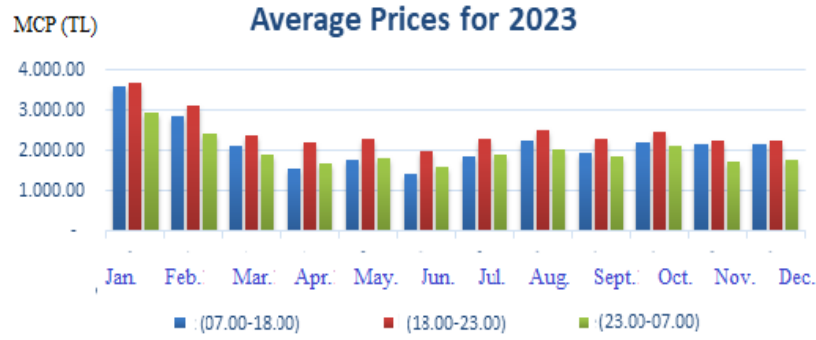


Figure 7. Average Market Clearing Prices in 2023 received from EPIAS Transparency Platform (2023 Yılı Ortalama Piyasa Takas Fiyatları (PTF) – EPIAŞ Şeffaflık Platformu Verileri)

When looking at the daytime-peak-night prices in Figure 8 in past years, nighttime prices are always low, while peak period prices are high [22]. Therefore, storing energy generated at night and selling it during peak hours will maximize profits. Energy storage and sales scenarios will be developed accordingly.

In Figure 8 the average production of the hybrid plant is shown for daytime-peak-night hours [22]. It

is evident that the consumption during daytime hours is always higher when considering wind and solar production. Based on this, it can be assumed that a portion of daytime production and all or part of nighttime production can be stored in the BESS, taking advantage of lower prices. Consequently, during peak hours when prices are high, both energy sales from the BESS and production from the plant can be sold to the electricity market.

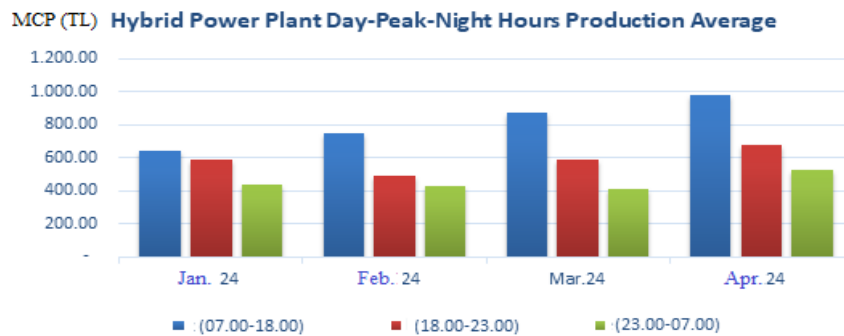


Figure 8. Daytime-peak-night Electricity Prices of 2024 (2024 Yılı Gündüz-Tepe-Gece Elektrik Fiyatları)

3. HYBRID ENERGY POWER PLANT ARBITRAGE SCENARIOS (MELEZ ENERJİ SANTRALI ARBITRAJ SENARYOLARI)

According to the arbitrage scenarios, the energy produced during the hours when the power plant operates at lower costs will be stored in the BESS instead of being sold to the market. During the peak hours, defined as 18:00 - 23:00, the stored energy will be sold. The storage process will begin at midnight when the prices are relatively lower. Depending on the production of the hybrid plant, which consists of wind and solar power, the charging time for the BESS will be determined, typically being 2 hours or longer. The assumed installed capacity of the hybrid plant is 44.4 MW for

wind and 40 MW for solar. Batteries will primarily be charged with wind energy overnight, but in cases where wind power is insufficient, the charging process will continue throughout the day with the contribution of solar power. In this study, a degradation-unaware model has been used for the BESS. As a result, the effects of degradation from rapid charging/discharging required for like frequency support, as well as the impact of temperature changes on battery life, have not been considered. Battery efficiencies were selected based on the literature on battery technologies in general [23,24]. Fantham's experimental calculations of efficiency using the Open Circuit Voltage (OCV) method for batteries in a 2 MW BESS system found an average efficiency of 95.9934% for lithium

batteries [25]. In [15] which included energy arbitrage, the efficiency of lithium batteries was estimated to be around 90% based on various references. The calculations will be as follows:

- Starting from midnight, the BESS will begin to charge, and the energy produced by the hybrid plant will not be sold to the market until the BESS is fully charged at 80 MW. The excess energy will be sold to the market.
- The stored energy in the BESS will be sold to the market during the peak hours (18:00 - 23:00) with a 90% efficiency rate.
- No energy will be sold to the market while the BESS is being charged.

$$\text{Battery Charge Status} = \text{Previous Charge Status} + \text{Charged Energy} - \text{Produced Energy} \quad (1)$$

$$\text{Energy Stored in the Battery} = (\text{Charged Energy} \times \text{Efficiency}) \times \text{Charging Time} \quad (2)$$

Where, previous charge status means the charge status of the BESS in the previous hour, charged energy means the amount of energy charged by the power plant, produced energy represent the amount of energy produced by the hybrid plant, efficiency is taken as the efficiency of energy storage in the BESS, charging time is account for the time taken to charge the BESS in (1) and (2). While energy is stored in the BESS, there will be no sales to the market in (3) and (4). Sales from the BESS will be calculated with (5) during peak hours.

$$\text{Total Revenue}_1 = \text{Total Production} \times \text{MCP} \quad (3)$$

$$\text{Total Revenue}_2 = (\text{Total Production} - \text{Energy Stored in Battery}) \times \text{MCP} \quad (4)$$

$$\text{Battery Energy Revenue} = \text{Energy Stored in Battery} \times \text{MCP} \quad (5)$$

Table 1. An arbitrage scenario for January 3, 2024. (3 Ocak 2024 tarihine ait bir arbitraj senaryosu)

Hour	Total Energy (MWh)	Wind	PV	Batt. Charge	Batt. Discharge	MCP (TL/MWh)	Total Revenue (TL)	Total Revenue -BESS	Batt. Revenue (TL)
00:00	-	-	-	-		2,325.00	-	-	-
01:00	4.76	4.76	-	4.76		2,248.00	10,700.48	-	-
02:00	1.23	1.23	-	1.23		2,188.00	2,691.24	-	-
03:00	4.03	4.03	-	4.03		2,188.00	8,817.64	-	-
04:00	1.25	1.25	-	1.25		2,098.00	2,622.50	-	-
05:00	1.98	1.98	-	1.98		1,449.98	2,870.96	-	-
06:00	8.14	8.14	-	8.14		1,349.99	10,988.92	-	-
07:00	3.87	3.87	-	3.87		2,110.66	8,168.25	-	-
08:00	4.69	3.29	1.40	4.69		2,649.00	12,423.81	-	-
09:00	15.40	-	15.40	15.40		2,690.02	41,426.31	-	-
10:00	15.40	-	15.40	15.40		2,379.99	36,651.85	-	-
11:00	28.38	-	28.38	19.25		2,288.00	64,933.44	20,889.44	-
12:00	30.75	-	30.75			1,349.99	41,512.19	41,512.19	-
13:00	30.74	-	30.74			1,449.99	44,572.69	44,572.69	-
14:00	27.61	-	27.61			2,146.78	59,272.60	59,272.60	-
15:00	24.50	4.20	20.30			2,288.01	56,056.25	56,056.25	-
16:00	24.14	11.64	12.50			2,380.00	57,453.20	57,453.20	-
17:00	22.19	20.33	1.86			2,600.00	57,694.00	57,694.00	-
18:00	31.12	31.12	-		14.40	2,594.00	80,725.28	80,725.28	37,353.60
19:00	36.34	36.34	-		14.40	2,299.98	83,581.27	83,581.27	33,119.71
20:00	35.31	35.31	-		14.40	1,968.00	69,490.08	69,490.08	28,339.20
21:00	38.11	38.11	-		14.40	2,288.01	87,196.06	87,196.06	32,947.34
22:00	36.62	36.62	-		14.40	2,185.01	80,015.07	80,015.07	31,464.14
23:00	26.82	26.82	-			1,998.00	53,586.36	53,586.36	-
							973,450.44	792,044.49	163,224.00
								Profit and Loss	- 18,181.96

In Scenario 2, the date March 4, 2024, was examined in Table 2. Due to the low energy production of the hybrid plant, the BESS was charged until 11:00, and no energy was sold to the market. When this stored energy was sold to the

system during peak hours, a loss of 11,054,38 TL was incurred. If this energy had been sold directly to the system without being stored, this loss would not have occurred.

Table 2. An arbitrage scenario for March 4, 2024 (4 Mart 2024 tarihine ait bir arbitraj senaryosu)

Hour	Total Energy (MWh)	Wind	PV	Batt. Charge	Batt. Dis-charge	MCP (TL/ MWh)	Total Revenue (TL)	Total Revenue -BESS	Batt. Revenue (TL)
00:00	2.64	2.64	-	2.64		2,200.01	5,808.03	-	-
01:00	2.57	2.57	-	2.57		2,245.00	5,769.65	-	-
02:00	1.90	1.90	-	1.90		2,278.98	4,330.06	-	-
03:00	0.38	0.38	-	0.38		2,200.00	836.00	-	-
04:00	-	-	-	-		2,100.00	-	-	-
05:00	-	-	-	-		2,243.00	-	-	-
06:00	-	-	-	-		2,278.99	-	-	-
07:00	0.86	-	0.86	0.86		2,300.00	1,978.00	-	-
08:00	8.60	-	8.60	8.60		2,690.00	23,134.00	-	-
09:00	19.22	-	19.22	19.22		2,612.12	50,204.95	-	-
10:00	27.09	-	27.09	27.09		2,340.28	63,398.19	-	-
11:00	25.37	-	25.37	16.74		2,393.91	60,733.50	20,659.44	-
12:00	19.80	0.94	18.86			2,098.99	41,560.00	41,560.00	-
13:00	15.97	1.29	14.68			2,199.00	35,118.03	35,118.03	-
14:00	6.95	0.93	6.02			1,997.18	13,880.40	13,880.40	-
15:00	17.31	-	17.31			2,097.00	36,299.07	36,299.07	-
16:00	17.13	-	17.13			2,278.98	39,038.93	39,038.93	-
17:00	2.74	-	2.74			2,549.01	6,984.29	6,984.29	-
18:00	0.47	-	0.47		14.40	2,649.01	1,245.03	1,245.03	38,145.74
19:00	-	-	-		14.40	2,690.00	-	-	38,736.00
20:00	0.08	0.08	-		14.40	2,690.00	215.20	215.20	38,736.00
21:00	2.17	2.17	-		14.40	2,502.00	5,429.34	5,429.34	36,028.80
22:00	2.28	2.28	-		14.40	2,280.00	5,198.40	5,198.40	32,832.00
23:00	4.48	4.48	-			2,186.00	9,793.28	9,793.28	-
							410,954.34	215,421.42	184,478.54
								Profit and Loss	- 11,054.38

In the third scenario, the date June 6, 2023, was examined in Table 3. Due to high energy production by the BESS at 00:00 and 01:00, it was fully charged within 2 hours. When this stored energy was sold to the system during peak hours, a loss of 31,119.28 TL was incurred. If this energy had been sold directly to the system without being stored, this

loss would not have occurred. Upon examining the cause of the loss, it can be observed that the MCP during the charging periods was 2,188.22 TL and 2,059.08 TL, while the prices during the sales were 1,699.99, 1,775.01, 2,134.28, 2,299.98, and 1,756.97 respectively, resulting in selling energy to the market at lower prices.

Table 3. An arbitrage scenario for June 6, 2023. (6 Haziran 2023 tarihine ait bir arbitraj senaryosu)

Hour	Total Energy (MWh)	Wind	PV	Batt. Charge	Batt. Dis-charge	MCP (TL/ MWh)	Total Revenue (TL)	Total Revenue -BESS	Batt. Revenue (TL)
00:00	43.26	43.26	-	43.26		2,188.22	94,662.40	-	-
01:00	42.56	42.56	-	36.74		2,059.08	87,634.44	11,983.85	-
02:00	43.25	43.25	-			1,600.00	69,200.00	69,200.00	-
03:00	43.31	43.31	-			1,133.60	49,096.22	49,096.22	-
04:00	43.31	43.31	-			1,600.00	69,296.00	69,296.00	-

05:00	39.92	39.92	-			1,348.99	53,851.68	53,851.68	-
06:00	31.86	31.86	-			1,133.60	36,116.50	36,116.50	-
07:00	42.92	42.92	-			1,000.00	42,920.00	42,920.00	-
08:00	44.35	44.35	-			1,349.00	59,828.15	59,828.15	-
09:00	44.98	44.98	-			1,700.00	76,466.00	76,466.00	-
10:00	45.48	45.48	-			1,249.99	56,849.55	56,849.55	-
11:00	45.48	45.48	-			1,133.59	51,555.67	51,555.67	-
12:00	45.43	45.43	-			750.00	34,072.50	34,072.50	-
13:00	44.89	44.89	-			980.00	43,992.20	43,992.20	-
14:00	44.84	44.84	-			1,249.99	56,049.55	56,049.55	-
15:00	45.30	45.30	-			1,250.00	56,625.00	56,625.00	-
16:00	44.68	44.68	-			1,348.98	60,272.43	60,272.43	-
17:00	43.92	43.92	-			1,600.01	70,272.44	70,272.44	-
18:00	34.65	34.65	-		14.40	1,699.99	58,904.65	58,904.65	24,479.86
19:00	23.39	23.39	-		14.40	1,775.01	41,517.48	41,517.48	25,560.14
20:00	15.07	15.07	-		14.40	2,134.28	32,163.60	32,163.60	30,733.63
21:00	15.17	15.17	-		14.40	2,299.98	34,890.70	34,890.70	33,119.71
22:00	8.56	8.56	-		14.40	1,756.97	15,039.66	15,039.66	25,300.37
23:00	5.03	5.03	-			1,348.98	6,785.37	6,785.37	-
							1,258,062.19	1,087,749.19	139,193.71
								Profit and Loss	- 31,119.28

In Scenario 4, the date November 1, 2023, was examined in Table 4. The BESS was charged at 00:00 and 10:00. When this stored energy was sold to the system during peak hours, a profit of 10,831.09 TL was obtained. The fact that the MCP

was 2700 TL during peak hours seems to have contributed to this additional profit. It appears that a higher price was obtained during peak hours compared to the price at which the BESS was charged during the night.

Table 4. An arbitrage scenario for November 1, 2023 (1 Kasım 2023 tarihine ait bir arbitraj senaryosu)

Hour	Total Energy (MWh)	Wind	PV	Batt. Charge	Batt. Discharge	MCP (TL/MWh)	Total Revenue (TL)	Total Revenue -BESS	Batt. Revenue (TL)
00:00	1.19	1.19	-	1.19		2,498.19	2,972.85	-	-
01:00	1.40	1.40	-	1.40		2,294.18	3,211.85	-	-
02:00	4.28	4.28	-	4.28		2,155.99	9,227.64	-	-
03:00	1.97	1.97	-	1.97		2,000.00	3,940.00	-	-
04:00	1.46	1.46	-	1.46		1,754.64	2,561.77	-	-
05:00	1.98	1.98	-	1.98		1,685.00	3,336.30	-	-
06:00	0.99	0.99	-	0.99		1,999.46	1,979.47	-	-
07:00	2.34	2.34	-	2.34		1,999.12	4,677.94	-	-
08:00	3.40	3.40	-	3.40		2,700.00	9,180.00	-	-
09:00	4.08	4.08	-	4.08		2,700.00	11,016.00	-	-
10:00	4.33	4.33	-	4.33		2,666.65	11,546.59	-	-
11:00	15.37	15.37	-	15.37		2,394.19	36,798.70	-	-
12:00	18.07	18.07	-	18.07		2,094.19	37,842.01	-	-
13:00	18.07	18.07	-	18.07		2,345.81	42,388.79	-	-
14:00	21.34	21.34	-	1.07		2,700.00	57,618.00	54,729.00	-
15:00	25.69	25.69	-			2,700.00	69,363.00	69,363.00	-
16:00	24.47	24.47	-			2,700.00	66,069.00	66,069.00	-
17:00	18.35	18.35	-			2,700.00	49,545.00	49,545.00	-
18:00	19.99	19.99	-		14.40	2,700.00	53,973.00	53,973.00	38,880.00

19:00	16.98	16.98	-		14.40	2,700.00	45,846.00	45,846.00	38,880.00
20:00	11.92	11.92	-		14.40	2,700.00	32,184.00	32,184.00	38,880.00
21:00	8.98	8.98	-		14.40	2,700.00	24,246.00	24,246.00	38,880.00
22:00	6.58	6.58	-		14.40	2,700.00	17,766.00	17,766.00	38,880.00
23:00	5.51	5.51	-			2,498.19	13,765.03	13,765.03	-
							611,054.94	427,486.03	194,400.00
								Profit and Loss	10,831.09

The data for the summer and autumn months of 2023 has been examined. Since the solar energy part of the hybrid power plant was put into operation

from the middle of October, the contribution of solar energy production to the total revenue began to be realized from mid-October onwards.

4. RESULT ANALYSIS OF SEASONAL ENERGY ARBITRAGE (MEVSİMSEL ENERJİ ARBİTRAJİ SONUÇ ANALİZİ)

A hybrid power plant's production data and the actual market prices were analyzed between June 1, 2023, and April 30, 2024. During this period, the

BESS was charged during off-peak hours and discharged during peak hours. Below are the calculations for summer, autumn, winter, and spring in three-month periods, as well as an analysis of the calculations for the entire period. All calculations have been formulated and executed in MS Excel, which forms the basis for many programs used in energy calculations, such as RETScreen.

Table 5. Summer Season Energy Arbitrage Revenue (Yaz Mevsimi Enerji Arbitraj Geliri)

01.06.2023 – 31.08.2023 Total Revenue (Summer Season)		
Total Revenue with only from Wind-PV Hybrid Power Plant	82,681,377	
Total Revenue without BESS Charging		69,420,565
Total Revenue only from BESS		15,006,186
Total Revenue	82,681,377	84,436,752
Revenue Difference (TL)		1,745,374
Revenue Difference (%)		2.11%

In Table 5, covering the summer period from June 1, 2023, to August 31, 2023, the revenues from storing energy in the BESS and selling energy were calculated for all days. If there were no BESS system, and the hybrid plant sold the generated energy directly to the market, the revenue would have been 82,681,377 TL. The hybrid plant does not sell energy to the market during the hours when the BESS is being charged and only stores energy,

resulting in a total revenue of 69,420,565 TL during the non-storage hours. The energy stored in the BESS during the low-price night hours and sold during the peak hours resulted in an additional revenue of 15,006,186 TL. This integration of the BESS created a total additional revenue of 1,745,374 TL for the given period. Therefore, the BESS had a positive revenue impact of 2.11%.

Table 6. Autumn Season Energy Arbitrage Revenue (Sonbahar Mevsimi Enerji Arbitraj Geliri)

01.09.2023 – 30.11.2023 Total Revenue (Autumn Season)		
Total Revenue with only from Wind-PV Hybrid Power Plant	92,197,827	
Total Revenue without BESS Charging		77,708,924
Total Revenue only from BESS		15,909,820
Total Revenue	92,197,827	93,618,744
Revenue Difference (TL)		1,420,917
Revenue Difference (%)		1.54%

In Table 6, covering the autumn period from September 1, 2023, to November 30, 2023, the

revenues from energy storage and energy sales from the BESS were calculated for all days. If there were

no BESS system, the revenue generated from selling energy to the market as produced by the hybrid plant would have been 92,197,827 TL. During the hours when the BESS is being charged, the hybrid plant will not sell energy to the market but only store it. Thus, the total revenue generated, excluding the hours when energy is not sold due to storage,

amounts to 77,708,924 TL. Energy stored in the BESS during hours when night prices are low is sold to the system during peak hours, resulting in revenue of 15,909,820 TL. With the BESS, a total of 1,420,917 TL additional revenue was generated during this period. Therefore, the BESS had a positive revenue impact of 1.54%.

Table 7. Winter Season Energy Arbitrage Revenue (Kış Mevsimi Enerji Arbitraj Geliri)

01.12.2023 – 29.02.2024 Total Revenue (Winter Season)		
Total Revenue with only from Wind-PV Hybrid Power Plant	84,405,029	
Total Revenue without BESS Charging		71,500,233
Total Revenue only from BESS		14,719,582
Total Revenue	84,405,029	86,219,814
Revenue Difference (TL)		1,814,786
Revenue Difference (%)		2.15%

In Table 7, covering the winter period from December 1, 2023, to February 29, 2024, the revenues from energy storage in the BESS and energy sales from the BESS were calculated for all days. If there were no BESS system, the revenue generated from selling energy to the market as produced by the hybrid plant would have been 84,405,029 TL. The total revenue generated,

excluding the hours when energy is not sold due to storage, amounts to 71,500,233 TL. Energy stored in the BESS during hours when night prices are low is sold to the system during peak hours, resulting in revenue of 14,719,582 TL. With the BESS, a total of 1,814,786 TL additional revenue was generated during this period. Therefore, the BESS had a positive revenue impact of 2.15%.

Table 8. Spring Season Energy Arbitrage Revenue (İlkbahar Mevsimi Enerji Arbitraj Geliri)

01.03.2023 – 30.04.2024 Total Revenue (Spring Season)		
Total Revenue with only from Wind-PV Hybrid Power Plant	64,506,015	
Total Revenue without BESS Charging		54,599,653
Total Revenue only from BESS		10,797,366
Total Revenue	64,506,015	65,397,019
Revenue Difference (TL)		891,004
Revenue Difference (%)		1.38%

In Table 8, covering the spring period from March 1, 2023, to April 30, 2024, the revenues from energy storage in the BESS and energy sales from the BESS were calculated for all days. If there were no BESS system, the revenue generated from selling energy to the market as produced by the hybrid plant would have been 64,506,015 TL. When the BESS system is integrated, during the hours when the BESS is being charged, the hybrid plant will not sell energy to the market but only store it. Thus, the total revenue generated, excluding the hours when

energy is not sold due to storage, amounts to 54,599,653 TL. Energy stored in the BESS during hours when night prices are low is sold to the system during peak hours, resulting in revenue of 10,797,366 TL. With the BESS, a total of 891,004 TL additional revenue was generated during this period. Therefore, the BESS had a positive revenue impact of 1.38%. As of now, May 2024 has not yet been completed; only two months have been calculated.

Table 9. Total Energy Arbitrage Revenue (Toplam Enerji Arbitraj Geliri)

01.06.2023 – 30.04.2024 Total Revenue (Approximately One Year Period)		
Total Revenue with only from Wind-PV Hybrid Power Plant	323,790,248	
Total Revenue without BESS Charging		273,229,375
Total Revenue only from BESS		56,432,954
Total Revenue	323,790,248	329,662,329
Revenue Difference (TL)		5,872,081
Revenue Difference (%)		1.81%

In Table 9, covering approximately one year from June 1, 2023, to April 30, 2024, the revenues from energy storage in the BESS and energy sales from the BESS were calculated for all days. The total benefit amounted to 5,872,081 TL, resulting in a positive revenue impact of 1.81%.

When arbitrage through integrating the BESS into the hybrid plant was examined on selected days across four seasons, it was observed that both profits and losses occurred. The most significant factor was found to be related to market trading prices, whether low or high, along with the duration of charging spread across hours, affecting the potential for losses. These analyses were based on actual production and prices; thus, scenarios were employed in the study. However, other models for maximizing revenue, such as storing and selling at different prices or solely storing and participating in the Balancing Market on the following day, utilizing the dispatch center's available capacity, can also be explored, or implemented. Additionally, the seasonal effect, not often observed, was evident in this study where price was more influential. Instances of low production or maintenance periods of the plant were identified during the analyses.

5. ECONOMIC INDICATORS (EKONOMİK GÖSTERGELER)

This section begins by discussing the revenue generated solely from the BESS through arbitrage over approximately one year (from 2023 to 2024), as shown in Table 9 of the previous section, and proceeds to calculate the net present value (NPV) using the CAPEX (capital expenditure), which includes the investment cost of the BESS, and the OPEX (operational expenses), which covers the operation and maintenance expenses. This will allow us to evaluate the economic feasibility of the proposed system. The NPV is calculated using (6). Although CAPEX and OPEX values for BESS differ in various sources, they have been converted to Turkish Lira using the most recent exchange rate and based on the latest report published for Türkiye [26]. Table 10 provides an overview of the unit costs associated with the BESS. This summary includes key cost components such as CAPEX, OPEX, and other technical metrics relevant to the implementation and maintenance of the BESS.

Table 10. Unit Cost of the BESS System (BEDS Sisteminin Birim Maliyeti)

Technology	Lifetime	CAPEX(TL/kWh)	OPEX(TL/year)	Efficiency
Li-ion BESS	20 years	300960000.00	188100	0.90

The discount rate used in the NPV calculation is based on [27], with the value r taken as an average of 9.8%.

$$NPV = \sum_{t=1}^n \frac{R_t - C_t}{(1+r)^t} - CAPEX \quad (6)$$

Here R_t is the revenue in year t , C_t is the operating cost in year t , r is the discount rate, n is the project lifespan (20 years in this case).

To calculate the Net Present Value (NPV) for each year and determine the payback period for a system with a lifespan of 20 years, initial CAPEX of 300960000 TL, annual revenue of 56432954 TL, and given the OPEX of 188100 TL, the following assumptions were made.

- Discount Rate (r): 9.8%
- Revenue (R_i): 56,432,954 TL per year
- Operating Cost (C_i): 188100 TL per year
- Lifespan (n): 20 years
- CAPEX: 300960000TL

Table 11 presents the NPV calculations for each year is shown for 40 MWh BESS. The future value (FV) is calculated as total revenues minus OPEX. The year in which FV minus CAPEX becomes positive indicates the payback period.

Table 11. NPV Calculation (Net Bugünkü Değer Hesaplaması)

Year	BESS Revenue	BESS OPEX	BESS Revenue - BESS OPEX	BESS FV - BESS CAPEX (NPV)	(1+r) ^t
1	56432954.00	188100.00	51224821.49	-249735178.51	1.10
2	56432955.00	188100.00	46652843.72	-203082334.79	1.21
3	56432956.00	188100.00	42488929.46	-160593405.32	1.32
4	56432957.00	188100.00	38696657.76	-121896747.57	1.45
5	56432958.00	188100.00	35242858.33	-86653889.24	1.60
6	56432959.00	188100.00	32097321.45	-54556567.79	1.75
7	56432960.00	188100.00	29232533.72	-25324034.07	1.92
8	56432961.00	188100.00	26623437.38	1299403.31	2.11
9	56432962.00	188100.00	24247211.16	25546614.47	2.32
10	56432963.00	188100.00	22083070.66	47629685.13	2.55
11	56432964.00	188100.00	20112086.57	67741771.70	2.80
12	56432965.00	188100.00	18317019.06	86058790.76	3.07
13	56432966.00	188100.00	16682167.02	102740957.78	3.37
14	56432967.00	188100.00	15193230.71	117934188.49	3.70
15	56432968.00	188100.00	13837186.68	131771375.17	4.06
16	56432969.00	188100.00	12602173.89	144373549.05	4.46
17	56432970.00	188100.00	11477389.90	155850938.95	4.90
18	56432971.00	188100.00	10452996.45	166303935.41	5.38
19	56432972.00	188100.00	9520033.37	175823968.77	5.91
20	56432973.00	188100.00	8670340.20	184494308.97	6.49

The following calculation in (7) was performed to determine the payback period (PP), where Y represents the years and X represents the FV-CAPEX value. The goal is to find Y (the payback period) when X is 0, which indicates that the investment is fully paid back [28].

$$Y = \frac{Y_2 - Y_1}{X_2 - X_1} * (X - X_1) + Y_1 \quad (7)$$

$$PP = \frac{8 - 7}{(1299403.31) - (-25324034.07)} * (0 - (-25324034.07)) + 7 = 7.9512 \text{ years}$$

Based on the calculations, it has been determined that the 40 MWh BESS system connected to the PV-wind hybrid system will amortize its cost in approximately 8 years solely through energy

arbitrage. This indicates that the investment is economically viable, leveraging price fluctuations in the energy market effectively. The amortization period suggests that significant price volatility exists, allowing the system to profit from buying energy at low prices and selling it during peak periods. It also implies that the BESS system operates with high efficiency and minimal operational costs. An 8-year payback period is considered reasonable for energy investments, highlighting the project's financial attractiveness. One of the main reasons the amortization period is feasible for the investment is that the BESS does not purchase energy from the grid, as it obtains the necessary energy for charging from the solar-wind hybrid system. Additionally, this timeframe reflects favorable market conditions in Türkiye for energy arbitrage for high energy level BESSs.

6. CONCLUSIONS (SONUÇLAR)

In this study, the integration of a Battery Energy Storage System (BESS) with a photovoltaic and wind hybrid power plant in Türkiye for arbitrage purposes is examined, motivated by the Regulation on Storage Activities in the Electricity Market in Türkiye. The time intervals for arbitrage were determined by analyzing past market clearing prices. Estimated revenues were calculated for spring, summer, winter, and autumn using production data from the hybrid power plant within these determined time intervals. The integration of the BESS enhanced the hybrid power plant's profitability, generating a total additional revenue of 5,872,081 TL over nearly a year, with a positive revenue impact of 1.81%. Specifically, the BESS contributed 1,745,374 TL in summer (2.11% impact), 1,420,917 TL in autumn (1.54% impact), 1,814,786 TL in winter (2.15% impact), and 891,004 TL in spring for 2 months (1.38% impact). Additionally, for a 40 MWh battery with a 20-year lifespan, the Net Present Value (NPV) calculation indicates an amortization period of 8 years. BESS can be used for various applications, including grid frequency ancillary services, stabilizing fluctuating energy production, meeting additional energy demands, and utilizing dispatchable capacities. For effective arbitrage, management should focus on exploiting price differentials between daytime peaks and nighttime lows, storing energy during low-price periods, and selling energy during high-price periods.

This paper provides insights into the benefits of BESS arbitrage within Türkiye's specific conditions and regulatory framework. It represents one of the initial studies on energy arbitrage in Türkiye using solar, wind, and BESS technologies, offering practical insights into leveraging the country's energy market regulations. The study delivers a comprehensive analysis of integrating solar and wind energy with BESS, highlighting economic benefits. It is beneficial for stakeholders by enhancing revenue for energy producers, informing regulatory authorities, improving reliability and reducing costs for consumers, and offering investment insights.

Future research could explore the timing of arbitrage for profit maximization using artificial intelligence methods and extend the analysis to include battery degradation costs and optimization methods.

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)

Eren GÜZ: Eren GÜZ: Contributed to methodology, performed the calculations, conducted the investigation, curated the data, and wrote the original draft of the manuscript.

Yönteme katkıda bulunmuş, hesaplamaları gerçekleştirmiş, araştırmayı yürütmüş, verileri düzenlemiş ve makalenin ilk taslağını yazmıştır.

Kübra Nur AKPINAR: Contributed to conceptualization and methodology, performed the calculations, and was responsible for writing – review & editing the manuscript.

Kavramsallaştırma ve yönteme katkıda bulunmuş, hesaplamaları gerçekleştirmiş ve makalenin gözden geçirilmesi ile düzenlenmesinden sorumlu olmuştur.

CONFLICT OF INTEREST (ÇIKAR ÇATIŞMASI)

There is no conflict of interest in this study.

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

REFERENCES (KAYNAKLAR)

- [1] International Energy Agency (IEA), Electricity Market Report 2023.
- [2] World Energy Council 2021 Global Energy Report, Access: <https://www.dunyaenerji.org.tr/wpcontent/uploads/2021/04/2021-Kuresel-EnerjiRaporu-Ozeti.pdf> December 13, 2021.
- [3] Energy Sector Outlook (TSKB). <https://www.tskb.com.tr/i/assets/document/pdf/enerjisektor-gorunumu-2021.pdf> . Access: September 10, 2021.
- [4] İpek, AT İ. K., & Sekin, A. Hybrid renewable energy system design: Balıkesir example. Dicle University Faculty of Engineering Journal, 13(3), 517-529.
- [5] TEIAS, <https://www.teias.gov.tr/turkiye-elektrik-uretim-iletim-istatistikleri> Access: March 21, 2024.

- [6] Ministry of Energy and Natural Resources – Türkiye National Energy Plan 2022.
- [7] Regulation on Storage Activities in the Electricity Market, 2021.
- [8] Grimaldi, A., Minuto, F. D., Brouwer, J., & Lanzini, A. (2024). Profitability of energy arbitrage net profit for grid-scale battery energy storage considering dynamic efficiency and degradation using a linear, mixed-integer linear, and mixed-integer non-linear optimization approach. *Journal of Energy Storage*, 95, 112380.
- [9] Wu, F.-B.; Yang, B.; Ye, J.-L. Chapter 5- Integrated ESS application and economic analysis. In *Grid-Scale Energy Storage Systems and Applications*; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 2019; pp. 153–201.
- [10] J. Atherton, J. Akroyd, F. Farazi, S. Mosbach, M. Q. Lim and M. Kraft, *Energy Environ. Sci.*, 2023, 16, 4020–4040.
- [11] Terlouw, T., AlSkaif, T., Bauer, C., & Van Sark, W. (2019). Multi-objective optimization of energy arbitrage in community energy storage systems using different battery technologies. *Applied Energy*, 239, 356-372.
- [12] Abran, E., Andersson, E., & Nilsson Rova, T. (2021). Battery Storage for Grid Application: A case study of implementing a Lithium-ion storage system for power peak shaving and energy arbitrage.
- [13] Bai, Y., Wang, J., & He, W. (2022). Energy arbitrage optimization of lithium-ion battery considering short-term revenue and long-term battery life loss. *Energy Reports*, 8, 364-371.
- [14] Aktas, A., Kircicek, Y., & Ozkaymak, M. (2020). Modeling and validation analysis according to temperature effect of different type batteries. *Thermal Science*, 24(2 Part A), 1031-1043.
- [15] Pusceddu, E., Zakeri, B., & Gisse, G. C. (2021). Synergies between energy arbitrage and fast frequency response for battery energy storage systems. *Applied Energy*, 283, 116274.
- [16] Grimaldi, A., Minuto, F. D., Brouwer, J., & Lanzini, A. (2024). Profitability of energy arbitrage net profit for grid-scale battery energy storage considering dynamic efficiency and degradation using a linear, mixed-integer linear, and mixed-integer non-linear optimization approach. *Journal of Energy Storage*, 95, 112380.
- [17] Yılmaz, G., Şahin, M., Akyazı, Ö., & Öztürk, B. (2023). Şebeke Bağlantılı Hibrit Yenilenebilir Enerji Sisteminin Homer ile Ekonomik ve Çevresel Analizi: İzmir Endüstriyel Bölgesi Örneği. *Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi*, 13(3), 1090-1106.
- [18] Peñaranda AF, Romero-Quete D, Cortés CA. Grid-Scale Battery Energy Storage for Arbitrage Purposes: A Colombian Case. *Batteries*. 2021; 7(3):59. <https://doi.org/10.3390/batteries7030059>.
- [19] Hu, Y., Armada, M., & Sánchez, M. J. (2022). Potential utilization of battery energy storage systems (BESS) in the major European electricity markets. *Applied Energy*, 322, 119512.
- [20] Mohamed, A. A. R., Best, R. J., Liu, X., & Morrow, D. J. (2022). Single electricity market forecasting and energy arbitrage maximization framework. *IET Renewable Power Generation*, 16(1), 105-124.
- [21] <https://seffaflik.epias.com.tr/electricity/electricity-generation/ex-post-generation/real-time-generation>
- [22] EPIAS, <https://seffaflik.epias.com.tr/electricity/electricity-generation/ex-post-generation/real-time-generation> Access: March 27, 2024.
- [23] Cellura, S., Mazza, A., Bompard, E., & Corgnati, S. (2023). An extended approach to the evaluation of energy storage systems: a case study of Li-ion batteries. *Electronics*, 12(11), 2391.
- [24] Tharani, K. L., & Dahiya, R. (2018). Choice of battery energy storage for a hybrid renewable energy system. *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, 26(2), 666-676.
- [25] Fantham, T. L. (2021). *Experimental Analysis, Modelling and Optimisation of Large Scale Lithium-ion Batteries* (Doctoral dissertation, University of Sheffield).
- [26] <https://shura.org.tr/wp-content/uploads/2024/08/SHURA-EDM-Turkiye-icin-Batarya-Enerji-Depolama-Secenekleri-01.08.2024.pdf>
- [27] Uzunkaya, Z. C. (2012). Türkiye için ekonomik indirgeme oranı tahmini. Kalkınma Bakanlığı. Available Online: <https://www.sbb.gov.tr/wp-content/uploads/2018/11/Turkiye-Icin-Ekonomik-Indirgeme-Orani-Tahmini.pdf>
- [28] Arnberg, G. (2022). Implementation of battery energy storage systems in the Swedish electrical infrastructure. Available Online: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1695148/FULLTEXT01.pdf>

Performance investigation of a vapor compression refrigeration system with and without heat exchanger using mono and hybrid nanofluids and operated with R1234yf

Kemal SARIOĞLU¹ , Gökhan YILDIZ^{2*} 

¹Düzce University, Graduate School of Natural and Applied Sciences, Department of Mechanical Engineering, Düzce, Türkiye

²Düzce University, Düzce Vocational School, Department of Electronics and Automation, Düzce, Türkiye

Article Info

Research article

Received: 02/11/2024

Revision: 15/12/2024

Accepted: 20/12/2024

Keywords

Vapor compression
refrigeration system
Hybrid nanolubricant
Thermodynamic analysis
Environmental analysis

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi

Başvuru: 02/11/2024

Düzeltilme: 15/12/2024

Kabul: 20/12/2024

Anahtar Kelimeler

Buhar sıkıştırırmalı soğutma
sistemi
Hibrit nanoyağlayıcı
Termodinamik analiz
Çevresel analiz

Graphical/Tabular Abstract (Grafik Özet)

In this study, the performance of the vapor compression refrigeration system operated with R1234yf using mono and hybrid nanolubricants was investigated. As a result, the best results were obtained in 1 wt% TiO₂-B compared to pure POE and other nanolubricants in terms of thermodynamics and environmental aspects/Bu çalışmada mono ve hibrit nanoyağlayıcılar kullanılarak R1234yf ile çalıştırılan buhar sıkıştırırmalı soğutma sisteminin performansı incelenmiştir. Sonuç olarak ağırlıkça %1 TiO₂-B'de termodinamik ve çevresel açıdan saf POE ve diğer nanoyağlayıcılara göre en iyi sonuçlar elde edilmiştir

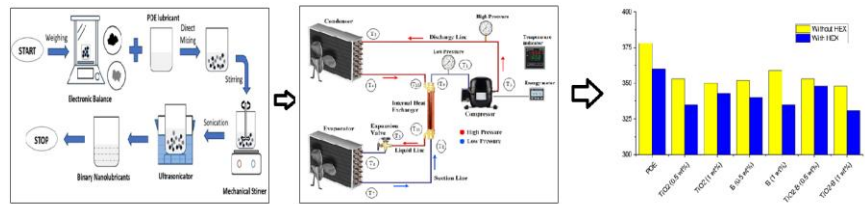


Figure A: Vapor compression refrigeration system with and without heat exchanger using mono and hybrid nanolubricants /**Şekil A:** Mono ve hibrit nanoyağlayıcı kullanılan ısı değıştiricili ve ısı değıştiricisiz buhar sıkıştırırmalı soğutma sistemi

Highlights (Önemli noktalar)

- The performance of a vapor compression refrigeration system with and without heat exchanger using mono and hybrid nanolubricants was investigated/Mono ve hibrit nanoyağlayıcı kullanılan ısı değıştiricili ve ısı değıştiricisiz bir buhar sıkıştırırmalı soğutma sisteminin performansı araştırılmıştır.
- The COP enhanced by 10.46% in the 1 wt% TiO₂-B hybrid nanolubricant in the experimental system with HEX/ COP ısı değıştiricili deney sisteminde, ağırlıkça %1 TiO₂-B hibrit nanoyağlayıcıda %10,46 artmıştır.
- A decrease of 8.06% was obtained with 1 wt% TiO₂-B hybrid nanolubricant in the experimental system with HEX compared to POE/Isı değıştiricili deney sisteminde POE'ye kıyasla ağırlıkça %1 TiO₂-B hibrit nanoyalayıcı ile %8,06'luk bir azalma elde edilmiştir

Aim (Amaç): In this study, the effects of different concentrations of mono and hybrid nanolubricants in vapor compression refrigeration systems with and without internal heat exchangers were investigated / Bu çalışmada farklı konsantrasyonlardaki mono ve hibrit nanoyağlayıcılar dahil ısı değıştiricili ve ısı değıştiricisiz buhar sıkıştırırmalı soğutma sistemindeki etkileri incelenmiştir.

Originality (Özgünlük): In previous studies, nanolubricants were used separately in heat exchangers and vapor compression refrigeration systems. In this study, the performance of nanolubricants was evaluated when used together / Daha önce yapılan çalışmalarda ısı değıştiricili ve buhar sıkıştırırmalı soğutma sisteminde nanoyağlayıcılar ayrı olarak kullanılmıştır. Bu çalışmada birlikte kullanıldığında nanoyağlayıcıların performansları değerlendirilmiştir.

Results (Bulgular): As a result of the experiments, all nanolubricants were compared with pure POE within the results obtained / Deneyler sonucunda elde edilen sonuçlar dahilinde saf POE'ye göre tüm nanoyağlayıcılar karşılaştırılmıştır.

Conclusion (Sonuç): Hybrid nanolubricant TiO₂-B used in a vapor compression refrigeration system with heat exchanger showed better performance than other nanolubricants in terms of thermodynamics and environmental aspects / Isı değıştiricili buhar sıkıştırırmalı soğutma sisteminde kullanılan hibrit nanoyağlayıcı TiO₂-B termodinamik ve çevresel açıdan diğer nanoyağlayıcılara göre daha iyi performans göstermiştir.



Performance investigation of a vapor compression refrigeration system with and without heat exchanger using mono and hybrid nanofluids and operated with R1234yf

Kemal SARIOĞLU¹ , Gökhan YILDIZ^{2*}

¹Düzce University, Graduate School of Natural and Applied Sciences, Department of Mechanical Engineering, Düzce, Türkiye

²Düzce University, Düzce Vocational School, Department of Electronics and Automation, Düzce, Türkiye

Article Info

Research article
Received: 02/11/2024
Revision: 15/12/2024
Accepted: 20/12/2024

Keywords

Vapor compression
refrigeration system
Hybrid nanolubricant
Thermodynamic analysis
Environmental analysis

Abstract

In recent years, the world's energy needs have been increasing. Approximately one third of the world's energy consumption is carried out by buildings. Most of this rate is due to heating, cooling, and air conditioning systems. Compressors are the components that consume the most energy in heating, cooling, and air conditioning systems. Reducing the energy consumption of compressors is of great importance. The thermodynamic and environmental performances of mono and hybrid nanolubricants acquired from different nanoparticles (TiO₂ and B) used at different concentrations (0.5 wt% and 1 wt%) in vapor compression refrigeration systems (VCRS) with and without heat exchanger (HEX) were investigated in this study. Because of the experiments, the COP enhanced by 10.46% in the 1 wt% TiO₂-B hybrid nanolubricant in the experimental system with HEX. Compared to POE, exergy efficiency improved by 23.36% in the experimental system without HEX with 1 wt% TiO₂-B hybrid nanolubricant and by 28.48% in the experimental system with HEX with 1 wt% TiO₂-B hybrid nanolubricant. In the energy consumption of the compressor, a decrease of 7.94% was obtained with 1 wt% TiO₂-B hybrid nanolubricant in the experimental system without HEX and a decrease of 8.06% was obtained with 1 wt% TiO₂-B hybrid nanolubricant in the experimental system with HEX compared to POE. Compared to POE, 7.92% improvement in total exergy destruction was found in the 1 wt% TiO₂-B hybrid nanolubricant in the experimental system without HEX, and 8.72% improvement was found in the 1 wt% TiO₂-B hybrid nanolubricant in the experimental system with HEX. The enviroeconomic value of 1 wt% TiO₂-B hybrid nanolubricants gave better results than POE and mono nanolubricant.

Mono ve hibrit nanoakışkan kullanılan ve R1234yf ile çalıştırılan ısı değiştiricili ve ısı değiştiricisiz bir buhar sıkıştırma soğutma sisteminin performansının araştırılması

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 02/11/2024
Düzeltilme: 15/12/2024
Kabul: 20/12/2024

Anahtar Kelimeler

Buhar sıkıştırma
soğutma sistemi
Hibrit nanoakışkan
Termodinamik analiz
Çevresel analiz

Öz

Dünyadaki enerji tüketiminin yaklaşık üçte biri binalar tarafından gerçekleştirilmektedir. Bu oranında büyük bölümünü ısıtma, soğutma ve iklimlendirme sistemlerinden kaynaklanmaktadır. Isıtma, soğutma ve iklimlendirme sistemlerinde en fazla enerji tüketen bileşen kompresörlerdir. Kompresörlerin enerji tüketimini azaltmak büyük önem arz etmektedir. Bu çalışmada ısı değiştiricisiz ve ısı değiştiricili buhar sıkıştırma soğutma sisteminde farklı konsantrasyonlarda (%0,5 wt ve %1 wt) kullanılan farklı nanoparçacıklardan (TiO₂ ve B) elde edilen mono ve hibrit nanoakışkanların termodinamik ve çevresel performansları incelenmiştir. Deneyler sonucunda, ısı değiştiricili deney sisteminde COP değeri %1 wt TiO₂-B hibrit nanoakışkanla %10,46 artmıştır. Kompresörün enerji tüketiminde POE'ye göre ısı değiştiricisiz deney sisteminde %1 wt TiO₂-B hibrit nanoakışkanla %7,94'lük düşüş, ısı değiştiricili sistemde %1 wt TiO₂-B hibrit nanoakışkanla %8,06'lık düşüş elde edilmiştir. Ekserji verimi POE'ye göre ısı değiştiricisiz deney sisteminde %1 wt TiO₂-B hibrit nanoakışkanla %23,36'lık iyileşme, ısı değiştiricili deney sisteminde %1 wt TiO₂-B hibrit nanoakışkanla %28,48'lik iyileşme gerçekleşmiştir. Toplam ekserji yıkımı POE'ye göre, ısı değiştiricisiz deney sisteminde %1 wt TiO₂-B hibrit nanoakışkanla %7,92'lik iyileşme, ısı değiştiricili deney sisteminde %1 wt TiO₂-B hibrit nanoakışkanla %8,72'lik iyileşme tespit edilmiştir. %1 wt TiO₂-B hibrit nanoakışkanlarda çevreekonomik değer POE ve mono nanoakışkanla göre daha iyi sonuç vermiştir.

1. INTRODUCTION (GİRİŞ)

The decreasing energy resources in the world day by day and the parallel increase in energy costs and the increase in demand for energy have forced countries to work on new energy sources and new solution methods to develop and use them [1]. Developed countries have become more sensitive about using energy more efficiently and are trying to reduce energy consumption to use existing resources more economically [2]. Focusing on energy saving and efficiency brings the importance and necessity of energy efficiency to the forefront [3].

Approximately 40% of the world's energy consumption comes from buildings [4]. A large portion of this rate consists of heating, cooling, and air conditioning systems [5]. The biggest contributor to these systems is the energy consumption of compressors [6]. For this reason, even the slightest improvement in energy efficiency and energy consumption in refrigeration and air conditioning systems will benefit serious energy savings worldwide [7].

In a refrigeration cycle, refrigerants are used to take heat from one environment and transfer it to another [8]. They generally provide heat exchange by converting from liquid to vapor and from vapor to liquid [9]. The heat transfer coefficient and viscosity of refrigerants affect the performance of heat exchangers (HEX) [10]. Different types of refrigerants such as chlorofluorocarbon (CFC) (R11, R12, R13, R114 and R115), hydrochlorofluorocarbon (HCFC) (R22, R124, R123), hydrofluorocarbon (HFC) (R134a) and hydrofluoroolefin (HFO) (R-1234ze, R-1234yf and R-513A) have been used from past to present [11]. In addition to the performance of these refrigerants, their environmentally friendly features have also gained importance over time with the effects of global warming and the Kyoto Protocol and the Paris Agreement. CFC and HCFC refrigerants cause environmental pollution, greenhouse effect, and ozone layer depletion [12]. Some types of refrigerants have been gradually banned because they damage the ozone layer in the stratosphere of the atmosphere and cause global warming [13]. Instead of these banned refrigerants, new generation refrigerants that are more environmentally friendly have begun to be used [14].

In addition to being environmentally friendly, it is very significant to enhance the performance of vapor compression refrigeration systems (VCRS) and save energy [15]. With the development and

widespread use of nanotechnology in thermal energy systems (TES), there has been a significant enhancement in the use of nanoparticles [16]. Nanofluids are acquired by adding nanoparticles to the base fluid (water, oil, etc.) [17]. Nanofluids increase system performance by causing significant improvements in thermophysical properties such as heat transfer, thermal conductivity, and viscosity in the TESs in which they are used [18]. Nanofluids are generally prepared by a one-step or two-step method. The one-step method is applied by mixing the base fluid and nanoparticle at one time [19]. In the two-step method, the base fluid and nanoparticles are first blended with a magnetic stirrer for a specified time [20]. It is then subjected to an ultrasonic bath for a specified period [21]. Nanoparticles are also used as hybrid nanofluids by adding them into the base fluid as mono, binary, or ternary [22]. The use of hybrid nanofluids in TESs is also quite common [23].

There are some studies on the usage of mono and hybrid nanolubricants in VCRSs operating with R1234yf. Bibin and Gundabattini investigated the transfer characteristics and pressure drop of a VCRS using Copper oxide (CuO) nanoparticles and operating with R1234yf using mathematical and simulation methods. CuO nanofluid was used at a concentration of 0.2 to 1 vol%. The heat transfer coefficient and pressure drop of the nanofluid increased by 45.36% and 35.69%, respectively [24]. Sharif et al. conducted the effects of using Silicon oxide (SiO₂) and Aluminum oxide (Al₂O₃) nanoparticles in automotive air conditioning operating with R1234yf on system performance. Nanolubricants formed by adding nanoparticles into Polyalkylene Glycol (PAG) at different concentrations (0.01 vol% and 0.05 vol%) were obtained by a two-step method. The highest cooling capacity was determined with an average improvement of 15.7% in the system with SiO₂ nanolubricant at 0.01 vol% concentration. Additionally, the highest coefficient of performance (COP) increase and power consumption were obtained as 9.8% and 27.1% in 0.05 vol% Al₂O₃ nanolubricant, respectively [25]. Bibin and Gundabattini analyzed the liquid and vapor densities of Al₂O₃, Titanium oxide (TiO₂), and CuO nanoparticles in a VCRS operated with R1234yf. The experimental results showed that the liquid and vapor densities of CuO/R1234yf nanorefrigerant at 5% concentration were 10.3% and 62.93% higher than Al₂O₃/R1234yf, respectively. In terms of liquid vapor density, CuO/R1234yf was found to be superior to Al₂O₃/R1234yf and TiO₂/R1234yf [26]. Sharif et al. tested the impacts of Al₂O₃-SiO₂/PAG nanolubricant on system performance in a vehicle

air conditioner operated with R1234yf. Hybrid nanolubricants were obtained at different concentrations by the two-step method. 12% performance increase was observed for the $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{/PAG}$ nanolubricant at a concentration of 0.03%. Additionally, a 7.7% reduction in energy consumption was detected at the same concentration of nanolubricant [27]. Bibin and Gundabattini investigated the heat transfer and pressure drop of TiO_2 nanoparticle used in a VCRS operating with R1234yf by mathematical and other methods. Experiments were carried out by changing the $\text{TiO}_2\text{/POE}$ nanolubricant at different concentrations (0.2 vol%-1 vol%) in the range of 10 °C to 40 °C. The heat transfer coefficient and pressure drop of the nanolubricant were improved by 134.03% and 80.77%, respectively [28]. Li and Lu investigated the performance of VCRS by using four different refrigerants and adding Al_2O_3 nanoparticle. The COP enhancement of R1233zd(E)- Al_2O_3 nanorefrigerant is considerably higher than the other three nanorefrigerants. The maximum exergy efficiency was obtained as 38.46% for R1233zd(E)- Al_2O_3 [29]. Sharif et al. observed the enhancement of the system by utilizing hybrid nanolubricants in a vehicle air conditioner operated with R1234yf. It was observed that less energy was consumed in the experimental system using $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{/PAG}$ nanolubricant compared to PAG. In addition, higher cooling capacity was achieved in $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{/PAG}$ nanolubricant compared to PAG [30]. Pundkar and Chaudhari experimentally tested the performance of nanolubricants in VCRS operated with R1234yf and R134a. Nanoparticles (Al_2O_3 and TiO_2) added into POE were obtained as nanolubricants at different concentrations (between 0.5% and 1%). As a result, 18% and 15% increase in COP value were detected in 0.5% Al_2O_3 and 0.5% TiO_2 nanolubricants, respectively, and 23% and 19% decrease in energy consumption was determined, respectively [31].

In this study, the effects of mono and hybrid nanolubricants utilized in VCRS with HEX on

system performance were investigated. Improvements in this area are needed to reduce the energy consumption of compressors in VCRSs in the global energy consumption of buildings. Therefore, the usage of nanoparticles with high heat transfer properties was preferred. Mono and hybrid nanolubricants obtained from different concentrations and different types of nanoparticles (TiO_2 and Boron (B)) were effective in increasing the performance and reducing the energy consumption of the VCRS with HEX. In addition, in a VCRS, liquid refrigerant entering the compressor reduces the efficiency and the compressor's life. To prevent this circumstance, the use of internal HEXs in the VCRS is preferred to perform the superheating process. Energy, exergy, and environmental analysis of the VCRS using mono and hybrid nanolubricants were performed and interpreted.

2. MATERIALS AND METHODS (MATERİYAL VE METOD)

In this section, mono and hybrid nanolubricants were tested in a VCRS with and without internal HEX. Theoretical explanations of thermophysical properties, and thermodynamic and environmental analysis utilized to evaluate the VCRS's performance with and without internal HEX used in the experiments are given.

2.1. Preparation of Nanolubricant

(Nanoyağlayıcının Hazırlanışı)

Mono and hybrid nanolubricants were acquired by adding TiO_2 and B nanoparticles into POE. The obtained hybrid nanolubricants are formed by adding nanoparticles at a ratio of 50:50. Technical properties of nanoparticles used in nanolubricants are shown in Table 1. Scanning electron microscope (SEM) images of the nanoparticles in the nanolubricants used in the experiments are given in Figure 1.

Table 1. Technical properties of nanoparticles (Nanoparçacıkların teknik özellikleri)

Nanoparticle	Purity, %	Density, g/cm ³	Average Particle Size, nm	Morphology	Thermal Conductivity, W/m.K
TiO_2	+99.5	4.5	45	Nearly Spherical	8
B	+99.5	3.58	100	Nearly Spherical	27

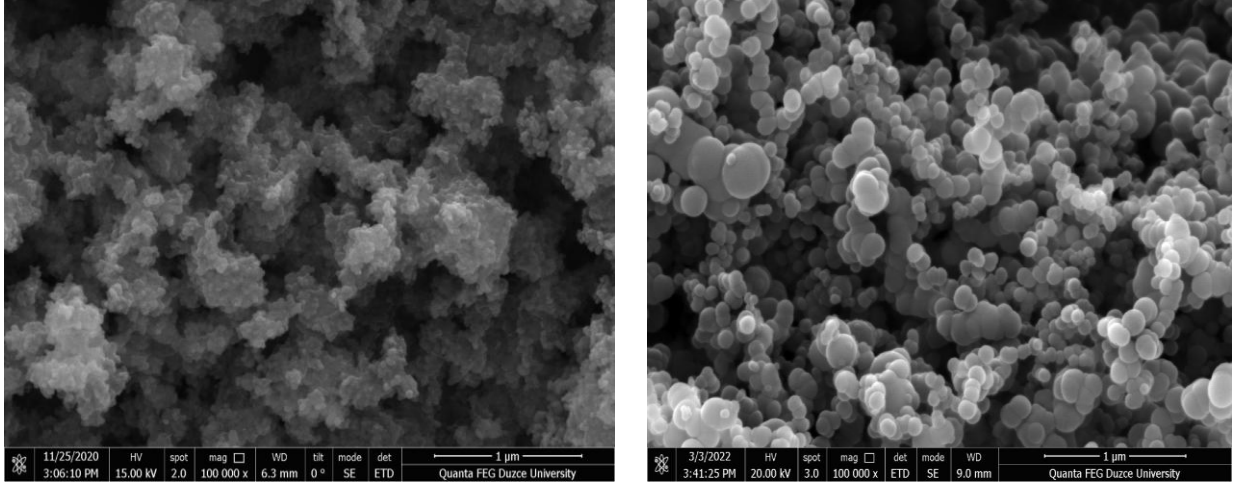


Figure 1. SEM images of nanoparticles used in the experiments a) TiO₂ and b) B (Deneylerde kullanılan nanoparçacıkların SEM görüntüleri a) TiO₂ ve b) B)

The weights of POE and nanoparticles were measured using a precision balance. To acquire mono and hybrid nanolubricants, nanoparticles are added to POE and then blended with a magnetic stirrer at 25 °C for 3 h. It is subjected to ultrasonic

bath treatment at 50 Hz frequency and 250 W power for 2.5 h to ensure homogeneous distribution of nanoparticles in the POE. Preparation of all nanolubricants in this study is given in Figure 2.

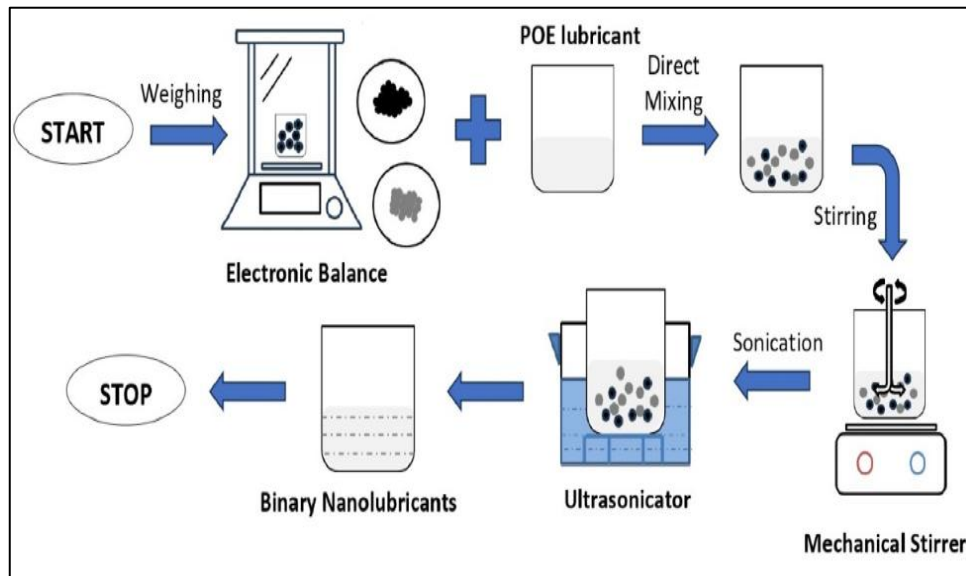


Figure 2. Steps of preparation of mono and hybrid nanolubricants [32] (Mono ve hibrit nanoyağlayıcıların hazırlanma aşamaları)

2.2. Experimental setup (Deney sistemi)

The performance of a VCRS with internal HEX using mono and hybrid nanolubricants was analyzed in the present study. Refrigerants are used to perform the cooling process in the experimental system. In this study, R1234yf, which is more

environmentally friendly, was used as the refrigerant. The VCRS with internal HEX used in the experiments is shown in Figure 3. The P-h and T-s diagrams of the thermodynamic points of the refrigerant used in the experimental system for the system without and with a heat exchanger are given in Figure 4.

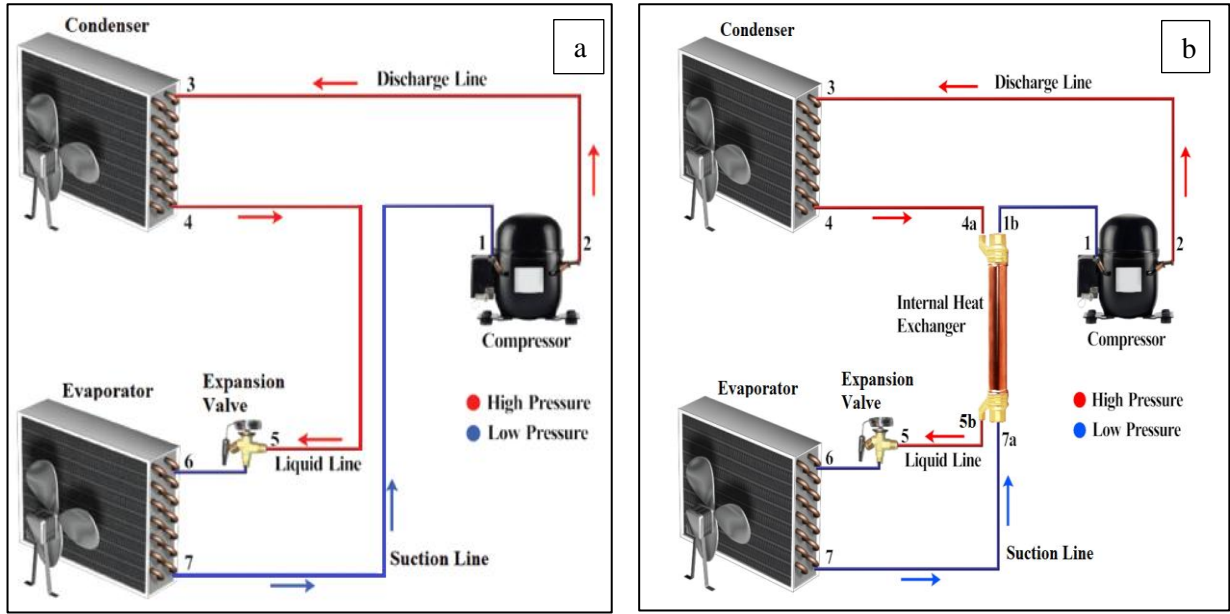


Figure 3. Schematic view of the experimental setup a) without HEX, b) with HEX (Deney sisteminin şematik gösterimi a) ısı değiştiricisiz, b) ısı değiştiricili)

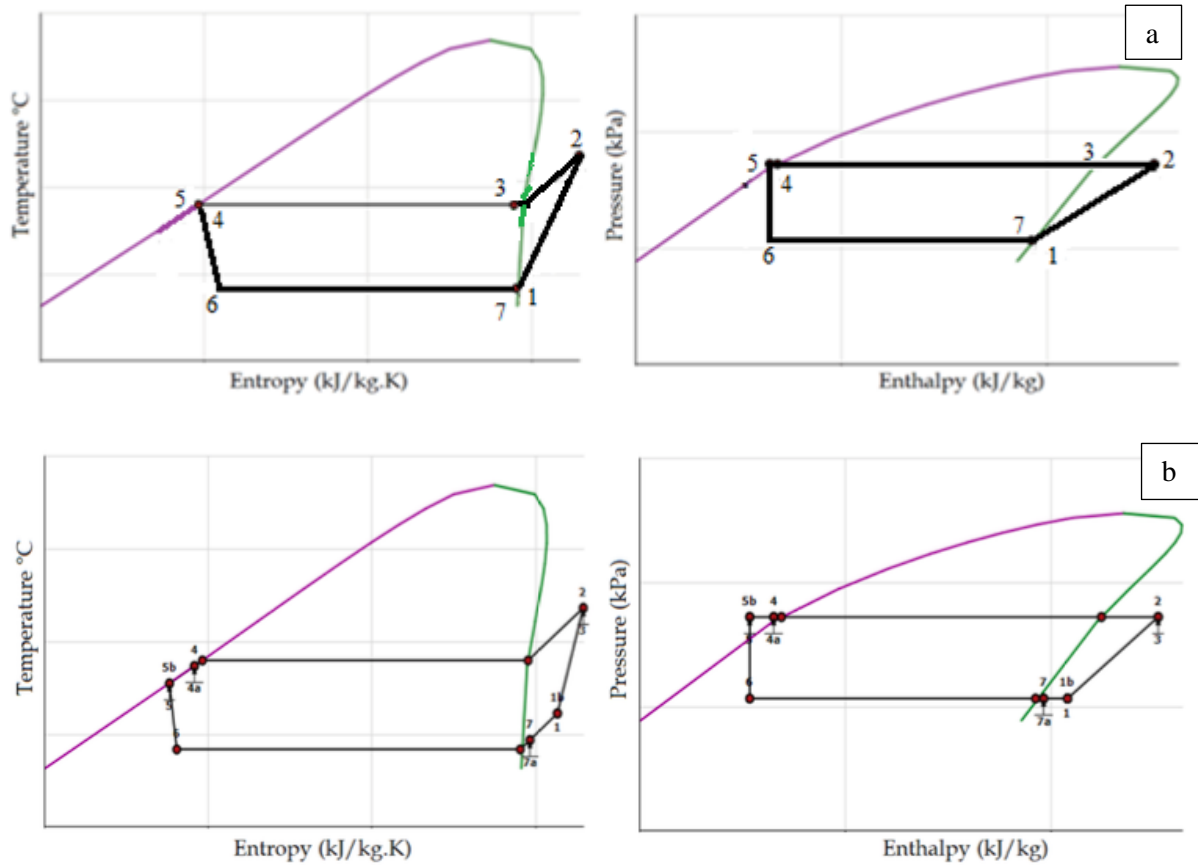


Figure 4. T-s and P-h diagrams of the experimental system a) without HEX, b) with HEX (Deney sisteminin T-s ve P-h diyagramları a) ısı değiştiricisiz, b) ısı değiştiricili)

Checks were made before starting the experiments in the VCRES with internal HEX. After the system was checked, 200 mL of POE was added to the VCRES with internal HEX. The air in the system is vacuumed with the help of a vacuum pump to prevent any air from remaining in the system. Then, 140 g of R1234yf refrigerant was charged. After the

system was started, it was waited until it reached equilibrium conditions with the environment. When the system reached equilibrium conditions, data were taken from the system at 20 minute intervals for 1 h. The average of data taken at 5 different times during 1 h was used. The same procedures were followed in the usage of other mono and

hybrid nanolubricants. The experiments were carried out at an average temperature of 23 °C and a relative humidity of 60%. While the nanolubricants were being replaced in the VCRS, the R1234yf in the system was completely evacuated. No matter how well the refrigerant is evacuated from the system, trace amounts of refrigerant will remain in the system. For this case, the system was purged

with N₂ for 5 minutes at each nanolubricants change. R1234yf charging was done after the sweeping process. The technical specifications of the VCRS with internal HEX used in the experiments are given in Table 2. The view of pressure and temperature measurement points on the experimental system and the view of the experimental system are shown in Figure 5.

Table 2. Technical specifications of VCRS (VCRS'nin teknik özellikleri)

Components	Specifications
Compressor	Displacement: 4.05-9.09 cm ³ Cooling capacity: 325-970 W
Evaporator	Capacity: 1 kW
Condenser	Capacity: 1.4 kW
Thermostatic expansion valve	Temperature range: -40/10 °C Static superheat: 4 °C
Filter drier	Temperature range: -40/70 °C Net volume: 0.464 L
Heat exchanger	Type: Tube-in-tube heat exchanger Capacity: 1 kW Maximum working pressure: 28 bar Operating temperature: -60 °C to 120 °C

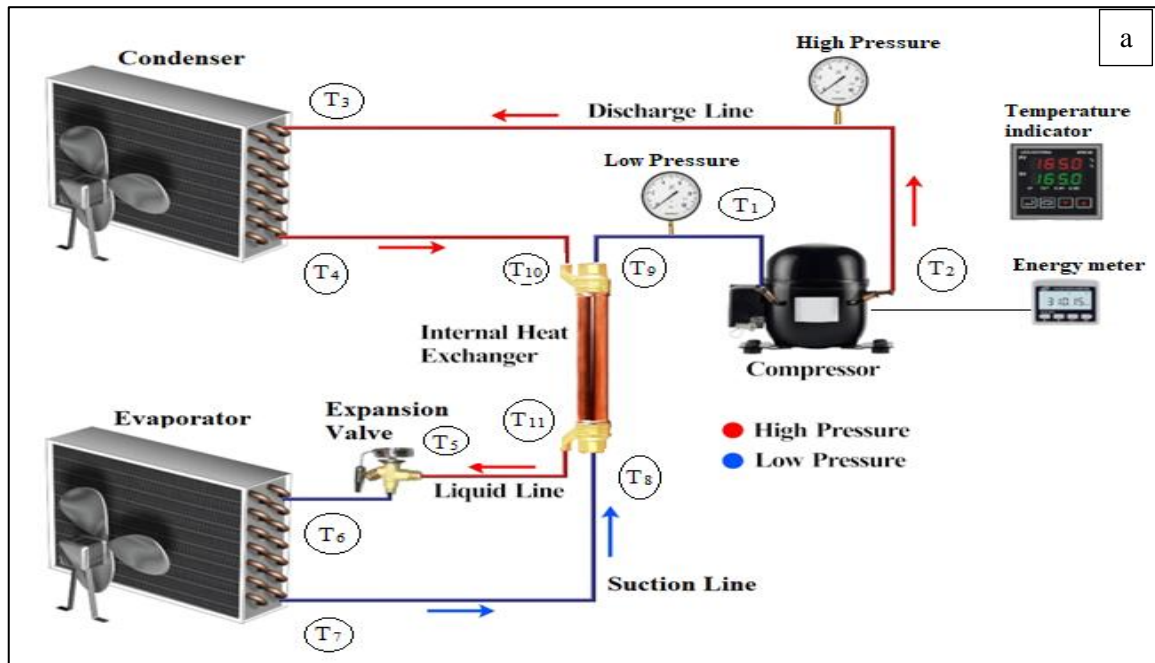




Figure 5. View of experimental system a) measurement points b) general view (Deney sisteminin görüntüsü a) ölçüm noktaları, b) genel görünüm)

2.3. Thermophysical properties (Termofiziksel özellikler)

Different thermal properties such as thermal conductivity and viscosity must be determined to determine some properties of a fluid. Thermal conductivities of fluids directly affect the heat transfer properties of the fluid. Thermal conductivity can be measured with measuring instruments, or it can be obtained through models produced from experimental data. The Maxwell model gives the best results in studies on mono nanofluids obtained from spherical nanoparticles. The Maxwell model is given in Equation 1. Likewise, a model for mono nanofluids was developed to calculate the thermal conductivity of hybrid nanofluids. The model used in the thermal conductivity calculation of hybrid nanofluids is given in Equation 2.

$$\frac{k_{nf}}{k_{bf}} = \frac{k_{np} + (n-1)k_{bf} - (n-1)\phi(k_{bf} - k_{np})}{k_{np} + (n-1)k_{bf} - \phi(k_{bf} - k_{np})} \quad (1)$$

$$k_{hnf} = k_{bf} \frac{(\phi_{np1}k_{np1} + \phi_{np2}k_{np2} / (\phi_{np1} + \phi_{np2}) + 2k_{bf} + 2(\phi_{np1}k_{np1} + \phi_{np2}k_{np2}) - 2(\phi_{np1} + \phi_{np2})k_{bf})}{(\phi_{np1}k_{np1} + \frac{\phi_{np2}k_{np2}}{\phi_{np1}} + \phi_{np2}) + 2k_{bf} - (\phi_{np1}k_{np1} + \phi_{np2}k_{np2}) + (\phi_{np1} + \phi_{np2})k_{bf}} \quad (2)$$

One of the most important thermal properties of fluids is viscosity. Mono and hybrid nanolubricants's viscosity utilized in experimental studies was obtained with the help of models according to the measured POE viscosity. These models are given in Equation 3 and Equation 4.

$$\mu_{nf} = \mu_{bf} (1 + 2.5\phi) \quad (3)$$

$$\mu_{hnf} = \frac{\mu_{bf}}{(1 - \phi_{np1} - \phi_{np2})^{2.5}} \quad (4)$$

2.4. Thermodynamic analysis (Termodinamik analiz)

In this study, the performance of the VCRS with HEX using mono and hybrid nanolubricants was examined in terms of thermodynamics. The evaporator can be defined as the place where the cooling process takes place. The evaporator cools the environment by taking the heat of the refrigerant that reaches a temperature lower than the ambient temperature. The amount of heat drawn by the evaporator from the environment is given in Equation 5.

$$\dot{Q}_{evap} = \dot{m}_r (h_7 - h_6) \quad (5)$$

One of the main components of a VCRS is the condenser. The condenser releases the high heat created by the superheated vapor refrigerant coming from the compressor under pressure to the environment at a lower temperature. The heat released by the condenser to the environment is given in Equation 6.

$$\dot{Q}_{cond} = \dot{m}_r (h_4 - h_3) \quad (6)$$

The compressor compresses the refrigerant coming from the evaporator in theoretically saturated vapor form, increases its pressure and temperature, and sends it to the condenser in the form of superheated vapor. The power and electrical power consumed by the compressor while performing this compression process are given in Equation 7 and Equation 8.

$$\dot{W}_{comp} = \dot{m}_r (h_2 - h_1) \quad (7)$$

$$\dot{W}_{comp,el} = \frac{\dot{W}_{comp}}{\eta_{mec} \times \eta_{el}} \quad (8)$$

The COP is calculated to determine the performance of the VCRES. The COP is expressed as the ratio of the heat drawn by the evaporator from the environment to the power consumed by the compressor. The calculation of the COP value of a VCRES with an internal HEX is shown in Equation 9.

$$COP = \frac{\dot{Q}_{evap}}{\dot{W}_{comp,el}} \quad (9)$$

Exergy analysis provides detailed information about the usability of any system to increase its efficiency. Exergy analysis for a steady flow system is given in Equation 10. $\dot{E}_{x,dest}$ in the equation represents exergy destruction. The first term in Equation 10 represents the flow exergy, the next term represents the heat transfer exergy, and the last term represents the work exergy.

$$\dot{E}_{x,dest} = \Sigma \dot{E}_{x,in} - \Sigma \dot{E}_{x,out} + \Sigma [\dot{Q} (1 - \frac{T_0}{T})]_{in} - \Sigma [\dot{Q} (1 - \frac{T_0}{T})]_{out} + \Sigma \dot{W}_in - \Sigma \dot{W}_out \quad (10)$$

The flow exergy in each cycle in the HEX steam system is given in Equation 11. In Equation 11, \dot{m}_r is the mass flow rate of the refrigerant, h_0 is the enthalpy at dead state conditions, T_0 is the ambient temperature for the dead state, and s_0 is the entropy for the dead state condition. The dead state conditions of the refrigerant are based on T_0 25 °C and P_0 101.325 kPa.

$$\dot{E}_x = \dot{m}_r [h - h_0 - T_0 (s - s_0)] \quad (11)$$

Exergy destruction is the parameter that shows exactly how much exergy is lost in which component of the system. In this way, it provides information about which component needs to be improved. The exergy destruction for each major component in the experimental system is given in Equations 12-16.

$$\frac{\dot{E}_{x,dest,comp}}{\dot{W}_{comp,el}} = \dot{m}_r [(h_1 - T_0 s_1) - (h_2 - T_0 s_2)] + \quad (12)$$

$$\dot{E}_{x,dest,cond} = \dot{m}_r [(h_3 - T_0 s_3) - (h_4 - T_0 s_4)] - \left[\dot{Q}_{cond} \left(1 - \frac{T_0}{T_{cond}} \right) \right] \quad (13)$$

$$\dot{E}_{x,dest,evap} = \dot{m}_r [(h_6 - T_0 s_6) - (h_7 - T_0 s_7)] + \left[\dot{Q}_{evap} \left(1 - \frac{T_0}{T_{evap}} \right) \right] \quad (14)$$

$$\dot{E}_{x,dest,exv} = \dot{m}_r T_0 (s_6 - s_5) \quad (15)$$

$$\dot{E}_{x,dest,hex} = \dot{m}_r [(h_{4a} - T_0 s_{4a}) - (h_{5b} - T_0 s_{5b})] + [(h_{7a} - T_0 s_{7a}) - (h_{1b} - T_0 s_{1b})] \quad (16)$$

The total exergy destruction of all components in the VCRES with HEX is calculated according to Equation 17.

$$\dot{E}_{x,dest,ov} = \dot{E}_{x,dest,comp} + \dot{E}_{x,dest,cond} + \dot{E}_{x,dest,ev} + \dot{E}_{x,dest,exv} + \dot{E}_{x,dest,hex} \quad (17)$$

Exergy analysis of the VCRES with HEX is calculated by the ratio of the exergy difference of the evaporator to the compressor power.

$$\eta_{ex} = \frac{\dot{E}_{x,6} - \dot{E}_{x,7}}{\dot{W}_{comp,el}} \quad (18)$$

In the VCRES, an internal HEX is used to apply superheating to prevent liquid refrigerant from passing into the compressor. To evaluate the performance of the internal HEX used in the experimental system, the efficiency coefficient (ϵ_{hex}) is calculated in Equation 19.

$$\epsilon_{hex} = \frac{T_1 - T_7}{T_4 - T_7} \quad (19)$$

2.5. Environmental analysis (Çevresel analiz)

Today, a significant portion of the energy needed is met by fossil fuels. In this energy production, high amounts of CO₂ emissions occur due to fossil fuels. High amounts of CO₂ emissions into the atmosphere cause environmental pollution and global warming. Research is being carried out with great effort around the world to reduce these effects. With these measures, environmental economic analysis has also become important. The electrical power consumed by the compressor is determined in Equation 20. $\dot{W}_{comp,el}$ is the power consumed by the compressor in unit time and t is the operating time of the compressor. The average operating time of the compressor used in this study was determined as 18 h. The amount of CO₂ released by the VCRES with HEX using mono and hybrid nanolubricants is calculated in Equation 21. φ_{CO_2} represents the amount of CO₂ reduced by the experimental system and ψ_{CO_2} represents the amount of CO₂ released by the operation of coal-fired power plants. The value of ψ_{CO_2} is taken as 2.08 kgCO₂/kWh.

$$\dot{W}_{comp,el} = \dot{W}_{comp,el} \cdot t \quad (20)$$

$$\varphi_{CO_2} = \psi_{CO_2} \times \dot{W}_{comp,el} \quad (21)$$

The enviroeconomic value of the system used in the experiments is calculated in Equation 22.

$$Z_{CO_2} = z_{CO_2} \cdot \varphi_{CO_2} \quad (22)$$

In Equation 22, z_{CO_2} represents the international carbon price and varies between 13 and 16 \$/tCO₂. The value of z_{CO_2} is taken as 14.5 \$/tCO₂ in the calculations [33].

2.6. Uncertainty analysis (Belirsizlik analizi)

Uncertainty analysis provides a methodical approach to determining the sensitivity of the results obtained. A range of errors is determined with this approach. Uncertainty analysis has a distinct advantage over other analysis in that it helps identify the variable that causes the largest error.

$$W_R = \left[\left(\frac{dR}{dx_1} w_1 \right)^2 + \left(\frac{dR}{dx_2} w_2 \right)^2 + \dots + \left(\frac{dR}{dx_n} w_n \right)^2 \right]^{1/2} \quad (23)$$

Table 3. Technical specifications of measurement devices (Ölçü aletlerinin teknik özellikleri)

No.	Measurement Instrument	Range	Accuracy	Uncertainty
1	Thermocouple (K type)	(-30)-130 °C	0.5%	±0.45 °C
2	Radwag precision scales	0-220 g	0.001 g	±0.01 g
3	Energy meter	0.1-3680 W	0.1 W	±0.32 W
4	Pressure transmitter	0-30 bar	1 bar	±0.2 bar

3. RESULTS AND DISCUSSIONS (BULGULAR VE TARTIŞMA)

The performance of a VCRS with internal HEX operated with R1234yf using mono and hybrid nanolubricant at different concentrations is discussed thermodynamically and environmentally in this section.

The thermal conductivity of fluids utilized in TESs is an important parameter affecting system performance. The POE's thermal conductivity increased significantly because of the effect of the nanoparticles added to it. This can be defined by the fact that solid nanoparticles have higher thermal conductivities than liquids, and liquids have higher thermal conductivities than gases. Nanoparticles with high thermal conductivity remain suspended in the base fluid to which they are added, creating a better heat transfer environment compared to the base fluid. POE's thermal conductivities, and mono

and hybrid nanolubricants depending on temperature are shown in Table 4. The POE's thermal conductivity was determined as 0.1447 W/mK at 30 °C and 0.1455 W/mK at 50 °C. The thermal conductivities of mono and hybrid nanolubricants at the same temperature are higher than the POE's thermal conductivity. The highest thermal conductivity value of 0.2249 W/mK at 50 °C was obtained in 1 wt% TiO₂-B hybrid nanolubricant. The lowest thermal conductivity value at the same temperature was obtained in POE as 0.1455 W/mK. Mono and hybrid nanolubricants have higher thermal conductivities compared to POE. This can be defined by the different sizes of nanoparticles. Smaller sized nanoparticles, mono, and hybrid nanoparticles have smaller surface-to-volume ratios. As seen in Table 4, there is a general increase in thermal conductivity with enhancing temperature. The change in POE's thermal conductivities, mono and hybrid nanolubricants with enhancing temperature is parallel.

Table 4. Changes in thermal conductivity of nanolubricants with temperature (Nanoyağlayıcıların termal iletkenliklerinin sıcaklıkla değişimleri)

Temperature (°C)	POE	TiO ₂ (0.5 wt%)	TiO ₂ (1 wt%)	B (0.5 wt%)	B (1 wt%)	TiO ₂ -B (0.5 wt%)	TiO ₂ -B (1 wt%)
10	0.1413	0.1793	0.2104	0.1738	0.2012	0.1832	0.2185
20	0.1449	0.1838	0.2157	0.1782	0.2063	0.1879	0.2240
30	0.1447	0.1836	0.2154	0.1780	0.2061	0.1876	0.2237
40	0.1452	0.1842	0.2161	0.1786	0.2068	0.1883	0.2245
50	0.1455	0.1846	0.2165	0.1790	0.2072	0.1887	0.2249
60	0.1439	0.1826	0.2142	0.1770	0.2049	0.1866	0.2225
70	0.1434	0.1819	0.2135	0.1764	0.2042	0.1859	0.2217

An important parameter affecting the performance of fluids used in TESs is viscosity. As the fluid's viscosity used in the VCRS enhances, the amount of friction in the compressor increases. As this friction increases, the temperature inside the compressor increases. Viscosity changes of POE, mono, and hybrid nanolubricants with increasing temperature are shown in Table 5. The mono and hybrid nanolubricants' viscosity at the same temperature is higher than POE. When comparing POE, mono, and hybrid nanolubricants at the same temperature, POE has the lowest viscosity value. The mono and hybrid nanolubricants' high viscosities compared to POE can be defined by their large surface area to volume ratio. Therefore, the surface area of mono and hybrid nanolubricants increases and the resistance

to flow in the system increases. Additionally, it is observed that the viscosity reduces with rising temperature. This allows the flow to be freer as the cohesive forces between molecules are reduced. Thus, a significant decrease in viscosity is observed in POE, mono, and hybrid nanolubricants as the temperature rises because of the reducing cohesive forces. In the experimental system, the highest viscosity value was obtained as 1.8098 Pa.s in 1 wt% TiO₂-B hybrid nanolubricant at 10 °C, and the lowest viscosity value was obtained as 0.0170 Pa.s in POE at 70 °C. As the temperature increases, the viscosity values of POE, mono, and hybrid nanolubricants reach values very close to each other after 60 °C.

Table 5. Changes in viscosity of nanolubricants with temperature (Nanoyağlayıcıların viskozitelerinin sıcaklıkla değişimleri)

Temperature (°C)	POE	TiO ₂ (0.5 wt%)	TiO ₂ (1 wt%)	B (0.5 wt%)	B (1 wt%)	TiO ₂ -B (0.5 wt%)	TiO ₂ -B (1 wt%)
10	0.4420	0.5746	0.7072	0.5475	0.6531	0.8108	1.8098
20	0.2050	0.2665	0.3280	0.2539	0.3029	0.3761	0.8394
30	0.1080	0.1404	0.1728	0.1338	0.1596	0.1981	0.4422
40	0.0600	0.0780	0.0960	0.0743	0.0887	0.1101	0.2457
50	0.0380	0.0494	0.0608	0.0471	0.0561	0.0697	0.1556
60	0.0240	0.0312	0.0384	0.0297	0.0355	0.0440	0.0983
70	0.0170	0.0221	0.0272	0.0211	0.0251	0.0312	0.0696

The energy consumption by the compressor in a VCRS with an internal HEX using mono and hybrid nanolubricants at different concentrations is indicated in Figure 6. As the concentrations of nanolubricants increase compared to POE, a decrease in the compressor's energy consumption is observed. Energy consumption is lower in VCRSs using HEXs than in VCRSs without HEXs. This

circumstance can be explained as the refrigerant entering the compressor in the form of almost superheated vapor, as the superheating process takes place in VCRSs using a HEX. While the energy consumption in VCRSs with internal HEXs is already lower than in VCRSs without HEXs, the usage of mono and hybrid nanolubricants in the experimental system with HEX has further reduced

energy consumption. In the VCRS without HEX, the highest energy consumption was obtained as 378 W in POE, and the lowest energy consumption was obtained as 348 W in 1 wt% TiO₂-B hybrid nanolubricant. In the VCRS with HEX, the highest energy consumption was obtained with POE as 360 W, while the lowest energy consumption was obtained with 1 wt% TiO₂-B hybrid nanolubricant as 331 W. This is due to the spherical shape of the

nanoparticles used in the nanolubricants utilized in the experiments. Nanoparticles with spherical shapes create a rolling effect in the base fluid. As the friction between mating surfaces decreases due to the rolling effect, energy consumption in the compressor decreases. Additionally, since nanolubricants have higher thermal conductivity than POE, heat transfer between fluids is increased.

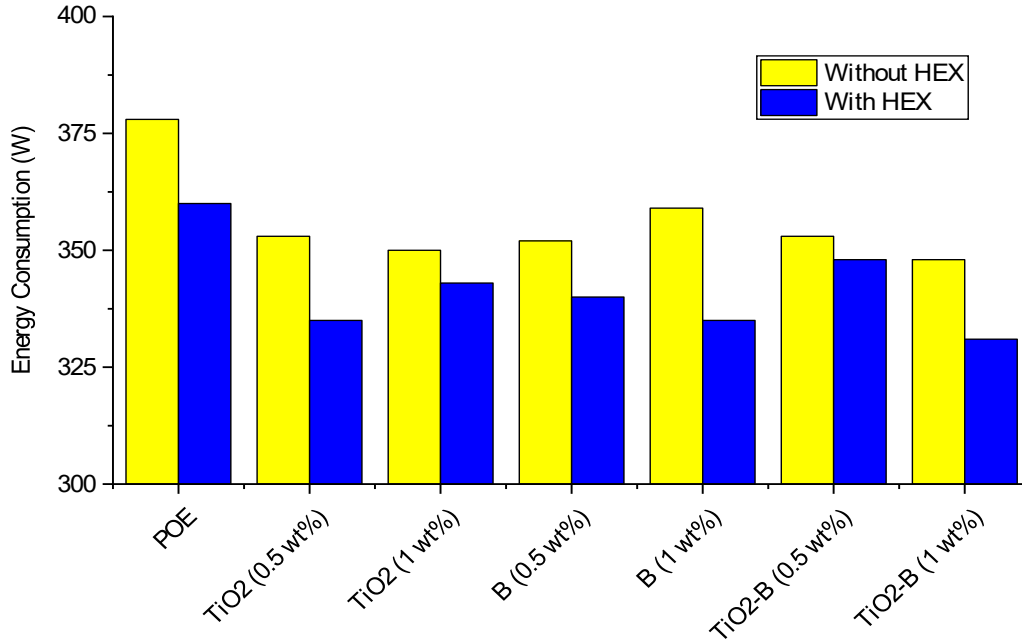


Figure 6. Energy consumption in the experimental system with and without HEX using mono and hybrid nanolubricants (Mono ve hibrit nanoyağlayıcı kullanılan ısı değiştiricili ve ısı değiştiricisiz deney sistemindeki enerji tüketimleri)

The COP changes of VCRS with internal HEX using nanolubricants at different concentrations are shown in Figure 7. The COP value increases in a VCRS with a HEX compared to an expected result in a VCRS without a HEX. However, when mono and hybrid nanolubricants are utilized in a VCRS with and without HEX, the POE of the system is observed to increase. This can be explained by the fact that mono and hybrid nanolubricants directly enhance VCRS performance due to their high thermal conductivity value. Additionally, COP values increase as the concentrations of mono and hybrid nanolubricants utilized in refrigeration systems with and without HEXs increase. In the experimental system without HEX, the lowest COP was determined as 2.63 in POE, and the highest COP was determined as 2.91 in 1 wt% TiO₂-B

hybrid nanolubricant. In the experimental system with HEX, the lowest COP was obtained as 2.85 in POE, and the highest COP was obtained as 3.14 in 1 wt% TiO₂-B hybrid nanolubricant. Compressor energy consumption given in Figure 6 is effective on the COP value. Since the nanolubricants' energy consumption utilized in VCRS is low due to their high thermal conductivity, their COP values are higher than POE. As a result, hybrid nanolubricants used in VCRSs with and without HEXs have higher COP values than POE and mono nanolubricants with increasing concentrations. Additionally, the HEX used in the VCRS positively affected the system performance.

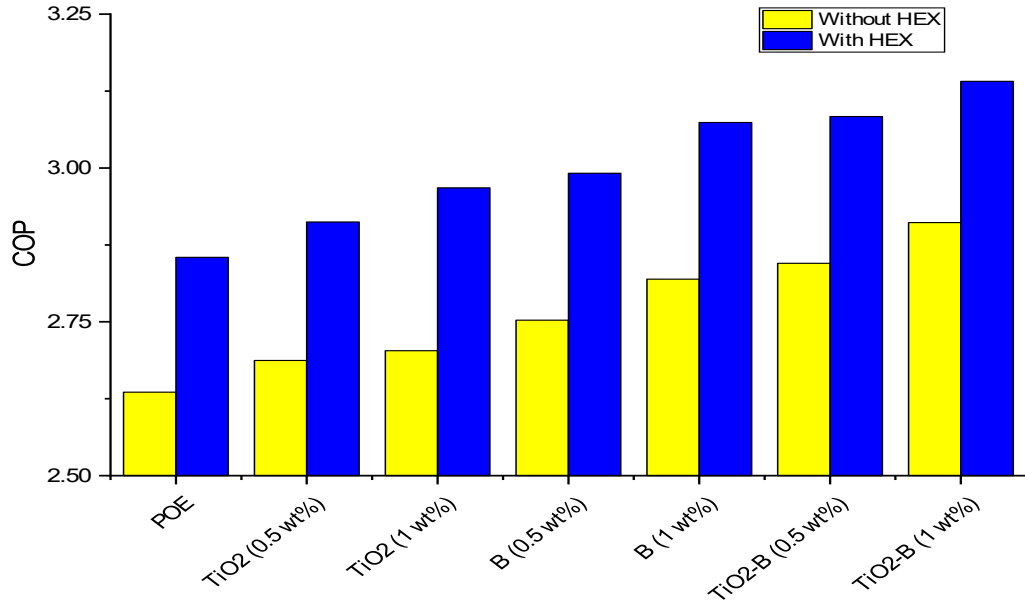


Figure 7. COP changes of the experimental system with and without HEX using mono and hybrid nanolubricants (Mono ve hibrit nanoyağlayıcı kullanılan ısı değiştiricili ve ısı değiştiricisiz deney sistemindeki COP değişimleri)

Mono and hybrid nanolubricants' total exergy destruction used in VCRRSs with and without HEXs are shown in Figure 8. The mono and hybrid nanolubricants' exergy destruction decreases as the concentration enhances compared to POE. This can be defined by the fact that mono and hybrid nanolubricants with higher COP have lower total exergy destruction. The lowest total exergy destruction obtained in the experimental system without HEX was 451.24 W in 1 wt% TiO₂-B

hybrid nanolubricant, and the highest total exergy destruction was 490 W in POE. In the experimental system with HEX, the lowest total exergy destruction is determined as 437.12 W in 1% TiO₂-B hybrid nanolubricant, and the highest total exergy destruction is calculated as 478.87 W. The usage of mono and hybrid nanolubricants in the experimental system with HEX led to significant improvement in the system.

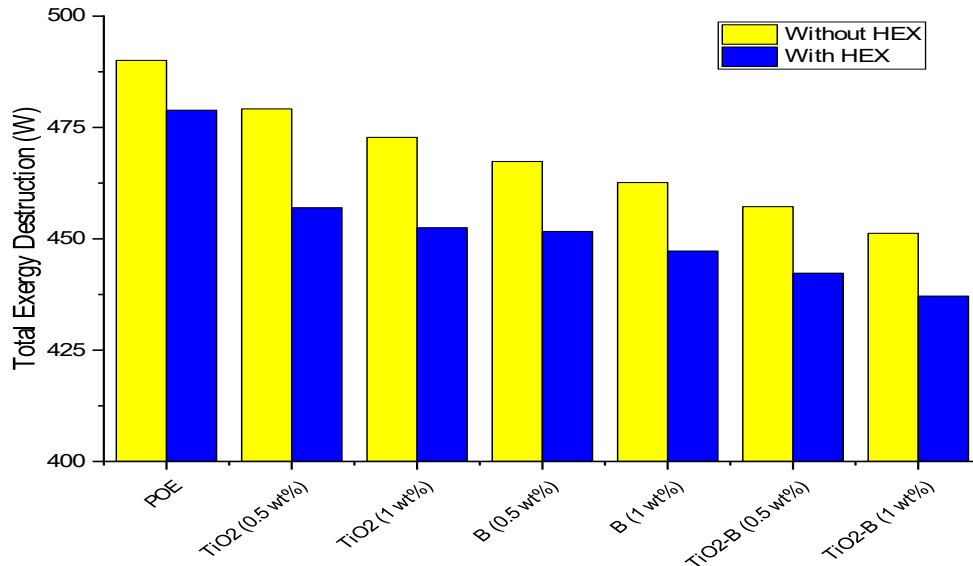


Figure 8. Total exergy destruction of the experimental system with and without HEX using mono and hybrid nanolubricants (Mono ve hibrit nanoyağlayıcı kullanılan ısı değiştiricili ve ısı değiştiricisiz deney sisteminin toplam ekserji yıkımları)

The exergy efficiencies of the VCRRS with and without HEX for nanolubricants used at different concentrations are shown in Figure 9. The exergy efficiency of mono and hybrid nanolubricants

compared to POE increased as the concentration increased. Exergy efficiency is inversely proportional to the total exergy destruction, which indicates the usability of the system. Exergy

efficiency is generally parallel to the COP values of the experimental system using nanolubricants. This shows the importance of nanoparticles since heat transfer increases with increasing concentration. In the experimental system without HEX, the lowest exergy efficiency was obtained at 27.84% in POE, and the highest exergy efficiency was obtained at 34.43% in 1 wt% TiO₂-B hybrid nanolubricant. In the experimental system with HEX, the lowest

exergy efficiency is 33.76% and the highest exergy efficiency is 43.37% in 1 wt% TiO₂-B hybrid nanolubricant. It is observed that hybrid nanolubricants used in VCRSs with and without HEXs have better exergy efficiency than POE and mono nanolubricants. This can be defined by the fact that the thermal properties of hybrid and mono nanolubricants should be taken into account at high concentrations.

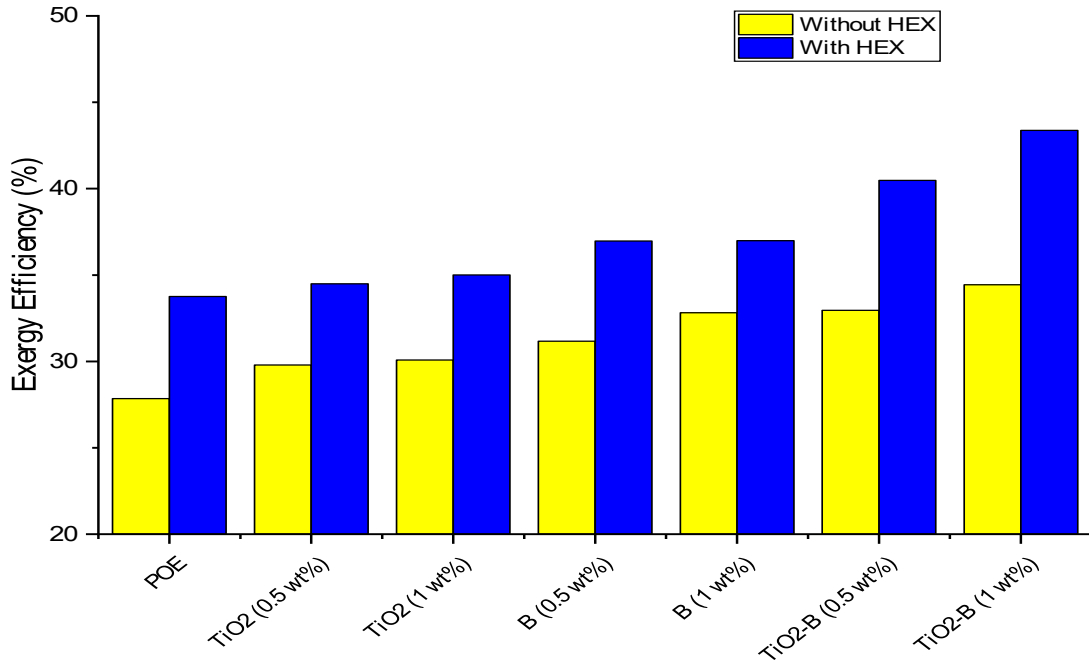


Figure 9. Exergy efficiency change of the experimental system with and without HEX using mono and hybrid nanolubricants (Mono ve hibrit nanoyağlayıcı kullanılan ısı değıştiricili ve ısı değıştiricisiz deney sisteminin ekserji verimi değışimleri)

The performance of VCRS using a counterflow tube-in-tube internal HEX is significantly increased. The efficiency of the internal HEX utilized in the VCRS also has great importance in the COP value of the VCRS. The efficiency coefficient of the counter-flow concentric tube HEX using mono and hybrid nanolubricants is given in Figure 10. As seen in Figure 10, higher efficiency values were obtained in the internal HEX using mono and hybrid nanolubricants compared to POE. As the concentrations of nanolubricants enhance,

the efficiency of the HEX also enhances. The lowest efficiency value obtained in the internal HEX was 0.9367, while the highest efficiency value was 0.9843 obtained in 1 wt% TiO₂-B hybrid nanolubricant. By using mono and hybrid nanolubricants, the efficiency of the internal HEX was better than POE, which significantly affected the COP increase (See Figure 7). The positive effects of using nanofluids in tube-in-tube counter-flow HEXs are well known.

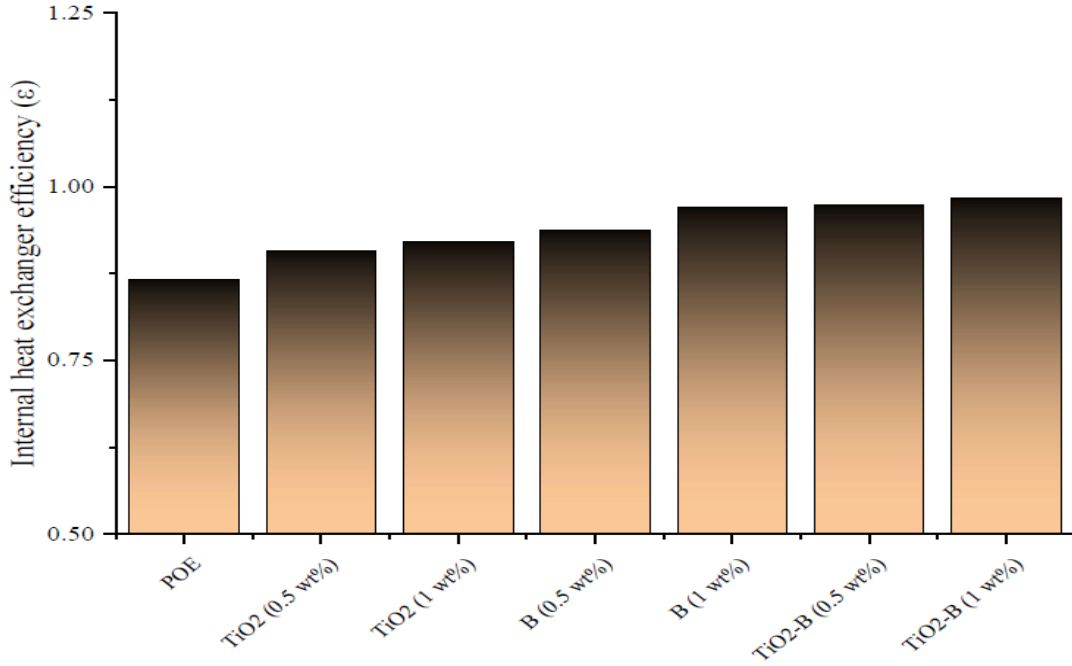


Figure 10. Efficiency changes of the internal heat exchanger (Dahili ısı değiştiricinin verimlilik değişimleri)

Today, while it is important to ensure efficiency in TESs, the environmental impacts of TESs and the reduction of these impacts are equally important because of the increase in global warming and the greater risk it poses in the future. The enviroeconomic analysis results are given in Table 6 to show the environmental effects of the experimental system with and without HEX of nanolubricants used at different concentrations. In the experimental system without HEX, the lowest amount was obtained as 0.18892 ϕ /h in 1 wt% TiO₂-B hybrid nanolubricant, and the highest amount was obtained as 0.20521 ϕ /h in POE. In the experimental system with HEX, the lowest amount was obtained

as 0.17969 ϕ /h in 1 wt% TiO₂-B hybrid nanolubricant, and the highest amount was obtained as 0.19544 ϕ /h in POE. The most effective parameter in calculating environmental values is the energy consumption of compressors. Since lower energy consumption was achieved in the experimental system with and without HEX using mono and hybrid nanolubricants compared to POE, better environmentally friendly results were obtained in the experimental system using 1 wt% TiO₂-B hybrid nanolubricant. Hybrid nanolubricants were effective in increasing performance and contributed to the experimental system being more environmentally friendly.

Table 6. Processing parameters (İşleme parametreleri)

	Without HEX	With HEX
POE	0.20521	0.19544
0.5 wt% TiO ₂	0.19164	0.18186
1 wt% TiO ₂	0.19001	0.18621
0.5 wt% B	0.19109	0.18458
1 wt% B	0.19489	0.18186
0.5 wt% TiO ₂ -B	0.19164	0.18892
1 wt% TiO ₂ -B	0.18892	0.17969

4. CONCLUSIONS (SONUÇLAR)

Thermodynamic and environmental analysis of the VCRES with and without HEX were applied and interpreted using mono and hybrid nanolubricants at different concentrations (0.5 wt% and 1 wt%) in this

study. Key improvements from the experimental system are presented below:

- In the experimental system used with and without HEX, mono and hybrid nanolubricants reached higher thermal conductivity values compared to POE. The highest thermal

conductivity was determined as 54.57% increase in 1 wt% TiO₂-B hybrid nanolubricant compared to POE. In general, increases in thermal conductivity values were observed with increasing temperature and increasing concentration.

- Higher system performance was obtained with mono and hybrid nanolubricants utilized in the experimental system with and without HEX compared to POE. Compared to POE, there was an increase of 10.46% in 1 wt% TiO₂-B hybrid nanolubricant in the experimental system with HEX. It was determined that the COP value increased as the concentration of mono and hybrid nanolubricants increased compared to POE in the experimental system with and without HEX.
- Mono and hybrid nanolubricants utilized in the experimental system with and without HEX reduced the compressor's energy consumption. Energy consumption was reduced by 7.94% in the experimental system without HEX with 1 wt% TiO₂-B hybrid nanolubricant, and by 8.06% in the experimental system with HEX with 1 wt% TiO₂-B hybrid nanolubricant compared to POE. This can be defined by the fact that mono and hybrid nanolubricants reduce friction in the compressor and reduce the load on the compressor. Thus, the use of mono and hybrid nanolubricants in experimental systems with and without HEXs increases the performance of the compressor.
- Significant changes were observed in the mono and hybrid nanolubricants' total exergy destruction at different concentrations utilized in the experimental system with and without HEX. In the experimental system with and without HEX where mono and hybrid nanolubricants were used, total exergy destruction decreased as the concentration increased. According to the total exergy destruction POE, an improvement of 7.92% was obtained in the experimental system without HEX with 1 wt% TiO₂-B hybrid nanolubricant and 8.72% in the experimental system with HEX with 1 wt% TiO₂-B hybrid nanolubricant. This shows that the mono and hybrid nanolubricants utilized in the experimental system without and with HEX help the improvement of the system.
- In parallel with the COP of mono and hybrid nanolubricants utilized in experimental systems with and without HEXs, exergy efficiency also

increases with increasing concentrations. In exergy efficiency, compared to POE, an improvement of 23.36% was achieved with 1% wt TiO₂-B hybrid nanolubricant in the experimental system without HEX and 28.48% with 1% wt TiO₂-B hybrid nanolubricant in the experimental system with HEX.

- It is observed that mono and hybrid nanolubricants at different concentrations utilized in the experimental system with and without HEX are more environmentally friendly than POE. This can be defined by the fact that mono and hybrid nanolubricants provide lower energy consumption compared to POE. Therefore, using mono and hybrid nanolubricants, less energy is used and less CO₂ will be released into the atmosphere by the compressor. The enviroeconomic value was improved by 7.94% with 1% wt TiO₂-B hybrid nanolubricant in the experimental system with HEX, and it was improved by 8.06% with 1% wt TiO₂-B hybrid nanolubricant in the experimental system without HEX.

Significant improvements in system performance, and thermodynamic and environmental performances were observed by using mono and hybrid nanolubricants in VCRSs with and without HEXs. In particular, using an internal HEX in the VCRS increases the system's performance, and mono and hybrid nanolubricants positively contribute to both performance and environmental aspects. In addition, the use of R1234yf as a refrigerant in the VCRS with and without internal HEX has made the system more environmentally friendly since its global warming potential and ozone depletion potential are lower than other HFC group refrigerants.

Nanofluids significantly help enhance the performance of TESs. However, they have some advantages as well as some disadvantages. One of the most important disadvantages is that the nanofluids obtained by two different methods undergo precipitation in the base fluid after a certain time. For this reason, the use of nanofluids cannot be used commercially in the refrigeration sector. Moreover, although mono nanofluids were widely used in past studies, the number of studies on binary and ternary combinations of nanoparticles is quite low. It would be more beneficial to increase the number of studies in this area.

DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS (ETİK STANDARTLARIN BEYANI)

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.

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

AUTHORS' CONTRIBUTIONS (YAZARLARIN KATKILARI)

Kemal SARIOĞLU: He conducted the experiments, analyzed the results.

Deneyleri yapmış ve sonuçları analiz etmiştir.

Gökhan YILDIZ: 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] Ang TZ, Salem M, Kamarol M, Das HS, Nazari MA, Prabakaran N. A comprehensive study of renewable energy sources: Classifications, challenges and suggestions. *Energy Strategy Reviews*. 2022; 43: 100939
- [2] Ahmad T, Zhang D. A critical review of comparative global historical energy consumption and future demand: The story told so far. *Energy Reports*. 2020; 6: 1973-1991.
- [3] Himeur Y, Alsalemi A, Al-Kababji A, Bensaali F, Amira A, Sardianos C, Varlamis I. A survey of recommender systems for energy efficiency in buildings: Principles, challenges and prospects. *Information Fusion*. 2021; 72: 1-21.
- [4] González-Torres M, Pérez-Lombard L, Coronel JF, Maestre IR, Yan D. A review on buildings energy information: Trends, end-uses, fuels and drivers. *Energy Reports*. 2022; 8: 626-637.
- [5] Taheri S, Hosseini P, Razban A. Model predictive control of heating, ventilation, and air conditioning (HVAC) systems: A state-of-the-art review. *Journal of Building Engineering*. 2022; 60: 105067.
- [6] Zhao Y, Xu X, Qadrdan M, Wu J. Optimal operation of compressor units in gas networks to provide flexibility to power systems. *Applied Energy*. 2021; 290: 116740.
- [7] Zheng W, Hu J, Wang Z, Li J, Fu Z, Li H, Yan J. COVID-19 impact on operation and energy consumption of heating, ventilation, and air-conditioning (HVAC) systems. *Advances in Applied Energy*. 2021; 3: 100040.
- [8] Lv H, Ma H, Mao N, He T. Boiling heat transfer mechanism of environmental-friendly refrigerants: A review. *International Journal of Refrigeration*. 2022; 133: 214-225.
- [9] Alsouda F, Bennett NS, Saha SC, Salehi F, Islam MS. Vapor compression cycle: A state-of-the-art review on cycle improvements, water and other natural refrigerants. *Clean Technologies*. 2023; 5: 584-608.
- [10] Salman M, Dhamodharan P, Kim SC. Analysis of low GWP refrigerants in brazed plate heat exchanger: Evaporation heat transfer and integrated correlations. *Applied Thermal Engineering*. 2024; 253: 123817.
- [11] Savitha DC, Ranjith PK, Talawar B, Rana Pratap Reddy N. Refrigerants for sustainable environment—A literature review. *International Journal of Sustainable Energy*. 2022; 41: 235-256.
- [12] Alba CG, Alkhatib II, Llovel F, Vega LF. Assessment of low global warming potential refrigerants for drop-in replacement by connecting their molecular features to their performance. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*. 2021; 9: 17034-17048.
- [13] Vuppaladadiyam AK, Antunes E, Vuppaladadiyam SSV, Baig ZT, Subiantoro A, Lei G, Duan H. Progress in the development and use of refrigerants and unintended environmental consequences. *Science of the Total Environment*. 2022; 823: 153670.
- [14] Uddin K, Saha BB. An overview of environment-friendly refrigerants for domestic air conditioning applications. *Energies*. 2022; 15: 8082.
- [15] Wu D, Hu B, Wang RZ. Vapor compression heat pumps with pure Low-GWP refrigerants. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2021; 138: 110571.
- [16] Kumar RR, Samykano M, Pandey AK, Kadrigama K, Tyagi VV. Phase change materials and nano-enhanced phase change materials for thermal energy storage in photovoltaic thermal systems: A futuristic approach and its technical challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2020; 133: 110341.
- [17] Sofiah AGN, Samykano M, Pandey AK, Kadrigama K, Sharma K, Saidur R. Immense impact from small particles: Review on stability

- and thermophysical properties of nanofluids. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. 2021; 48: 101635.
- [18] Younes H, Mao M, Murshed SS, Lou D, Hong H, Peterson GP. Nanofluids: Key parameters to enhance thermal conductivity and its applications. *Applied Thermal Engineering*. 2022; 207: 118202.
- [19] Urmi WT, Rahman MM, Kadirgama K, Ramasamy D, Maleque MA. An overview on synthesis, stability, opportunities and challenges of nanofluids. *Materials Today: Proceedings*. 2021; 41: 30-37.
- [20] Li D, Hejazi Dehaghani SH, Karimipour A. Developing a novel hybrid nanofluid preparation method using the droplet generation method: Predicting the thermal conductivity, viscosity, and magnetic properties compared to the conventional two-step method. *International Journal of Thermophysics*. 2024; 45: 84.
- [21] Sandhya M, Ramasamy D, Sudhakar K, Kadirgama K, Harun WSW. Ultrasonication an intensifying tool for preparation of stable nanofluids and study the time influence on distinct properties of graphene nanofluids—A systematic overview. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2021; 73: 105479.
- [22] Adun H, Kavaz D, Dagbasi M. Review of ternary hybrid nanofluid: Synthesis, stability, thermophysical properties, heat transfer applications, and environmental effects. *Journal of Cleaner Production*. 2021; 328: 129525.
- [23] Eshgarf H, Kalbasi R, Maleki A, Shadloo MS, Karimipour A. A review on the properties, preparation, models and stability of hybrid nanofluids to optimize energy consumption. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2021; 144: 1959-1983.
- [24] Bibin BS, Gundabattini E. Investigation on transport properties, heat transfer characteristics and pressure drop of CuO enhanced R1234yf based refrigerant. *Case Studies in Thermal Engineering*. 2023; 49: 103229.
- [25] Sharif MZ, Azmi WH, Zawawi NNM, Ghazali MF. Comparative air conditioning performance using SiO₂ and Al₂O₃ nanolubricants operating with Hydrofluoroolefin-1234yf refrigerant. *Applied Thermal Engineering*. 2022; 205: 118053.
- [26] Bibin BS, Gundabattini E. Investigation on the density of Al₂O₃/R1234yf, TiO₂/R1234yf and CuO/R1234yf nano-refrigerants. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part N: Journal of Nanomaterials, Nanoengineering and Nanosystems*. 2023; 237: 121-129.
- [27] Sharif MZ, Azmi WH, Ghazali MF, Ali HM. Performance augmentation of retrofitted sustainable R1234yf in R134a air conditioning system using Al₂O₃-SiO₂ hybrid nanolubricant. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2023; 148: 10203-10215.
- [28] Bibin BS, Gundabattini E. Pressure drop and heat transfer characteristics of TiO₂/R1234yf nanorefrigerant: A numerical approach. *Sustainability*. 2023; 15: 12605.
- [29] Li S, Lu J. A theoretical comparative study of vapor-compression refrigeration cycle using Al₂O₃ nanoparticle with low-GWP refrigerants. *Entropy*. 2022; 24: 1820.
- [30] Sharif MZ, Azmi WH, Ghazali MF, Zawawi NNM, Ali HM. Numerical and thermo-energy analysis of cycling in automotive air-conditioning operating with hybrid nanolubricants and R1234yf. *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*. 2023; 83: 935-957.
- [31] Pundkar AH, Chaudhari SS. Performance parameters enhancement with application of nanotechnology to MTR refrigeration system. *Materials Today: Proceedings*. 2023; 72: 890-895.
- [32] Zawawi NNM, Azmi WH, Hamisa AH, Hendrawati TY, Aminullah ARM. Experimental investigation of air-conditioning electrical compressor using binary TiO₂-SiO₂ polyol-ester nanolubricants. *Case Studies in Thermal Engineering*. 2024; 54: 104045.
- [33] Tuncer AD, Khanlari A, Sözen A, Gürbüz EY, Şirin C, Gungor A. Energy-exergy and enviro-economic survey of solar air heaters with various air channel modifications. *Renewable Energy*. 2020; 160: 67-85.

Nomenclature

Al_2O_3	Aluminum oxide	SEM	Scanning electron microscope
B	Boron	T	Temperature, K
CO_2	Carbon dioxide	TiO_2	Titanium oxide
COP	Coefficient of Performance	TES	Thermal energy system
CuO	Copper oxide	VCRS	Vapor compression refrigeration system
S	Entropy, kJ/K	\dot{W}	Power, kW
\dot{E}_x	Exergy rate, kW	W_n	Uncertainties in the independent variables
h	Specific enthalpy, kJ/kg	w	Dimensional function
k	Thermal conductivity, W/m.K	W_R	Total uncertainty
\dot{m}	Mass flow rate, kg/s	z_{CO_2}	International carbon price
P	Pressure	Z_{CO_2}	Environmental cost
\dot{Q}	Heat transfer rate, kW	η	Efficiency, %
R	Uncertainty function	\emptyset	Particle volume fraction, wt.%
N_2	Nitrogen	μ	Viscosity of base fluid, Pa.s
PAG	Polyalkylene Glycol	ρ	Density
POE	Polyol ester oil	ψ_{CO_2}	Amount of CO_2 produced by the operation of coal-fired power plants
s	Specific Entropy, kJ/kg.K	φ_{CO_2}	CO_2 emissions' amount decreased by the VCRS
SiO_2	Silicon dioxide		

Subscript

bf	Base fluid	hnf	Hybrid nanofluid
comp	Compressor	in	Inlet
cond	Condenser	mec	Mechanical
dest	Destruction	nf	Nanofluid
el	Electrical	out	Outlet
evap	Evaporator	np	Nanoparticle
ex	Exergy	r	Refrigerant
exv	Expansion valve		

Design of Simulation Program for Analysis of Shortest Path Algorithms in Grid-Based Path Planning

İbrahim ŞANLIALP^{1*}, İbrahim YANDI¹

¹Kırşehir Ahi Evran University, Faculty of Engineering and Architecture, Department of Computer Engineering, Kırşehir, Turkey

Article Info

Research article
Received: 20/10/2024
Revision: 21/12/2024
Accepted: 25/01/2025

Keywords

Optimal Path Planning
Simulation Program
Shortest Path Algorithms
Grid-based Path Planning
Unity 3D

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 20/10/2024
Düzeltilme: 21/12/2024
Kabul: 25/01/2025

Anahtar Kelimeler

Optimal Yol Planlama
Simülasyon Programı
En Kısa Yol Algoritmaları
Izgara Tabanlı Yol Planlama
Unity 3D

Graphical/Tabular Abstract (Grafik Özet)

In this study, a simulation program was developed using the Unity 3D game engine and the C# programming language to determine the shortest path between cells with various terrain types and elevation levels on a hexagonal grid-based map. Figure A shows an image of the developed user interface. / Bu çalışmada, altıgen ızgara tabanlı bir harita üzerinde farklı arazi türleri ve yükseklik seviyelerine sahip hücreler arasındaki en kısa yolu belirlemek amacıyla Unity 3D oyun motoru ve C# programlama dili kullanılarak bir simülasyon programı geliştirilmiştir. Şekil A, geliştirilen kullanıcı arayüzüne ait bir görsel göstermektedir.

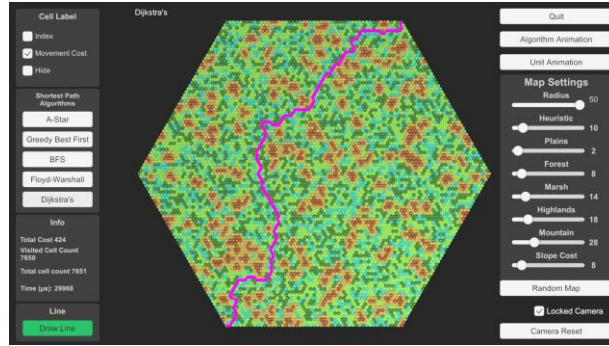


Figure A: Designed user interface / Şekil A: Tasarlanan kullanıcı arayüzü

Highlights (Önemli noktalar)

- The simulation program has been designed for the analysis of shortest path algorithms. / En kısa yol algoritmalarının analizi için bir simülasyon programı tasarlanmıştır.
- Heuristic and non-heuristic algorithms were used to find the shortest path, and these algorithms were compared. / En kısa yolu bulmak için için sezgisel ve sezgisel olmayan algoritmaları kullanılmıştır ve bu algoritmalar karşılaştırılmıştır.
- Evaluations demonstrate that they can aid in selecting the most appropriate algorithm for optimal path planning. / Değerlendirmeler, optimum yol planlaması için en uygun algoritmanın seçilmesine yardımcı olabileceklerini göstermektedir.

Aim (Amaç): The aim of this study is to analyze algorithms to find the shortest path between cells with various terrain types and elevation levels on a hexagonal grid-based map. / Bu çalışmanın amacı, altıgen ızgara tabanlı bir harita üzerinde farklı arazi tipleri ve yükseklik seviyelerine sahip hücreler arasındaki en kısa yolu bulmak için algoritmaları analiz etmektir.

Originality (Özgünlük): The originality of this study lies in the development of a unique simulation program that evaluates various shortest path algorithms on complex hexagonal grid-based maps. / Bu çalışmanın özgünlüğü, karmaşık altıgen ızgara tabanlı haritalar üzerinde çeşitli en kısa yol algoritmalarını değerlendiren özgün bir simülasyon programının geliştirilmesidir.

Results (Bulgular): The results are summarized in three main points: (1) heuristic algorithms demonstrated high performance in terms of computation time and the number of cells visited; (2) the increase in the number of cells visited by the heuristic algorithms was smaller compared to non-heuristic algorithms; (3) heuristic algorithms did not achieve optimum results in terms of traversal cost. / Sonuçlar üç ana noktada özetlenmektedir: (1) Sezgisel algoritmalar, hesaplama süresi ve ziyaret edilen hücre sayısı açısından yüksek performans sergilemiştir; (2) Sezgisel algoritmaların ziyaret ettiği hücre sayısındaki artış, sezgisel olmayan algoritmalara kıyasla daha düşük olmuştur; (3) Sezgisel algoritmalar, geçiş maliyeti açısından optimum sonuçlara ulaşamamıştır.

Conclusion (Sonuç): This study emphasizes the importance of optimal path planning, and its results demonstrate that they can assist in selecting the most suitable algorithm for solving specific pathfinding problems. / Bu çalışma, optimal yol planlamanın önemini vurgulamakta ve sonuçları, belirli yol bulma problemlerinin çözümü için en uygun algoritmanın seçilmesine yardımcı olabileceğini göstermektedir.



Design of Simulation Program for Analysis of Shortest Path Algorithms in Grid-Based Path Planning

İbrahim ŞANLIALP^{1*} , İbrahim YANDI¹

¹Kırşehir Ahi Evran University, Faculty of Engineering and Architecture, Department of Computer Engineering, Kırşehir, Turkey

Article Info

Research article

Received: 20/10/2024

Revision: 21/12/2024

Accepted: 25/01/2025

Keywords

Optimal Path Planning
Simulation Program
Shortest Path Algorithms
Grid-based Path Planning
Unity 3D

Abstract

This study focuses on the analysis of algorithms used to find the shortest path between cells with different terrain types and elevation levels on a map comprising hexagonal cells ranging from 91 to 7651. A simulation program was designed for the analysis and developed using the Unity 3D game engine and the C# programming language. Within the scope of the study, an intelligent agent was incorporated into the simulation. The intelligent agent perceives its environment, evaluates terrain type and elevation factors, and attempts to find the shortest path with the lowest traversal cost between two points based on the selected algorithm. The performance of the algorithms was compared in terms of computation time, the number of cells visited, and traversal cost. The results revealed that the heuristic algorithms demonstrated high performance in computation time and the number of cells visited. However, they did not achieve the same level of success in terms of traversal cost. Furthermore, it was concluded that the increase in the number of cells visited by heuristic algorithms was smaller compared to non-heuristic algorithms. The findings of this study highlight the importance of optimal path planning in determining the most effective algorithm under various conditions and provide valuable contributions to developers for applications requiring efficient navigation in complex environments.

Izgara Tabanlı Yol Planlamasında En Kısa Yol Algoritmalarının Analizi İçin Simülasyon Programı Tasarımı

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi

Başvuru: 20/10/2024

Düzeltilme: 21/12/2024

Kabul: 25/01/2025

Anahtar Kelimeler

Optimal Yol Planlama
Simülasyon Programı
En Kısa Yol Algoritmaları
Izgara Tabanlı Yol Planlama
Unity 3D

Öz

Bu çalışma, 91 ila 7651 arasında değişen altıgen hücrelerden oluşan bir haritada farklı arazi tipleri ve yükseklik seviyelerine sahip hücreler arasındaki en kısa yolu bulmak için kullanılan algoritmaların analizine odaklanmaktadır. Analiz için bir simülasyon programı tasarlanmış ve Unity 3D oyun motoru ile C# programlama dili kullanılarak geliştirilmiştir. Çalışma kapsamında simülasyona bir akıllı ajan entegre edilmiştir. Akıllı ajan, çevresini algılar, arazi türü ve yükseklik faktörlerini değerlendirir ve seçilen algoritmaya göre iki nokta arasında en düşük geçiş maliyetine sahip en kısa yolu bulmaya çalışır. Algoritmaların performansı, hesaplama süresi, ziyaret edilen hücre sayısı ve geçiş maliyeti açısından karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, sezgisel algoritmaların hesaplama süresi ve ziyaret edilen hücre sayısı açısından yüksek performans gösterdiğini ortaya koymuştur. Ancak, geçiş maliyetleri açısından aynı başarıyı sağlayamadıkları görülmüştür. Ayrıca, sezgisel algoritmalar tarafından ziyaret edilen hücre sayısındaki artışın sezgisel olmayan algoritmalara kıyasla daha küçük olduğu sonucuna varılmıştır. Bu çalışmanın bulguları, çeşitli koşullar altında en etkili algoritmayı belirlemede optimum yol planlamanın önemini vurgulamakta ve karmaşık ortamlarda verimli gezinme gerektiren uygulamalar için geliştiricilere değerli katkılar sunmaktadır.

1. INTRODUCTION (GİRİŞ)

Optimization is a discipline that is commonly used to address complex problems in a variety of application areas [1]. Map-based pathfinding problems have a wide range of applications and play

a crucial role in game development, optimization, and artificial intelligence research [2, 3]. However, pathfinding can be resource-intensive, especially when dealing with complex maps [4]. Algorithms such as A-Star and Dijkstra's are commonly used; however, on large, intricate maps, they can be

computationally demanding. For example, while A-Star is highly efficient in finding optimal paths, it incurs higher processing costs. Dijkstra's algorithm, though it consistently finds the shortest path by exploring all nodes, requires significant computational power, especially when using large datasets [5]. As a result, researchers have developed optimization techniques to reduce these costs in game development, optimization, and artificial intelligence research.

Unity [6] is a versatile and innovative game engine that supports real-time 3D animations and provides interactive content to users [7]. It enables seamless integration of movements, environmental elements, and user interfaces into game objects [8] through drag-and-drop or as programmable variables in C# [9]. Furthermore, hexagonal grid maps are more information-rich than traditional square grids. This framework adapts to a variety of scene requirements and offers efficiency, flexibility, and homogeneity [2, 10].

Several studies have focused on grid-based pathfinding problems. In one such study, Barbour emphasized the efficiency of hexagonal grids and proposed a new pathfinding technique that improves runtime and reduces algorithmic complexity [11]. This method enhances the degree of movement of a unit while reducing the costs typically associated with other techniques. Bailey et al. conducted a path-length analysis for grid-based path planning and demonstrated that as node connectivity increases, the percentage difference between a grid path and the real shortest path decreases [12]. In another study, Yang et al. addressed the issue of origin-destination matrix estimation by developing a hexagon-based dynamic graph convolutional network that generates distinct hexagon-based road graphs throughout different time periods [13].

The purpose of this study is to analyze algorithms to find the shortest path between cells with various terrain types and elevation levels on a hexagonal grid-based map. Unity 3D game engine and C# are utilized during the development of the simulation program. The proposed program finds neighborhood connections of each hexagonal cell, which, in turn, defines the movement costs between

them. In addition, it helps identify efficient pathfinding strategies for hexagonal grid environments. The study makes a significant contribution by introducing a simulation tool that evaluates various shortest path algorithms on complex hexagonal grid-based maps.

The second part of the study is about the hexagonal grid-based map structure, and general information about shortest path algorithms is given in Section 3. Section 4 explains the design of the simulation program developed within this study. The analysis and results are explained in Section 5, followed by a discussion in Section 6. The last section presents the conclusions.

2. HEXAGONAL GRID-BASED MAP STRUCTURE (ALTIGEN AĞ TABANLI HARİTA YAPISI)

Advances in computer graphics and game development have enabled new spatial representation and design possibilities. A prominent example is the hexagonal grid-based map, which uses six-sided polygons to achieve more efficient area coverage and enhanced visual appeal [2]. This technique offers a significant alternative to conventional square grid layouts by providing more accurate distance metrics and facilitating smooth user interactions [14, 15].

Hexagonal geometry is suitable for analyzing map usage in experimental research. Hexagons efficiently cover large areas without gaps. Their symmetrical structure enhances spatial tasks like estimating object positions, measuring distances, and determining directions [16]. Figure 1 shows a map design based on a hexagonal grid and a single row path.

The simulation program developed using the Unity 3D game engine features a map structure composed of hexagonal cells arranged in a regular 3D grid. Each cell is connected to six neighboring cells, forming a hexagonal pattern. The neighboring cell information is assigned to each cell, simplifying the tracking and management of connections and transitions. For example, when moving between cells, identifying adjacent cells enables pathfinding algorithms to operate more efficiently [13].



Figure 1. Hexagonal grid-based map design (Altgen ızgara tabanlı harita tasarımı) [13]

2.1. Cube Coordinates (Küp Koordinatları)

The hexagonal grid structure consists of three main axes: x , y , and z . Unlike square grids, which have two axes, hexagonal grids use a symmetrical coordinate system. There is a symmetrical relationship between these axes [17]:

$$x + y + z = 0 \quad (1)$$

The equations describing the relationship between the coordinates and column widths is given:

$$x = t - r/2 \quad (2)$$

$$y = -(t - r/2 + r) \quad (3)$$

$$z = r \quad (4)$$

where t represents the number of columns and width of the hexagonal grid, r represents the number of rows, and height, x , y , and z are the coordinates of the cube; the sum of these three coordinates is 0 [2].

Cube coordinate system enables more effective management of hexagonal grid structures, improves algorithm performance, and enhances user experience. In addition, the flexibility and simplicity of cube coordinate calculations play key roles in creating and managing hexagonal maps. As a result, cube coordinates are applied to the cells when designing the hexagonal grid-based map in this study. Figure 2 illustrates the cube coordinate system used in this study [18].

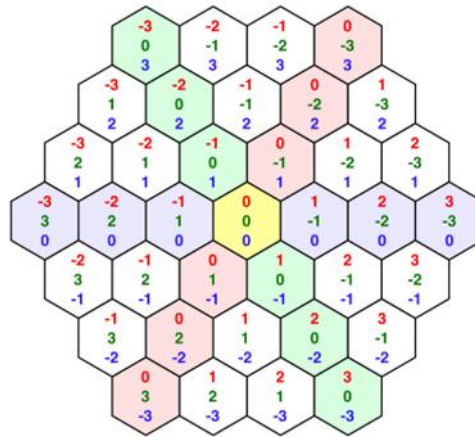


Figure 2. Cube coordinate system used in the study (Çalışmada kullanılan küp koordinat sistemi) [18]

3. SHORTEST PATH ALGORITHM (EN KISA YOL ALGORİTMASI)

A computer application employs a shortest path algorithm, along with a plotting component, to determine the shortest route between two points, from the source to the destination. Shortest path algorithms are essential to identify the shortest and most optimal paths. Many critical applications,

including video games, robotics, GPS, and simulations, depend on these algorithms [19]. This study discusses the shortest path algorithms in simulation program design. The shortest path problems are solved using A-Star, Greedy Best-First Search, Breadth-First Search, Floyd-Warshall, and Dijkstra's algorithms. In the study, A-Star and Greedy Best-First Search represent heuristic

algorithms, while Breadth-First Search, Floyd-Warshall and Dijkstra's algorithms represent non-heuristic algorithms. These algorithms are explained in order.

3.1. A-Star Algorithm (A-Yıldız Algoritması)

The A-Star algorithm is a popular heuristic search algorithm in pathfinding and graph traversal because it efficiently determines the shortest route between two nodes [20, 21]. This algorithm evaluates positions within the search space to identify the optimal path from the beginning point to the target node [22]. A-Star employs an evaluation function to guide its search. The function is defined as [23]:

$$f(n) = g(n) + h(n) \quad (5)$$

where $g(n)$ represents the cost from the starting point to the current node n , and $h(n)$ is the estimated cost from the current node n to the goal node; $f(n)$ is the total estimated cost of the path through node n [24]. The objective of the A-Star algorithm is to find a path that minimizes $f(n)$. The A-Star algorithm employs a heuristic function to calculate the cost h of moving from the current node to the goal node and ensures that the search is both accurate and efficient using the heuristic function $h(n)$ [25].

3.2. Greedy Best-First Search Algorithm (En İyi Öncelikli Arama Algoritması Algoritması)

Greedy Best-First Search (GBFS) algorithm is a heuristic search algorithm used to explore paths in a search space, which is often represented as a tree [26]. It prioritizes nodes based on an evaluation function, selecting the most favorable nodes first to efficiently reach the goal [27]. When exhaustive exploration is too costly, the GBFS algorithm applies a greedy heuristic to narrow down the number of paths, frequently discarding less promising ones [26, 28].

Let $\langle S, s_t, S_g, scor \rangle$ be a state space, where S is a finite collection of states, $scor$ is the successor function, $s_t \in S$ is the beginning state, and $S_g \subseteq S$ is the set of target states. The algorithm defines the state space and applies the heuristic function h to the states in S . The GBFS algorithm generates the initial state s_t , iteratively expands the generated but unexpanded states, and stops when expanding a goal state from S_g [29]. The preference is to expand goal states from S_g if they are generated; otherwise, it expands the state s with the minimum $h(s)$ among all generated but unexpanded states. In GBFS, state s is "opened" when it is generated for the first time and "closed" when it is expanded. The GBFS process involves

generating successors of the current state and adding those that are not yet open or closed to the open list. Once a state is expanded, it is transferred from an open list to a closed list [28].

3.3. Breadth First Search Algorithm (Sığ Öncelikli Arama Algoritması)

The Breadth First Search (BFS) algorithm gradually broadens the solution space and investigates all possible outcomes at each stage [30]. BFS is commonly used to discover the shortest path from a single source in an unweighted graph [31]. BFS operates by visiting all nodes at level n before progressing to the next nodes at level $n+1$. The search begins at the root node and traverses nodes from left to right at each level, advancing to subsequent levels in a systematic manner until a solution is discovered [32,33].

One notable advantage of BFS is its ability to avoid deadlocks; it inevitably finds a solution if it exists. In addition, when multiple solutions are present, the BFS ensures that the minimal solution is identified. However, a significant drawback of this method is its substantial memory requirement, as it needs to store all nodes within the search tree. In addition, BFS can be time-intensive because it must evaluate all nodes at level n before proceeding to find a solution at level $n+1$ [30,32,33].

3.4. Floyd-Warshall Algorithm (Floyd-Warshall Algoritması)

The Floyd-Warshall algorithm is a dynamic method for finding the shortest paths between all pairs of nodes in a directed graph [34,35]. This algorithm solves the problem by using previous solutions that are interconnected, which allows for multiple possibilities. Moreover, Floyd-Warshall algorithm allows for the presence of negative weights on edges, provided there are no negative weight cycles in the graph [35,36].

Given a graph $G=(V,E)$, where V and E represent the set of vertices and the set of edges with weights, respectively, the algorithm calculates the minimum weight path between each pair of vertices. The weights are denoted by $w(e)$. The sum of edge weights along a path gives the total path weight [36,37]. This algorithm creates a distance matrix M , with each entry representing the shortest distance from vertex i to vertex j . $M[i][j]$ is initially set to the weight of edge (i,j) if one exists or infinity otherwise, with the exception of $M[i][i]$, which is set to zero. The algorithm then iteratively updates this matrix by taking each vertex as an intermediate

point and testing whether a shorter path exists through that intermediate vertex [37].

3.5. Dijkstra's Algorithm (Dijkstra Algoritması)

Dijkstra's algorithm solves the problem of determining the shortest path between two nodes in a graph, and it was introduced by Holland in 1970 [19]. This algorithm is designed to find the optimal path. As it searches for the minimum-cost path by evaluating all possible routes starting from the initial point, the search area expands outward in concentric circles. Therefore, it suffers from low search efficiency and extended search times, particularly when the distance to the destination is significant. Both Dijkstra's algorithm and the A-Star algorithm are among the most commonly used shortest-route optimization methods [39,40].

4. DESIGN OF SIMULATION PROGRAM (SİMÜLASYON PROGRAMI TASARIMI)

The simulation program design consists of five stages. In the first stage, the definition and algorithm of the simulation program are created. In the second stage, the terrain structure and starting and ending points are modeled as hexagonal maps using Unity 3D. In the third stage, the shortest path algorithms are programmed using the C# programming language. In the final stage, the user interface is designed, and the simulation program is tested. Each stage is presented sequentially.

4.1. Simulation Program Definition (Simülasyon Programı Tanımı)

In the developed simulation program, a geographical area is represented by a map comprising hexagonal cells. This map consists of cells representing plains, forests, swamps, plateaus, mountain terrains and elevation levels. Each cell on the map is connected to other cells through neighborhood ties, and these ties determine the cost of movement between cells. An intelligent agent integrated into this hexagonal map structure is added to the proposed program. The intelligent agent evaluates its environment by calculating it according to terrain type and elevation parameters and attempts to find the shortest path between two points using the selected shortest pathfinding algorithm. The proposed program solves the problem of finding the shortest path between two given points in this way. The developed simulation program helps determine the most effective pathfinding strategies for the complex structure of hexagonal cells and evaluates the performance of the shortest pathfinding algorithms. The workflow diagram of the developed simulation program is shown in Figure 3.

4.2. Map Modeling (Harita Modelleme)

A variety of map sizes are used at this stage, each revealing different terrain types and slope costs. The map sizes in the simulation program consist of 91, 331, 721, 1261, 1951, 2791, 3781, 4921, 6211, and 7651 cells. In addition, the maps include slope costs. A hexagonal map is constructed by arranging hexagonal cells in a regular grid in 3D space, where each cell is connected to six neighboring cells. The hexagonal map containing the terrain types of the cells created for this study is shown in Figure 4.

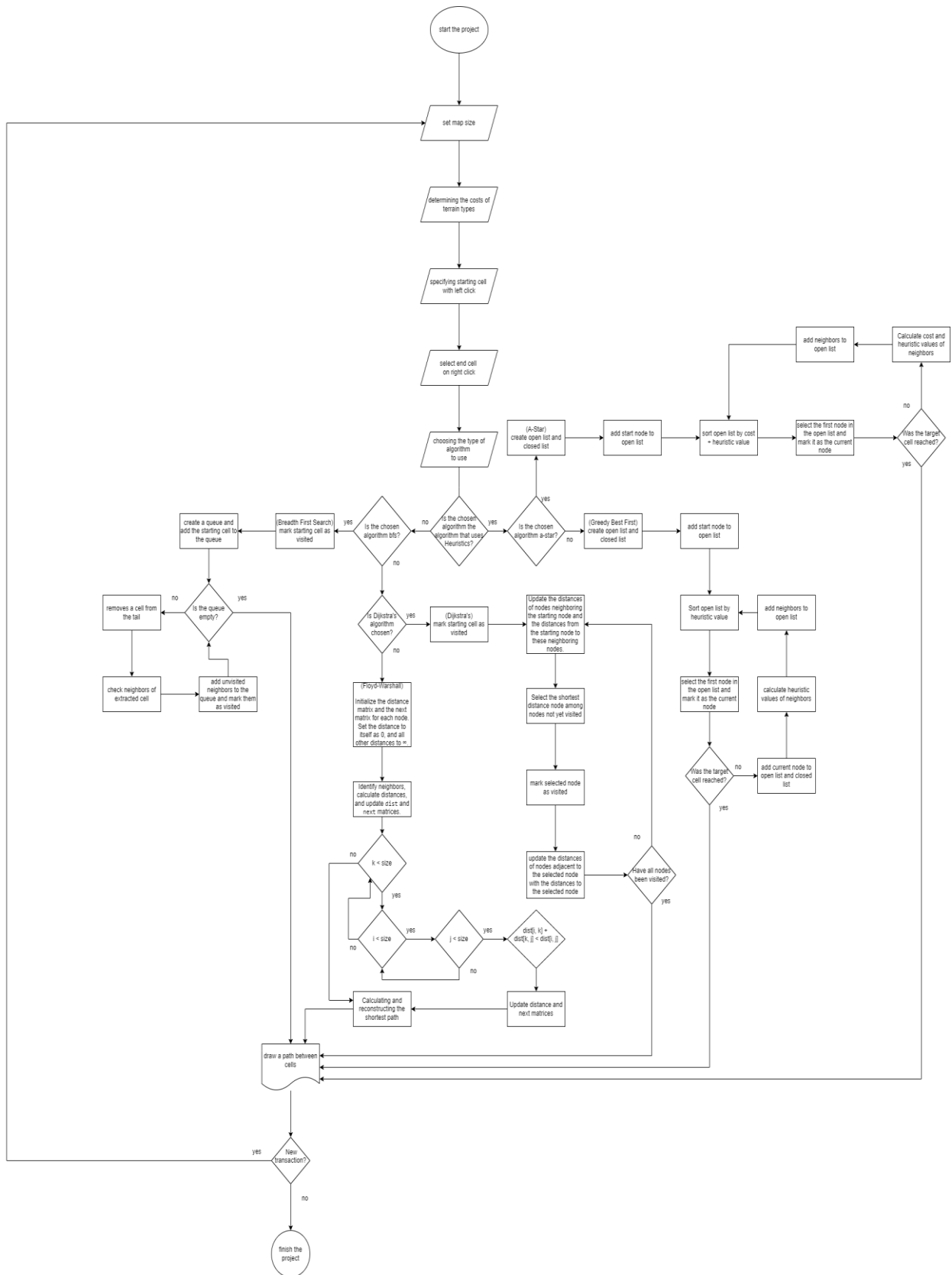


Figure 3. Flow chart of the simulation program (Simülasyon programının akış şeması)

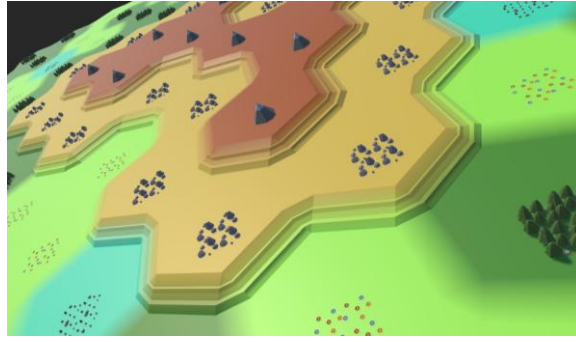


Figure 4. Experimental setup and workflow (Deney tasarımı ve iş akışı)

4.3. Intelligent Agent (Akıllı Ajan)

The intelligent agent is programmed using the C# programming language in Unity and used to perform simulations on a hexagonal map. This intelligent agent perceives its environment, evaluates terrain type and elevation factors, and attempts to find the shortest path between two points using the selected shortest path algorithm. The

representations of the starting and ending points are shown in Figure 5. Here, the starting point represents the intelligent agent model, depicted in the red hexagonal cell. The other end point represents the tent model and is in the blue hexagonal cell.

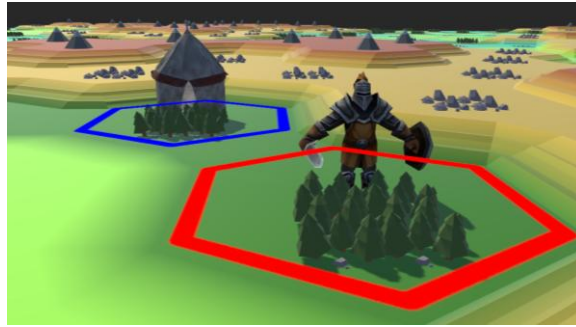


Figure 5. Displaying representations of starting and ending points (Başlangıç ve bitiş noktalarının temsillerinin görüntülenmesi)

To allow the created intelligent agent model to work, an animator is added to the model in Unity, and it is allowed to work on the paths obtained by associating it with the shortest path algorithms.

4.4. User Interface (Kullanıcı Arayüzü)

The user interface is designed for the developed simulation program. This interface is developed using the C# programming language and Unity 3D game engine. With the help of the developed user interface, users can visualize the analysis of the shortest path algorithms and perform simulations. An image taken from the developed user interface unit is shown in Figure 6.

The user interface of the simulation program is composed of several control units, including the cell labeling panel, the shortest path algorithms panel, the information panel, the line panel, the algorithm and navigated cells animation, the parameter editing required to create a hexagonal map, and an option for exiting the simulation program.

The cell labeling panel provides features for displaying the index and movement cost of cells, where the index uniquely identifies each cell, and the movement cost represents the terrain-dependent traversal cost. These values can be toggled using a checkbox control; selecting the "Hide" option ensures that the information remains concealed when not needed. Furthermore, the shortest path algorithm panel allows users to choose from a variety of algorithms, including A-Star, GBFS, BFS, Floyd-Warshall, and Dijkstra's.

The starting point is defined by clicking the left mouse button, whereas the ending point is selected using the right mouse button, enabling the computation of the shortest path based on the chosen points and algorithm. In addition, the information panel offers comprehensive details about the simulation, such as the total cost of the calculated path, the number of cells visited during the algorithm's execution, the total number of cells on the map, and the execution times of the algorithms measured in microseconds. Moreover,

the interface includes a button that visually represents the cells visited by the algorithm. It also has a button that animates the movement of the intelligent agent character as it transitions from the starting to the ending cell. To enhance usability, the camera reset control repositions the camera to its

initial alignment with the intelligent agent character, while the random map button generates a new hexagonal map based on the specified radius, thereby introducing dynamic map variations.

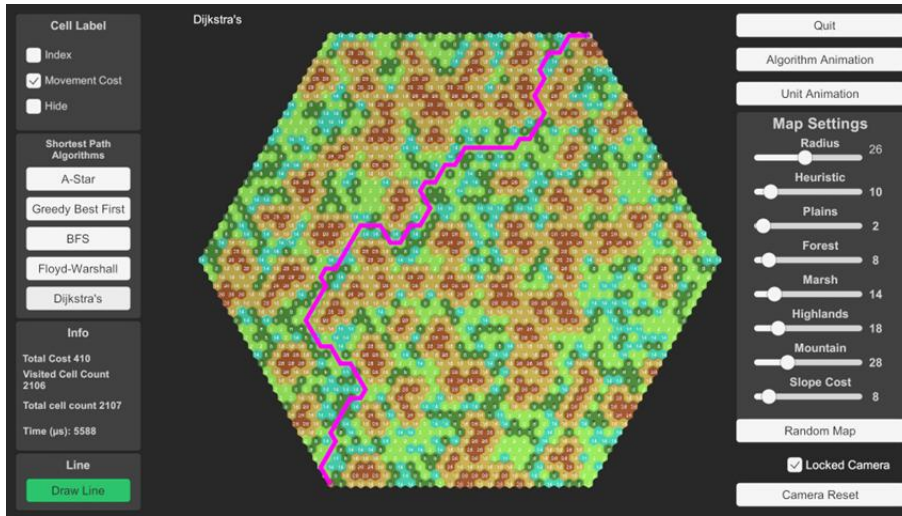


Figure 6. Design of the simulation interface (Simülasyon arayüzünün tasarımı)

By integrating these features into a cohesive design, the user interface provides an interactive simulation environment that seamlessly combines visualization and analysis, facilitating an in-depth exploration of various pathfinding algorithms.

5. ANALYSIS AND RESULTS (ANALİZ VE BULGULAR)

The process of creating hexagonal cells in Unity 3D begins by representing each cell with 6 triangles. These triangles form each side of the hexagon,

ensuring the geometric integrity of the hexagonal shape. The map creation process follows a spiral pattern from the center outwards. This arrangement is performed based on the radius value determined by the user. In other words, the radius determined by the user directly affects the size of the map and the number of hexagons. In the simulation, the radius values are limited to between 5 and 50, and the analyses were carried out in this range. Tests conducted with different radius values for the performance of the algorithms are presented in Figure 7.

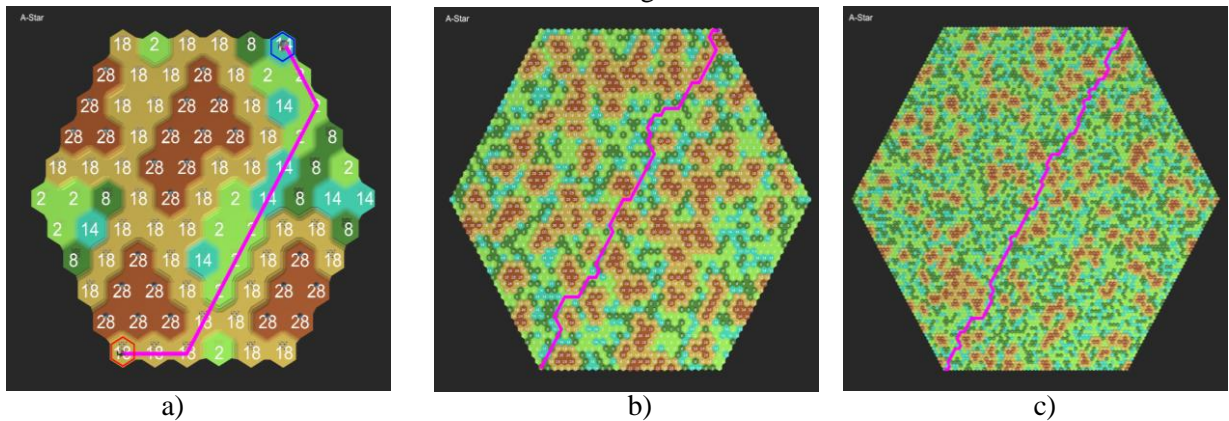


Figure 7. Testing the performance of algorithms with different radius: A-star a) radius 5 b) radius 26 c) radius 50 (Farklı yarıçaplarla algoritmaların performansının test edilmesi: A-Star a) yarıçap 5 b) yarıçap 26 c) yarıçap 50)

The analyses were carried out in the form of scenario-based performance comparisons for different terrain types, elevation levels, and difficulty levels. The performance of each algorithm was measured 100 times. This study was developed and analyzed in the Unity 2021.3.16f1 environment

on a computer: Windows 10, Intel i7, 2.2-GHz CPU, and 32-GB RAM.

Tests were conducted to analyze the shortest path algorithms on maps comprising hexagonal grid-based cells. These tests are scenario-based. In this

scenario, the distance between the starting and ending points on the cube grid maps is calculated as the maximum distance. The distance was calculated using the Manhattan metric [41]. The performance results were comparatively analyzed for various

radii. All algorithms were compared on maps with an equal number of cells, and each test was run for 100 iterations. Table 1 lists the number of cells visited by the algorithms, the shortest path cost, and the computation time results.

Table 1. Comparison of the algorithm results for 100 runs (100 çalıştırma için algoritma sonuçlarının karşılaştırılması)

		A - Star			Greedy Best First Search			Breadth First Search			Floyd-Warshall			Dijkstra's		
Cell Count	Cells Visited	Cost	Time	Cells Visited	Cost	Time	Cells Visited	Cost	Time	Cells Visited	Cost	Time	Cells Visited	Cost	Time	
91	54	238	145	31	242	97	91	242	901	91	222	6.503	90	228	512	
331	101	364	410	61	472	174	331	472	5.701	331	260	243.233	330	272	883	
721	150	502	633	91	524	309	721	650	25.141	721	372	2.187.507	720	372	1.795	
1.261	185	324	938	121	650	500	1.261	524	84.210	1.261	224	10.782.611	1.260	228	2.734	
1.951	293	428	2.303	151	792	783	1.951	792	216.216	1.951	314	37.462.657	1.950	314	4.564	
2.791	337	520	2.559	181	914	1.392	2.791	914	461.616	2.791	350	101.338.671	2.790	350	6.911	
3.781	365	764	3.028	211	1.006	1.290	3.781	1.166	863.089	3.781	472	246.229.475	3.780	472	9.532	
4.921	424	654	4.731	241	1.166	2.229	4.921	1.214	1.430.888	4.921	424	532.024.244	4.920	476	16.562	
6.211	451	764	5.811	271	1.074	2.666	6.211	1.006	2.334.501	6.211	476	1.062.641.112	6.210	402	26.792	
7.651	502	626	5.954	301	1.214	4.633	7.651	1.074	3.540.228	7.651	402	1.933.918.809	7.650	424	28.933	

The comparison of the algorithms in terms of transition cost is shown in Figure 8. A comparison of the algorithms in terms of computation time is

shown in Figure 9. Figures 8 and 9 give the average values obtained over 100 runs of the algorithms.

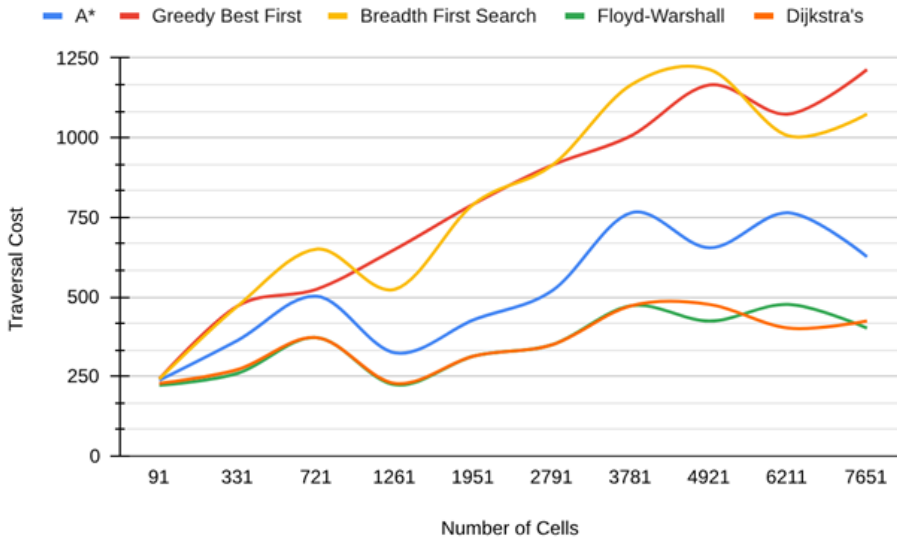


Figure 8. Algorithm comparison of traversal cost (Geçiş maliyetinin algoritma karşılaştırması)

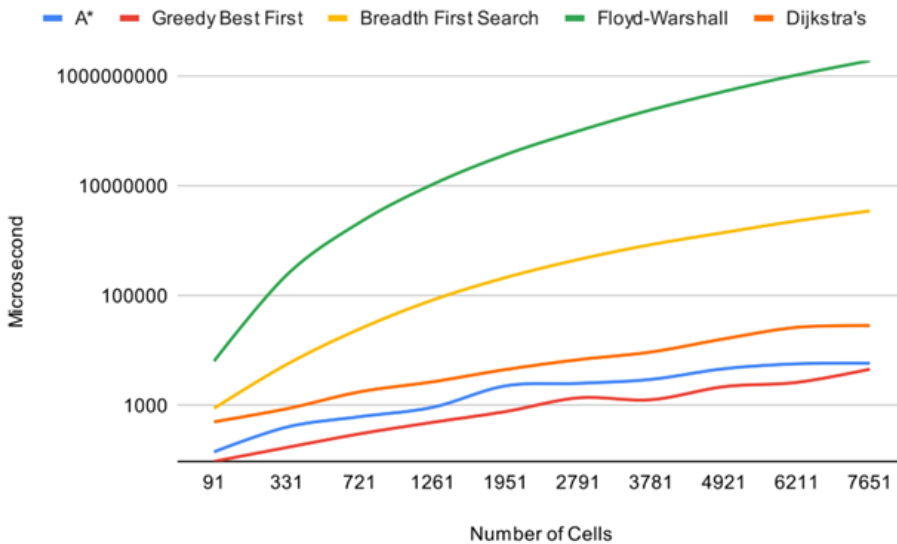


Figure 9. Algorithm comparison of computation times (Hesaplama sürelerinin algoritma karşılaştırması)

In the analyzed algorithms, the number of cells visited increases as the radius expands. However, the increase in the number of cells visited by the heuristic algorithms is smaller than that of the non-heuristic algorithms. Table 1 and Figures 8 and 9 demonstrate that the Floyd-Warshall and Dijkstra algorithms are the most efficient in terms of traversal cost. However, Floyd-Warshall is the least efficient with respect to computation time. The GBFS algorithm is the fastest algorithm in terms of computation time but incurs the highest traversal cost. Similarly, BFS is another algorithm with high traversal costs and visits a large number of cells. In contrast, both A-Star and GBFS visit fewer cells in the generated maps. Among these algorithms, however, A-Star identifies a path with a nearly optimal traversal cost.

6. DISCUSSION (TARTIŞMA)

The A-Star algorithm demonstrates balanced performance by effectively finding the shortest paths while maintaining reasonable computation times. Although the number of cells visited increases with larger radii, the resulting path cost remains relatively low. Its computation time, while moderate, increases proportionally with problem size. In contrast, the Greedy Best-First Search (GBFS) algorithm reaches the target quickly by visiting fewer cells. However, it does not guarantee optimal path costs, making it more suitable for scenarios where fast but suboptimal solutions are acceptable. On the other hand, the Breadth-First Search (BFS) algorithm explores all possible paths, leading to the visitation of a large number of cells. Consequently, it consumes substantial

computational resources and exhibits long running times, particularly for larger radii. Due to its exhaustive search nature, the resulting path costs tend to be higher, rendering BFS inefficient for large-scale problems. The Floyd-Warshall algorithm, while capable of determining the shortest paths between all node pairs by visiting a fixed number of cells, suffers from extremely long computation times, especially as problem size or radii increase. Despite its optimal or near-optimal path costs, this characteristic makes it impractical for solving large-scale problems. Lastly, Dijkstra's algorithm systematically evaluates all possible paths by incorporating movement costs and effectively finds the shortest path with the least overall cost. This property makes it a practical solution for addressing large-scale problems.

7. CONCLUSION (SONUÇ)

This study examines algorithms used to find the shortest path between cells with different terrain types and elevation levels on a map consisting of varying numbers of hexagonal cells. The developed simulation program features a unique interface that allows the comparison of shortest path algorithms in a simulated environment. The performance of these algorithms are compared at different radii and problem sizes. As the radius expands, the number of cells visited by each algorithm increases. The analysis results of shortest path algorithms can be summarized in three main points: (1) heuristic algorithms demonstrated high performance in terms of computation time and the number of cells visited; (2) the increase in the number of cells visited by the heuristic algorithms was smaller compared to non-heuristic algorithms; (3) heuristic algorithms did not achieve optimum results in terms of traversal cost.

In conclusion, these evaluations demonstrate that they can assist in selecting the most appropriate algorithm for solving specific pathfinding problems. When considering performance criteria, it becomes evident that a balance must be established between traversal cost and computation time. The algorithm should be chosen based on the requirements of the target problem. Therefore, this study contributes to identifying the most effective algorithm under different conditions and emphasizes the importance of optimal path planning in determining the best algorithm for various scenarios. Additionally, this study provides valuable insights for developers working on applications that require efficient navigation in complex environments.

ACKNOWLEDGMENTS (TEŞEKKÜR)

This study was supported by Kırşehir Ahi Evran University Scientific Research Projects Coordination Unit (Project Number: MMF.A4.24.004). / Bu çalışma Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından desteklenmiştir (Proje Numarası: MMF.A4.24.004).

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)

İbrahim ŞANLIALP: He directed the study, designed the simulation program, carried out experiments, analyzed the results, wrote and revised the manuscript.

Çalışmayı yönlendirmiş, simülasyon programını tasarlamış, deneyleri gerçekleştirmiş, sonuçları analiz etmiş, makaleyi yazmış ve gözden geçirmiştir.

İbrahim YANDI: He developed the simulation program and significantly contributed to performing experiments and writing.

Simülasyon programını geliştirmiş ve deneylerin gerçekleştirilmesi ile makale yazımına önemli ölçüde 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] Ruszczyński, A. (2011). Nonlinear optimization. Princeton university press.
- [2] Xing, H., Chai, M., Song, Y. (2024). Artificial intelligence pathfinding based on Unreal Engine 5 hexagonal grid map. In 2024 IEEE 4th International Conference on Neural Networks, Information and Communication (NNICE), 1708-1711.

- [3] Adaixo, M. C. G. (2014). Influence Map-Based Pathfinding Algorithms in Video Games, M.S. Thesis, Universidade da Beira Interior.
- [4] Lawande, S. R., Jasmine, G., Anbarasi, J., Izhar, L. I. (2022). A systematic review and analysis of intelligence-based pathfinding algorithms in the field of video games. *Applied Sciences*, 12(11), 5499.
- [5] Johner, R., Lanaia, A., Dornberger, R., Hanne, T. (2022). Comparing the Pathfinding Algorithms A*, Dijkstra's, Bellman-Ford, Floyd-Warshall, and Best First Search for the Paparazzi Problem. In *Congress on Intelligent Systems: Proceedings of CIS*, 561-576.
- [6] Real-Time 3D Development Platform, Unity, <https://unity.com/products/unity-engine>
- [7] Jeong-Shick, Y. (2023). Unity: A Powerful Tool for 3D Computer Animation Production. *Journal of the Korea Computer Graphics Society*, 29(3), 45-57.
- [8] Boyraz G, Kırıcı, P. (2019). 3D Game Design with UNITY 3D Game Simulator. *International Journal of Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies*, 3(2), 225-229.
- [9] Gunes, M., Dilipak, H. (2020). Shortest Path Approach in Pedestrian Transfers Application in Unity. *Gazi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 6(2), 111-119.
- [10] Zhang, X., Zhang, X. (2022). Based on Navmesh to implement AI intelligent pathfinding in three-dimensional maps in UE4. In *Proceedings of the 2022 5th International Conference on Algorithms, Computing and Artificial Intelligence*, 1-5.
- [11] Barbour Jr, R. D. (2008). Reduction of complexity in path finding using grid-based methods. Faculty of Graduate Studies and Research, University of Regina.
- [12] Bailey, J. P., Nash, A., Tovey, C. A., Koenig, S. (2021). Path-length analysis for grid-based path planning. *Artificial Intelligence*, 301, 103560.
- [13] Yang, Y., Zhang, S., Zhang, C., James, J. Q. (2021). Origin-destination matrix prediction via hexagon-based generated graph. In *2021 IEEE International Intelligent Transportation Systems Conference (ITSC)*, 1399-1404.
- [14] Wüthrich, C. A., Stucki, P. (1991). An algorithmic comparison between square-and hexagonal-based grids. *CVGIP: Graphical Models and Image Processing*, 53(4), 324-339.
- [15] Duszak, P. (2022). SLAM on the Hexagonal Grid. *Sensors*, 22(16), 6221.
- [16] Edler, D., Keil, J., Bestgen, A. K., Kuchinke, L., Dickmann, F. (2019). Hexagonal map grids—an experimental study on the performance in memory of object locations. *Cartography and Geographic Information Science*, 46(5), 401-411.
- [17] Her, I. (1995). Geometric transformations on the hexagonal grid. *IEEE Transactions on Image Processing*, 4(9), 1213-1222.
- [18] Hex Map 1, Hexagonal Grid, <https://catlikecoding.com/unity/tutorials/hex-map/part-1/>
- [19] Rafiq, A., Kadir, T. A. A., Ihsan, S. N. (2020). Pathfinding algorithms in game development. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 769(1), 012021.
- [20] Yan, Y. (2023). Research on the A Star Algorithm for Finding Shortest Path. *Highlights in Science, Engineering and Technology*, 46, 154-161.
- [21] Wayahdi, M. R., Ginting, S. H. N., Syahputra, D. (2021). Greedy, A-Star, and Dijkstra's algorithms in finding shortest path. *International Journal of Advances in Data and Information Systems*, 2(1), 45-52.
- [22] Deng, Z., Wang, D. (2023). Research on Parking Path Planing Based on A-Star Algorithm. *Journal of New Media*, 5(1).
- [23] Candra, A., Budiman, M. A., Pohan, R. I. (2021). Application of a-star algorithm on pathfinding game. In *Journal of Physics: Conference Series (IOP Publishing)*, 1898(1), 012047.
- [24] Saian, P. O. N. (2016). Optimized A-Star algorithm in hexagon-based environment using parallel bidirectional search. In *2016 IEEE 8th International Conference on Information Technology and Electrical Engineering (ICITEE)*, 1-5.
- [25] Zhang, H., Tao, Y., Zhu, W. (2023). Global path planning of unmanned surface vehicle

- based on improved A-Star algorithm. *Sensors*, 23(14), 6647.
- [26] Frăsinaru, C., Răschip, M. (2019). Greedy best-first search for the optimal-size sorting network problem. *Procedia Computer Science*, 159, 447-454.
- [27] Heusner, M. (2019). Search behavior of greedy best-first search (Doctoral dissertation, University_of_Basel).
- [28] Heusner, M., Keller, T., Helmert, M. (2017). Understanding the search behaviour of greedy best-first search. In *Proceedings of the International Symposium on Combinatorial Search*, 8(1), 47-55.
- [29] Heusner, M., Keller, T., Helmert, M. (2018). Best-case and worst-case behavior of greedy best-first search. *International Joint Conferences on Artificial Intelligence*, 1463-1470.
- [30] Lina, T. N., Rumetna, M. S. (2021). Comparison analysis of breadth first search and depth limited search algorithms in sudoku game. *Bulletin of Computer Science and Electrical Engineering*, 2(2), 74-83.
- [31] Fayed, H. A., Atiya, A. F. (2013). A mixed breadth-depth first strategy for the branch and bound tree of Euclidean k-center problems. *Computational Optimization and Applications*, 54, 675-703.
- [32] Sihotang, J. (2020). Analysis Of Shortest Path Determination By Utilizing Breadth First Search Algorithm. *Jurnal Info Sains: Informatika dan Sains*, 10(2), 1-5.
- [33] Cormen, T. H., Leiserson, C. E., Rivest, R. L., Stein, C. (2022). *Introduction to algorithms*. MIT press.
- [34] Pandika, I. K. L. D., Irawan, B., Setianingsih, C. (2018). Application of optimization heavy traffic path with floyd-warshall algorithm. In *2018 IEEE International Conference on Control, Electronics, Renewable Energy and Communications (ICCEREC)*, 57-62.
- [35] Mirino, A. E. (2017). Best routes selection using Dijkstra and Floyd-Warshall algorithm. In *2017 IEEE 11th International Conference on Information & Communication Technology and System (ICTS)*, 155-158.
- [36] Hougardy, S. (2010). The Floyd–Warshall algorithm on graphs with negative cycles. *Information Processing Letters*, 110(8-9), 279-281.
- [37] Azis, H., Lantara, D., Salim, Y. (2018). Comparison of Floyd-Warshall algorithm and greedy algorithm in determining the shortest route. In *2018 IEEE 2nd East Indonesia conference on computer and information technology (EIconCIT)*, 294-298.
- [38] Noto, M., Sato, H. (2000). A method for the shortest path search by extended Dijkstra algorithm. In *Smc 2000 conference proceedings. 2000 IEEE international conference on systems, man and cybernetics*, 3, 2316-2320.
- [39] Salem, I. E., Mijwil, M. M., Abdulqader, A. W., Ismaeel, M. M. (2022). Flight-schedule using Dijkstra's algorithm with comparison of routes findings. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, 12(2), 1675.
- [40] Cui, X., Shi, H. (2011). A*-based pathfinding in modern computer games. *International Journal of Computer Science and Network Security*, 11(1), 125-130.
- [41] Du, D. Z., Kleitman, D. J. (1990). Diameter and radius in the Manhattan metric. *Discrete & computational geometry*, 5, 351-356.

Impact of Channel Geometry and Operating Temperature on the Performance of Solid Oxide Electrolyzer Cells: A Study of Uniform and Non-Uniform Temperature Effects

Berre KUMUK^{1*} 

¹Iskenderun Technical University, Iskenderun Vocational School of Higher Education, Department of Motor Vehicles and Transportation Technologies, Iskenderun/HATAY

Article Info

Research article
Received: 07/02/2025
Revision: 16/02/2025
Accepted: 25/02/2025

Keywords

Solid oxide electrolyzer cells
Channel geometry
Uniform temperature distributions
Non-uniform temperature distributions

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 07/02/2025
Düzeltilme: 16/02/2025
Kabul: 25/02/2025

Anahtar Kelimeler

Katı oksit elektrolizör hücreleri
Kanal geometrisi
Düzenli sıcaklık dağılımı
Düzensiz sıcaklık dağılımı

Graphical/Tabular Abstract (Grafik Özet)

This study examines the impact of channel geometry and operating temperature on the performance of Solid Oxide Electrolyzer Cells (SOECs), a promising technology for efficient hydrogen production, both in uniform and non-uniform conditions. / Bu çalışma, verimli hidrojen üretimi için umut verici bir teknoloji olan Katı Oksit Elektroliz Hücrelerinin (SOEC) performansı üzerindeki kanal geometrisi ve işletme sıcaklığının etkilerini, hem uniform hem de non-uniform koşullarda incelemektedir.

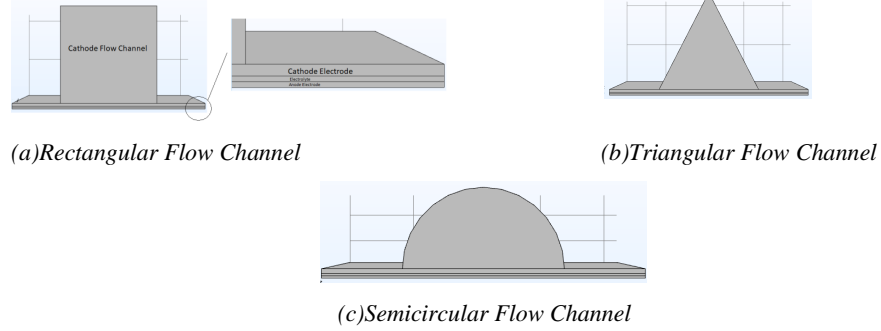


Figure A: SOECs geometry / Şekil A: SOEC geometrisi

Highlights (Önemli noktalar)

- Rectangular channels improve performance by 10%. Increasing the temperature from 1073 K to 1273 K boosts efficiency by 15%. / Dikdörtgen kanallar %10 verimlilik artışı sağlar. Sıcaklık 1073 K'dan 1273 K'ya çıkarsa %15 verimlilik artar.
- Rectangular channels improve mass transport, while serpentine designs enhance gas residence time. / Dikdörtgen kanallar kütle taşımalarını artırırken, serpantin tasarımları gazın ikamet süresini uzatır.
- Non-uniform temperature distribution has little effect on performance in small-scale SOECs. / Düzensiz sıcaklık dağılımı, küçük ölçekli SOEC'lerde performansı çok etkilemez.

Aim (Amaç): This study aims to numerically investigate the effects of flow channel geometry and temperature on the performance of solid oxide electrolyzers. / Bu çalışma, akış kanalı geometrisi ve sıcaklığın katı oksit elektrolizörlerinin performansı üzerindeki etkilerini sayısal olarak incelemeyi amaçlamaktadır.

Originality (Özgünlük): The originality of this study lies in its comprehensive numerical analysis of the effects of different flow channel geometries and temperature variations on the performance of SOECs. / Farklı akış kanalı geometrilerinin ve sıcaklık değişimlerinin SOEC performansı üzerindeki etkilerinin kapsamlı bir sayısal analizine dayanmasıdır.

Results (Bulgular): The results demonstrate that rectangular flow channels enhance performance by 10%, and increasing the temperature from 1073 K to 1273 K improves efficiency by 15%, with minimal impact from non-uniform temperature distribution. / Sonuçlar, dikdörtgen akış kanallarının performansını %10 oranında artırdığını ve sıcaklığın 1073 K'dan 1273 K'ya çıkmasının verimliliği %15 oranında iyileştirdiğini, düzensiz sıcaklık dağılımının ise minimal etkisi olduğunu göstermektedir.

Conclusion (Sonuç): In conclusion, optimizing flow channel geometry and temperature significantly improves the performance of solid oxide electrolyzers, with rectangular channels and higher temperatures offering the best results. / Sonuç olarak, akış kanalı geometrisi ve sıcaklık optimizasyonu, katı oksit elektrolizörlerinin performansını önemli ölçüde artırmakta olup, dikdörtgen kanallar ve daha yüksek sıcaklıklar en iyi sonuçları sunmaktadır.



Impact of Channel Geometry and Operating Temperature on the Performance of Solid Oxide Electrolyzer Cells: A Study of Uniform and Non-Uniform Temperature Effects

Berre KUMUK^{1*}

¹Iskenderun Technical University, Iskenderun Vocational School of Higher Education, Department of Motor Vehicles and Transportation Technologies, Iskenderun/HATAY

Article Info

Research article
Received: 07/02/2025
Revision: 16/02/2025
Accepted: 25/02/2025

Keywords

Solid oxide electrolyzer cells
Channel geometry
Uniform temperature distributions
Non-uniform temperature distributions

Abstract

This study investigates the effects of channel geometry and operating temperature on the performance of Solid Oxide Electrolyzer Cells (SOECs), a promising technology for efficient hydrogen production. Through computational simulations and experimental analysis, we explore the impact of different channel designs—rectangular, triangular, and semicircular—on system efficiency. Among the geometries, rectangular channels deliver the highest performance, with a 10% efficiency improvement over the others. Additionally, increasing the operating temperature from 1073 K to 1273 K accelerates reaction kinetics, yielding a 15% efficiency gain. The study identifies the optimization of both channel design and temperature as crucial for maximizing hydrogen production. Furthermore, the research finds that non-uniform temperature distribution has minimal impact on performance for the small-scale fuel cell configuration used. These findings emphasize the importance of understanding the interplay between geometry and operating conditions in SOEC design and contribute to the advancement of sustainable hydrogen production technologies.

Katı Oksit Elektrolizör Hücrelerinin Performansı Üzerindeki Kanal Geometrisi ve Çalışma Sıcaklığının Etkisi: Düzgün ve Düzgün Olmayan Sıcaklık Etkilerinin İncelenmesi

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 07/02/2025
Düzeltilme: 16/02/2025
Kabul: 25/02/2025

Anahtar Kelimeler

Katı oksit elektrolizör hücreleri
Kanal geometrisi
Düzenli sıcaklık dağılımı
Düzensiz sıcaklık dağılımı

Öz

Bu çalışma, verimli hidrojen üretimi için umut verici bir teknoloji olan Katı Oksit Elektrolizör Hücrelerinin (SOEC) performansı üzerindeki kanal geometrisi ve çalışma sıcaklığının etkilerini incelemektedir. Hesaplamalı simülasyonlar ve deneysel analizler yoluyla, farklı kanal tasarımlarının — dikdörtgen, üçgen ve yarım daire — sistem performansı üzerindeki etkisi araştırılmaktadır. Geometrilere arasında dikdörtgen kanallar, diğerlerine kıyasla %10 oranında daha yüksek bir performans sergileyerek en yüksek verimliliği elde etmektedir. Ayrıca, çalışma sıcaklığının 1073 K'den 1273 K'ye yükseltilmesi, reaksiyon kinetiğini hızlandırarak %15 oranında bir verimlilik artışı sağlamaktadır. Çalışma, hem kanal tasarımının hem de sıcaklık optimizasyonunun, hidrojen üretiminin maksimize edilmesi açısından kritik öneme sahip olduğunu belirlemektedir. Ayrıca, araştırma, kullanılan küçük ölçekli yakıt hücresi yapılandırmasında düzensiz sıcaklık dağılımının performans üzerinde minimal bir etkisi olduğunu ortaya koymaktadır. Bu bulgular, SOEC tasarımında geometri ve işletme koşulları arasındaki etkileşimin anlaşılmasının önemini vurgulamakta ve sürdürülebilir hidrojen üretim teknolojilerinin gelişimine katkı sağlamaktadır.

1. INTRODUCTION (GİRİŞ)

Solid oxide electrolyzers (SOECs) have garnered increasing attention as key components in the development of advanced energy conversion technologies. These electrolyzers utilize high-temperature solid oxide electrolytes to facilitate electrochemical reactions, positioning them as a promising approach for the efficient and sustainable production of hydrogen and other important electrochemical processes [1]. The inherent characteristics of SOECs, including their high operational efficiency, rapid response times, and adaptability to a range of applications, have driven substantial research and development efforts within the field of electrochemical engineering.

SOECs operate at elevated temperatures, typically exceeding 600°C, which enhances the ion conductivity of the solid oxide electrolyte. This reduction in electrical resistance leads to improved efficiency, enabling SOECs to achieve higher current densities with lower energy input when compared to other types of electrolyzers, such as proton exchange membrane (PEM) electrolyzers or alkaline electrolyzers [2]. This high-temperature operation is a key factor in the performance advantages of SOECs.

Hydrogen production plays a central role in various industrial and energy sectors, particularly in the context of its integration with gas turbine technology. Gas turbines, widely utilized in power generation and aviation, stand to benefit significantly from hydrogen as a clean and sustainable fuel. Hydrogen can serve as a carbon-neutral or low-carbon fuel, which has the potential to drastically reduce greenhouse gas emissions in gas turbine operations. By integrating hydrogen production and storage systems, gas turbines can transition from reliance on fossil fuels to hydrogen, contributing to cleaner, more environmentally friendly power generation and propulsion systems. Additionally, hydrogen's high energy density and efficient combustion properties make it an ideal candidate for enhancing the performance and reducing the environmental footprint of gas turbines, ultimately supporting the broader goal of a sustainable energy future [3,4].

The growing interest in SOECs is largely driven by their potential to address critical challenges in the transition toward a cleaner, more sustainable energy landscape. As global efforts intensify to reduce greenhouse gas emissions and achieve energy independence, SOECs present a viable solution for harnessing renewable energy sources to produce

green hydrogen. This hydrogen plays an essential role in the decarbonization of sectors such as transportation, industry, and energy storage. This paper aims to explore the influence of channel geometry and temperature on the performance of SOECs.

Existing literature includes both numerical and experimental studies that investigate the performance of solid oxide electrolyzers under various parameters [5–10]. For instance, Ni et al. [11] examined the effects of component thickness on an anode-supported solid oxide electrolysis configuration. Their findings indicated that increasing electrode porosity and pore size could reduce voltage losses. Additionally, both elevated temperature and higher steam molar fractions were found to enhance the electrical efficiency of solid oxide electrolysis. Chen et al. [12] developed a numerical cell model that integrates electrochemical, flow, and thermal aspects, validating the model through comparisons with current-voltage curves and electrochemical impedance spectroscopy. Their study demonstrated significant performance improvements as operating temperature increased and uniformity of temperature distribution enhanced by higher steam partial pressures. However, it resulted in a reduction in steam conversion rates. Similarly, Wang et al. [13] investigated the performance of intermediate-temperature solid oxide electrolysis cells at 650°C, finding that higher steam concentrations reduced the cell voltage, primarily by diminishing steam electrode polarization. Srinivas et al. [14] explored the impact of various electrolytes, such as scandium-doped zirconia (SCGZ), yttrium-stabilized zirconia (YSZ), and gadolinium-doped ceria (GDC), under different temperature and pressure conditions. Their simulation models, incorporating convection, diffusion, and the Butler–Volmer equation, demonstrated a high R^2 value of over 0.996 in predicting polarization curves and electrochemical behavior. Notably, the impedance of SCGZ was significantly lower compared to YSZ and GDC, suggesting its superior electrochemical performance.

Furthermore, several studies have investigated the effects of material properties on the performance of SOECs [15–19]. Biswas et al. [20] examined the electrochemical performance of three distinct cathode configurations made from copper and gadolinia-doped ceria (Cu-GDC) cermets for steam electrolysis at 800°C in a tubular SOEC. Their research achieved an impressive polarization resistance of 0.42 Ωcm^2 at 1.60 V and a Faradaic efficiency exceeding 95%. They also noted that the

optimal steam flow rate for maximizing current density at a given operating temperature was influenced by the concentration of electrocatalytically active sites. Xing et al. [21] conducted experimental research on $\text{La}_{0.75}\text{Sr}_{0.25}\text{Cr}_{0.5}\text{Mn}_{0.5}\text{O}_{3-\delta}$ (LSCM)-YSZ cathode-supported SOECs, reporting a hydrogen production rate of $561 \text{ mL cm}^{-2} \text{ h}^{-1}$ at 850°C with 80% absolute humidity at 1.6 V. Bercero et al. [22] investigated the performance of Ni-YSZ/10Sc1CeSZ/Pt single cells, obtaining current densities of -450 mA cm^{-2} at 1.5 V at 900°C with an ASR of $0.99 \Omega \text{ cm}^2$.

Additionally, numerous studies have examined hydrogen production from seawater electrolysis, both experimentally and numerically [23–28]. Liu et al. [29] demonstrated the outstanding performance of solid oxide electrolysis cells in seawater splitting, highlighting their potential for large-scale hydrogen production.

A review of the literature reveals that while solid oxide electrolyzers with different flow channel geometries offer various advantages and disadvantages, no comprehensive numerical or experimental study explicitly addressing the impact of flow channel geometry on SOEC performance has been found [30,31].

In this study, the numerical effects of flow channel geometry on the performance of solid oxide electrolyzers are investigated. Additionally, the influence of temperature on the performance of different channel geometries is examined numerically. It is well-established that numerical studies are a vital first step in advancing experimental research [32]. The results of this study are expected to fill a critical gap in the literature and provide valuable insights for researchers intending to conduct experimental investigations into flow channel geometry in SOECs.

2. MATERIALS AND METHODS (MATERIYAL VE METHOD)

2.1. Mathematical Model (Matematiksel Model)

Solid oxide electrolyzers (SOECs) are a specialized category of electrochemical devices that hold significant importance in the field of energy conversion and storage. These devices are predominantly utilized for the production of hydrogen and syngas through the electrolysis of water and carbon dioxide. The development of a precise and reliable mathematical model for SOECs is crucial for optimizing their performance, as well as for gaining a deeper understanding of the complex physical and chemical processes involved

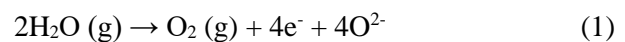
in their operation. A robust mathematical model of a solid oxide electrolyzer generally incorporates several key components that are essential for simulating the electrochemical behavior, heat transfer, fluid dynamics, and material properties that influence the overall efficiency and effectiveness of the system.

The fundamental electrochemical processes occurring within the SOEC, including oxygen and hydrogen ion transport across the solid oxide electrolyte, electrochemical reactions at the electrodes, and charge transfer kinetics.

The electrochemical reactions that occur in a solid oxide electrolyzer (SOEC) during the electrolysis of water involve the splitting of water molecules (H_2O) into hydrogen (H_2) and oxygen (O_2) gases. SOECs are high-temperature electrochemical devices that use a solid oxide electrolyte to facilitate this reaction. Eq.1 and Eq.2 are the two main electrochemical reactions that take place in a solid oxide electrolyzer:

Anode Reaction (Oxygen Evolution Reaction):

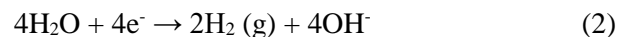
At the anode (the positive electrode), oxygen ions (O_2^-) are generated from oxygen molecules in the air. The electrochemical reaction at the anode can be represented as follows:



In this reaction, water molecules are ionized, and oxygen gas is evolved while releasing electrons. These electrons then flow through the external circuit to the cathode.

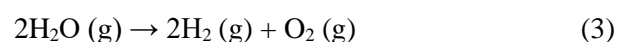
Cathode Reaction (Hydrogen Evolution Reaction):

At the cathode (the negative electrode), hydrogen gas (H_2) is produced by the reduction of water molecules. The electrochemical reaction at the cathode can be represented as follows:



In this reaction, water molecules gain electrons to form hydrogen gas, and hydroxide ions (OH^-) are produced.

The overall electrochemical reaction for a solid oxide electrolyzer is the combination of these two half-reactions, which can be written as Equation 3:



It's important to note that SOECs operate at elevated temperatures, typically above 600°C, which is necessary for the solid oxide electrolyte to be sufficiently conductive to facilitate the ion transport and electrochemical reactions. Additionally, the exact reaction mechanisms and kinetics may vary depending on the specific materials and design of the SOEC.

The physical geometry of the SOEC, as well as the boundary conditions, including temperature profiles, gas flow rates, and electrical current densities at the electrodes.

No-Slip Conditions on Walls: Non-slip conditions were assumed for velocity at the impermeable walls, where the velocity at the wall contact point is zero.

Negligible Boundary Layers: Boundary layers for gas flow were neglected since they are insignificant compared to the corresponding radius.

Zero Flux at Electrode and Electrolyte Ends: It was assumed that the flux is zero at the ends of both the electrode and the electrolyte.

Uniform Potential and Species Concentrations at Electrode-Gas Channel Interface: It was presumed that the electrical potential and species

concentrations are uniform at the interface between the electrode and gas channel.

Boundary Treated as Well-Insulated: The boundary was considered well-insulated, implying that there is no change in variables at the boundary.

Zero Electric Potential at Fuel and Air-Side Interconnects: The electric potential was assumed to be zero at the fuel and air-side interconnects.

Constant Current Density at Interconnect Base: At the base of the interconnect, the current density was considered constant.

The main assumptions made in this study were as follows [33]:

- The distribution of temperature within each subsystem is assumed to be constant due to its tiny size.
- The velocities of the fluid and partial pressures are assumed to be uniformly uniform in each subsystem and in every direction.
- The viscosity of the fluid in each subsystem is the same.

Table 1 shows the governing equations for the SOEC model [12,35].

Table 1. Governing equations (Genel denklemler)

Description	Governing equaiton
Mass	$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u}) = Q_{mass}$
Momentum	$\nabla \left\{ -pI + \frac{\mu}{\varepsilon} [\nabla \vec{u} + (\nabla \vec{u})^T] - \frac{2\mu}{3\varepsilon} \nabla \vec{u} \right\} - \left(\frac{\mu}{B_0} + Q_{mom} \right) \vec{u}$ $= \frac{\rho}{\varepsilon} \left(\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \frac{\vec{u}}{\varepsilon} \nabla \vec{u} \right)$
Conservation of species	$\varepsilon \rho \frac{\partial \omega_i}{\partial t} + \nabla \cdot \vec{J}_i + \rho (\vec{u} \cdot \nabla) \omega_i = R_i$
Conservation of charge	$\nabla \cdot (-\sigma_{ion} \varphi_{ion}) = Q_{ion}; \nabla \cdot (-\sigma_e \varphi_e) = Q_e$
Energy	$\rho C_P \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_P \vec{u} \cdot \nabla T = \nabla \cdot (\kappa^{eff} \nabla T) + Q$

To further enhance the understanding of mass transport within the SOEC, this study employs a set of well-established mathematical models. These models account for the primary transport phenomena, including diffusion, convection, and electrochemical fluxes, which govern the

movement of reactants and products in the cell. However, it is essential to recognize that the transport behavior in SOECs is highly influenced by the intricate interplay between flow dynamics and thermal gradients. In recent years, SOECs have garnered significant attention as promising devices

for sustainable hydrogen production and energy conversion due to their high efficiency and versatility. The accurate modeling of SOEs plays a crucial role in optimizing their performance and understanding fundamental processes. In this study, we employ COMSOL Multiphysics, a powerful finite element analysis software, to develop a comprehensive numerical model for the simulation of SOEC operation. This model aims to provide

valuable insights into the complex electrochemical and transport phenomena occurring within the SOEC, enabling the design and improvement of these vital components in various energy conversion applications. The (a) rectangular flow channel, (b) triangular flow channel and (c) semicircular flow channel geometry used in the SOEC analyses are shown in Figure 1 and the model parameters are given in Table 2.

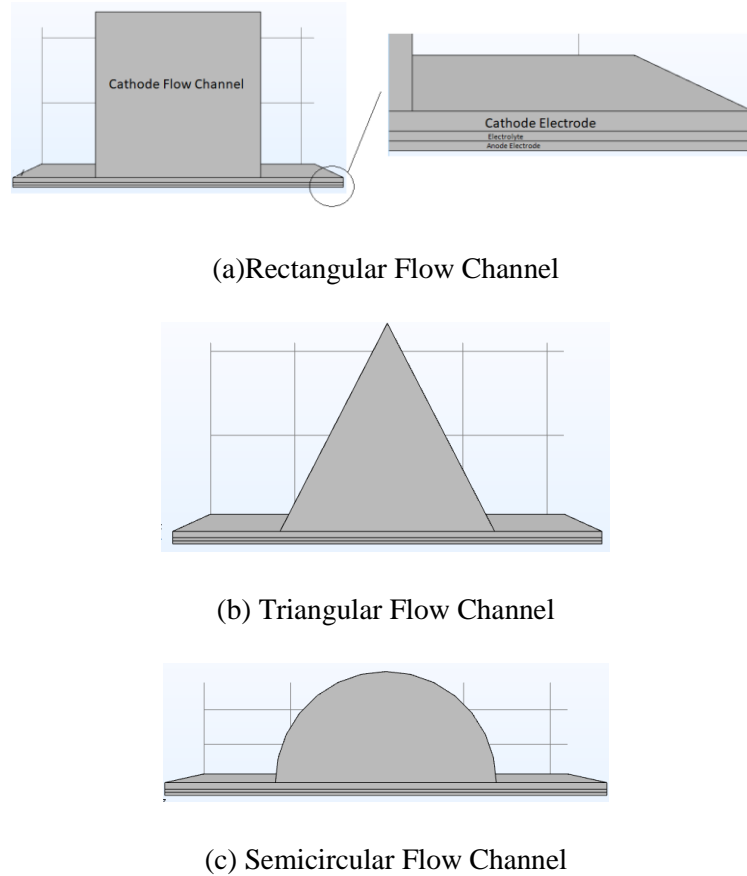


Figure 1. SOECs geometry [35] (Katı oksit elektrolizör hücreleri geometrisi)

Table 2. Processing parameters (İşleme parametreleri)

Cell Structure Parameters		
Anode thickness	15×10^{-6}	[m]
Electrolyte thickness	15×10^{-6}	[m]
Cathode thickness	31×10^{-6}	[m]
Cell length	40	[mm]
Channel height	1.05	[mm]
Channel weight	1.05	[mm]

Cell Physics Parameters		
Electrode permeability	10^{-13}	[m ²]
Gas pore volume fraction	0.475	
Electrolyte volume fraction	0.4	
Electrode specific surface area	1.025×10^5	[1/m]
Cell voltage	1.4	[V]

3. RESULTS (BULGULAR)

The use of COMSOL Multiphysics, enhanced by the specialized Fuel Cell & Electrolyzer Module for numerical simulations, facilitated a thorough investigation of cathode-supported, rectangular flow channel SOECs. This approach allowed for detailed analysis of various operational parameters, leading to a deeper insight into the behavior of SOECs and the optimization of their performance under different conditions.

3.1 Model Validation (Model Doğrulaması)

In this study, the results effectively validated our numerical analysis through comprehensive experimental investigations, demonstrating a high

level of consistency and agreement. As shown in Figure 2, the outcomes from both numerical simulations and experimental measurements were in remarkable alignment, thereby confirming the accuracy and reliability of our computational models. Building on this strong correlation between numerical and experimental data, we have proceeded with further analyses, using these validated parameters as a solid foundation. This not only highlights the robustness of our numerical approach but also strengthens our confidence in the predictive capabilities of the model for future research and practical applications. The numerical model utilized in this study was validated against experimental data, ensuring the reliability of the results.

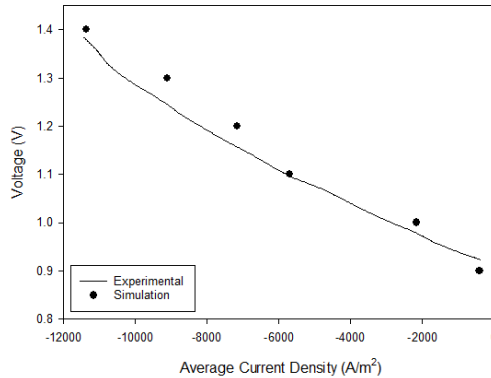


Figure 2. Model validation with experimental results [12,35] (Deneysel sonuçlarla model doğrulaması)

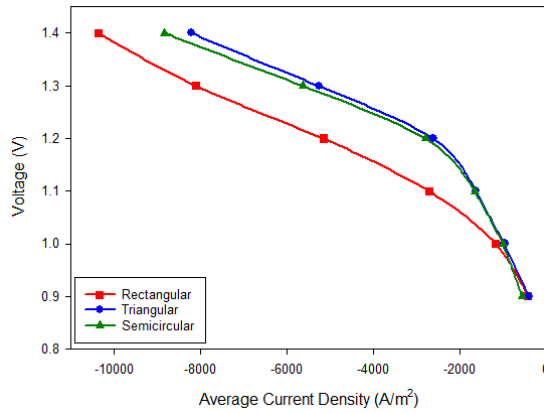
3.2 Effect of flow channel geometry (Akış kanalı geometrisinin etkisi)

Polarization losses refer to the resistive losses that occur at the electrode surfaces within an electrochemical cell when an electrical current passes through. These losses are caused by the buildup of charged species at the electrode-electrolyte interface, which impedes the effective transfer of charge and reduces the overall efficiency of the cell. In this study, we performed an extensive

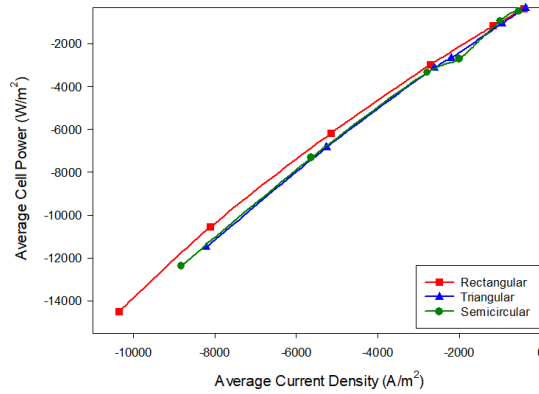
comparison of polarization and performance outcomes across rectangular, triangular, and semicircular flow channels at an operating temperature of 1073 K. The results of this analysis are presented visually in Figure 3. Through this comparison, we were able to identify the unique advantages and trade-offs associated with each channel geometry, particularly regarding their influence on polarization and overall performance. These findings offer crucial insights into the

optimization of flow channel designs for high-temperature applications, emphasizing the importance of selecting the most appropriate geometry to improve the efficiency and effectiveness of the system. Flow channel geometry

plays a significant role in mass transport within SOECs. This study demonstrates the impact of geometric factors, such as channel width and length, on the overall electrochemical performance.



(a)



(b)

Figure 3. Flow channel geometry effect on (a) polarization curve and (b) performance curve [35] (Akış kanalı geometrisinin etkisi a) Polarizasyon eğrisi b) Performans eğrisi)

As shown in Figure 3, the rectangular flow channel SOEC demonstrated superior performance based on the conducted analysis. Due to its four equal sides, the rectangular geometry offers a larger internal surface area compared to other flow channel shapes of similar dimensions. This expanded surface area allows for a more excellent distribution of electrocatalysts, thereby facilitating a higher volume of simultaneous electrochemical reactions. Consequently, this improves the overall performance of the system by promoting more efficient reactant conversion.

In addition, rectangular flow channels typically provide a more uniform distribution of reactants across the electrode surfaces. The consistent flow of gases and electrolytes minimizes the formation of localized concentration gradients, thereby reducing

polarization losses. This enhancement in mass transport contributes to improved cell performance. Furthermore, rectangular flow channels generally exhibit lower pressure drop characteristics compared to triangular or semicircular geometries. Reduced pressure drops indicate that the system requires less energy to maintain the desired flow rates, resulting in better overall energy efficiency.

The rectangular geometry also promotes efficient heat transfer. Heat generated during the electrochemical reactions is more effectively dissipated within square channels, helping maintain a consistent temperature throughout the cell. This thermal stability is critical for ensuring optimal electrolyte conductivity and, consequently, for maximizing overall performance.

The mole fraction of water can be seen in Figure 4 and the mole fraction of hydrogen can be seen in Figure 5 (A) rectangular flow channel, (B) triangular flow channel and, (C) semicircular flow channel respectively.

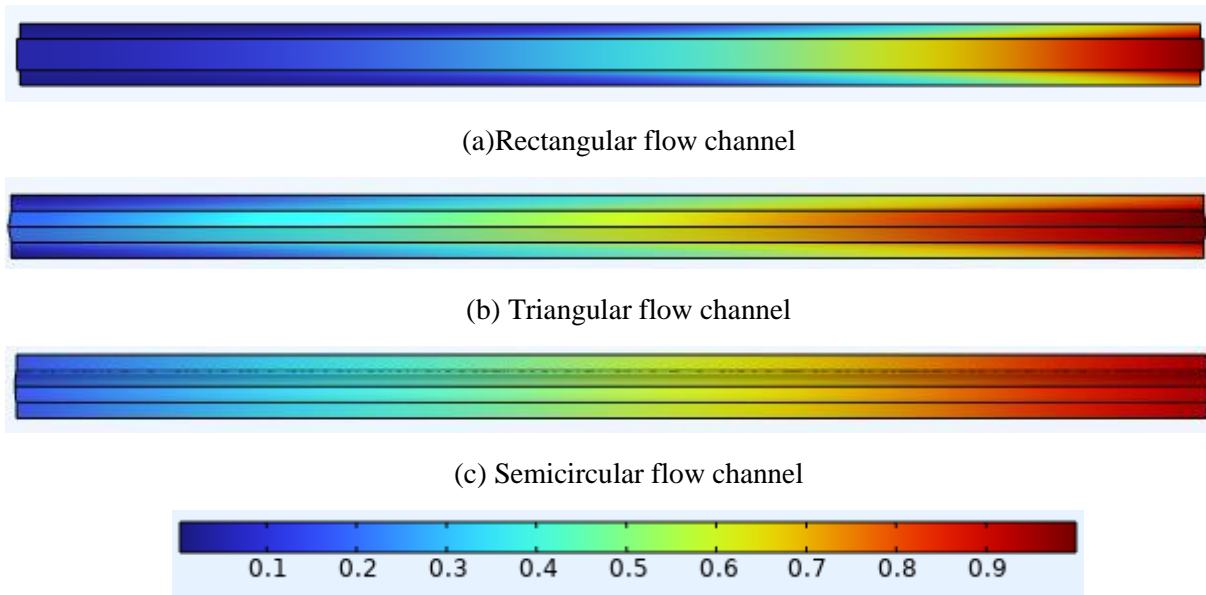


Figure 4. Mole fraction of the water. (Suyun mol dağılımı)

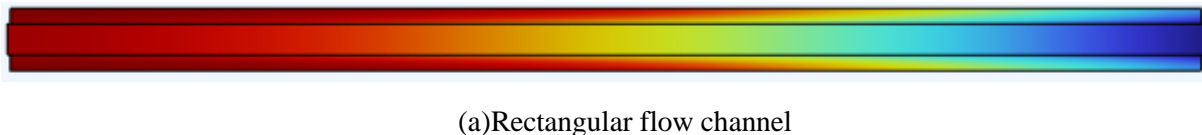
The mole fraction of water in rectangular, triangular, and semicircular flow channels can be understood by considering the geometry of each channel and its influence on the distribution and concentration of water vapor within the system. In rectangular channels, the relatively larger cross-sectional area provides more space for water vapor to accumulate. This increased surface area facilitates efficient diffusion and mixing of the water vapor, resulting in a more uniform distribution of water molecules along the length and width of the channel. Due to the rectangular shape, water molecules exhibit greater mobility, promoting a homogeneous mole fraction of water across the entire channel.

In contrast, triangular channels present a more constrained geometry, with a narrower base compared to a rectangular channel of the same width. This limitation in available space leads to variations in water vapor distribution, with higher concentrations typically observed at the center of the channel and lower concentrations near the edges. The more confined environment in triangular channels may also hinder the diffusion and mixing

of water vapor, further impacting the uniformity of the mole fraction.

Semicircular channels, characterized by their curved shape, introduce additional complexities in the distribution of water vapor. Water vapor tends to accumulate near the center of the channel, where the curvature is most pronounced, resulting in higher mole fractions of water at the core and lower concentrations at the edges. The curvature of the channel may limit the lateral movement of water vapor molecules, exacerbating concentration gradients across the channel.

Overall, the mole fraction of water in these different geometries is heavily influenced by the specific flow patterns, diffusion characteristics, and available space within each channel. Rectangular channels generally offer a more uniform distribution of water vapor, while triangular and semicircular channels exhibit concentration variations due to their geometric constraints and the impact of curvature on diffusion dynamics.



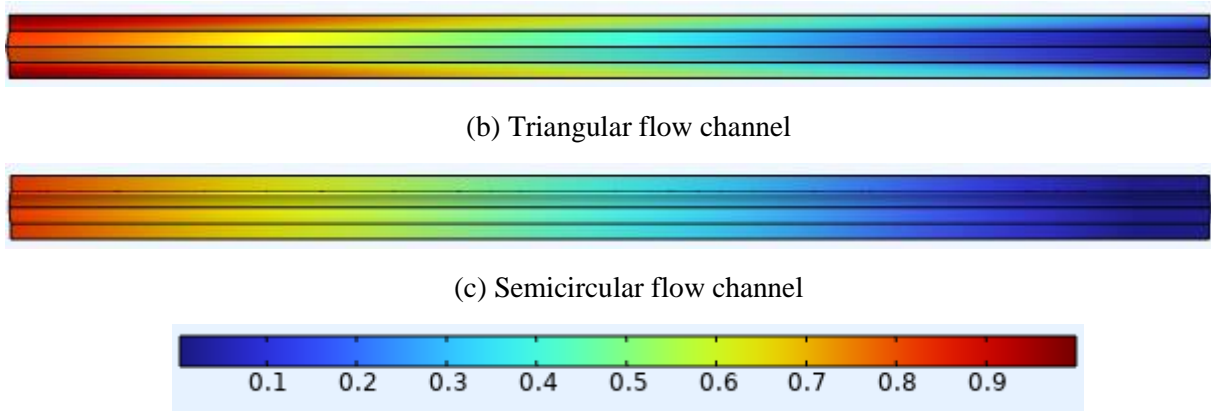


Figure 5. Mole fraction of the hydrogen. (Hidrojen mol dağılımı)

As illustrated in Figure 5, rectangular flow channels, with their relatively spacious cross-sectional area, provide ample space for the presence of hydrogen molecules. The large surface area facilitates efficient diffusion and thorough mixing of hydrogen gas, resulting in a relatively uniform distribution of hydrogen throughout the channel. The rectangular geometry promotes a consistent mole fraction of hydrogen, extending across both the width and length of the channel, assuming that other factors, such as flow rate and operating conditions, are kept constant.

In contrast, triangular flow channels present a more constrained geometry, characterized by a narrower base than a rectangular channel of the same width. This limitation in space can lead to variations in hydrogen distribution, with higher concentrations near the center of the channel and lower concentrations at the edges. The confined geometry of triangular channels may also slow down the diffusion and mixing of hydrogen, which negatively impacts the uniformity of the hydrogen mole fraction.

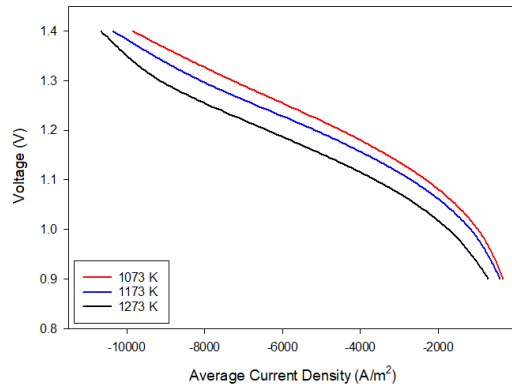
Semicircular channels, due to their curved shape, result in distinct hydrogen distribution patterns. Hydrogen gas tends to accumulate in the central region of the semicircular channel, where the curvature is most pronounced. This causes the mole fraction of hydrogen to be higher at the center, gradually decreasing toward the edges of the channel. The curved structure of these channels restricts the lateral movement of hydrogen molecules, which further exacerbates the concentration variations.

Overall, rectangular channels tend to produce a more consistent distribution of hydrogen, while triangular and semicircular channels experience more significant variations in hydrogen concentration. These differences are primarily due

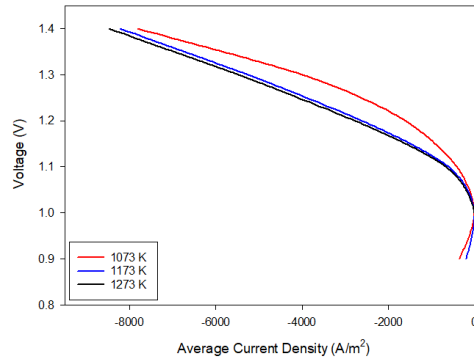
to the geometric constraints and the confined environments inherent to each channel type, which influence the diffusion and mixing characteristics of hydrogen gas within the flow channels.

3.3 Effect of temperature (Sıcaklığın etkisi)

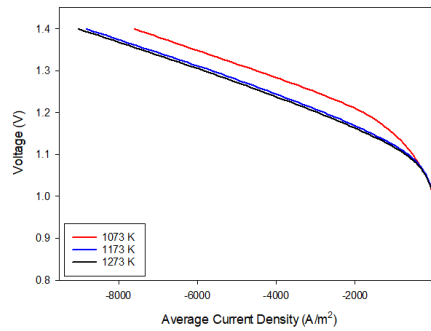
Temperature plays a crucial role in shaping the polarization curve of a SOEC, primarily due to its profound effects on electrochemical kinetics and ionic conductivity within the cell. As the temperature increases, the kinetic energy of particles rises, which in turn accelerates reaction rates at the electrode-electrolyte interfaces. This enhancement in reaction rates leads to a reduction in activation overpotential, allowing for faster electrochemical reactions. As a result, the cell's resistance decreases, and current densities at a given voltage increase. Furthermore, higher temperatures improve the ionic conductivity of the solid oxide electrolyte, which supports more efficient ion transport within the cell. This enhanced ionic conductivity further reduces ohmic overpotentials, contributing to better overall cell performance. Consequently, the operation of an SOEC system at elevated temperatures generally results in lower polarization losses, increased current output, and higher energy efficiency. Such improvements underscore the importance of temperature control in optimizing SOEC operation, particularly for applications such as hydrogen production and energy storage. Temperature gradients have a profound effect on mass transport within SOECs. As the temperature increases, the diffusivity of the species involved in the electrolysis process also changes, which in turn affects the efficiency of the system. Figure 6 illustrates the impact of temperature on the polarization curve, showing (a) rectangular, (b) triangular, and (c) semicircular flow channel configurations.



a) Rectangular Flow Channel



b) Triangular flow channel



c) Semicircular flow channel

Figure 6. The effect of temperature on polarization curve [35] (Sıcaklığın polarizasyon eğrisi üzerine etkisi)

As depicted in Figure 6, the influence of temperature on SOEC performance varies across different flow channel geometries. In rectangular flow channels, higher temperatures typically accelerate electrochemical reactions at the electrodes due to an increase in kinetic energy, which leads to a reduction in activation overpotentials and lower resistive losses. This results in improved efficiency at elevated temperatures. In triangular flow channels, temperature significantly affects the flow dynamics, influencing both mass transport and the local temperature distribution. Elevated temperatures can

enhance convective heat and mass transfer, which may reduce overpotentials and further enhance the overall system efficiency. Similarly, in semicircular flow channels, temperature influences the flow patterns and thermal gradients, which in turn affect mass transfer and electrochemical kinetics. Regardless of the flow channel configuration, temperature control remains a critical factor in optimizing SOEC performance, as it governs the complex interactions between electrochemical reactions and transport processes within each distinct channel geometry.

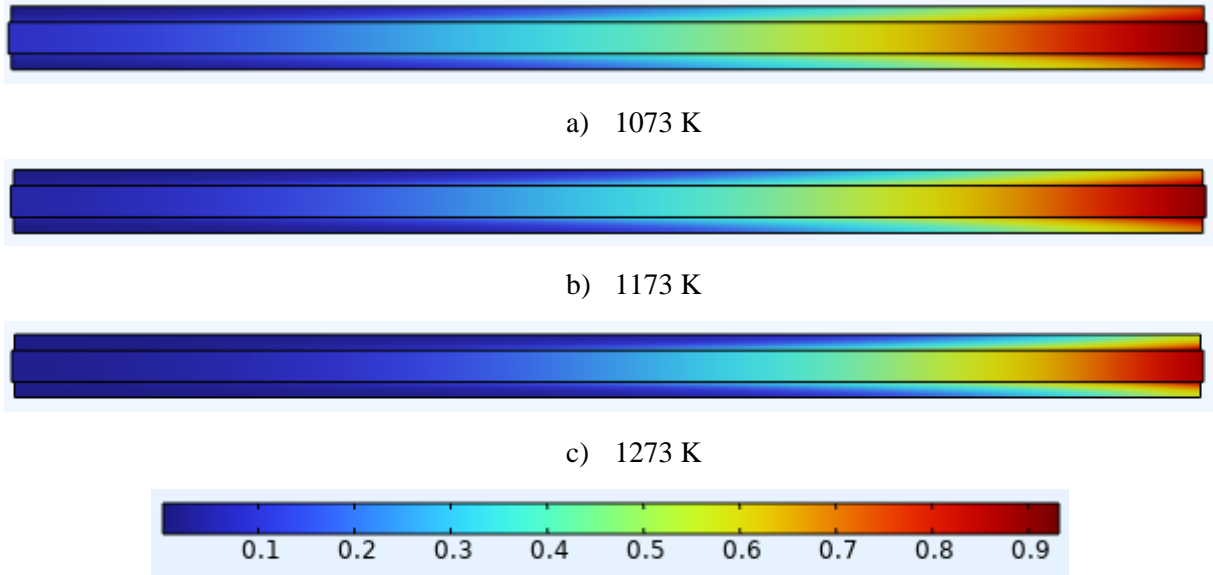


Figure 7. The effect of temperature on mole fraction of the water at rectangular flow channel. (Dikdörtgen akış kanalında sıcaklığın suyun mol dağılımı üzerindeki etkisi)

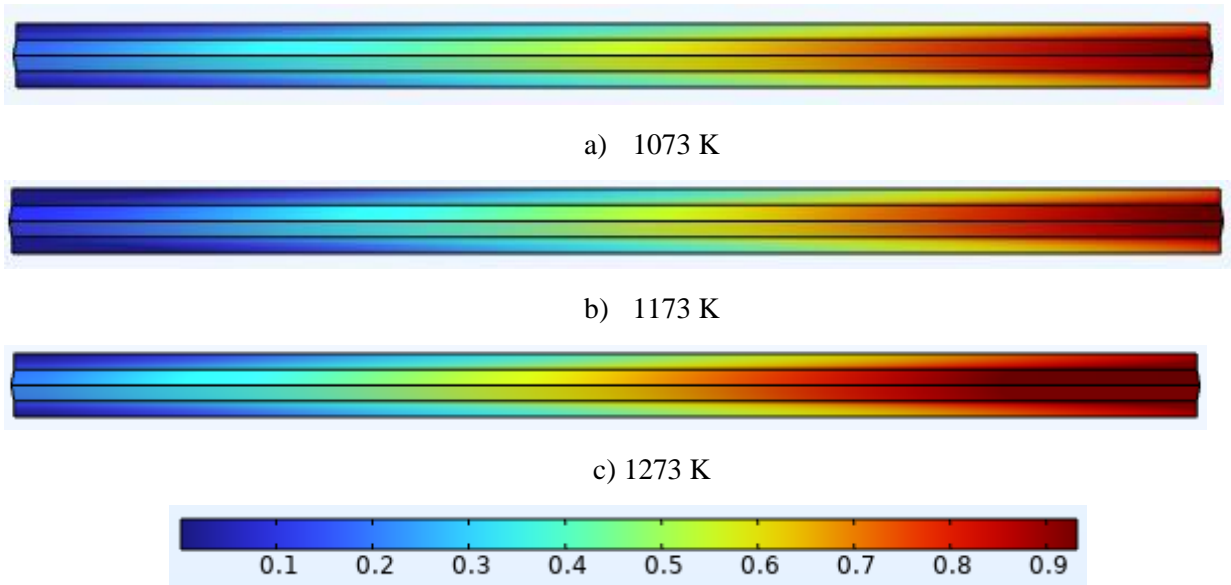
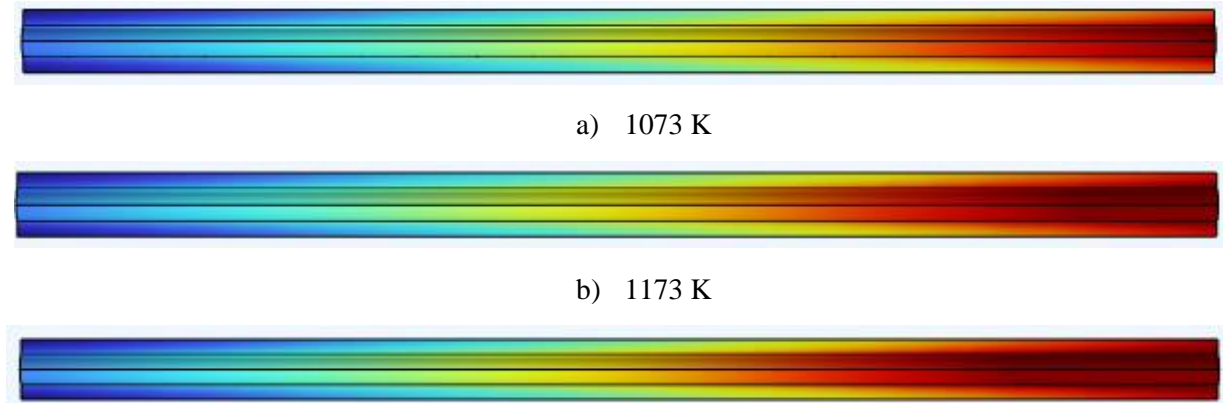


Figure 8. The effect of temperature on mole fraction of the water at triangular flow channel. (Üçgen akış kanalında sıcaklığın suyun mol dağılımı üzerindeki etkisi)



c) 1273 K

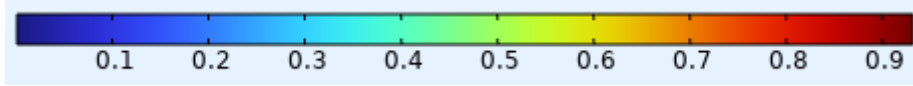


Figure 9. The effect of temperature on mole fraction of the water at semicircular flow channel. (Yarımdaire akış kanalında sıcaklığın suyun mol dağılımı üzerindeki etkisi)

Figures 7, 8, and 9 illustrate the influence of temperature on the mole fraction of water in rectangular, triangular, and semicircular flow channels, respectively. In rectangular flow channels, an increase in temperature generally results in a decrease in the mole fraction of water. This is attributed to the enhancement of water vapor dissociation into hydrogen and oxygen at the electrode-electrolyte interface, which accelerates electrochemical reactions. As more water molecules are consumed in the electrolysis process, their concentration within the channel diminishes. In triangular flow channels, the effect of temperature on the mole fraction of water follows a similar trend to that observed in rectangular channels. However, the temperature-induced changes in convective heat and mass transfer patterns within the channel also

play a significant role. Elevated temperatures can enhance convective transport, promoting improved mixing of the reactant gases and potentially maintaining a more stable mole fraction of water compared to rectangular channels. In semicircular flow channels, temperature impacts the mole fraction of water through its influence on flow patterns and thermal gradients. Higher temperatures increase the kinetic energy of gas molecules, which may enhance their diffusion rates and lead to a more uniform distribution of water along the channel. However, the exact effect of temperature in semicircular channels may vary depending on the specific design and operational conditions, making it essential to consider these factors when optimizing SOEC performance.



a) 1073 K



b) 1173 K



c) 1273 K

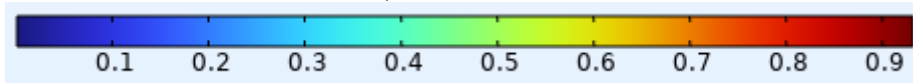


Figure 10. The effect of temperature on mole fraction of the hydrogen at rectangular flow channel. (Dikdörtgen akış kanalında sıcaklığın hidrojen mol dağılımı üzerindeki etkisi)



a) 1073 K



b) 1173 K

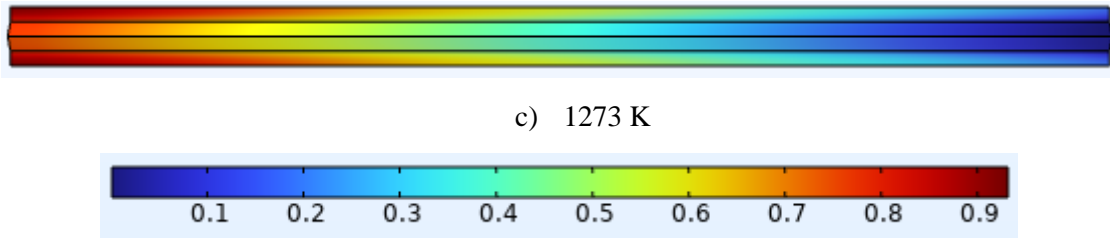


Figure 11. The effect of temperature on mole fraction of the hydrogen at triangular flow channel. (Üçgen akış kanalında sıcaklığın hidrojen mol dağılımı üzerindeki etkisi)

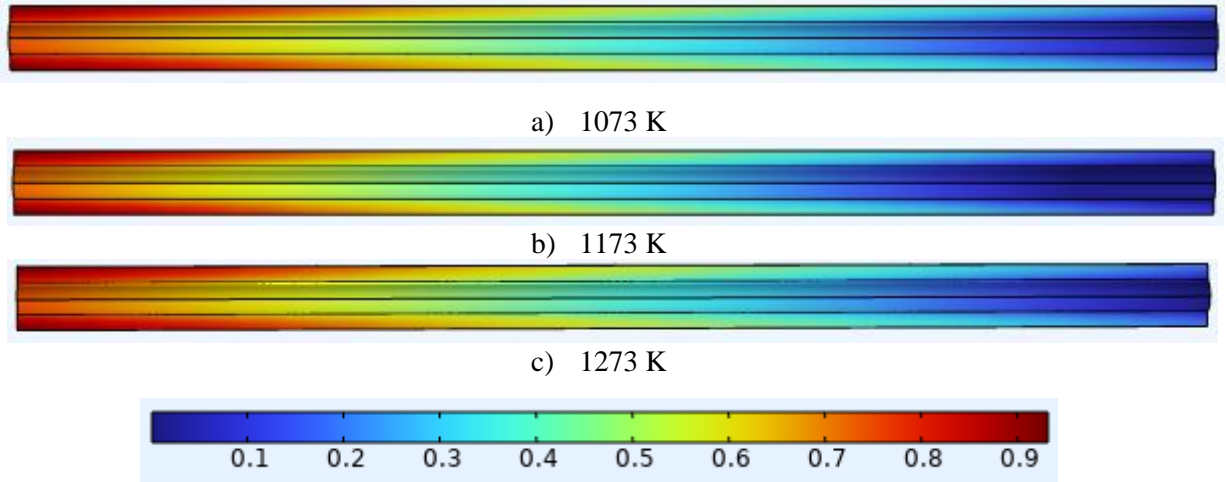


Figure 12. The effect of temperature on mole fraction of the hydrogen at semicircular flow channel. (Yarımdaire akış kanalında sıcaklığın hidrojen mol dağılımı üzerindeki etkisi)

Figures 10, 11, and 12 demonstrate the effect of temperature on the mole fraction of hydrogen in rectangular, triangular, and semicircular flow channels, respectively. In rectangular flow channels, increasing the temperature typically results in a rise in the mole fraction of hydrogen. This is primarily due to the enhanced hydrogen evolution reactions at the electrode-electrolyte interface, driven by the increased thermal energy. The elevated temperature accelerates the dissociation of water into hydrogen and oxygen, leading to higher hydrogen production rates and consequently a higher mole fraction of hydrogen within the channel. In triangular flow channels, the effect of temperature on the mole fraction of hydrogen follows a similar pattern as observed in rectangular channels. Higher temperatures promote more efficient hydrogen production by accelerating the electrochemical reactions, thereby increasing the mole fraction of hydrogen. In semicircular flow channels, the impact of temperature on the mole fraction of hydrogen is influenced by the flow patterns and thermal gradients within the channel.

Elevated temperatures can enhance the kinetics of hydrogen evolution, which may lead to a higher mole fraction of hydrogen. However, the exact effect is dependent on the specific design of the channel and the complex interactions between temperature, flow dynamics, and reaction kinetics, making it essential to consider these factors in optimizing system performance.

3.4 Effect of non-uniform operating temperature conditions

SOECs, when operated at high temperatures, often encounter significant challenges in sustaining optimal conditions. Combustion chambers and furnaces are commonly utilized to generate the requisite elevated temperatures. However, an analysis of combustion systems highlights that ensuring a uniform temperature distribution remains a persistent challenge [34]. In the concluding phase of the study, the influence of this temperature imbalance on the operational efficiency of SOECs was systematically examined.

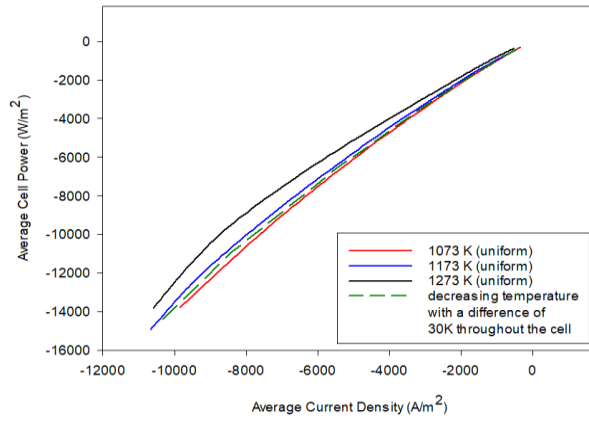


Figure 13. Power curves of rectangular flow channel geometry SOEC under uniform and non-uniform (decreasing) temperature condition. (Dikdörtgen akış kanalının düzenli ve düzensiz (azalan) sıcaklık dağılımlarında güç eğrisi)

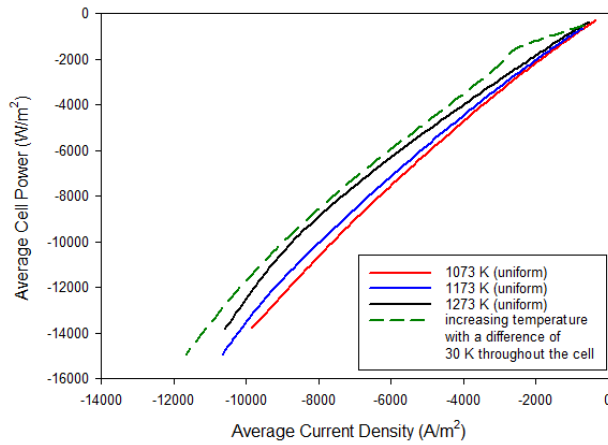


Figure 14. Power curves of rectangular flow channel geometry SOEC under uniform and non-uniform (increasing) temperature condition. (Dikdörtgen akış kanalının düzenli ve düzensiz (artan) sıcaklık dağılımlarında güç eğrisi)

Figure 13 presents the power curve of the rectangular flow channel geometry SOEC under varying operating temperature conditions, highlighting a 30 K decrease in temperature from the cell inlet when compared to power curves obtained at different temperatures. A closer analysis of the graph reveals that the cell power, especially at lower current densities, is reduced relative to the reference curve. This effect is attributed to the

characteristics of the rectangular flow channel. In contrast, Figure 14 displays the power curve of the fuel cell under the condition of a 30 K increase in operating temperature from the cell inlet, compared to the curves at other temperature conditions. The graph demonstrates an improvement in cell performance as the temperature rises from the cell entrance, with the influence of the rectangular flow channel considered as a significant factor.

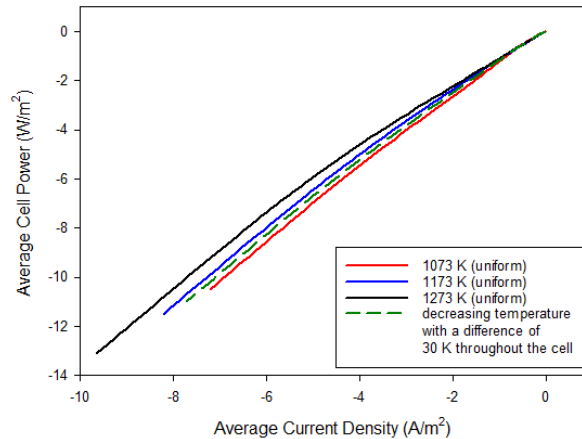


Figure 15. Power curves of triangular flow channel geometry SOEC under uniform and non-uniform (decreasing) temperature condition. (Üçgen akış kanalının düzenli ve düzensiz (azalan) sıcaklık dağılımlarında güç eğrisi)

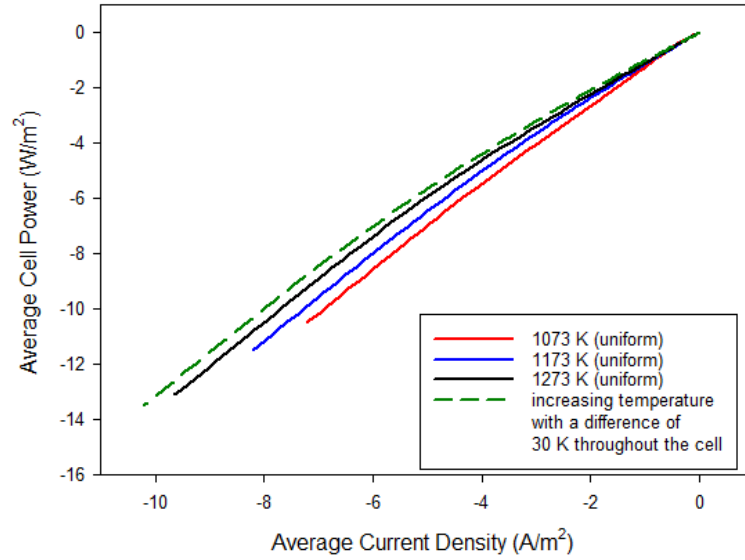


Figure 16. Power curves of triangular flow channel geometry SOEC under uniform and non-uniform (increasing) temperature condition. (Üçgen akış kanalının düzenli ve düzensiz (artan) sıcaklık dağılımlarında güç eğrisi)

Figure 15 illustrates the power curve of the SOEC with a triangular flow channel geometry under varying operating temperature conditions, highlighting a 30 K decrease in temperature from the cell inlet when compared to power curves at different operating temperatures. Upon analyzing the graph, it is evident that the cell power is lower than that of the reference curve. This reduction in power is attributed to the specific characteristics of

the triangular flow channel. In Figure 16, the power curve of the fuel cell is shown under a condition where the operating temperature increases by 30 K from the cell inlet, compared to curves at other temperature settings. The graph indicates a noticeable improvement in cell performance as the temperature rises from the cell entrance, with particular emphasis on the impact of the triangular flow channel.

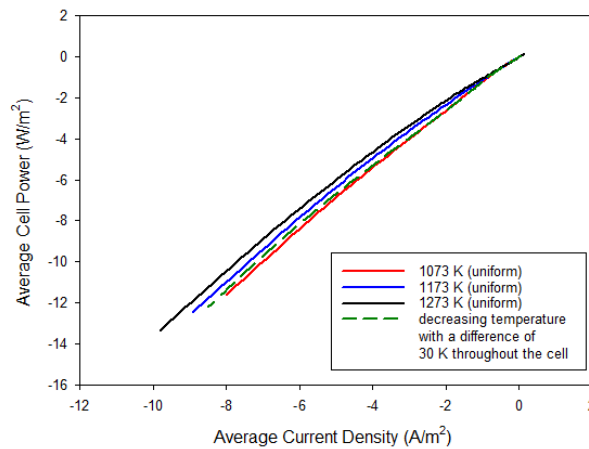


Figure 17. Power curves of semicircular flow channel geometry SOEC under uniform and non-uniform (decreasing) temperature condition. (Yarımdaire akış kanalının düzenli ve düzensiz (azalan) sıcaklık dağılımlarında güç eğrisi)

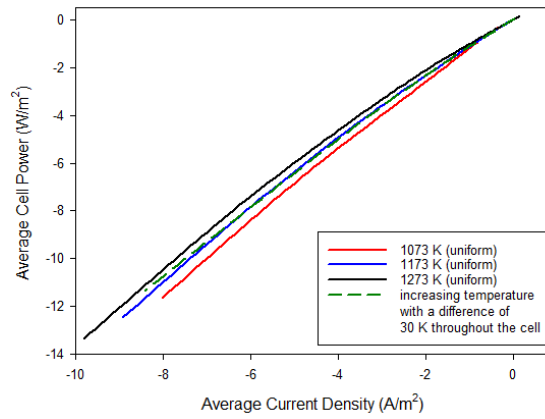


Figure 18. Power curves of semicircular flow channel geometry SOEC under uniform and non-uniform (increasing) temperature condition. (Yarımdaire akış kanalının düzenli ve düzensiz (artan) sıcaklık dağılımlarında güç eğrisi)

Figure 17 depicts the power curve of the SOEC featuring a semicircular flow channel geometry under varying operating temperature conditions, highlighting a 30 K reduction in temperature from the cell inlet compared to power curves at different operating temperatures. Upon examining the graph, it becomes clear that the cell power is lower than the reference curve. This reduction is primarily influenced by the characteristics of the semicircular flow channel. In Figure 18, the power curve of the fuel cell is shown under the condition of a 30 K increase in operating temperature from the cell inlet, in comparison to curves at different temperature conditions. The graph demonstrates a positive correlation between the rise in temperature from the cell entrance and improved cell performance, with the semicircular flow channel's influence taken into account.

In fluid dynamics, the heat distribution across various flow geometries is pivotal in determining temperature variations within the medium. Among the commonly studied geometries—rectangular, triangular, and semicircular—the semicircular flow geometry exhibits the least degree of non-uniform temperature distribution. This can be attributed to the symmetrical design of the semicircular flow, where the curvature facilitates a more uniform heat distribution. In contrast, rectangular and triangular geometries, with their sharp corners and edges, often result in localized temperature variations due to the abrupt changes in fluid direction. The smooth, continuous curvature of the semicircular geometry helps minimize these abrupt transitions, thereby fostering a more even and stable temperature distribution.

4. CONCLUSIONS (SONUÇLAR)

In this study, the integration of COMSOL Multiphysics, specifically the Fuel Cell & Electrolyzer Module, enabled a thorough analysis of cathode-supported, rectangular flow channel Solid Oxide Electrolyzer Cells (SOECs). The findings were rigorously validated through experimental investigations, with numerical simulations showing a strong correlation with the experimental data. The use of rectangular flow channels, with their increased internal surface area, enhanced performance by facilitating more efficient electrochemical reactions, promoting a more uniform distribution of reactants, reducing pressure drops, and optimizing heat transfer. Temperature was found to significantly influence the mole fractions of water and hydrogen within the channels, with higher temperatures generally improving distribution patterns and overall performance. This study underscores the advantages of rectangular flow channels in SOEC applications and highlights the critical role of temperature management in optimizing performance across various flow channel configurations.

In conclusion, this research provides important insights into the operational behavior and performance optimization of SOECs, particularly in the context of rectangular flow channel designs. The strong agreement between numerical simulations and experimental results reinforces the reliability of the computational model and enhances its predictive capability for future research and practical applications. The study highlights the benefits of rectangular flow channels, especially in terms of improved reactant distribution and enhanced electrochemical performance, while also emphasizing the significant influence of

temperature on mole fraction profiles. Additionally, a notable observation was made regarding the effect of non-uniform temperature distributions—commonly observed in experimental settings—on SOEC performance. This finding contributes to a deeper understanding of SOEC behavior and sets the stage for future advancements in the development and optimization of such systems.

Overall, this study offers a unique contribution by providing a comprehensive analysis of cathode-supported, rectangular flow channel designs in SOECs, utilizing COMSOL Multiphysics simulations validated against experimental data. The research emphasizes the significant role of rectangular flow channels in enhancing electrochemical performance, optimizing heat transfer, and reducing pressure drops. Furthermore, it underscores the critical influence of temperature management on mole fraction profiles, offering valuable insights into SOEC behavior and laying a solid foundation for future advancements in system optimization.

ACKNOWLEDGMENTS (TEŞEKKÜR)

I want to thank Nigde Omer Halisdemir University for allowing us to use software and computer facilities.

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)

Berre KÜMÜK: She developed the numerical model, conducted the analysis and wrote the manuscript.

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] Hu K, Fang J, Ai X, Huang D, Zhong Z, Yang X, Wang L. Comparative study of alkaline water electrolysis, proton exchange membrane water electrolysis and solid oxide electrolysis through multiphysics modeling. *Applied Energy*. 2022; 312: 118788.
- [2] Yelegen N, Kümüük B, Kaplan RN, İlbaş M, Kaplan Y. Numerical and experimental studies on unitized regenerative proton exchange membrane fuel cell. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2023; 48(35): 12969–12981.
- [3] İlbas M, Kumuk O, Karyeyen S. Modelling of the gas-turbine colorless distributed combustion: An application to hydrogen enriched – kerosene fuel. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2022; 47(24): 12354–12364.
- [4] Kumuk O, İlbas M. Comparative analysis of ammonia/hydrogen fuel blends combustion in a high swirl gas turbine combustor with different cooling angles. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2024; 52(B): 1404-1418.
- [5] Henke M, Willich C, Kallo J, Friedrich KA. Theoretical study on pressurized operation of solid oxide electrolysis cells. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2014; 39(24): 12434-12439.
- [6] Alzahrani AA, Dincer I. Modeling and performance optimization of a solid oxide electrolysis system for hydrogen production. *Applied Energy*. 2018; 225: 471-485.
- [7] Kim S-D, Seo D-W, Dorai AK, Woo S-K. The effect of gas compositions on the performance and durability of solid oxide electrolysis cells. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2013; 38(16): 6569-6576.
- [8] Chin W, Huang J, Liu Y, Wu Y, Lee Y. Correlation between the thickness of NiFe₂O₄ and hydrogen production performance for solid oxide electrolysis cells. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2024; 52(B): 994-1001.
- [9] Kim S-D, Yu J-H, Seo D-W, Han I-S, Woo S-K. Hydrogen production performance of 3-cell flat-tubular solid oxide electrolysis stack. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2012; 37(1): 78-83.
- [10] Wang Y, Wu C, Zu B, Han M, Du Q, Ni M, Jiao K. Ni migration of Ni-YSZ electrode in solid oxide electrolysis cell: An integrated model study. *Journal of Power Sources*. 2021; 516: 230660.
- [11] Ni M, Leung MKH, Leung DYC. Parametric study of solid oxide steam electrolyzer for hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2007; 32: 2305–2313.
- [12] Chen H, Wang J, Xu X. Parametric Study of Operating Conditions on Performances of a Solid

- Oxide Electrolysis Cell. *Journal of Thermal Science*. 2023; 32: 1973-1988.
- [13] Wang Z, Mori M, Araki T. Steam electrolysis performance of intermediate-temperature solid oxide electrolysis cell and efficiency of hydrogen production system at $300\text{Nm}^3\text{h}^{-1}$. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2010; 35(10): 4451–4458.
- [14] Srinivas S, Dhanushkodi SR, Chidambaram RK, Skrzyniowska D, Korzen A, Taler J. Benchmarking Electrolytes for the Solid Oxide Electrolyzer Using a Finite Element Model. *Energies*. 2023;16:6419.
- [15] Song Y, Zhang X, Zhou Y, Lv H, Liu Q, Feng W, et al. Improving the performance of solid oxide electrolysis cell with gold nanoparticles-modified LSM-YSZ anode. *Journal of Energy Chemistry*. 2019; 35: 181–187.
- [16] Yoon S-E, Ahn J-Y, Kim B-K, Park J-S. Improvements in co-electrolysis performance and long-term stability of solid oxide electrolysis cells based on ceramic composite cathodes. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2015; 40(39): 13558-13565.
- [17] Hjalmarsson P, Sun X, Liu Y-L, Chen M. Durability of high performance Ni-yttria stabilized zirconia supported solid oxide electrolysis cells at high current density. *Journal of Power Sources*. 2014; 262: 316-322.
- [18] Dogdibegovic E, Ibanez S, Wallace A, Kopechek D, Arkenberg G, Swartz S, Funk JM, Reiser M, Rahman MA, Aphale A, Singh P, Ding H, Tang W, Glazoff MV, Ding D, Skafte TL, Tucker MC. Performance of stainless steel interconnects with $(\text{Mn},\text{Co})_3\text{O}_4$ -Based coating for solid oxide electrolysis. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2022; 47(58): 24279-24286.
- [19] Yang C, Coffin A, Chen F. High temperature solid oxide electrolysis cell employing porous structured $(\text{La}_{0.75}\text{Sr}_{0.25})_{0.95}\text{MnO}_3$ with enhanced oxygen electrode performance. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2010;35:3221–3226.
- [20] Biswas S, Kaur G, Giddey S. Steam electrolysis in solid oxide electrolytic cells using a cermet of copper and gadolinia doped ceria cathode. *Electrochimica Acta*. 2023; 468: 143150.
- [21] Xing R, Wang Y, Liu S, Jin C. Preparation and characterization of $\text{La}_{0.75}\text{Sr}_{0.25}\text{Cr}_{0.5}\text{Mn}_{0.5}\text{O}_{3-\delta}$ -yttria stabilized zirconia cathode supported solid oxide electrolysis cells for hydrogen generation. *Journal of Power Sources*. 2012;208:276–281.
- [22] Laguna-Bercero MA, Skinner SJ, Kilner JA. Performance of solid oxide electrolysis cells based on scandia stabilised zirconia. *Journal of Power Sources*. 2009;192:126–131.
- [23] Liang J, Han M. Different performance and mechanisms of CO_2 electrolysis with CO and H_2 as protective gases in solid oxide electrolysis cell. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2022; 47(43): 18606-18618.
- [24] Ni M. Modeling of a solid oxide electrolysis cell for carbon dioxide electrolysis. *Chemical Engineering Journal*. 2010;164:246–254.
- [25] Jensen SH, Sun X, Ebbesen D, Knibbe R, Mogensen M. Hydrogen and synthetic fuel production using pressurized solid oxide electrolysis cells. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2010; 35(18): 9544-9549.
- [26] Xi C, Sang J, Wu A, Yang J, Qi X, Guan W, Wang J, Singhal SC. Electrochemical performance and durability of flat-tube solid oxide electrolysis cells for $\text{H}_2\text{O}/\text{CO}_2$ co-electrolysis. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2022; 47(18): 10166-10174.
- [27] Foit S, Dittrich L, Duyster T, Vinke I, Eichel RA, de Haart LGJ. Direct solid oxide electrolysis of carbon dioxide: Analysis of performance and processes. *Processes*. 2020;8:1390.
- [28] Singh V, Muroyama H, Matsui T, Hashigami S, Inagaki T, Eguchi K. Feasibility of alternative electrode materials for high temperature CO_2 reduction on solid oxide electrolysis cell. *Journal of Power Sources*. 2015;293:642–648.
- [29] Liu Z, Han B, Lu Z, Guan W, Li Y, Song C, Chen L, Singhal SC. Efficiency and stability of hydrogen production from seawater using solid oxide electrolysis cells. *Applied Energy*. 2021; 300: 117439.
- [30] Wang Y, Du Y, Ni M, Zhan R, Du Q, Jiao K. Three-dimensional modeling of flow field optimization for co-electrolysis solid oxide electrolysis cell. *Applied Thermal Engineering*. 2020; 172: 114959.
- [31] Xu Y, Zhang J, Tu Z. Numerical simulation of flow channel geometries optimization for the planar solid oxide electrolysis cell. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2024; 52: 288-301.
- [32] Lay-Grindler E, Laurencin J, Delette G, Aicart J, Petitjean M, Dessemond L. Micro modelling of solid oxide electrolysis cell: From performance to durability. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2013;38:6917–6929.
- [33] Ilbas M, Kumuk B, Alemu MA, Arslan B. Numerical investigation of a direct ammonia tubular solid oxide fuel cell in comparison with hydrogen. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2020;45:35108–35117.
- [34] Cimen FM, Ilbas M, Yalcin S. Effects of physical properties and operating parameters on numerically developed flat-tube solid oxide fuel cell

performance. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2023;48:23136–23145.
[35] Kumuk B. Exploring the Impact of Channel Geometry and Temperature on Solid Oxide

Electrolyzer Cell Performance, *IHTEC2024*, Diyarbakır, Türkiye.

Reducing Carbon Footprint in Ankara: The Use of Biodiesel Produced from Waste Oils in Public Transportation

Osman Furkan KAPIKIRAN¹ , Halil İbrahim VARIYENLİ¹ , Mert ÖKTEN^{2*} , Semih Sadi KILIÇ³ 

¹Gazi University, Faculty of Technology, Department of Energy Systems Engineering, Ankara, Turkey

²Manisa Celal Bayar University, Faculty of Hasan Ferdi Turgutlu Technology, Department of Energy Systems Engineering, Manisa, Turkey

³Gazi University, Graduate School of Natural and Applied Science, Department of Energy Systems Engineering, Ankara, Turkey

³Ministry of Energy and Natural Resources of Türkiye, General Directorate of Nuclear Energy and International Projects, Ankara, Turkey

Article Info

Research article

Received: 07/11/2024

Revision: 20/12/2024

Accepted: 25/12/2024

Keywords

Biomass Energy
Biodiesel
Carbon Emission
Environmental
Sustainability
Waste Oil Recycling

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi

Başvuru: 07/11/2024

Düzeltilme: 20/12/2024

Kabul: 25/12/2024

Anahtar Kelimeler

Biyokütle Enerjisi
Biyodizel
Karbon Emisyonu
Çevresel Sürdürülebilirlik
Atık Yağ Geri Dönüşümü

Graphical/Tabular Abstract (Grafik Özet)

This study evaluates the use of biodiesel produced from waste oils in Ankara's public transportation and its environmental and economic impacts. Biodiesel production was carried out through the transesterification process, and Figure A illustrates the flowchart of this process. The results show that biodiesel reduces carbon emissions by 76% while offering a sustainable fuel alternative. / Bu çalışma, atık yağlardan üretilen biyodizelin Ankara'da toplu taşımada kullanımını ve bunun çevresel ve ekonomik etkilerini değerlendirmektedir. Biyodizel üretimi transesterifikasyon süreci ile gerçekleştirilmiş olup Şekil A'da bu sürecin akış şeması gösterilmektedir. Sonuçlar, biyodizelin karbon emisyonlarını %76 oranında azalttığını ve sürdürülebilir bir yakıt alternatifi sunduğunu göstermektedir.

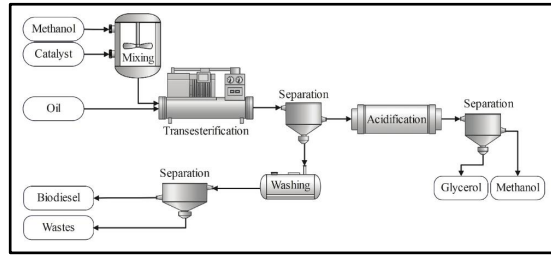


Figure A: Biodiesel production flow chart /Şekil A: Biyodizel üretim akış şeması

Highlights (Önemli noktalar)

- Biodiesel reduces emissions. / Biyodizel emisyonları azaltır.
- Waste oils recycled. / Atık yağlar geri dönüştürülür.
- Sustainable fuel alternative. / Sürdürülebilir yakıt alternatifi.

Aim (Amaç): This study investigates the use of biodiesel produced from waste oils in public transportation in Ankara to assess its environmental and economic impacts, particularly its potential to reduce the carbon footprint. / Bu çalışma, atık yağlardan üretilen biyodizelin çevresel ve ekonomik etkilerini, özellikle de karbon ayak izini azaltma potansiyelini değerlendirmek amacıyla Ankara'da toplu taşımada kullanımını araştırmaktadır.

Originality (Özgünlük): Data on waste oil collection and conversion efficiencies were analyzed to evaluate the impact on carbon emissions and fuel consumption. / Karbon emisyonları ve yakıt tüketimi üzerindeki etkiyi değerlendirmek için atık yağ toplama ve dönüştürme verimliliklerine ilişkin veriler analiz edilmiştir.

Results (Bulgular): Biodiesel from 870,522 liters of waste oil collected monthly in Ankara reduces carbon emissions by 76%, producing 739,943 liters of fuel. Using biodiesel also reduces fossil fuel imports by approximately 9.77 million \$ annually. / Ankara'da aylık olarak toplanan 870.522 litre atık yağdan elde edilen biyodizel, karbon emisyonlarını %76 oranında azaltarak 739.943 litre yakıt üretmektedir. Biyodizel kullanımı ayrıca fosil yakıt ithalatını yılda yaklaşık 9,77 milyon \$ azaltmaktadır.

Conclusion (Sonuç): The integration of biodiesel into Ankara's public transportation system significantly reduces carbon emissions and supports sustainable urban development. Expanding waste oil collection and biodiesel production can enhance environmental and economic benefits. / Biyodizelin Ankara'nın toplu taşıma sistemine entegre edilmesi karbon emisyonlarını önemli ölçüde azaltmakta ve sürdürülebilir kentsel kalkınmayı desteklemektedir. Atık yağ toplama ve biyodizel üretiminin yaygınlaştırılması çevresel ve ekonomik faydaları artırabilir.



Reducing Carbon Footprint in Ankara: The Use of Biodiesel Produced from Waste Oils in Public Transportation

Osman Furkan KAPIKIRAN¹ , Halil İbrahim VARIYENLİ¹ , Mert ÖKTEN^{2*} , Semih Sadi KILIÇ³ 

¹Gazi University, Faculty of Technology, Department of Energy Systems Engineering, Ankara, Turkey

²Manisa Celal Bayar University, Faculty of Hasan Ferdi Turgutlu Technology, Department of Energy Systems Engineering, Manisa, Turkey

³Gazi University, Graduate School of Natural and Applied Science, Department of Energy Systems Engineering, Ankara, Turkey

³Ministry of Energy and Natural Resources of Türkiye, General Directorate of Nuclear Energy and International Projects, Ankara, Turkey

Article Info

Research article
Received: 07/11/2024
Revision: 20/12/2024
Accepted: 25/12/2024

Keywords

Biomass Energy
Biodiesel
Carbon Emission
Environmental
Sustainability
Waste Oil Recycling

Abstract

Biodiesel is derived from biomass and used as a motor fuel. Due to its renewable feature and lower carbon emission, biodiesel attracts attention as an environmentally friendly fuel alternative. This study examines the utilization of biodiesel derived from waste oils in public transport vehicles within the province of Ankara, and the impact of this utilization on the carbon footprint. Furthermore, the effects on the local economy are examined in the context of environmental sustainability. The conversion of waste oils into biodiesel represents a promising fuel alternative that simultaneously advances environmental sustainability and fosters energy diversity. The limited number of detailed analyses on biodiesel use in public transportation in Turkey positions this study as a novel contribution. The study presents a numerical analysis of the impact of biodiesel usage on fossil fuel consumption and carbon emissions in the public transport fleet, specifically in buses. Furthermore, the impact of this practice on the local economy and its long-term implications for sustainable urban transportation are also assessed. In Ankara, 870522 liters of waste oil are collected on a monthly basis, resulting in a reduction of 76% in carbon emissions due to the production of 739943 liters of biodiesel derived from these oils. As a result, energy consumption, efficiency and carbon emission analyses show that biodiesel is an economically and environmentally sustainable alternative. It is expected that the recycling of waste oils will improve waste management and reduce the negative impacts on the environment.

Ankara'da Karbon Ayak İzini Azaltmak: Toplu Taşımada Atık Yağlardan Üretilen Biyodizel Kullanımı

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 07/11/2024
Düzeltilme: 20/12/2024
Kabul: 25/12/2024

Anahtar Kelimeler

Biyokütle Enerjisi
Biyodizel
Karbon Emisyonu
Çevresel Sürdürülebilirlik
Atık Yağ Geri Dönüşümü

Öz

Biyodizel, biyokütleden elde edilir ve motor yakıtı olarak kullanılır. Yenilenebilir özelliği ve daha düşük karbon emisyonu nedeniyle biyodizel, çevre dostu bir yakıt alternatifi olarak dikkat çekmektedir. Bu çalışmada, Ankara ilinde toplu taşıma araçlarında atık yağlardan üretilen biyodizelin kullanımını ve bu kullanımın karbon ayak izi üzerindeki etkilerini incelemektedir. Ayrıca yerel ekonomi üzerindeki etkiler, çevresel sürdürülebilirlik bağlamında incelenmiştir. Atık yağların biyodizele dönüştürülmesi, hem çevresel sürdürülebilirliği destekleyen hem de enerji çeşitliliği sağlayan bir yakıt alternatifi olarak öne çıkmaktadır. Türkiye'de kamu ulaşımında biyodizel kullanımı üzerine yapılan detaylı analizlerin sınırlı olması, bu çalışmayı yenilikçi bir konuma taşımaktadır. Çalışmada, biyodizel kullanımının toplu taşıma filosundaki otobüslerde fosil yakıt tüketimini ne kadar azalttığı ve karbon emisyonlarına katkısı sayısal verilerle açıklanmaktadır. Ayrıca, bu uygulamanın yerel ekonomiye sağladığı katkılar ve uzun vadede sürdürülebilir kentsel ulaşım üzerindeki etkileri de değerlendirilmiştir. Ankara'da her ay 870522 l atık yağ toplanmakta ve bu yağlardan elde edilen aylık 739943 l biyodizel sayesinde karbon emisyonları %76 oranında azalmaktadır. Sonuç olarak, enerji tüketimi, verimlilik ve karbon emisyonu analizleri yapılan biyodizelin ekonomik ve çevresel açıdan sürdürülebilir bir alternatif olduğunu göstermektedir. Atık yağların geri dönüşümü sayesinde atık yönetiminin iyileşmesi ve çevreye olan olumsuz etkilerin azalması beklenmektedir.

1. INTRODUCTION (GİRİŞ)

The continuous increase in the world population leads to a rapid growth in energy demand. This situation has made the efficient use of energy and the dissemination of clean energy sources an important goal on a global scale. While the effects of the fluctuations in energy demand and prices experienced due to the Covid-19 pandemic in 2020 continue, Russia's war against Ukraine in early 2022 raised serious questions about how to ensure energy supply security for all countries. These events have necessitated a reconsideration of energy policies and emphasized the importance of sustainable energy sources. As a result, energy supply security and sustainability have focused on the need to replace traditional fossil fuels with clean and renewable energy sources. Increasing carbon emissions since the industrial revolution have led to an increase in climate change and natural disasters. For this reason, the UN encourages the whole world to reduce carbon emissions and turn to renewable energy sources with important steps such as the Paris Climate Agreement [1]. In this framework, transition from fossil fuels to clean energy is a critical step in terms of both environmental sustainability and energy security.

In recent years, the utilization of alternative fuels has been prioritized in an effort to achieve the environmental sustainability targets of public transport systems in urban areas. Biofuels, particularly biodiesel, which can supplant fossil fuels in the battle against global warming and climate change, have emerged as a pivotal solution. Biodiesel is a renewable energy source derived from organic wastes and has the potential to both curtail fossil fuel consumption and reduce carbon emissions [2]. Biodiesel is a biomass energy that has no toxin effect and can easily degrade in nature and can replace diesel fuel in the future. Biodiesel can be produced from animal and vegetable oils, wax oil and domestic waste oils. The process of converting these oils into biodiesel is called transesterification [3]. In this method, triglycerides react with alcohol to form esters and glycerol (Fig. 1). The most widely used biodiesel production method is base catalyzed transesterification. This method requires low temperature and pressure, and high yields can be obtained. Biodiesel is important in terms of environmental pollution and does not cause a net increase of carbon dioxide in the atmosphere. Also, biodiesel waste is less risky than waste from fossil fuels and has a higher flash point, which reduces the risk of explosion.

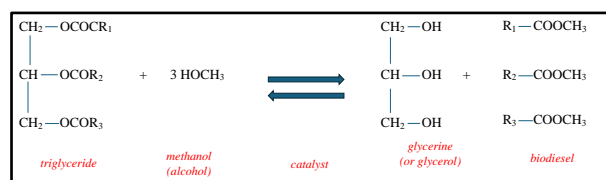


Figure 1. Transesterification reaction (Transesterifikasyon reaksiyonu)

Laboratory studies on biodiesel production are ongoing [4-11]. Initially based on 1st generation feedstocks, mainly edible oils, biodiesel production has shifted towards 2nd and 3rd generation sources such as non-edible vegetable oils, waste oils and algal biomass to overcome the food and fuel dilemma and increase sustainability [12]. In the literature, biodiesel is produced from sunflower oil [13-16], banana peel [17], hazelnut [18], palm [19, 20], rubber [21], soya [22] and olive oil [23], animal fats [24-28], waste frying oil [29, 30], seafood such as cowpea [31], scallop [32], algae [33].

The production of biodiesel from waste oils exhibits a number of innovative and advantageous features when compared to other methods of biodiesel production. The reuse of existing waste materials has the dual benefit of reducing raw material costs and contributing to the management of waste materials in an environmentally responsible manner. Furthermore, the utilization of this method results in a reduction in the consumption of natural resources, thereby contributing to the protection of agricultural areas. Furthermore, the production of biodiesel results in lower carbon emissions. The process in question has the effect of minimizing environmental impacts by reducing greenhouse gas emissions. Mitigates environmental contamination by addressing waste management concerns. Furthermore, the utilization of this method serves to reduce the costs associated with the production of biodiesel. This is a significant benefit, particularly when utilizing costly agricultural inputs. The collection and processing of materials at the local level can provide support to the local economy. The process can be made more efficient through the use of various catalysts and techniques. The recovery of additional by-products (e.g. glycerol) enhances the overall efficiency of the production process.

The production of biodiesel from waste oils represents an innovative approach from both an environmental and an economic perspective. This process presents a significant opportunity to enhance the availability of sustainable energy sources, optimize waste management practices and conserve natural resources. In comparison to alternative methods of biodiesel production, the

utilization of waste oils can result in reduced costs and a lesser environmental impact.

The amount of energy consumed in the collection of waste oils is dependent on a number of variables, and therefore it is challenging to provide an exact figure. Nevertheless, the principal factors influencing energy consumption can be broadly classified as follows:

- The collection method is a significant factor influencing the energy consumption associated with the collection of waste oils. The manual collection of waste oils may be less energy efficient. Nevertheless, the collection processes may prove to be more time-consuming and labor-intensive. The utilization of mechanical means for the collection of waste oils, such as tankers or specialized collectors, facilitates a more expeditious and less labor-intensive process. However, this approach may potentially lead to an increase in fuel consumption and energy costs.
- The distance between the areas where waste oils are collected, and the collection centre is a significant factor influencing energy consumption. The collection of waste oils from nearby locations has the potential to reduce energy consumption. The collection of waste oils from more distant areas may necessitate the use of greater quantities of fuel, which in turn may result in increased energy consumption.
- The frequency of collection is also a significant factor. The frequency of collection has an impact on the costs associated with energy consumption. A greater frequency of collection may result in increased fuel consumption, whereas a less frequent collection may increase the risk of oil spoilage during storage.
- The efficiency of the vehicles used for transportation is also a factor to be considered. The energy efficiency of the vehicles employed is a determining factor in the amount of energy consumed during the collection process. The utilization of vehicles with reduced emissions and enhanced fuel efficiency can contribute to a reduction in overall energy consumption.

The average volume of diesel fuel required to collect one liter of waste oil is 0.1–0.5 liters. This equates to an energy consumption of approximately 1.5–7.5 MJ [30].

In studies examining the use of biodiesel in public transport buses in Belgrade, it was concluded that emissions were reduced by an average of 60% and particulate matter emissions were one-third compared to conventional diesel-powered buses [34, 35]. It has been demonstrated that the utilization of biodiesel does not result in any alteration that will diminish the engine compression ratio, reduce engine power and torque. Furthermore, it has been shown to lead to a notable reduction in emission values [36]. In a separate investigation conducted in Portugal, it was observed that the fuel consumption of buses operating on B100 was 20% higher, while those utilizing B20 demonstrated a 4–6% reduction in fuel consumption [37]. In a study in which 27 technical literature sources on biodiesel engines were analyzed, it was reported that the emission of carbon monoxide was 80% lower, the emission of particulate matter was 65% lower and the emission of nitrogen oxides was 120% lower than that of normal diesel engines [38].

As one of the most populous cities in Turkey and a major hub for public transportation, Ankara province serves as a pivotal location for this transformation. The waste oils collected in Ankara are converted into biodiesel, which is then used in public transport vehicles. This process has the additional benefit of reducing the environmental impact of urban transport. The objective of this study is to examine the environmental and economic impacts of the utilization of biodiesel produced from waste oils in public transport in Ankara, and to evaluate the extent to which this practice reduces the carbon footprint, with reference to numerical data. In particular, the potential of biodiesel to reduce carbon emissions is closely related to the collection and conversion processes of waste oil in Ankara. The primary focus of this study is the reduction of carbon emissions through the use of waste oils in biodiesel production. Specifically, the case of Ankara province is used to highlight contributions to sustainable energy use. In this context, the objective is to ascertain the quantity of waste oil that can be converted into biodiesel within the city, the number of public transport vehicles utilizing this fuel, and the extent of carbon emissions that can be prevented as a result.

2. MATERIALS AND METHODS (MATERIAL VE METOD)

The Biodiesel is obtained by the transesterification process. The reaction rate depends on temperature, catalyst concentration, alcohol content and stirring speed. Usually, the reaction is carried out at a temperature of 60–65 °C, which is close to the

boiling point of methanol. The reaction rate constant k can be calculated using the Arrhenius equation (Eq. 1) [39]:

$$k = Ae^{-\frac{Ea}{RT}} \quad (1)$$

k ; reaction rate constant, A ; frequency factor, Ea ; activation energy ($\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$), R ; gas constant ($8.314 \text{ J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$), and T ; temperature (K).

In the transesterification process, the alcohol/catalyst mixture is filled into a closed reactor with agitator mixer and vegetable oil is added. The system is then completely closed to the atmosphere to prevent alcohol loss. The reaction is carried out at $55\text{-}60^\circ\text{C}$. The recommended reaction time is between 1 and 2 hours. According to the stoichiometric value of the reaction, 3 mol alcohol is required for 1 mol oil. However, in order to increase the efficiency of the reaction, 1 mol oil is reacted with 6 mol alcohol. After the reaction is completed, two main products glycerin and biodiesel are formed. Since the density of the glycerin phase is higher than that of the biodiesel phase and biodiesel and glycerin do not dissolve in each other, these two phases separate from each other over time. Glycerin and biodiesel are completely separated when waiting for about 10 hours. After the glycerin and biodiesel phases are separated, the excess alcohol in each phase is removed by a flash evaporation or distillation process. In both processes, the alcohol vapor is cooled and condensed, recovered and reused. Figure 2 shows the biodiesel production flow chart [40].

The physical and chemical properties (density, viscosity, acid value, water content and free fatty acid (FFA) content of the collected domestic waste oils are determined, and their suitability is evaluated. Water content in domestic waste oils may adversely affect the transesterification reaction. Water can react with the catalyst and cause saponification. Therefore, the water content of oils should be minimized before transesterification.

Water content is determined by Karl Fischer titration (Eq. 2) [39].

$$\text{Water content} = \frac{\text{Titrated KF (ml)}}{\text{oil (g)}} \times 100 \quad (2)$$

Domestic waste oils generally have high FFA content. High FFA content may cause saponification side reactions in the transesterification reaction, which may reduce the biodiesel yield. The FFA content is found by Equation 3 [39].

$$\text{FFA} = \frac{\text{Titrated KOH (mg)}}{\text{oil (g)}} \times 100 \quad (3)$$

For every mole of triglycerides ($\text{CH}_2\text{COOR}_1\text{-CHCOOR}_2\text{-CH}_2\text{COOR}_3$) of the oil, 3 moles of methanol (HOCH_3) must be used (Eq. 4). Energy is required for heating the reactor, operating the mixers and purification processes (Eq. 5). Conversion efficiency is found according to the theoretical and produced amount of biodiesel (Eq. 6). The amount of biodiesel required is calculated by Equation 7 [39].

$$n_{\text{HOCH}_3} = M \times n_{\text{CH}_2\text{COOR}_1\text{-CHCOOR}_2\text{-CH}_2\text{COOR}_3} \quad (4)$$

$$\text{Energy consumption (kWh)} = \text{Equipment power (kW)} \times \text{Operating time (h)} \quad (5)$$

$$\eta = \frac{\text{Produced Biodiesel (g)}}{\text{Theoretical Biodiesel (g)}} \times 100 \quad (6)$$

$$\text{Amount of biodiesel required} = \frac{\text{Diesel energy content (MJ/l)}}{\text{Biodiesel energy content (MJ/l)}} \quad (7)$$

M ; mole fraction, n ; number of moles, and η ; conversion efficiency.

The flash point of biodiesel is higher than diesel ($>130^\circ\text{C}$). This feature makes biodiesel a safer fuel for use, transport and storage. A comparison of the fuel properties of diesel and biodiesel is given in Table 1 [39].

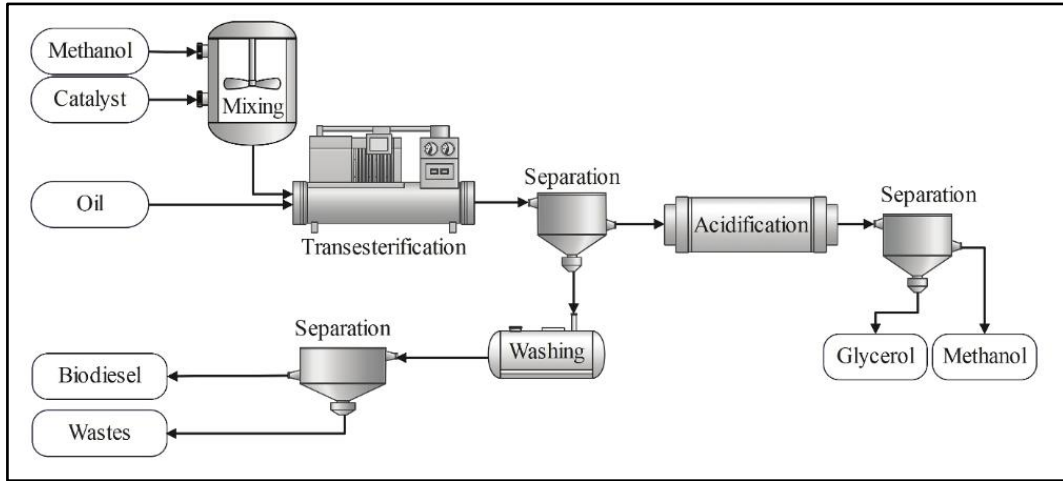
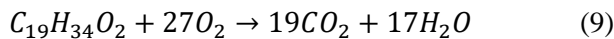
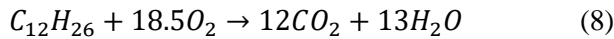


Figure 2. Biodiesel production flow chart (Biyodizel üretim akış şeması)

Table 1. Diesel and Biodiesel fuel properties (Dizel ve Biyodizel yakıt özellikleri)

Fuel specifications	Unit	Limit value	Biodiesel	Diesel
Closed formula	g/mol		$C_{19}H_{34}O_2$	$C_{12}H_{26}$
Molecular weight			296	120-320
Lower heating value:				
Mass	MJ/kg		37.1	42.7
Volumetric	MJ/l		32.6	35.5
Specific gravity (15 °C)	kg/l	0.875-0.90	0.86-0.90	0.82-0.86
Kinematic viscosity (40 °C)	mm ² /s	2-4.5	3.5- 5.0	2.5-3.5
Flash point temperature	°C	> 55	> 100	> 55
Sulphur content	% Mass	< 0.05	< 0.01	< 0.05
Cetane number		> 49	> 55	49-55
Ash	% Mass	< 0.01	< 0.01	< 0.01
Water quantity	mg/kg	< 200	< 500	< 200

The combustion reactions of diesel and biodiesel fuels are chemically analogous; however, disparities in combustion products and efficiencies emerge due to discrepancies in their molecular structures. The combustion reactions of these two fuels are presented in Equations 8 and 9 [39]. The combustion products of biodiesel contain carbon dioxide and water in a similar manner to those of diesel, but with a reduced level of sulphur and toxic substances released.



Greenhouse gas emissions from the use of biodiesel are generally lower compared to fossil fuels. Carbon emissions were calculated based on fuel consumption data multiplied by CO₂ emission factors associated with biodiesel use (Eq. 10). This analysis follows internationally recognized emission calculation methodologies [41].

$$CO_2 \text{ emission (kg)} = \text{Fuel consumption(l)} \times \text{Fuel emission factor (kgCO}_2\text{/l)} \quad (10)$$

CO₂, which has a large share in greenhouse gases, causes global warming, the world's most important environmental problem, and is an emission resulting from combustion. CO₂, SO_x, NO_x emissions, which are also released as a result of combustion and are among greenhouse gases, are also harmful to human health. It has also been proven that CO, SO_x emissions, particulate matter and unburned hydrocarbons are released less. As a result of the tests, it has been revealed that NO_x emissions when using biodiesel are 13% higher than the amount generated when using diesel fuel [30]. However, biodiesel does not contain sulphur. Therefore, NO_x control technologies can be applied to systems using biodiesel fuel. Conventional diesel fuel is not suitable for NO_x control technologies because it contains sulphur. The negative effects on the ozone layer are 50% less when using biodiesel than diesel fuel. Sulfur components that cause acid rain are almost non-existent in biodiesel fuels. Table 2 shows the comparison of B20 and B100 life cycle

emissions with diesel emissions. With the use of biodiesel and diesel-biodiesel blends, CO, PM, HF, SO_x, and CH₄ emissions decrease, while NO_x, HCl, and HC emissions increase [42-46].

Biodiesel converts CO₂ with the help of photosynthesis in the carbon cycle. It accelerates the carbon cycle as it does not have a feature that increases the greenhouse effect. Since it is sulphur-free, it does not cause acid rain. The total pollution potential of biodiesel fuels is 50% less than diesel fuels [47].

3. RESULTS (BULGULAR)

The population of Ankara province is 5803482 people by the end of 2023 [48]. Assuming that 4 people live in each house, it is assumed that there are 1450870 houses in Ankara province. A daily oil consumption of 100 ml, a waste rate of 0.2 [49] and

a conversion efficiency of 0.85 [50, 51] allow the production of 739943 liters of biodiesel from 870522 liters of waste oil collected monthly.

The lower heating value of diesel fuel is approximately 35.8 MJ/l. The lower heating value of B100 biodiesel is approximately 32.8 MJ/l [49-51]. This is approximately 91.6% of the energy content of diesel fuel. Since B20 biodiesel is a mixture of 20% biodiesel and 80% diesel, its energy content (35.2 MJ/l) is approximately 98.3% of the energy content of diesel fuel. In order to provide the same amount of energy as diesel, it is necessary to use 9.1% more than B100 biodiesel and 1.7% more than B20 biodiesel. If B100 biodiesel is used as fuel from the 870522 l waste oil amount that can be collected, 739943 l biodiesel can be used instead of 678225 l diesel; if B20 biodiesel is used as fuel, 2897928 l diesel and 739943 l biodiesel can be used instead of 3637871 l diesel.

Table 2. Comparison of B20 and B100 Biodiesel and Diesel emissions (B20 ve B100 Biyodizel ve Dizel emisyonlarının karşılaştırılması)

Emissions	B20 (20% Biodiesel)	B100 (100% Biodiesel)
CO: Carbon monoxide	-6.90%	-34.50%
PM: Particulate Matter	-6.48	-32.41
HF: Hydrofluoric Acid	-3.10%	-15.51%
SO _x : Sulphur Oxides	-1.61%	-8.03%
CH ₄ : Methane	-0.51%	-2.57%
NO _x : Nitrogen Oxides	2.67%	13.35%
HCl: Hydrochloric Acid	2.71%	13.54%
C _x H _y : Hydrocarbons	7.19%	35.96%

On average, the combustion of 1 liter of diesel fuel results in approximately 2.68 kg of CO₂ emissions [39]. CO₂ emissions of B20 are generally 15-20% lower than diesel fuel [50]. Using a reduction rate of 78% for B100 biodiesel and 17.5% for B20 biodiesel [51], the amount of CO₂ emission was calculated as 0.59 kg CO₂/l and 2.21 kg CO₂/l, respectively. When B100 biodiesel is used, 436.6 tonnes of CO₂ are emitted instead of 1817.6 tonnes of CO₂, and when B20 biodiesel is used, 8203 tonnes of CO₂ are emitted instead of 9749.5 tonnes of CO₂. In this case, with the use of B100 biodiesel produced only in Ankara province and only from waste oils collected from households, instead of diesel as fuel, there will be a 76% reduction in CO₂ emissions with 1381.2 tonnes/month and a 16% reduction in CO₂ emissions with 1546.5 tonnes/month with the use of B20 biodiesel.

The municipal fleet in Ankara comprises approximately 1900 buses, 1000 of which are

diesel-fueled. Additionally, there are approximately 2000 diesel-fueled private and public buses in the city [52]. Table 3 presents a summary of the economic and environmental assessment for 3000 public transport vehicles in Ankara, which run on diesel fuel and travel an average of 50000 km per year (Fig. 3).

The analysis indicates that diesel fuel remains the most cost-effective option. Nevertheless, with the ongoing rise in costs, an annual expense of 2.7 billion ₺ has been projected. The utilization of B20 biodiesel results in an approximate additional cost of 100 million ₺. This increase in cost makes biodiesel a less economically viable option, despite its lower carbon emission advantage. The most expensive option is B100 biodiesel, with an estimated annual cost of 3.17 billion ₺. The cost of fully renewable biodiesel fuel is estimated to be approximately 468 million ₺ higher than that of diesel fuel. Although biodiesel use appears to be

more costly economically, long-term environmental benefits tied to carbon reduction could offset costs through reduced healthcare and air quality expenses.

It has been calculated that Ankara can prevent the import of 678225 l of diesel fuel per month by producing biodiesel from 870522 l of waste oil. This equates to the prevention of the import of approximately 8138700 l of fossil fuel on an annual basis. Assuming an average oil price of 1.20 \$/l, it is estimated that approximately 9.77 million \$ can be saved annually. The collection and conversion of waste oil into biodiesel has the additional benefit of eliminating the clean-up costs incurred as a result of waste oil spillage into sewers or nature. Assuming a cost saving of 0.5 ₺ per liter in waste management, an annual waste management cost saving of approximately 435261 ₺ can be achieved from

870522 l of waste oil. The biodiesel production process will create local employment opportunities, both directly and indirectly, in the collection, transportation, production and distribution of waste oil. For instance, it is estimated that a new labor force of 10-15 people will be required for the biodiesel production facility. When the long-term economic benefits of biodiesel are analyzed, the following can be concluded:

- An annual reduction of \$ 9.77 million in fuel imports,
- A reduction of 435261 ₺ in waste management costs,
- A contribution to the local economy through the provision of new employment opportunities.

Table 3. Summary of the economic and environmental assessment (Ekonomik ve çevresel değerlendirme özeti)

Parameters	Diesel	B20 Biodiesel	B100 Biodiesel
Energy content (MJ/l)	35.8	35.08	33
Fuel cost (₺/l)	45	45.6	48
Fuel consumption (l/100 km)	40	40.8	44
Carbon emission (kg CO ₂ /l)	2.68	2.62	2.45
Annual fuel consumption (l)	20000	20400	22000
Annual fuel cost (₺)	900000	930240	1056000
Annual carbon emission (kg CO ₂)	53600	53448	53900
Annual total fuel consumption (l)	60000000	61200000	66000000
Annual total fuel cost (₺)	2700000000	2790720000	3168000000
Annual total carbon emission (kg CO ₂)	160800000	160344000	161700000

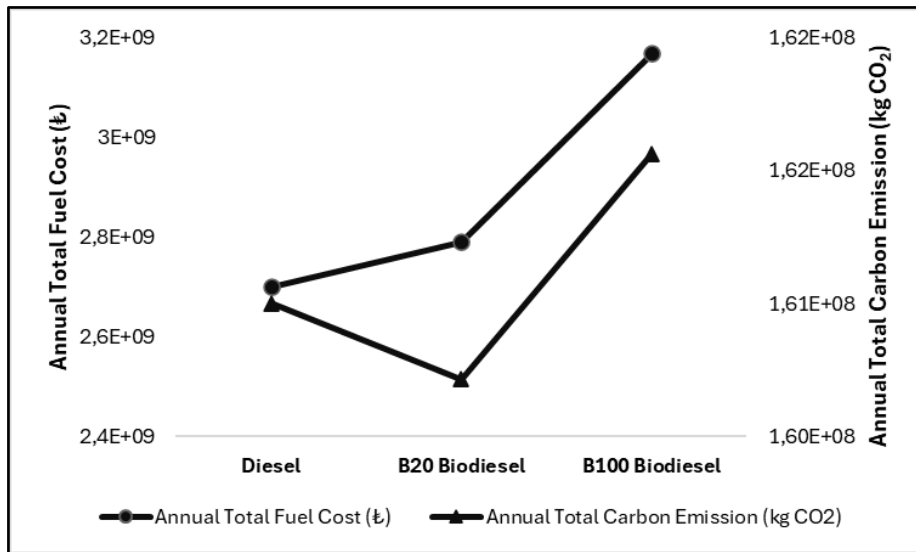


Figure 3. Cost and carbon emission variation by fuel type (Yakıt türüne göre maliyet ve karbon emisyonu değişimi)

The total annual carbon emissions resulting from the utilization of diesel fuel are estimated to be 160800 tonnes of CO₂ equivalents. The application

of B20 biodiesel results in a marginal reduction in emissions, with the annual emission total reduced to 160344 tonnes of CO₂ equivalent. Although the

environmental benefit is limited, it can be considered as an alternative option for municipalities seeking to reduce their carbon footprint to a slight extent. B100 biodiesel maintains carbon emissions at 161700 tonnes of CO₂; furthermore, it offers a more sustainable alternative, given the near-zero net carbon emissions of biofuel. While the cost of using B20 biodiesel increases by 3%, its significant reduction in carbon emissions makes it an attractive option for environmental sustainability.

The Selective Catalytic Reduction (SCR) system is a technology that has been demonstrated to reduce NO_x emissions by up to 90%. In these systems, NO_x emissions are converted into harmless nitrogen gas using a urea solution, known as AdBlue. The integration of SCR systems in public transportation vehicles in Ankara has been shown to significantly offset the increase in NO_x emissions caused by biodiesel. The Exhaust Gas Recirculation (EGR) system has been found to increase the amount of exhaust gas returning to the engine, thereby lowering the combustion temperature and reducing NO_x emissions. In engines using biodiesel, a 30-40% reduction in NO_x emissions can be achieved with EGR technology [30]. The combustion process is optimized by making biodiesel-specific engine calibration, thus minimizing the NO_x increase caused by biodiesel. The increase in NO_x emissions has been identified as one of the most significant environmental drawbacks associated with biodiesel utilization. The proposed technological solutions, namely the use of SCR to achieve a -90% reduction in NO_x emissions and EGR to achieve a 30-40% reduction in NO_x emissions, hold great promise in addressing this issue. The implementation of these solutions has the potential to significantly enhance the environmental sustainability of biodiesel use in Ankara's public transportation sector.

Furthermore, it is evident that the annual production of 887932.4 liters of B100 biodiesel derived from waste oil gathered in Ankara province is sufficient to fulfil the requirements of the entire diesel-powered public transport vehicle fleet. This will result in a 100% reduction in the amount of carbon emissions from diesel-powered public transport vehicles.

4. CONCLUSIONS (SONUÇLAR)

In this study, examined the environmental and economic consequences of utilizing biodiesel derived from waste oils in the public transportation system of Ankara province. The findings demonstrate that the utilization of biodiesel

markedly diminishes carbon emissions in comparison to fossil fuels, thereby promoting energy sustainability.

This study represents one of the first detailed analyses of the impacts of using biodiesel produced from waste oils in the public transport system in Ankara on both the local environment and energy sustainability. While the literature contains numerous studies on the industrial and individual uses of biodiesel, comprehensive research on the use of biodiesel in public transport in Turkey, particularly at the metropolitan level, remains limited. This research project focuses on the conversion of waste oil collected in Ankara into biodiesel and its direct use in urban transport. It demonstrates the impact of this process in reducing carbon emissions and its potential to reduce energy dependency, presenting quantitative data to support these claims.

A further innovative aspect of the study is that the process of collecting waste oil, converting it into biodiesel and integrating it into the transport sector is considered at the city scale. Furthermore, the integration of this practice into public transport fleets and its contribution to the local economy are also examined. In this context, the study offers a tangible model for the implementation of sustainable transport solutions in large cities such as Ankara, as well as crucial data on the environmental and economic impacts of integrating biodiesel into urban transport systems.

The results of the study can be summarized as follows:

- 739943 l of biodiesel can be obtained from 870522 l of waste oil that can be collected on a provincial basis.
- If B100 biodiesel is used as fuel from the 870522 l waste oil amount that can be collected, 739943 l biodiesel can be used instead of 678225 l diesel; if B20 biodiesel is used as fuel, 2897928 l diesel and 739943 l biodiesel can be used instead of 3637871 l diesel.
- When B100 biodiesel is used, 436.6 tonnes of CO₂ emissions are emitted instead of 1817.6 tonnes of CO₂, and when B20 biodiesel is used, 8203 tonnes of CO₂ emissions are emitted instead of 9749.5 tonnes of CO₂.
- When diesel fuel is replaced with B100 biodiesel produced from waste oils, 1381.2 tonnes (76%) of CO₂ emissions per month and

1546.5 tonnes (16%) of CO₂ emissions per month are reduced with the use of B20 biodiesel. The findings align with studies conducted on the bus fleet in Belgrade, where biodiesel usage was also shown to reduce emissions by 60%

- Biodiesel produced from waste oil is capable of meeting the total energy requirements of diesel-powered public transport vehicles. Consequently, the carbon emissions from diesel-powered public transport vehicles have been reduced by 100%.
- While diesel fuel remains the most cost-effective option, the use of biodiesel, particularly B20, is preferable when considering the reduction of carbon emissions and the promotion of environmental sustainability.
- In consideration of the environmental benefits, B20 biodiesel emerges as a viable option for the reduction of carbon emissions. However, B100 biodiesel is relatively costly and may be viewed as a potential investment for achieving carbon neutrality targets.

These results show that waste oil has a significant potential for biodiesel production in Ankara province and the environmental benefits are considerable. The utilization of waste oil in accordance with the sustainable transport objectives of local governments and municipalities is regarded as a strategic measure with regard to both the environment and energy security. The findings of the study demonstrated that the integration of biodiesel into the public transport fleet in Ankara plays a significant role in reducing the carbon footprint, and that this practice can provide greater benefits if it is expanded. Furthermore, the production of biodiesel has had a positive impact on the local economy, creating new employment opportunities in waste management and energy production.

Moreover, the implementation of a more extensive network of waste oil collection facilities in Ankara will facilitate an increase in biodiesel production, consequently leading to a further reduction in carbon emissions. It is crucial to enhance the awareness of the local population and expand waste oil collection initiatives in order to achieve this objective. An increase in the capacity of existing biodiesel production facilities will facilitate a more efficient conversion of waste oils into biodiesel. It is possible to reduce production costs by conducting

research into innovative technologies and more efficient production processes. It would be prudent for the government to provide support and tax reductions in order to encourage the use of biodiesel. The collaboration of the public and private sectors in the production of biodiesel can facilitate a more efficient process of energy generation from waste oils. Such collaboration can simultaneously reduce the cost of production of biodiesel and promote the use of sustainable fuel. The acceleration of the transition to biodiesel in the transport and industrial sectors will result in increased environmental benefits. The integration of biodiesel, which is currently employed in a restricted number of buses, into the entirety of Ankara's public transportation fleet would result in significant energy savings and environmental benefits across the city. In order to achieve this, it is necessary to increase investment in infrastructure and encourage the implementation of policies that facilitate the use of biodiesel. It is recommended that the environmental impacts of biodiesel use be subjected to regular monitoring and reporting. In addition to the reduction of CO₂ emissions, the impact of biodiesel on other air pollutants should also be considered. An increase in the use of biodiesel will contribute to Ankara's achievement of national and international carbon reduction targets. It is therefore recommended that legal regulations and incentives for the use of environmentally friendly fuels such as biodiesel be increased.

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)

Osman Furkan KAPIKIRAN: He conducted the numerical analysis and performed the writing process.

Sayısal analizi yapmış ve maklenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

Halil İbrahim VARIYENLİ: He conducted the numerical analysis and performed the writing process.

Sayısal analizi yapmış ve maklenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

Mert ÖKTEN: He conducted the numerical analysis and performed the writing process.

Sayısal analizi yapmış ve maklenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

Semih Sadi KILIÇ: He conducted the numerical analysis and performed the writing process.

Sayısal analizi yapmış 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] United Nations. Treaty of Paris. 2024. <https://www.unep.org/environmental-moments-unep50-timeline>.
- [2] Ökten M. An investigation on provincial production & consumption of electric energy: A case analysis for Ankara. *Kocaeli Journal of Science and Engineering (KOJoSE)*. 2021; 4(1): 59-68.
- [3] Brown A, Smith B. Environmental impacts of biodiesel versus diesel fuel: A comparative study. *Journal of Environmental Science*. 2017; 15(2): 123-135.
- [4] Aydın K, Keskin A. Dizel motorlarında motorin, bitkisel yağlar ve alkol karışımlarının performans ve emisyon etkilerinin araştırılması Yanma ve Hava Kirliliği Kontrolü V. Ulusal Sempozyumu. 2000.
- [5] Yücesu HS, Altın R, Çetinkaya S. Dizel motorlarında alternatif olarak bitkisel yağ kullanımının deneysel incelenmesi. *Türk Journal Engineering Environment Science*. 2001; 25: 39-49.
- [6] Taşyürek M, Acaroğlu M. Biyoyakıtlarda (Biyomotorinde) emisyon azatlımı ve küresel ısınmaya etkisi. Uluslararası Küresel İklim Değişikliği ve Çevresel Etkileri Konferansı. 2007.
- [7] Çaylı G, Küsefoğlu S. Increased yields in biodiesel production from used cooking oils by a two-step process: Comparison with one step process by using TGA. *Fuel Processing Technology*. 2008; 89(2): 118-122.
- [8] Özbay N, Oktar N, Tapan NA. Esterification of free fatty acids in waste cooking oils (WCO): Role of ion-exchange resins. *Fuel*. 2008; 87(10-11): 1789-1798.
- [9] Gürü M, Koca A, Can A, Çınar C, Şahin F. Biodiesel production from waste chicken fat based sources and evaluation with Mg based additive in a diesel engine. *Renewable Energy*. 2010; 35: 637-643.
- [10] Altınok F, Albayrak S, Arslan NP, Taskin M, Aygun E, Sisecioglu M, Adigüzel A. Application of Anoxybacillus gonensis UF7 lipase as a catalyst for biodiesel production from waste frying oil. *Fuel*. 2023; 334(1): 126672.
- [11] El-Khair MAA, El Saied M, El Naga AOA, Morshedy AS. Rapid and low-temperature biodiesel production from waste cooking oil: Kinetic and thermodynamic insights using a KOH/ZnAl₂O₄ nanocatalyst derived from waste aluminum foil. *Energy Conversion and Management*. 2024; 318: 118898.
- [12] Anil N, Rao PK, Sarkar A, Kubavat J, Vadivel S, Manwar NR, Paul B. Advancements in sustainable biodiesel production: A comprehensive review of bio-waste derived catalysts. *Energy Conversion and Management*. 2024; 318: 118884.
- [13] Antolin G, Tinaut FV, Briceño Y, Castaño V, Pérez C, Ramírez AI. Optimisation of biodiesel production by sunflower oil transesterification. *Bioresource Technology*. 2002; 83(2): 111-114.
- [14] Vicente G, Martínez M, Aracil J. Integrated biodiesel production: A comparison of different homogeneous catalysts systems. *Bioresource Technology*. 2004; 92(3): 297-305.
- [15] Ayhan V, Tunca S, Özsert İ, Ergen G, Cesur İ. Ayçiçek yağı metil ester karışımlarının bir dizel motorunun performans ve emisyonlarına etkisi. *APJES*. 2019; 7(1): 67-73.
- [16] Samuel OD, Okwu MO, Oyejide OJ, Taghinezhad E, Afzal A, Kaveh M. Optimizing biodiesel production from abundant waste oils through empirical method and grey wolf optimizer. *Fuel*. 2020; 281: 118701.
- [17] Foroutan R, Peighambaroust SJ, Mohammadi R, Peighambaroust SH, Ramavandi B. The potential of biochar derived from banana peel/Fe₃O₄/ZIF-67@K₂CO₃ as magnetic nanocatalyst for biodiesel production from waste cooking oils. *Results in Engineering*. 2024; 22: 102005.
- [18] Usta N, Conkur ES, Can AC, Topcu M, Öztürk E, Can O, Nas S, Çon AH. Combustion of biodiesel fuel produced from hazelnut soapstock/waste sunflower oil mixture in a diesel engine. *Energy Conversion and Management*. 2005; 46(5): 741-755.
- [19] Kalam MA, Masjuki HH. Biodiesel from palmoil—an analysis of its properties and

- potential. *Biomass and Bioenergy*. 2002; 23(6): 471-479.
- [20] Torres EA, Cerqueira GS, Ferrer TM, Quintella CM, Raboni M, Torretta V, Urbini G. Recovery of different waste vegetable oils for biodiesel production: A pilot experience in Bahia State Brazil. *Waste Management*. 2013; 33(12): 2670-2674.
- [21] Ramadhas AS, Jayaraj S, Muraleedharan C. Biodiesel production from fish FFA rubber seed oil. *Fuel*. 2005; 84: 335-340.
- [22] Çanakçı M, Van Gerpen JH. Comparison of engine performance and emissions for petroleum diesel fuel, yellow-grease biodiesel and soybean-oil biodiesel. *Trans ASAE*. 2003; 46: 937-944.
- [23] Çaynak S, Gürü M, Biçer A, Keskin A, İcingür Y. Biodiesel production from pomace oil and improvement of its properties with synthetic manganese additive. *Fuel*. 2009; 88(3): 534-538.
- [24] Tashtoush MG, Al Widyhan MI, Al Jarrah MM. Experimental study on evaluation and optimization of conversion of waste animal fat into biodiesel. *Energy Conversion and Management*. 2004; 45: 2697-2711.
- [25] Reyes JF, Sepulveda MA. PM-10 emissions and power of a Diesel engine fueled with crude and refined Biodiesel from salmon oil. *Fuel*. 2006; 1-6.
- [26] Altıparmak D, Keskin A, Koca A, Guru M. Alternative fuel properties of tall oil fatty acid methyl ester-diesel fuel blends. *Bioresource Technology*. 2007; 98(2): 241-246.
- [27] Moraes PS, Igansi AV, Cadaval Jr TRS, Pinto LAA. Biodiesel produced from crude, degummed, neutralized and bleached oils of Nile tilapia waste: Production efficiency, physical-chemical quality and economic viability. *Renewable Energy*. 2020; 161: 110-119.
- [28] Sharma P, Usman M, Salama ES, Redina M, Thakur N, Li X. Evaluation of various waste cooking oils for biodiesel production: A comprehensive analysis of feedstock. *Waste Management*. 2021; 136: 219-229.
- [29] Fawaz EG, Salam DA. Preliminary economic assessment of the use of waste frying oils for biodiesel production in Beirut Lebanon. *Science of The Total Environment*. 2018; 637-638: 1230-1240.
- [30] Fonseca JM, Teleken JG, de Cinque Almeida V, da Silva C. Biodiesel from waste frying oils: Methods of production and purification. *Energy Conversion and Management*. 2019; 184: 205-218.
- [31] AlYammahi J, Chelaifa H, Hasan A, Darwish AS, Lemaoui T, Hernandez HH, Galvan AR. Salicornia seed oil: A high-yielding and sustainable halophytic feedstock for biodiesel and energy in underutilized hypersaline coastal deserts. *Energy Conversion and Management*. 2024; 318: 11891.
- [32] Nahas L, Dahdah E, Aouad S, El Khoury B, Gennequin C, Aad EA, Estephane J. Highly efficient scallop seashell-derived catalyst for biodiesel production from sunflower and waste cooking oils: Reaction kinetics and effect of calcination temperature studies. *Renewable Energy*. 2023; 202: 1086-1095.
- [33] Adib AR, Rahman MM, Hassan T, Ahmed M, Al Rifat A. Novel biofuel blends for diesel engines: Optimizing engine performance and emissions with *C. cohnii* microalgae biodiesel and algae-derived renewable diesel blends. *Energy Conversion and Management: X*. 2024; 100688.
- [34] Ivković I, Kaplanović S, Z'ez'elj S. Višekriterijumsko rangiranje konstrukcijsko-koncepcijskih rešenja autobusa u cilju stvaranja održivog JMTP-a u Beogradu. *Journal of Applied Engineering Science*. 2007; 5(15): 57–66.
- [35] Petrović J, Ivković I, Vujac'ić I, Z'ez'elj S. Possibilities of buses on alternative fuel in public urban transport in Belgrade. *Technology Economical Devolution Economy*. 2009; 15(1): 78–89.
- [36] Tica S, Filipović S, Živanović P, & Milovanović B. Test run of biodiesel in public transport system in Belgrade. *Energy Policy*. 2010; 38: 7014–7020.
- [37] Serrano LMV, Camara RMO, Carreira VJR, da Silva MCG. Performance study about biodiesel impact on buses engines using dynamometer tests and fleet consumption data. *Energy Conversion Management*. 2012; 60: 2–9.
- [38] Bunger J, Krahl J, Schroder O, Schmidt L, Westphal GA. Potential hazards associated with combustion of bio-derived versus petroleum-derived diesel fuel. *Criteria Revolution Toxicology*. 2012; 42(9): 732–750.
- [39] Akgül G, Sözer S, Culfa M. Atık yağlardan biyodizel üretiminde yenilikçi biyokömür katalizörü TÜBAV Bilim Dergisi. 2017; 10(4): 29-39.
- [40] Ahmadbeigi A, Mahmoudi M, Fereidooni L, Akbari M, Kasaeian A. Biodiesel production from waste cooking oil: A review on production methods, recycling models, materials and catalysts. *Journal of Thermal Engineering*. 2024; 10(5): 1362-1389.

- [41] IPCC. Climate change 2014: Mitigation of climate change intergovernmental panel on climate change. 2024. <https://www.ipcc.ch/report/ar5/syr/>.
- [42] Green C, Brown D, Black E. Effects of biodiesel on NOx emissions: A comparative analysis. *Journal of Sustainable Energy*. 2019; 25(4): 321-335.
- [43] Johnson F, Brown A. Reduction of CO and SOx emissions with biodiesel: A case study. *Environmental Engineering Review*. 2018; 10(3): 210-225.
- [44] Jones G. Sulfur compounds in biodiesel fuels. *Biodiesel: Production, Properties, and Applications*. 2019; 87-102, Springer.
- [45] Smith B. Impacts of greenhouse gas emissions on global warming. *Environmental Health Perspectives*. 2020; 128(5): 450-465.
- [46] Demirbas A. Progress and recent trends in biodiesel fuels. *Energy Conversion Management*. 2009; 50(1): 14-34.
- [47] De Paulo AA, Da Costa RS, Rahde SB, Vecchia FD, Seferin M, Dos Santos CA. Performance and emission evaluations in a power generator fuelled with Brazilian diesel and additions of waste frying oil biodiesel. *Applied Thermal Engineering*. 2016; 98: 288-297.
- [48] TÜİK. Adrese dayalı nüfus kayıt sistemi sonuçları. 2024. <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Adrese-Dayali-Nufus-Kayit-Sistemi-Sonuclari-2023-496884#:~:text=%C4%B0stanbul'un%20n%C3%BCfusu%2C%20bir%20%C3%B6nceki,24%20ki%C5%9Fi%20ile%20Antalya%20izledi>.
- [49] U.S. Department of Energy. Biodiesel benefits and considerations. alternative fuels data center. 2024. https://afdc.energy.gov/fuels/biodiesel_benefits.html
- [50] National Renewable Energy Laboratory. Biodiesel handling and use guide (4th edition). 2009. <https://www.nrel.gov/docs/fy09osti/43672.pdf>
- [51] Environmental Protection Agency. A comprehensive analysis of biodiesel impacts on exhaust emissions. 2002. <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi/P1001YTB.PDF?Dockkey=P1001YTB.PDF>.
- [52] Ankara EGO. 2024. <https://m.ego.gov.tr/haber/6155/egonun-otobus-filosu-genisliyor-16-solo-tip-otobus-daha-alindi>.

Thermodynamic and Exergoeconomic Assessment of a Solar-Assisted Combined Cooling, Heating, and Power System in Antalya, Turkey

Abdulrazzak AKROOT^{1*} , and Mohammed REFAEI¹ 

¹Karabük University, Faculty of Engineering, Department of Mechanical Engineering, Karabük, Turkey

Article Info

Research article
Received: 26/11/2024
Revision: 08/01/2025
Accepted: 05/02/2025

Keywords

Solar-Assisted Energy Systems
Organic Rankine Cycle
Exergoeconomic analysis
Parabolic trough collectors

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 26/11/2024
Düzeltilme: 08/01/2025
Kabul: 05/02/2025

Anahtar Kelimeler

Güneş Destekli Enerji Sistemleri
Organik Rankine Döngüsü
Eksergoekonomik analiz
Parabolik oluk kolektörleri

Graphical/Tabular Abstract (Grafik Özet)

This study evaluates a solar-assisted CCHP system, finding R245fa more efficient and butane more cost-effective, supporting its viability in solar-rich regions like Antalya, Turkey/Bu çalışma, güneş destekli bir CCHP sistemini değerlendirerek R245fa'nın daha verimli, bütanın ise daha maliyet etkin olduğunu belirlemiştir ve Antalya gibi güneş zengini bölgeler için uygunluğunu göstermektedir.

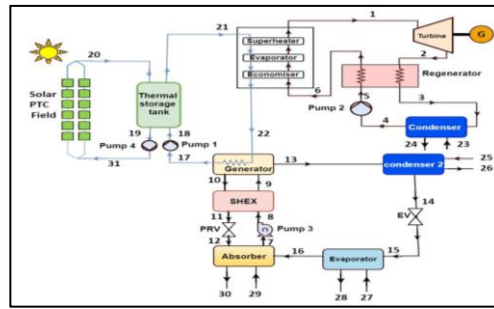


Figure A: The schematic diagram for the solar-assisted CCHP system (Güneş destekli CCHP sisteminin şematik diyagramı)

Highlights (Önemli noktalar)

- Thermodynamic and exergoeconomic analyses are conducted to evaluate the performance of a solar-assisted CCHP system in Antalya, Turkey/Antalya, Türkiye'deki güneş destekli CCHP sisteminin performansını değerlendirmek için termodinamik ve eksergoekonomik analizler gerçekleştirilmiştir.
- The impact of working fluids (R245fa and butane) on efficiency, cost, and environmental performance is assessed using steady-state simulations/Çalışma akışkanlarının (R245fa ve bütan) verimlilik, maliyet ve çevresel performans üzerindeki etkisi durağan hal simülasyonları kullanılarak değerlendirilmiştir.
- Exergoeconomic factors are analyzed to optimize system components, ensuring economic feasibility and sustainability/Sistem bileşenlerini optimize etmek, ekonomik fizibiliteyi ve sürdürülebilirliği sağlamak için eksergoekonomik faktörler analiz edilmiştir.

Aim (Amaç): This study aims to enhance the performance of solar-assisted CCHP systems by optimizing energy efficiency and reducing environmental impact through exergoeconomic analysis/Bu çalışma, eksergoekonomik analiz yoluyla enerji verimliliğini artırarak ve çevresel etkiyi azaltarak güneş destekli CCHP sistemlerinin performansını iyileştirmeyi amaçlamaktadır.

Originality (Özgünlük): This study assesses a solar-assisted CCHP system, comparing R245fa and butane for efficiency and cost-effectiveness to optimize sustainable energy solutions/Bu çalışma, güneş destekli CCHP sistemini değerlendirerek R245fa ve bütan verimlilik ve maliyet açısından karşılaştırmaktadır

Results (Bulgular): R245fa achieves higher efficiency (86.89%) and lower CO₂ emissions (0.195 kg/kWh), while butane reduces costs (63.06 \$/h). The 72.12% exergoeconomic factor supports R245fa's superior performance for sustainable solar-assisted CCHP systems/R245fa daha yüksek verimlilik (%86,89) ve düşük CO₂ emisyonu (0,195 kg/kWh) sağlarken, bütan maliyeti düşürmektedir (63,06 \$/saat). %72,12 eksergoekonomik faktör değeri, güneş destekli CCHP sistemlerinde R245fa'nın üstün performansını desteklemektedir.

Conclusion (Sonuç): This study confirms the efficiency of solar-assisted CCHP systems, showing R245fa as environmentally superior with higher efficiency, while butane is more cost-effective/Bu çalışma, güneş destekli CCHP sistemlerinin verimliliğini doğruluyor; R245fa çevresel açıdan üstünken, bütan daha maliyet etkindir.



Thermodynamic and Exergoeconomic Assessment of a Solar-Assisted Combined Cooling, Heating, and Power System in Antalya, Turkey

Abdulrazzak AKROOT^{1*} and Mohammed REFAEI¹

¹Karabük University, Faculty of Engineering, Department of Mechanical Engineering, Karabük, Turkey

Article Info

Research article
Received: 26/11/2024
Revision: 08/01/2025
Accepted: 05/02/2025

Keywords

Solar-Assisted Energy Systems
Organic Rankine Cycle
Exergoeconomic analysis
Parabolic trough collectors

Abstract

This study investigates the potential of solar-assisted combined cooling, heating, and power (CCHP) systems to address energy efficiency and sustainability challenges, particularly in regions with abundant solar resources, such as Antalya, Turkey. The thermodynamic design and exergoeconomic analysis were conducted on a tri-generation system that integrates parabolic trough collectors, an organic Rankine cycle engine, and an absorption refrigeration unit. Using steady-state simulations in the Engineering Equation Solver (EES), the analysis evaluated key performance metrics such as thermal and exergy efficiencies, power outputs, and cost rates for two working fluids: R245fa and butane. Results showed that the R245fa-based system achieved an electrical output of 232.5 kW, a cooling capacity of 716.7 kW, a heating capacity of 2225 kW, a thermal efficiency of 86.89%, an exergy efficiency of 16.26%, a total cost rate of 66.12 \$/h, and a carbon footprint of 0.195 kg CO₂/kWh. Additionally, the exergoeconomic factor for this system was 72.12%. On the other hand, the butane-based system produced 221.8 kW of electricity, 745.4 kW of cooling, and 2197 kW of heating, with a thermal efficiency of 86.44%, an exergy efficiency of 15.73%, a total cost rate of 63.06 \$/h, and a carbon footprint of 0.223 kg CO₂/kWh. The exergoeconomic factor for the butane-powered system was calculated at 70.86%. The Mean Absolute Percentage Error (MAPE) for the model validation was less than 5%, confirming the reliability of the results. The findings emphasize the superior performance of R245fa in terms of thermodynamic and environmental metrics, while butane offers cost advantages.

Antalya'da Güneş Enerjisiyle Çalışan Kombine Soğutma, Isıtma ve Güç Sisteminin Termodinamik ve Eksergoekonomik Değerlendirmesi

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 26/11/2024
Düzeltilme: 08/01/2025
Kabul: 05/02/2025

Anahtar Kelimeler

Güneş Destekli Enerji Sistemleri
Organik Rankine Döngüsü
Eksergoekonomik analiz
Parabolik oluk kolektörleri

Öz

Bu çalışma, güneş destekli kombine soğutma, ısıtma ve güç (CCHP) sistemlerinin enerji verimliliği ve sürdürülebilirlik zorluklarını ele alma potansiyelini, özellikle Antalya, Türkiye gibi bol güneş kaynağına sahip bölgelerde araştırmaktadır. Parabolik oluk kolektörleri, organik Rankine çevrimi motoru ve absorpsiyonlu soğutma ünitesini entegre eden bir trijenerasyon sistemi üzerinde termodinamik tasarım ve eksergoekonomik analiz gerçekleştirilmiştir. Engineering Equation Solver (EES) kullanılarak yapılan durağan hal simülasyonları ile R245fa ve bütan olmak üzere iki farklı çalışma akışkanı için termal ve ekserji verimlilikleri, güç çıktıları ve maliyet oranları gibi temel performans ölçütleri değerlendirilmiştir. Sonuçlar, R245fa bazlı sistemin 232,5 kW elektrik üretimi, 716,7 kW soğutma kapasitesi, 2225 kW ısıtma kapasitesi, %86,89 termal verimlilik, %16,26 ekserji verimliliği, 66,12 \$/saat toplam maliyet oranı ve 0,195 kg CO₂/kWh karbon ayak izi sağladığını göstermektedir. Ayrıca, bu sistemin eksergoekonomik faktörü %72,12 olarak hesaplanmıştır. Öte yandan, bütan bazlı sistem 221,8 kW elektrik üretimi, 745,4 kW soğutma kapasitesi, 2197 kW ısıtma kapasitesi, %86,44 termal verimlilik, %15,73 ekserji verimliliği, 63,06 \$/saat toplam maliyet oranı ve 0,223 kg CO₂/kWh karbon ayak izi sağlamıştır. Bütan bazlı sistemin eksergoekonomik faktörü %70,86 olarak hesaplanmıştır. Model doğrulaması için Ortalama Mutlak Yüzde Hata (MAPE) %5'in altında olup, sonuçların güvenilirliğini doğrulamaktadır. Bulgular, R245fa'nın termodinamik ve çevresel ölçütler açısından üstün performans sergilediğini, ancak bütanın maliyet açısından avantaj sunduğunu ortaya koymaktadır.

1. INTRODUCTION (GİRİŞ)

The quest for sustainable energy solutions has intensified amid rising energy demands and climate

change challenges [1]. Solar-assisted Combined Heating, Cooling, and Power (CCHP) systems offer a promising approach, efficiently meeting diverse energy needs with a single adaptable system [2].

These systems deliver heating, cooling, and electricity, providing a comprehensive solution to growing energy consumption [3]. Renewable energy integration is crucial to tackling climate change [4,5]. Solar energy, abundant and eco-friendly, can revolutionize energy systems. Solar-assisted CCHP systems enhance efficiency by providing electricity, heating, and cooling simultaneously [6,7]. Recent advancements in CCHP systems integrated with renewable energy sources have significantly enhanced their efficiency, sustainability, and cost-effectiveness [8]. However, most studies focus on specific applications without providing a holistic thermodynamic and exergoeconomic assessment. For example, Ukaegbu et al. [9] optimized solar-assisted CCHP systems to balance net power, efficiency, and CO₂ emissions but did not explore the economic trade-offs of using different working fluids. Similarly, Liu et al. [10] demonstrated the enhanced efficiency of biomass and natural gas co-firing in a CCHP system, achieving exergy and thermal efficiencies of 41.76% and 75.69%, respectively. Gao et al. [11] developed a cooling-power-desalination cycle using waste heat from diesel exhaust, identifying optimal operating conditions for improved efficiency and cost-effectiveness. Wang et al. [12] introduced an ammonia-water system for low-temperature heat source utilization, achieving thermal and exergy efficiencies of 24.62% and 11.52%, respectively. Zeng et al. [13] optimized solar absorption cooling systems based on meteorological data, reducing the system's total cost rate by 13.6% compared to the base case. Divan et al. [14] proposed a molten carbonate fuel cell-based hybrid system for CCHP applications, reporting energy and exergy efficiencies of 54% and 52.58% with minimal CO₂ emissions. Takleh et al. [15] evaluated solar-geothermal systems using different working fluids, finding that R423A provided the highest energy efficiency and lowest exergy degradation rates. Wang et al. [16] applied energy-based optimization to hybrid solar building CCHP systems, reducing annual energy consumption through optimal component selection. Pokson and Chaiyat [17] designed an IMW-CCHP system utilizing waste heat, achieving exergy and energy efficiencies of 25.88% and 12.25%, respectively, with low energy costs. Al-Sayyab et al. [18] improved cooling COP using alternative refrigerants in a solar-driven heat pump, achieving up to a 75% COP increase with R450A compared to R134a. Yan et al. [19]

optimized hybrid CCHP capacity incorporating geothermal, solar, and wind energy, achieving significant reductions in CO₂ emissions and enhanced energy independence. Ao et al. [20] introduced multi-scenario optimization for hybrid CCHP design, improving computation efficiency and optimizing system flexibility. Wang et al. [21] integrated a CCHP system with full-spectrum solar devices, achieving energy and exergy efficiencies of 70.65% and 26.59%, respectively, with 16% CO₂ reduction. Nami et al. [22] developed a solar-assisted biomass-based trigeneration system for domestic needs, demonstrating high energy efficiency and reliable performance across seasonal conditions. Cavalcanti et al. [23] modeled evacuated tube collectors and absorption chillers, confirming the impact of dead state temperature on exergy efficiency. Wang et al. [24] optimized hybrid CCHP systems under load and RES uncertainties, reducing greenhouse gas emissions while enhancing energy-saving benefits. Saini et al. [25] proposed a solar-driven CCHP system with thermal energy storage for remote buildings, improving exergy efficiency and reducing power and cooling costs. Ramos et al. [26] showed PV-T systems can meet residential energy needs, reducing energy costs by 30–40% compared to PV-only systems. Fani and Sadreddin [27] analyzed solar CCHP systems for office buildings, achieving up to 89% efficiency and reducing CO₂ emissions by 2,217 kg/day in winter.

This research is notable for its novel method of using renewable solar energy in Combined Cooling, Heating, and Power (CCHP) systems to tackle climate change and energy sustainability issues. This study simulates a solar-assisted CCHP system in Antalya, Turkey, assessing the influence of several working fluids, including R245fa and octane, on the efficiency of the ORC and the system's steady-state performance under varied sun intensities.

The study emphasizes the ecological advantages of decreasing carbon emissions and shows the economic efficiency of solar energy in promoting sustainable development. The results provide practical insights for enhancing solar-integrated energy systems, aiding policy formulation, and promoting global initiatives for a low-carbon future. To further clarify the current study's differences and novelty, Table 1 compares methodologies and results from key literature.

Table 1: Comparative Analysis of Methodologies and Key Findings in Solar-Assisted CCHP Studies (Güneş Destekli CCHP Çalışmalarında Metodolojilerin ve Temel Bulguların Karşılaştırmalı Analizi)

Study	Methodology	Key Findings	Differences with Current Study
Ukaegbu et al. [9]	Optimization of solar-assisted CCHP systems	Balanced power, efficiency, and CO ₂ emissions	Did not examine working fluids, economic aspects, or regional specificity (e.g., Antalya's climate)
Liu et al. [10]	Biomass and natural gas co-firing in CCHP	High efficiency achieved with co-firing	No solar integration; focused on biomass and fossil-based fuels
Gao et al. [11]	Cooling-power-desalination combined cycle	Enhanced efficiency with diesel exhaust recovery	Focused on waste heat recovery; no direct comparison of working fluids or thermodynamic specifics
Current Study	Simulation of solar-assisted CCHP with PTCs	Comprehensive thermodynamic, exergoeconomic, and environmental analysis; comparison of R245fa and butane	Novel integration of solar energy with working fluid comparison in a location-specific context

2. MODEL DESCRIPTION (MODEL AÇIKLAMASI)

Solar-assisted CCHP systems integrate solar energy into a hybrid setup to simultaneously produce electricity, heating, and cooling, enhancing energy efficiency and sustainability, as seen in Figure 1. These systems consist of interconnected components, including solar collectors, an Organic Rankine Cycle (ORC) unit, an absorption chiller, and thermal energy storage, each playing a vital role in the system's operation. Parabolic solar collectors focus sunlight onto a receiver containing Therminol 66, a heat transfer fluid, which absorbs thermal energy and transfers it to a thermal storage tank as superheated steam. This stored energy drives the ORC, efficiently generating electricity and thermal energy by utilizing waste heat for heating applications. The residual thermal energy from the ORC powers the absorption chiller, which produces chilled water using a lithium bromide-water solution for cooling processes. Excess thermal energy is stored and utilized later to ensure reliable performance during high-demand periods, optimizing the system's overall effectiveness and reducing energy waste. R245fa and butane were chosen for their advantageous thermodynamic characteristics, rendering them appropriate for use in Organic Rankine Cycle (ORC) systems. R245fa has a low boiling point and exceptional thermal stability, making it optimal for high efficiency in

moderate temperature applications. Conversely, butane is readily accessible, economical, and has significant cooling capability, making it a viable choice for certain applications. The two fluids exhibit different performance trade-offs for efficiency, cost, and environmental effect, offering a thorough foundation for comparison in solar-assisted CCHP systems. Table 1 presents the Input parameters for modeling the solar-assisted CCHP system. The following assumptions are made in the system modeling:

- All components of the system operate under steady-state conditions.
- Therminol-66 oil is used as the working fluid in the solar energy system to transfer heat efficiently from the solar collectors to the storage tank, ARS generator, and ORC evaporator.
- The LiBr-H₂O solution exciting the generator is considered to be in a saturated state.
- The refrigerant vapor leaving the evaporator and the liquid refrigerant exiting the condenser are both assumed to be saturated.
- The throttling valve functions under isenthalpic conditions.
- The effectiveness of the SHEX is assumed to be 0.7.
- Pressure losses within the pipes and heat exchangers are neglected.

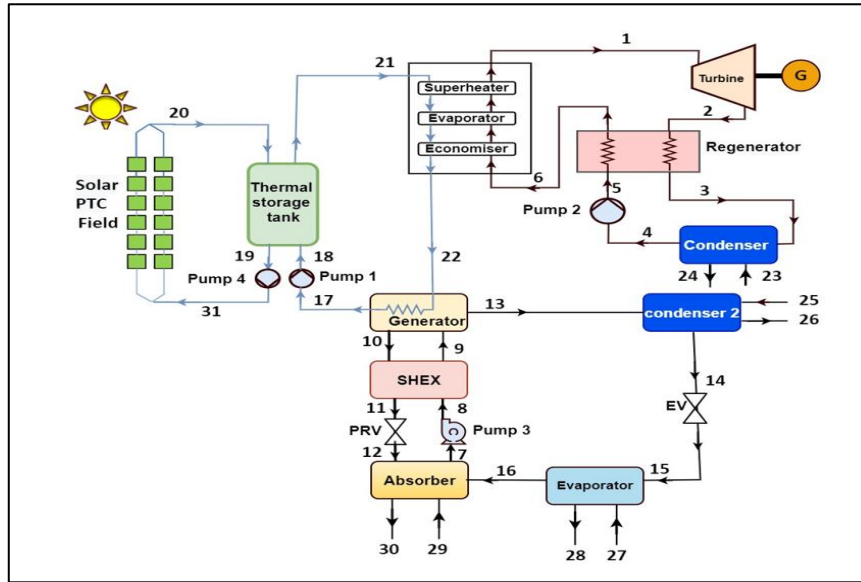


Figure 1. The schematic diagram for solar-assisted CCHP system. (Güneş destekli CCHP sisteminin şematik diyagramı)

Table 2. Input data for modeling the suggested Solar-assisted CCHP system (Önerilen Güneş Destekli CCHP sisteminin modellenmesi için giriş verileri)

Parameter	Value
Solar area	510130 m ²
Sun temperature	5770 K
Solar reservoir outlet temperature	243°C
Solar reservoir inlet temperature	127°C
Latitude (N)	36.54°N
Longitude (E)	30.41°E
Location	Antalya, Turkey
Direct normalC irradiation (DNI)	6.25 kWh/m ² .day
T _{amb}	25°C
P _{amb}	101 kPa
Absorber temperature (T ₁₂)	36°C
Generator temperature (T ₁₅)	90°C
LiBr solution strength	55%
Compressor efficiency	85%
ORC turbine efficiency	90%
ORC pump efficiency	80%

The core equations governing mass, energy, and exergy balances for a control volume while neglecting potential and kinetic energy variations are outlined below. These equations form the basis for modeling the operation of the model:

$$\sum \dot{m}_{in} - \sum \dot{m}_{out} = 0 \quad (1)$$

$$\dot{Q} - \dot{W} + \sum \dot{E}_{in} - \sum \dot{E}_{out} = \frac{dE_{cv}}{dt} \quad (2)$$

$$\dot{E}x_{in} + \dot{E}x_Q - \dot{E}x_{out} - \dot{E}x_W - \dot{E}x_{dis} = 0 \quad (3)$$

Exergy for a thermodynamic system exchanging energy as heat with a reference environment can be defined as [28]:

$$\dot{E}x_Q = \dot{Q}_i \left(1 - \frac{T_0}{T_i} \right) \quad (4)$$

The exergy rate associated with work is equivalent to the rate of energy transfer through work:

$$\dot{E}x_W = \dot{W} \quad (5)$$

The energy transfer rate of a fluid is calculated as:

$$\dot{E}x_{in} = \dot{m}ex_{in} \quad (6)$$

$$\dot{E}x_{out} = \dot{m}ex_{out} \tag{7}$$

Lastly, the following indicators are added to examine the performance of the CCHP system:

Overall output work:

$$\dot{W}_{net} = \dot{W}_{ORT} - \dot{W}_{P1} - \dot{W}_{P2} - \dot{W}_{P3} - \dot{W}_{P4} \tag{8}$$

Overall efficiency:

$$\eta_{CCHP} = \frac{\dot{W}_{net} + \dot{Q}_{heating} + \dot{Q}_{cooling}}{A_{Coll} \cdot \eta_{coll} \cdot DNI \cdot N_{Coll}} \tag{9}$$

$$\Psi_{SCCHP} = \frac{\dot{W}_{net} + \dot{E}X_{P,heating} + \dot{E}X_{P,cooling}}{\dot{Q}_{solar} \left(1 - \frac{T_0}{T_{sun}}\right)} \tag{10}$$

Coefficient of performance

$$COP_{VARS} = \frac{\dot{Q}_{Evaporator}}{\dot{Q}_{Generator} + \dot{W}_{Pump3}} \tag{11}$$

Exergoeconomic analysis evaluates the cost flows, total cost rates, and specific costs associated with the system's exergy streams, including the costs of exergy destruction and exergoeconomic factors. As part of this analysis, cost balances for the kth component are expressed Eq. 12 [29], with the cost rate for the j stream determined using Eq. 13 [30].

$$\sum (c_{in} \dot{E}x_{in})_k + c_{q,k} \dot{E}x_{q,k} + \dot{Z}_k = \sum (c_{out} \dot{E}x_{out})_k + c_{w,k} \dot{W}_k \tag{12}$$

$$\dot{C}_j = c_j \dot{E}x_j \tag{13}$$

The total cost rate for the kth component, encompassing both capital investment and operation and maintenance costs, is expressed in Eq. 14 [31].

$$\dot{Z}_k = z_k * CRF * \frac{\phi}{\tau} \tag{14}$$

Here, τ denotes the annual operating hours, ϕ represents the maintenance factor, and CRF refers to the Capital Recovery Factor as defined in Eq. 15 [32]. Additionally, z_k represents the purchase cost of the kth component. In Eq. 15, i indicates the annual interest rate, while n corresponds to the system's operational lifespan in years.

$$CRF = \frac{i(1+i)^N}{(1+i)^N - 1} \tag{15}$$

To assess the exergoeconomic performance of the kth component, several key parameters must be determined based on the definitions of fuel and product) [33]. These include the average unit cost of fuel (Eq. 16), the average unit cost of the product (Eq. 17), the cost rate of exergy destruction (Eq. 18), and the exergoeconomic factor (Eq. 24). Ultimately, the total unit cost of the product is expressed by Eq. 22 [34]:

$$c_{F,k} = \frac{\dot{C}_{F,k}}{\dot{E}_{F,k}} \tag{16}$$

$$c_{P,k} = \frac{\dot{C}_{P,k}}{\dot{E}_{P,k}} \tag{17}$$

$$\dot{C}_{D,k} = c_{F,k} \dot{E}_{D,k} \tag{18}$$

$$f_k = \frac{\dot{Z}_k}{\dot{Z}_k + \dot{C}_{D,k}} \tag{19}$$

$$\dot{C}_{total} = \frac{\dot{Z}_k + \dot{C}_{D,k}}{\dot{W}_{net} + \dot{Q}_{heating} + \dot{Q}_{cooling}} \tag{20}$$

3. RESULTS (BULGULAR)

The ORC model is validated by comparing its simulation results with those of Delgado-Torres and García-Rodríguez [35] for R245fa. It focuses on an ORC generating 100 kW of electricity with a turbine inlet temperature of 95°C. Table 2 compares the results of the current ORC model with the reference data from Delgado-Torres and García-Rodríguez [35] to validate its accuracy. The turbine inlet temperature (T_1) is identical in both models at 95°C, showing no deviation. The mass flow rate (\dot{m}_{ORC}) exhibits a minor deviation of 4.07%, with the

current model predicting 4.27 kg/s compared to 4.444 kg/s in the reference. The condenser outlet temperature (T_3) shows a slight variation of 0.7%, with the present model reporting 36.67°C versus 36.4°C in the reference. The ORC efficiency (η_{ORC}) is also closely aligned, with a deviation of only 0.5%, where the present model estimates 10.08% compared to 10.14% in the reference. Overall, the results indicate a high degree of agreement, validating the reliability of the present model for simulating ORC performance.

Table 3. Verification of the ORC model by comparing the current model's findings with Ref's [35] (Mevcut model bulgularının Ref'in [35] bulgularıyla karşılaştırılması yoluyla ORC modelinin doğrulanması)

	Ref. [35]	Present model	Deviation (%)
T_1 (°C)	95	95	0
\dot{m}_{ORC} (kg/s)	4.444	4.27	4.07
T_3 (°C)	36.4	36.67	0.7
η_{ORC} (%)	10.14	10.08	0.5

To address the potential instabilities in the absence of direct comparisons with existing studies, an uncertainty analysis was conducted to evaluate the reliability of the results, as seen in Table 4. The analysis employed the root-sum-square (RSS) method to propagate uncertainties from input parameters such as temperature, pressure, and mass flow rate to key output variables, including net work output (\dot{W}_{net}), heating capacity ($\dot{Q}_{heating}$), cooling capacity ($\dot{Q}_{cooling}$), thermal efficiency (η), and

exergy efficiency (ψ). The results revealed uncertainties of $\pm 2.5\%$ for net work output, $\pm 3.2\%$ for heating capacity, and $\pm 3.0\%$ for cooling capacity, which are well within acceptable ranges for thermodynamic simulations. Additionally, uncertainties for thermal and exergy efficiencies were $\pm 1.8\%$ and $\pm 2.1\%$, respectively. These findings confirm the robustness of the model and provide confidence in the reported results, ensuring their reliability despite the absence of comparable systems in the literature.

Table 4. Uncertainty Analysis of Key Performance Parameters (Temel Performans Parametrelerinin Belirsizlik Analizi.)

Parameter	Value (R245fa)	Value (Butane)	Uncertainty (%)
Net work output (\dot{W}_{net})	232.5	2225	$\pm 2.5\%$
Heating capacity ($\dot{Q}_{heating}$)	221.8	2197	$\pm 3.2\%$
Cooling capacity ($\dot{Q}_{cooling}$)	716.7 kW	745.4 kW	$\pm 3.0\%$
Thermal efficiency (η)	86.89%	86.44%	$\pm 1.8\%$
Exergy efficiency (ψ)	6.26%	15.73%	$\pm 2.1\%$

Table 5 comprehensively summarizes energy and exergy performance for each system component, comparing the working fluids R245fa and n-butane in the ORC. The findings highlight several key insights into the system's operation and performance: The absorber exhibits a similar energy input for both fluids, with 884.5 kW for R245fa and 920 kW for n-butane, accounting for around 33.57 kW and 34.92 kW of exergy destruction, respectively. This indicates comparable efficiency in transferring energy between the components for both working fluids. For R245fa, the ORC condenser removes 76.75 kW of energy with an exergy efficiency of 7.18%, while for n-butane, it removes 75.32 kW with an exergy efficiency of 7.21%. The ORC heat exchanger also shows a consistent performance, with slightly lower exergy destruction in the system using n-butane. The heat

removed from the evaporator is higher for n-butane (745.4 kW) compared to R245fa (716.7 kW), indicating slightly better thermal transfer with n-butane. However, both working fluids have similar exergy efficiency for this component, at 54.34%. The boiler's energy input for R245fa (2476 kW) and n-butane (2437 kW) is nearly identical, with R245fa having slightly lower exergy destruction (10.71 kW vs. 16.07 kW). For both fluids, pump efficiency varies slightly, with pump energy consumption being 16.77% of the total power for R245fa and 18.7% for n-butane. The PTC solar collectors exhibit the highest exergy destruction rates for both fluids, with values of 90.06% for R245fa and 90.22% for n-butane. This suggests that the solar collectors remain the most critical component for optimization, as they are responsible for a significant portion of exergy losses. The net work

output of the system is higher for R245fa (232.8 kW) compared to n-butane (221.83 kW). Similarly, the heat supply for R245fa is slightly greater (2225 kW vs. 2197 kW), highlighting that R245fa marginally outperforms n-butane in terms of overall system energy output. While both fluids perform similarly in most components, the system using R245fa demonstrates slightly better exergy efficiency in critical components such as the boiler and pumps. However, n-butane exhibits higher heat removal at the evaporator, making it potentially more suitable for applications requiring higher

cooling capacity. R245fa and n-butane provide comparable performance in the CCHP system, but R245fa slightly outperforms n-butane regarding net work output and process heat supply. However, the higher heat removal in the evaporator for n-butane may make it advantageous for applications requiring enhanced cooling performance. The PTC solar collector remains the component with the highest exergy destruction, underscoring the need for further optimization to improve overall system efficiency.

Table 5. Energy and exergy analysis for each system component for both working fluids (Her iki çalışma akışkanı için her sistem bileşeni için enerji ve ekserji analizi)

Component	R245fa				n-butane			
	$\dot{E}_{D,total}$ (kW)	$\dot{E}_{D,total}$ (%)	Exergy (%)	\dot{Q} or \dot{W} (kW)	$\dot{E}_{D,total}$ (kW)	$\dot{E}_{D,total}$ (%)	Exergy (%)	\dot{Q} or \dot{W} (kW)
Absorber	33.57	0.9472	39.78	884.5	34.92	0.982	39.78	920
ARC cond	9.32	0.263	66.86	749.4	9.7	0.2725	66.86	779.8
Boiler	10.71	0.3023	98.45	2476	16.07	0.452	97.6	2437
EV ₁	2.013	0.057	88.25	0	2.093	0.06	88.25	0
Evap	21.67	0.612	54.34	716.7	22.54	0.634	54.34	745.4
Generator	19.23	0.543	87.41	896.5	20.04	0.564	87.93	932.4
ORC cond	76.75	2.166	80.71	2225	67.21	1.89	82.51	2197
ORC HE	2.305	0.0651	98.2	30.41	1.983	0.0545	98.54	597.2
ORT	23.49	0.663	92.25	279.7	23.03	0.648	92.22	273
Pump ₁	7.338	0.207	16.5	8.79	7.631	0.2146	16.67	9.158
Pump ₂	4.816	0.136	83.63	29.42	5.42	0.1524	83.57	32.98
Pump ₃	0.0385	0.0011	3.313	0.04	0.04	0.001	3.313	0.0414
Pump ₄	7.259	0.205	16.03	8.645	7.55	0.21	16.07	8.995
PRV	0.0452	0.0013	99.98	0	0.047	0.001	99.98	0
PTC	3212	90.63	22.88	4392	3223	90.63	22.6	4392
SHEX	0.1066	0.003	96.36	30.41	0.1109	0.0031	96.36	31.63
TST	113.4	3.2	88.12	3654	114.8	3.227	87.83	3661

Table 6 presents the exergoeconomic analysis of each component in the CCHP system for the working fluids R245fa and n-butane. The findings provide significant insights into the cost distribution, exergoeconomic performance, and areas for improvement for the models. The total cost rate ($\dot{Z}_K + \dot{C}_D$) is slightly higher for R245fa (65.1176 \$/h) compared to n-butane (63.0576 \$/h),

indicating slightly higher economic demand when using R245fa as the working fluid. The total cost associated with exergy destruction (\dot{C}_D) for R245fa (18.162 \$/h) is also marginally higher than for n-butane (18.372 \$/h), suggesting similar performance in terms of minimizing inefficiencies. Components with high exergoeconomic factors (f) include the ORC HE (78.45% for R245fa and

80.84% for n-butane), indicating that a large portion of the cost for this component is driven by capital investment rather than exergy destruction. This highlights its economic efficiency and the importance of its design in the system. Conversely, components like EV1 and PRV have negligible exergoeconomic factors, emphasizing that their costs are almost entirely due to exergy destruction. These components are prime targets for optimization, such as by enhancing heat exchange efficiency or reducing irreversibilities. Heat exchangers (evaporator, condensers, and ORC HE) account for significant portions of both exergy destruction costs and capital investment. The evaporator, for instance, contributes 0.533 \$/h to exergy destruction costs for R245fa and 0.561 \$/h for n-butane. Enhancing these components through improved materials or design could result in substantial economic and thermodynamic performance gains. The ARC condenser shows a similar trend, with \dot{C}_D values of 1.7 \$/h and 1.788 \$/h for R245fa and n-butane, respectively, suggesting comparable inefficiencies for both working fluids. The turbines (ORT) demonstrate relatively high exergoeconomic factors (75.66% for R245fa and 57.54% for n-butane), indicating that capital investment significantly influences their costs. However, further improvements in isentropic efficiency could reduce exergy destruction, thereby lowering operational costs. Pumps exhibit varying levels of performance, with Pump 4 showing higher exergoeconomic factors (69.55% for R245fa and 72.22% for n-butane). In contrast, other pumps like Pump 1 and Pump 2 demonstrate relatively low values, highlighting the need for efficiency improvements. The PTC solar collector is a critical component, as it has the highest capital investment costs for both working fluids (39.22 \$/h for both R245fa and n-butane). Its exergoeconomic factor is 100% for both cases, indicating that all associated costs are tied to capital investment. The slightly higher exergoeconomic factor for R245fa (72.11%) compared to n-butane (70.86%) reflects marginally better economic performance, likely due to lower operational inefficiencies in key components. The generator's cost rates (cd) are 0.94 \$/h for R245fa and 0.9933 \$/h for n-butane, with exergoeconomic factors of 45.85% for both fluids. This parity suggests similar behavior of the generator across working fluids, making it a stable component in the system.

Table 7 summarizes the energy, exergy, and exergoeconomic performance of the CCHP system using R245fa and n-butane as working fluids. The results present the R245fa demonstrates superior performance in terms of network output, heating

capacity, exergy efficiency, and CO₂ emissions, making it a better choice for systems focusing on power generation and heating with lower environmental impact. n-butane shows a higher cooling capacity and lower operational cost, making it more suitable for applications prioritizing cooling or cost-efficiency. The marginal differences in thermal efficiency and exergy destruction between the two fluids suggest that either option can be viable depending on the specific application priorities. Optimization of components with high exergy destruction, such as the heat exchangers and the ORC subsystem, can further enhance the system's overall efficiency and cost-effectiveness for both fluids. The net power output is slightly higher for R245fa (232.5 kW) compared to n-butane (221.8 kW). This indicates that R245fa performs better in terms of electricity generation, likely due to its thermodynamic properties leading to higher efficiency in the turbine. The heating output (\dot{Q}_{heating}) is higher for R245fa (2225 kW) than for n-butane (2197 kW), indicating better performance for heating applications with R245fa. Conversely, the cooling capacity (\dot{Q}_{cooling}) is greater for n-butane (745.4 kW) compared to R245fa (716.7 kW). This makes n-butane a more suitable choice for applications prioritizing cooling. The thermal efficiency of the system is almost identical for both working fluids, with R245fa achieving 86.89% and n-butane achieving 86.44%. This indicates that both fluids utilize the input energy effectively with minimal differences. The exergy efficiency (ψ) is slightly higher for R245fa (16.26%) compared to n-butane (15.73%). This suggests that R245fa has a slight advantage in converting available exergy into useful work and heat, indicating better overall system performance in terms of thermodynamic efficiency. The total exergy destruction is marginally lower for R245fa (3544 kW) compared to n-butane (3557 kW). Although the difference is minimal, it reflects a slightly more efficient energy utilization with R245fa. The total cost rate is slightly higher for R245fa (66.12 \$/h) compared to n-butane (63.06 \$/h). While R245fa provides better thermodynamic performance, it comes with a marginally higher operational cost. The exergoeconomic factor (f) is higher for R245fa (72.12%) compared to n-butane (70.86%). This indicates that for R245fa, a larger proportion of the total cost is associated with capital investment rather than the cost of exergy destruction, highlighting its economic feasibility. The CO₂ emissions are significantly lower for R245fa (0.195 kg/kWh) compared to n-butane (0.223 kg/kWh), making R245fa a more environmentally friendly choice for the system.

Table 6. Exergoeconomic analysis for each component of the CCHP system for both working fluids (Her iki çalışma sıvısı için CCHP sisteminin her bir bileşeni için eksergoekonomik analiz)

Component	R245fa				n-butane			
	\dot{C}_D (\$/h)	\dot{Z}_K (\$/h)	$\dot{Z}_K + \dot{C}_D$ (\$/h)	f %	\dot{C}_D (\$/h)	\dot{Z}_K (\$/h)	$\dot{Z}_K + \dot{C}_D$ (\$/h)	f %
Absorber	2.603	0.208	2.811	7.4	2.742	0.214	2.956	7.24
ARC cond	1.7	0.006	1.706	0.352	1.788	0.009	1.797	0.5
Boiler	0.5236	0.2802	0.8038	34.86	0.7963	0.2837	1.08	26.27
EV ₁	0.367	0.0003	0.3673	0.082	0.3863	0.0006	0.3869	0.155
Evap	0.533	0.379	0.912	41.56	0.561	0.3883	0.9493	40.9
Generator	0.94	0.796	1.736	45.85	0.9933	0.8277	1.821	45.45
ORC cond	4.065	0.426	4.491	9.486	3.632	0.217	3.849	5.64
ORC HE	0.1221	0.4444	0.5665	78.45	0.1047	0.4418	0.5465	80.84
ORT	1.244	3.866	5.11	75.66	1.244	1.686	2.93	57.54
Pump ₁	0.5226	0.2578	0.7804	33.03	0.4943	0.2655	0.7598	34.94
Pump ₂	0.25	0.6057	0.8557	70.78	0.2535	0.6592	0.9127	72.22
Pump ₃	0.0027	0.0056	0.00833	67.59	0.0026	0.0057	0.0083	68.67
Pump ₄	0.517	0.255	0.772	33.03	0.489	0.2621	0.7511	34.89
PRV	0.0023	0.0027	0.005	54	0.0024	0.0029	0.00527	54.46
PTC	0	39.22	39.22	100	0	39.22	39.22	100
SHEX	0.0055	0.0067	0.01223	55.03	0.0058	0.007	0.01275	54.67
TST	4.764	0.196	4.96	3.95	4.877	0.195	5.072	3.84
Total	18.162	46.96	65.11726	72.11	18.372	44.685	63.0576	70.86

Table 7. Summary of the Energy, exergy, and exergoeconomic results of the CCHP system for both organic fluids (Her iki organik akışkan için CCHP sisteminin Enerji, ekserji ve eksergoekonomik sonuçlarının özeti)

Working Fluid	\dot{W}_{net} (kW)	$\dot{Q}_{heating}$ (kW)	$\dot{Q}_{cooling}$ (kW)	η (%)	ψ (%)	$\dot{E}_{D,total}$ kW	\dot{C}_{total} \$/h	f %	CO ₂ emission (kg/kWh)
R245fa	232.5	2225	716.7	86.89	16.26	3544	66.12	72.12	0.195
butane	221.8	2197	745.4	86.44	15.73	3557	63.06	70.86	0.223

Figure 2 illustrates the net output power (\dot{W}_{net}) and total cost rate (\dot{C}_{Total}) as a function of the superheated degree at the ORC intake for the system with two working fluids. The findings present that the work net increases with an increase in the superheating degree, whereas the total cost decreases. The \dot{W}_{net} for the CCHP system with R245fa is more significant than with butane. It is noticed from the curves when ΔT_{super} increases

from 5 to 50 °C, the \dot{W}_{net} increases from 174.6 to 294.3 kW for the system with butane, while it rises from 185.1 to 304 kW for the system with R245fa. Conversely, the total cost rate (\dot{C}_{Total}) for the CCHP system with butane is more attractive than the system with R245fa because the mass flow rate of the ORC with R245fa is higher than for the ORC with butane, and it causes an increase in the total cost investment for the components of the ORC.

The \dot{C}_{Total} reduces from 66.79 to 63.69 \$/h for the system with R245fa, while it decreases from 64.9 to 61.4 \$/h for the system with butane.

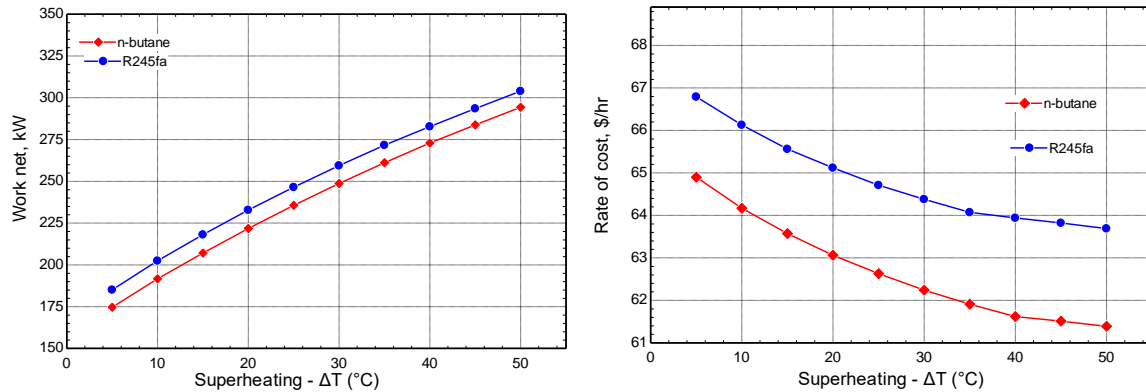


Figure 2. Work net and total cost rate for different superheated degree parameters (Farklı aşırı ısıtma dereceleri için iş net ve toplam maliyet oranı)

Figure 3 presents the overall efficiencies of the CCHP system as a function of the superheated degree with two working fluids. It revealed from the curves both the thermal and exergy efficiency of the system increased with an increase in the ΔT_{super} due to the enhancement of the system output (\dot{W}_{net} and $\dot{Q}_{heating}$) at high ΔT_{super} . Compared to the butane-based system, the CCHP

system that uses R245fa achieves higher overall efficiency. The $\eta_{thermal}$ enhances from 85.13 to 89.5 % and the η_{exergy} increases from 14.8 to 18.32 % for the system with R245fa when ΔT_{super} increases from 5 to 50 °C. Also, the $\eta_{thermal}$ enhances from 84.59 to 89.21 % and the η_{exergy} increases from 14.25 to 17.85 % for the system with butane.

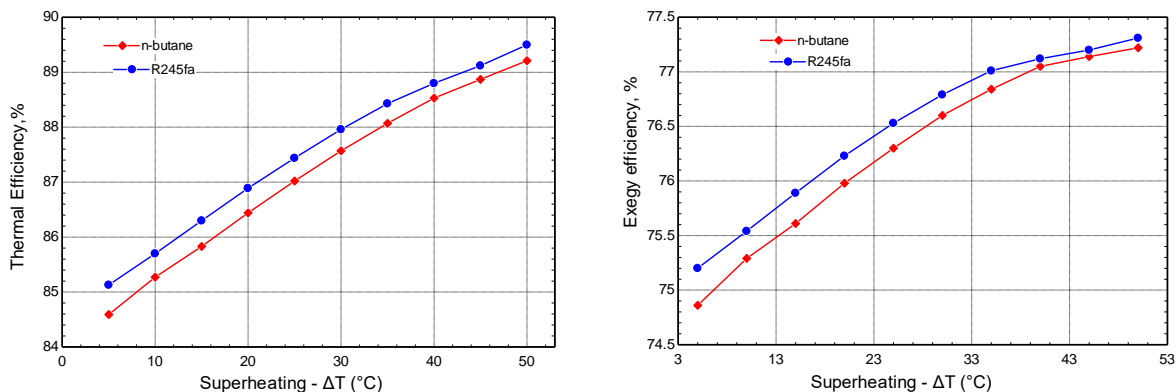


Figure 3. Overall efficiencies of the CCHP system for different superheated degree parameters (Farklı aşırı ısıtma derecesi parametreleri için CCHP sisteminin genel verimlilikleri)

The pressure ratio (α) represents the relationship between the turbine intake pressure (P_1) and the critical pressure ($P_{critical}$) of the working fluid. For R245fa, the critical pressure is 3651 kPa, whereas for butane, it is 3797 kPa. The effect of the pressure ratio parameter on the \dot{W}_{net} and \dot{C}_{Total} of the CCHP system are shown in Figure 4. The results indicate that the \dot{W}_{net} rises as the pressure ratio increases, but the overall cost \dot{C}_{Total} reduces. The \dot{W}_{net} production of the CCHP system using R245fa is higher, while the overall cost \dot{C}_{Total} is more expensive than using butane. It can be seen from the graphs that when the α value goes from 0.5 to 0.8, the \dot{W}_{net} increases from 96.83 kW to 240.8 kW for

the system using butane, and from 121.8 kW to 249.6 kW for the system using R245fa. The \dot{C}_{Total} reduces from 68.67 \$/h to 64.74 \$/h for the system with R245fa, while it decreases from 68.61 \$/h to 62.46 \$/h for the system with butane.

The overall efficiencies of the system as a function of the pressure ratio with two working fluids are presented in Figure 5. At a high-pressure ratio (α), the \dot{W}_{net} and $\dot{Q}_{heating}$ increase and cause an enhancement in the overall efficiencies of the system for both fluids. The CCHP system with R245fa demonstrates superior overall efficiency compared to the butane-based system. When the

pressure ratio (α) increases from 0.5 to 0.8, the η_{thermal} improves from 84.19 to 87.28% and the η_{exergy} increases from 13.28 to 16.7% for the system using R245fa. Similarly, for the system

using butane, the η_{thermal} increases from 83.13 to 86.89% and the η_{exergy} increases from 12.3 to 16.23%.

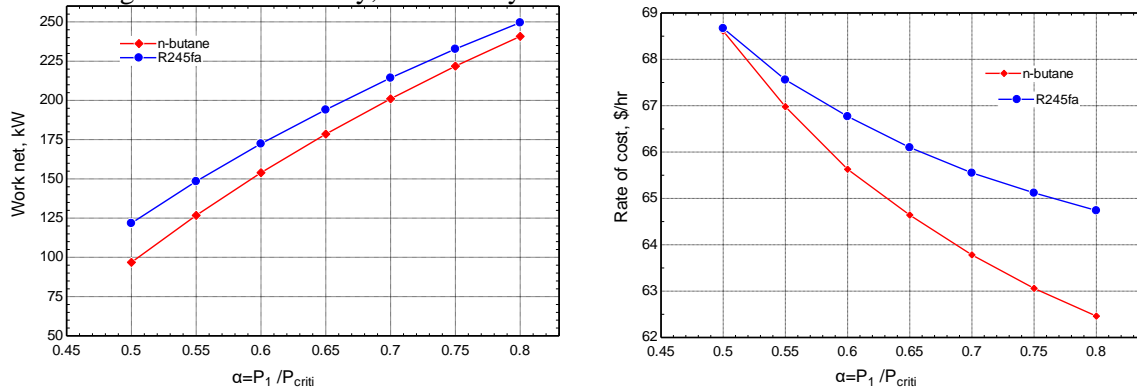


Figure 4. Work net and total cost rate for different pressure ratio parameters (Farklı basınç oranı parametreleri için iş net ve toplam maliyet oranı)

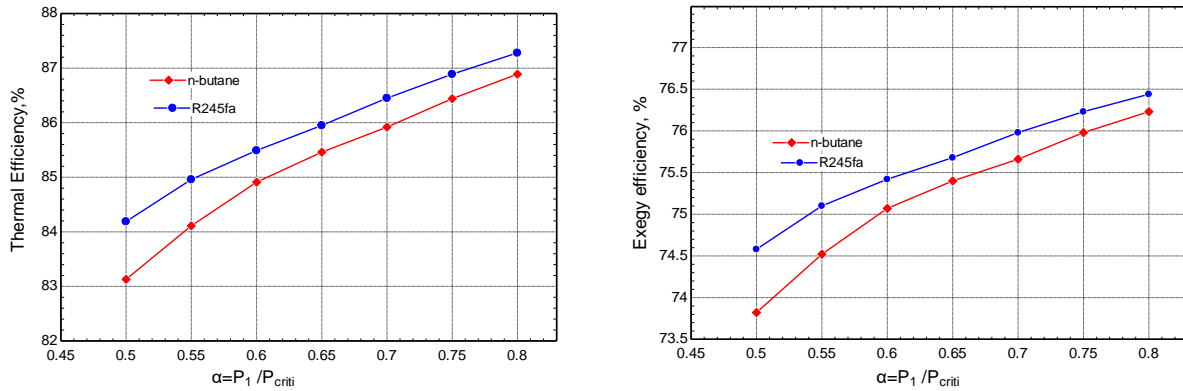


Figure 5. Overall efficiencies of the system for different pressure ratio parameters (Farklı basınç oranı parametreleri için sistemin genel verimlilikleri)

4. CONCLUSIONS (SONUÇLAR)

This study conducted a comprehensive analysis of a solar-assisted Combined Cooling, Heating, and Power (CCHP) system, integrating parabolic trough collectors (PTCs) and an Organic Rankine Cycle (ORC). Two working fluids, R245fa and butane, were evaluated for their thermodynamic, exergoeconomic, and environmental performance under steady-state conditions. The findings contribute to advancing the understanding and design of solar-assisted energy systems, particularly in regions with abundant solar resources like Antalya, Turkey. A reliable numerical model was developed for thermodynamic and exergoeconomic evaluation, demonstrating the ability to predict system performance accurately. R245fa was identified as the superior working fluid for thermodynamic and environmental performance, achieving higher efficiencies and a lower carbon footprint. Butane, however, demonstrated cost advantages and a higher cooling capacity, making it suitable for specific applications. The study tailored the system to Antalya's climatic conditions,

highlighting the viability of location-specific solutions for optimizing solar energy utilization.

Future research should focus on several key directions to build on the findings of this study. Expanding the analysis to include dynamic and seasonal conditions would enhance the real-world applicability of the results. Exploring alternative working fluids and innovative system configurations could further improve energy efficiency and cost-effectiveness. Additionally, conducting experimental validation to complement the numerical simulations would strengthen the practical relevance and reliability of the findings. Lastly, investigating hybrid systems that integrate other renewable energy sources, such as wind or geothermal, could diversify and enhance overall system performance, offering more sustainable and adaptable solutions.

SYMBOLS AND ABBREVIATIONS INDEX (SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ)

SYMBOLS

\dot{C}	Cost Rate (\$/h)
c	Exergy cost per unit (\$/GJ)
\dot{E}	Energy (kW)
$\dot{E}X$	Exergy flows (kW)
f	Exergoeconomic factor (%)
h	Specific enthalpy (kJ/kg)
\dot{m}	Mass flow rate (kg/s)
\dot{Q}	Heat transfer (kW)
\dot{W}	Work done (kW)
Z	Initial cost rate (\$/h)
η	Efficiency (%)
τ	Operation hour (h)
φ	Maintenance factor
ψ	Exergy efficiency (%)

ABBREVIATIONS

Abs	Absorber
ARC	Absorption refrigeration cycle
CCHP	Combined cooling heating power
Comp	Compressor
Cond	Condenser
EV	Expansion valve
Evap	Evaporator
Gen	Generator
HE	Heat exchanger
HRSG	Heat recovery steam generation
ORC	Organic Rankine cycle
ORT	Organic Rankine turbine
P	Pump
PTC	Parabolic trough collectors
RES	Renewable energy sources
SHES	Sensible heat exchanger
TST	Thermal storage tank

DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS (ETİK STANDARTLARIN BEYANI)

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.

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

AUTHORS' CONTRIBUTIONS (YAZARLARIN KATKILARI)

Abdulrazzak AKROOT: He conducted the conceptualization, developed the software, analyzed the results, wrote the original draft, and performed review & editing.

Konsept geliştirmeyi gerçekleştirdi, yazılımı geliştirdi, sonuçları analiz etti, orijinal taslağı yazdı ve gözden geçirme ve düzenleme işlemlerini yaptı.

Mohammed REFAEI: He conducted the investigation, methodology, formal analysis, and contributed to writing the original draft.

Araştırmayı, metodolojiyi ve resmi analizi gerçekleştirdi ve orijinal taslağın yazımına katkıda bulundu.

CONFLICT OF INTEREST (ÇIKAR ÇATIŞMASI)

There is no conflict of interest in this study.

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

REFERENCES (KAYNAKLAR)

- [1] Lior N. Sustainable energy development: the present (2009) situation and possible paths to the future, *Energy*, 35 (2010) 3976–94.
- [2] Zhang L, Li F, Sun B, Zhang C. Integrated optimization design of combined cooling, heating, and power system coupled with solar and biomass energy, *Energies*, 12 (2019) 687-702.
- [3] Li Y, Kong X. Introduction to CCHP Systems. In: Wang R, Zhai X, editors. *Handbook of Energy Systems in Green Buildings*, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; (2018) 551–572.
- [4] Talal W, Akroot A. Exergoeconomic Analysis of an Integrated Solar Combined Cycle in the Al-Qayara Power Plant in Iraq, *Processes*, 11 (2023) 622-641.
- [5] Talal W, Akroot A. An Exergoeconomic Evaluation of an Innovative Polygeneration System Using a Solar-Driven Rankine Cycle Integrated with the Al-Qayyara Gas Turbine Power Plant and the Absorption Refrigeration Cycle. *Machines*, 12 (2024) 133-148.
- [6] Salimi M, Hosseinpour M, Mansouri S, N. Borhani T. Environmental aspects of the combined cooling, heating, and power (CCHP) systems: a review, *Processes*, 10 (2022) 711-723.
- [7] Assareh E, Dejdar A, Ershadi A, Jafarian M, Mansouri M, Salek roshani A, et al. Performance analysis of solar-assisted-geothermal combined cooling, heating, and

- power (CCHP) systems incorporated with a hydrogen generation subsystem, *Journal of Building Engineering*, 65 (2023) 105727.
- [8] Wang J, Han Z, Guan Z. Hybrid solar-assisted combined cooling, heating, and power systems: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 133(2020) 110256.
- [9] Ukaegbu U, Tartibu L, Lim CW. Multi-Objective Optimization of a Solar-Assisted Combined Cooling, Heating and Power Generation System Using the Greywolf Optimizer, *Algorithms*, (2023) 16.
- [10] Liu J, Ren J, Zhang Y, Huang W, Xu C, Liu L. Exergoeconomic Evaluation of a Cogeneration System Driven by a Natural Gas and Biomass Co-Firing Gas Turbine Combined with a Steam Rankine Cycle, Organic Rankine Cycle, and Absorption Chiller, *Processes*, 12 (2023) 82.
- [11] Gao Q, Zhao S, Zhang Z, Zhang J, Zhao Y, Sun Y, et al. Performance Analysis and Multi-Objective Optimization of a Cooling-Power-Desalination Combined Cycle for Shipboard Diesel Exhaust Heat Recovery, *Sustainability*, 15 (2023) 16942.
- [12] Wang H, Wang J, Liu Z, Chen H, Liu X. Thermodynamic Analysis of a New Combined Cooling and Power System Coupled by the Kalina Cycle and Ammonia–Water Absorption Refrigeration Cycle, *Sustainability*, 14 (2022) 688 -703.
- [13] Zeng J, Li Z, Peng Z. Exergoeconomic analysis and optimization of solar assisted hybrid cooling systems in full working conditions, *Appl Therm Eng*, 206 (2022) 118082.
- [14] Divan A, Zahedi A, Mousavi SS. Conceptual design and technical analysis of a hybrid natural gas/molten carbonate fuel cell system for combined cooling, heating, and power applications, *Energy*, 273 (2022)112402.
- [15] Rostamnejad Takleh H, Zare V, Mohammadkhani F, Sadeghiasad MM. Proposal and thermoeconomic assessment of an efficient booster-assisted CCHP system based on solar-geothermal energy, *Energy*, 246 (2022) 123360.
- [16] Wang J, Wang J, Yang X, Xie K, Wang D. A novel energy-based optimization model of a building cooling, heating and power system, *Energy Convers Manag*, 268 (2022) 115987.
- [17] Pokson C, Chaiyat N. Thermal performance of a combined cooling, heating, and power (CCHP) generation system from infectious medical waste, *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 6 (2022) 1144-1162.
- [18] Khalid Shaker Al-Sayyab A, Mota-Babiloni A, Navarro-Esbrí J. Novel compound waste heat-solar driven ejector-compression heat pump for simultaneous cooling and heating using environmentally friendly refrigerants, *Energy Convers Manag*, 228 (2021) 914-930.
- [19] Yan R, Lu Z, Wang J, Chen H, Wang J, Yang Y, et al. Stochastic multi-scenario optimization for a hybrid combined cooling, heating and power system considering multi-criteria, *Energy Convers Manag*, 233 (2021) 113911.
- [20] Ao X, Liu J, Hu M, Zhao B, Pei G. A rigid spectral selective cover for integrated solar heating and radiative sky cooling system, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 230 (2021) 111270.
- [21] Wang J, Han Z, Liu Y, Zhang X, Cui Z. Thermodynamic analysis of a combined cooling, heating, and power system integrated with full-spectrum hybrid solar energy device, *Energy Convers Mana*, 228 (2021) 113596.
- [22] Nami H, Anvari-Moghaddam A, Nemati A. Modeling and analysis of a solar boosted biomass-driven combined cooling, heating and power plant for domestic applications, *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 47 (2021) 101326.
- [23] Cavalcanti EJC, Ferreira JVM, Carvalho M. Exergy assessment of a solar-assisted combined cooling, heat and power system, *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 47 (2021).
- [24] Wang J, Qi X, Ren F, Zhang G, Wang J. Optimal design of hybrid combined cooling, heating and power systems considering the uncertainties of load demands and renewable energy sources, *J Clean Prod*, 281 (2021)125357.
- [25] Saini P, Singh J, Sarkar J. Thermodynamic, economic and environmental analyses of a novel solar energy driven small-scale combined cooling, heating and power system, *Energy Convers Manag*, 226 (2020) 113542.
- [26] Ramos A, Chatzopoulou MA, Guarracino I, Freeman J, Markides CN. Hybrid photovoltaic-thermal solar systems for combined heating, cooling and power provision in the urban environment, *Energy Convers Manag*, 150 (2017) 838–50.
- [27] Fani M, Sadreddin A. Solar assisted CCHP system, energetic, economic and environmental analysis, case study, Educational office buildings. *Energy Build*, 136 (2017)100–109.

- [28] Khoshgoftar Manesh MH, Mousavi Rabeti SA, Nourpour M, Said Z. Energy, exergy, exergoeconomic, and exergoenvironmental analysis of an innovative solar-geothermal-gas driven polygeneration system for combined power, hydrogen, hot water, and freshwater production, *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 51 (2022).
- [29] Alfari A, Akroot A, Deniz E. The Exergo-Economic and Environmental Evaluation of a Hybrid Solar–Natural Gas Power System in Kirkuk, *Applied Sciences*, 14 (2024) 10113.
- [30] Bakhshmand SK, Saray RK, Bahlouli K, Eftekhari H, Ebrahimi A. Exergoeconomic analysis and optimization of a triple-pressure combined cycle plant using evolutionary algorithm, *Energy*, 93 (2015) 555–67.
- [31] Han Z, Wang J, Cui Z, Lu C, Qi X. Multi-objective optimization and exergoeconomic analysis for a novel full-spectrum solar-assisted methanol combined cooling, heating, and power system, *Energy*, 237 (2021) 121537.
- [32] Akroot A, Al Shammre AS. Economic and Technical Assessing the Hybridization of Solar Combined Cycle System with Fossil Fuel and Rock Bed Thermal Energy Storage in Neom City, *Processes*, 12 (2024) 1433.
- [33] Akroot A, Al Shammre AS. Techno-Economic and Environmental Impact Analysis of a 50 MW Solar-Powered Rankine Cycle System, *Processes*, 12 (2024) 1059.
- [34] Khaljani M, Khoshbakhti Saray R, Bahlouli K. Comprehensive analysis of energy, exergy and exergo-economic of cogeneration of heat and power in a combined gas turbine and organic Rankine cycle, *Energy Convers Manag*, 97 (2015)154–165.
- [35] Delgado-Torres AM, García-Rodríguez L. Analysis and optimization of the low-temperature solar organic Rankine cycle (ORC), *Energy Convers Manag*, 51 (2010) 2846–2856.

Optimization of Vortex Tube Design Parameters Using the Taguchi Method

Himmet Erdi TANÜRÜN^{1*} , Adem ACIR² 

¹Kahramanmaraş İstiklal University, Elbistan Engineering Faculty, Department of Energy Systems Engineering, Kahramanmaraş, Turkey

²Gazi University, Faculty of Technology, Department of Energy Systems Engineering, Ankara, Turkey

Article Info

Research article

Received: 07/02/2025

Revision: 21/02/2025

Accepted: 25/02/2025

Keywords

Cooling Coefficient of
Performance ($COP_{cooling}$)
Temperature difference
Analysis of variance
(ANOVA)
Computational Fluid
Dynamics (CFD)
Regression analysis

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 07/02/2025
Düzeltilme: 21/02/2025
Kabul: 25/02/2025

Anahtar Kelimeler

Soğutma Performans
Katsayısı ($COP_{cooling}$)
Sıcaklık farkı, Varyans
Analizi (ANOVA)
Hesaplamalı Akışkanlar
Dinamiği (HAD)
Regresyon analizi

Graphical/Tabular Abstract (Grafik Özet)

In Figure A, case 21 shows a central velocity of ≤ 120 m/s, while case 26 reaches a minimum of 150 m/s. The low-velocity region causes a temperature drop before the cold exit, confirming the effectiveness of Taguchi optimization. Şekil A'da vaka 21'de merkezde ≤ 120 m/s, vaka 26'da ise minimum 150 m/s hız gözlenmiştir. Düşük hız bölgesi, soğuk çıkış öncesi sıcaklık düşüşüne neden olarak Taguchi optimizasyonunun etkinliğini doğrulamaktadır.

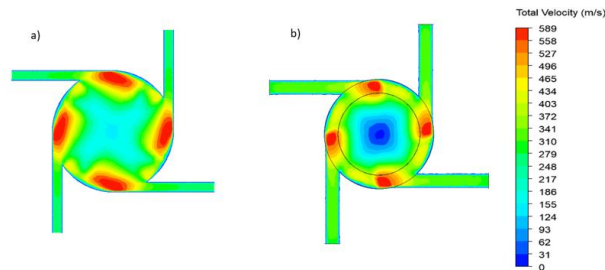


Figure A: Comparison of the velocities in the inlet region of a) Run 21 and b) the Run 26 / **Şekil A:** Giriş bölgesindeki hızların karşılaştırılması: a) Çalışma 21 ve b) Çalışma 26

Highlights (Önemli noktalar)

- The impact of four key design parameters on VT performance was analyzed using the Taguchi method. / Taguchi yöntemi kullanılarak VT performansı üzerinde dört temel tasarım parametresinin etkisi analiz edildi.
- A 40.3% improvement in $COP_{cooling}$ was achieved with the optimized design. / Optimize edilmiş tasarımla $COP_{cooling}$ değerinde %40,3'lük bir iyileşme sağlandı.
- The nozzle number (N) was identified as the most influential factor on $COP_{cooling}$. / $COP_{cooling}$ üzerinde en etkili faktör olarak meme sayısı (N) belirlendi.

Aim (Amaç): This study aims to optimize VT design parameters using the Taguchi method to enhance cooling performance. / Bu çalışma, soğutma performansını artırmak amacıyla VT tasarım parametrelerini Taguchi yöntemiyle optimize etmeyi amaçlamaktadır.

Originality (Özgünlük): The study demonstrates the effectiveness of the Taguchi approach in VT optimization by analyzing different design parameters, addressing a gap in the literature. / Çalışma, farklı tasarım parametrelerini analiz ederek VT optimizasyonunda Taguchi yaklaşımının etkinliğini göstermekte ve literatürdeki boşluğu doldurmaktadır.

Results (Bulgular): The optimized VT achieved a 40.3% higher $COP_{cooling}$, with nozzle number having the highest impact. / Optimize edilmiş VT, $COP_{cooling}$ değerinde %40,3 daha yüksek performans gösterirken, en büyük etki nozul sayısından kaynaklanmıştır.

Conclusion (Sonuç): The findings confirm that the Taguchi method is a reliable method for VT optimization, enhancing energy efficiency. / Bulgular, Taguchi yönteminin VT optimizasyonunda güvenilir bir method olduğunu ve enerji verimliliğini artırdığını doğrulamaktadır.



Optimization of Vortex Tube Design Parameters Using the Taguchi Method

Himmat Erdi TANÜRÜN^{1*} , Adem ACIR²

¹Kahramanmaraş İstiklal University, Elbistan Engineering Faculty, Department of Energy Systems Engineering, Kahramanmaraş, Turkey

²Gazi University, Faculty of Technology, Department of Energy Systems Engineering, Ankara, Turkey

Article Info

Research article
Received: 07/02/2025
Revision: 21/02/2025
Accepted: 25/02/2025

Keywords

Cooling Coefficient of
Performance ($COP_{cooling}$)
Temperature difference
Analysis of variance
(ANOVA)
Computational Fluid
Dynamic (CFD)
Regression analysis

Abstract

In this study, the optimization of a vortex tube (VT) with a fixed tube diameter and boundary conditions was conducted to improve four different design factors: the value of the conical valve angle (α), the number of nozzles (N), the cold flow exit diameter ($D_{cold\ exit}$), and the nozzle inlet diameter (D_{nozzle}), to improve the Cooling Coefficient of Performance ($COP_{cooling}$). For each identified factor, five different levels were assigned, and an L_{25} orthogonal series was constructed using the Taguchi approach. The 3D-designed cases were subjected to numerical analysis in the ANSYS Fluent software program using the standard k-epsilon turbulence model. The effect levels of the design parameters were determined using the Analysis of variance (ANOVA) method. Furthermore, after obtaining an empirical equation with $COP_{cooling}$ as the dependent variable through Regression analysis, a confirmation test was conducted. The results indicated that the order of influence of the five parameters on $COP_{cooling}$ was $N > D_{nozzle} > D_{cold\ exit} > \alpha$, with the N parameter having the strongest impact on the $COP_{cooling}$ in the VT, while the α parameter had the least effect. Additionally, the optimal VT showed a 40.3% improvement in $COP_{cooling}$ when compared to a VT with initial geometric parameters. The findings indicate that using the Taguchi approach for VT geometry optimization significantly enhanced performance.

Taguchi Yöntemi Kullanılarak Vorteks Tüpü Tasarım Parametrelerinin Optimizasyonu

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 07/02/2025
Düzeltilme: 21/02/2025
Kabul: 25/02/2025

Anahtar Kelimeler

Soğutma Performans
Katsayısı ($COP_{cooling}$)
Sıcaklık farkı, Varyans
Analizi (ANOVA)
Hesaplamalı Akışkanlar
Dinamiği (HAD)
Regresyon analizi

Öz

Bu çalışmada, sabit tüp çapı ve sınır koşulları ile bir vorteks tüpünün (VT) optimizasyonu, Soğutma Performans Katsayısını ($COP_{cooling}$) iyileştirmek amacıyla dört farklı tasarım faktörünün belirlenmesiyle gerçekleştirilmiştir: konik vana açısı (α), nozul sayısı (N), soğuk akış çıkışı çapı ($D_{cold\ exit}$) ve nozul giriş çapı (D_{nozzle}). Her belirlenen faktör için beş farklı seviye atanmış ve Taguchi yaklaşımı kullanılarak bir L_{25} ortogonal serisi oluşturulmuştur. 3D tasarlanmış analizler, ANSYS Fluent yazılımında standart k-epsilon türbülans modeli kullanılarak sayısal analizlere tabi tutulmuştur. Tasarım parametrelerinin etki seviyeleri, Varyans Analizi (ANOVA) yöntemiyle belirlenmiştir. Ayrıca, $COP_{cooling}$ bağımsız değişkeni ile regresyon analizi yoluyla ampirik bir denklem elde edildikten sonra, bir doğrulama testi gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, $COP_{cooling}$ üzerindeki beş parametrenin etki sırasının $N > D_{nozzle} > D_{cold\ exit} > \alpha$ olduğunu göstermiştir; burada N parametresi VT içindeki $COP_{cooling}$ üzerinde en güçlü etkiye sahipken, α parametresi en düşük etkiye sahiptir. Ayrıca, optimum VT'nin, başlangıçtaki geometrik parametrelere sahip bir VT ile karşılaştırıldığında $COP_{cooling}$ değerinde %40.3'lük bir iyileşme sağladığı belirlenmiştir. Taguchi yaklaşımının VT geometri optimizasyonunda kullanılması, performansı önemli ölçüde artırmıştır.

1. INTRODUCTION (GİRİŞ)

The vortex tube (VT), invented in the early 20th century and used in various applications, separates a compressed stream into hot and cold flows based on tangential inlet and high pressure. It has been observed that the gas, introduced tangentially at the

inlet, initiates a rotational flow or vortex within the system, effectively segregating into distinct hot and cold streams [1]. In 1947, in Germany, George J. Ranque and Rudolf Hilsch were the first to study the flow separation occurring within the tube both numerically and empirically [2].

A standard VT, as shown in Figure 1, consists of four main components: one or more tangential inlet nozzles, a vortex chamber, a cold exit, and a control valve at the hot exit of the tube. The compressed gas, typically air in open systems [3], is introduced into the system through tangential inlet nozzles, where it advances to the vortex chamber. Here, the

gas creates a vortex and the primary flow, referred to as peripheral flow, continues along the hot tube. Hot air exits from the end of this tube and hits the control valve, then moves along the tube as a secondary flow and exits through the cold hole as VT output.

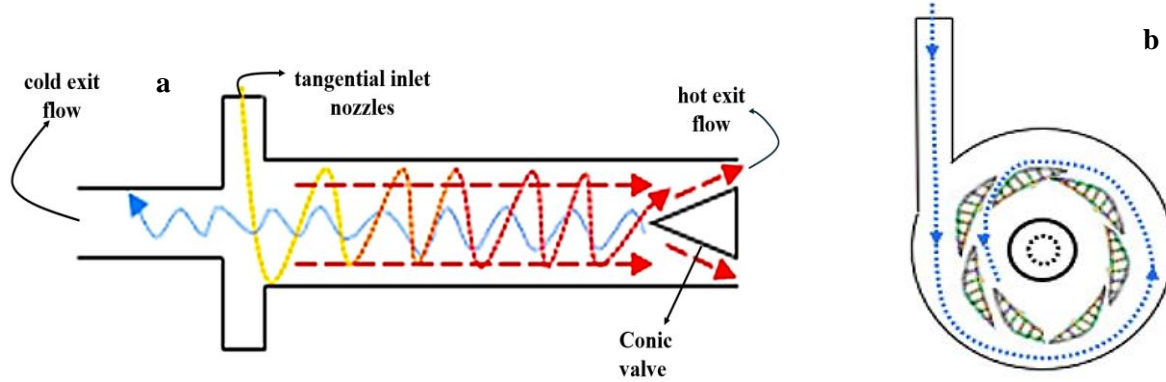


Figure 1. VT schematic view of a) longitude view and b) front view (VT'nin şematik görünümü: a) boyuna görünüm ve b) ön görünüm)

Due to its low efficiency, the VT is primarily used in spot cooling applications. Despite being less well-known than conventional cooling devices, the VT is a simple device without moving parts, making it inexpensive to manufacture and environmentally friendly. Thus, with its growing popularity in spot cooling, chemical analyses, and moderate-temperature chromatographic applications in recent years, there has been an increase in research on VT, focusing primarily on geometric and material influences, experimental and numerical methods, and optimization techniques for performance enhancement.

The impact of geometric and material properties on vortex tube performance plays a critical role in determining their efficiency and effectiveness. These properties directly influence the energy separation process within the internal structure, enhancing the potential to optimize cooling and heating capacities, which in turn facilitates broader industrial application of VTs. Studies by Hartnett and Eckert [4] investigated swirl flow characteristics, and Kurosaka's exploration of acoustic effects due to temperature differences in VTs [5], provide a foundational understanding of the physical phenomena within vortex tubes. Takahama's [6] work on optimizing geometric parameters demonstrated that maximum temperature differences were achieved with specific nozzle-to-tube diameter ratios (L/D) (0.2) and nozzle area to tube area ratios (0.08 to 0.17). Takahama and Yokosawa [7] further expanded this research by examining the effects of altering tube lengths and angles, finding a notable 10% impact on

temperature separation. This indicates the sensitivity of VT performance to geometric changes. Dinçer et al. explored the impact of different inlet pressures on the performance of the vortex tube [8]. Additionally, Arjomandi and Xue [9] observed that VT efficiency peaked when the valve-to-tube diameter ratio was adjusted to between 0.9 and 0.98. Gao et al. [10] and Promvong and Eiamsa-ard [11] further explored these geometric impacts, relating them to VT's cooling and heating capabilities. Liu et al. [12] conducted both numerical and experimental investigations, confirming the significant role of geometry in energy separation demonstrating the detailed interplay between design parameters and operational efficiency. Additionally, extensive comparisons of materials by Bagre et al. [13] and Chen et al. [14], illustrate the significant role of material properties like specific heat and thermal conductivity in optimizing VT efficiency.

The advancement of VT research heavily depends on the application of sophisticated experimental [15-16] and numerical methods[16-17]. These methods enable a detailed understanding of the physical and thermodynamic properties of vortex tubes, allowing for the development of more efficient and effective designs. The experimental application of the Taguchi method by Pınar et al. [18-19] to refine operational parameters under varied conditions highlights the method's utility in optimizing VT performance. Their studies adjusted inlet pressures and nozzle number (N) to fine-tune the system's efficiency. Meanwhile, Bramo and Pourmahmoud [20-21] provided detailed analyses

on the effects of varying the L/D , which directly influence the thermal gradient achieved within the VT. Dutta et al. [22] compared the efficacy of different turbulence models, with the standard $k-\epsilon$ model proving superior in accurately predicting the temperature separation. Shamsoddini et al. [23] assessed the impact of increasing N and found a direct correlation with enhanced cooling power, a critical insight for VT design optimizations. Kumar et al. [24] applied the Taguchi method extensively to adjust several geometric parameters, which confirmed the profound impact of nozzle inlet diameter (D_{nozzle}) and system pressure on VT performance. Kırmacı carried out an experimental study to determine the effects of orifice, N , and inlet pressure on efficiency using air and oxygen as working fluids. Their results showed that an increase in the N reduced the temperature gradient between hot and cold flows [25].

The optimization of vortex tubes involves the strategic manipulation of operational and design parameters to maximize energy and exergy efficiencies. This strategic approach ensures that VTs provide maximum cooling and heating potential in various industrial scenarios, reducing energy consumption and enhancing the overall sustainability of systems. Alborn and Gordon have investigated the secondary flow following rebound [26]. Chen et al. [14,27] utilized dimensional analysis to identify optimal configurations that significantly enhance VT performance. Their work achieved substantial improvements over traditional setups. Shaji et al. [28] applied the Re-Normalization Group $k-\epsilon$ model to further refine the VT dimensions, successfully boosting energy separation efficiency. This approach demonstrates the potential of computational fluid dynamics in optimizing VTs. Xue and Arjomandi [29] investigated the effect of vortex angles on VT efficiency, uncovering that cooling efficiency varies inconsistently with vortex angle adjustments under different pressure settings. Additionally, Wang and Suen [30] compared the thermal behavior of air and refrigerants within VTs, revealing that air, due to

higher velocities and shear stresses, exhibits more pronounced cooling and heating effects than refrigerants. This is a crucial factor in VT application across different industrial scenarios. Prabakaran et al. used Response Surface Methodology to optimize nozzle and orifice geometries along with inlet pressure parameters, showing a high degree of model accuracy within a 95% confidence interval, underscoring the effectiveness of their optimization [31].

Despite numerous studies in the literature examining the performance of the VT, research specifically focusing on the application of the ANOVA approach and regression analyses within the VT is quite limited. This study has achieved the optimal Cooling Coefficient of Performance (COP_{cooling}) for a counter-flow VT using the Taguchi approach, employing an L_{25} orthogonal array derived from four factors: Conical Valve Angle (α), N , the cold flow exit diameter ($D_{\text{cold exit}}$), and D_{nozzle} , each with five different levels. Additionally, the effect value of these four factors has been determined through the ANOVA. Furthermore, an empirical equation for the VT was obtained through regression analysis. Finally, a confirmation test was applied to the results obtained.

2. MATERIALS AND METHODS (MATERİYAL VE METOD)

2.1. Geometry and Validation (Geometri ve Doğrulama)

In this study, the geometric parameters of the vortex tube were meticulously designed for performance optimization using the commercial design software CATIA V5. The dimensions for all designs—diameter (12 mm), tube length (240 mm), and wall thickness (10 mm)—were consistently set to facilitate direct comparisons and systematic optimization. Figure 2 illustrates the isometric geometry of the optimized vortex tube and highlights the parameters used for optimization.

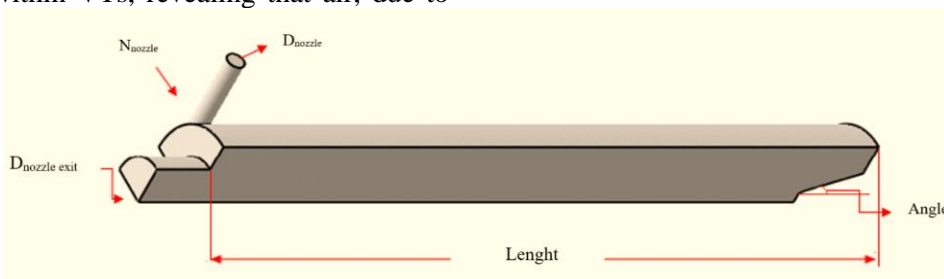


Figure 2. Geometric representation of the optimized VT (Optimizasyonu yapılmış VT'nin geometrik temsili)

Furthermore, for validation purposes, this study adopted the air-filled VT dimensions from Behara et al. [32], which provided comprehensive and clearly measured data. These dimensions included nozzle number (N), vortex diameter, and the length-to-diameter ratio (L/D), set respectively at 6 mm, 12 mm, and 20 mm. The boundary conditions for the inlet were set as follows: flow rate of 0.00921 kg/s, 300 K temperature, and 0.5422 MPa pressure, with a cold mass fraction (μ) of 0.22, as displayed in Table 1. While Behara et al. [32] achieved a ΔT of 21.6°, this study obtained a slightly higher ΔT of 21.72°, indicating an error rate of 3.1%, which is within the acceptable range in the literature standards and was used for validation.

Table 1. Boundary Conditions (Sınır Koşulları)

m_{inlet}	T_{inlet}	P_{inlet}	ξ
0.00921 kg/s,	300 K	0.5422 MPa	0,22

2.2. Mesh Independence (Ağ Bağımsızlığı)

Given the presence of 25 different geometries in the L_{25} orthogonal array, each geometry has a distinct mesh structure, making it challenging to discuss independence from a single mesh. However, the mesh counts have been specified considering the balance between geometric structures and mesh quality (Element Quality, Skewness, Orthogonal Quality, and y^+). Therefore, as illustrated in Figure 3, geometry case 7 within the L_{25} series has been designated as the reference geometry to conduct a mesh independence study on this case. To achieve a reasonable mesh structure for case 7, solutions at different mesh counts have been analyzed, as shown in Figure 4. Since the error rate at 1 202 813 meshes is below 1%, this mesh count has been determined as the reasonable mesh.

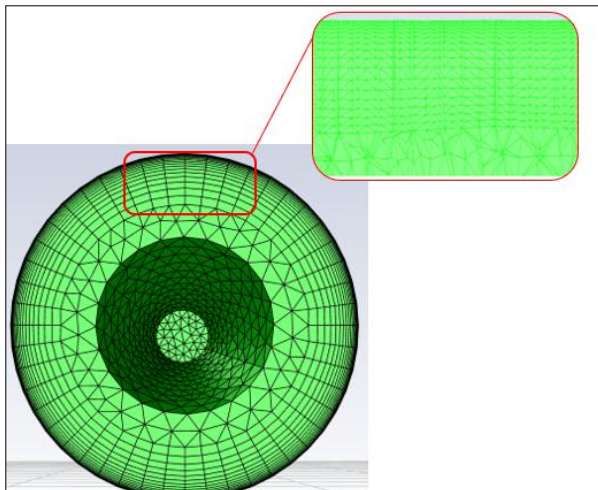


Figure 3. Mesh detail (Mesh Ayrıntısı)

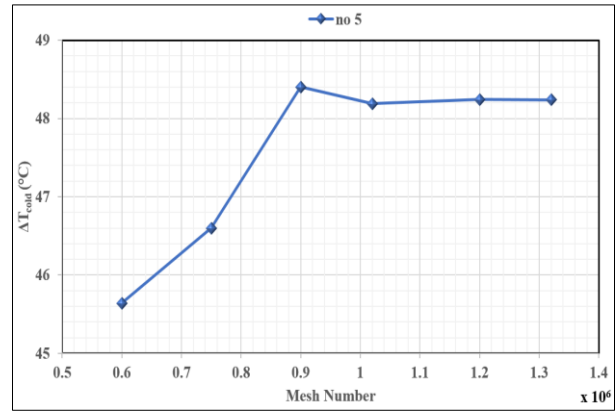


Figure 4. Grid Independence (Mesh Bağımsızlığı)

Table 2. Mesh Quality (Mesh Bağımsızlığı)

Element Quality	Skewness	Orthogonal Quality
0,8546	0,2253	0,772

In addition, there is variability in cell sizes regionally, and tetrahedral mesh has been used across all geometries with the same quality targets (element quality and y^+) aimed. Furthermore, Table 2 presents the average quality values for the 25 cases. The element and orthogonal quality values are considered reasonable, being close to 1, and skewness values are preferable when near 0. While refining the mesh on the tube surface, attention must be paid to the mesh cells within the boundary layers around critical areas of the case. y^+ is a dimensionless parameter used to assess the frictional effects of the fluid near the wall within the boundary layer. It is calculated using friction velocity (u), the distance to the wall (y), and the fluid's local kinematic viscosity (ν), as shown in Eq. 1 [33,34]. To achieve a y^+ of less than 5 in critical areas, 16 layers of inflation have been set across the entire VT surface. Although the y^+ is primarily related to the first mesh cell's thickness, the use of 16 inflation layers is intended not only to control y^+ but also to improve resolution across the entire boundary layer. This approach helps in capturing the complex behavior of the flow within the boundary layer more accurately.

$$y^+ = \frac{u \cdot y}{\nu} \tag{1}$$

2.3. Governing equations and Turbulence model
(Korunum Denklemleri ve Türbülans Modelleri)

This study utilized the ANSYS Fluent CFD commercial program to perform numerical modeling of VTs. In the vortex tube, the flow is considered as compressible, turbulent, and exhibits

significant rotational effects. It is modeled as a three-dimensional, steady-state flow using the standard k-epsilon turbulence model based on the finite volume method. Bramo et al. [20] demonstrated that the k-epsilon model is suitable for capturing the turbulence effects within the vortex tube's computational domain. The fundamental governing equations include the conservation of mass, momentum, and energy, which are structured as follows: The mass conservation equation, also known as the continuity equation, is expressed as follows: [35–37].

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{v}) = S_m \tag{2}$$

$$\frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) - \frac{\partial}{\partial x_j} \rho u'_i u'_j \right] \tag{3}$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left[u_i \rho \left(h + \frac{1}{2} u_i u_j \right) \right] = \frac{\partial}{\partial x_j} k_{eff}, \quad k_{eff} = K + \frac{c_p \mu_t}{Pr_t} \tag{4}$$

The turbulent kinetic energy (k) and its dissipation rate (ε) are calculated using the equations below [38,39]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M \tag{5}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \varepsilon u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - \rho C_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{k} \tag{6}$$

In the given equations, G_k refers to the generation of turbulence kinetic energy caused by mean velocity gradients, G_b denotes the generation of turbulence kinetic energy due to buoyancy effects, and Y_M represents the contribution from fluctuating dilatation in compressible turbulence to the dissipation rate. The constants C_{1ε} and C_{2ε}, along with the turbulent Prandtl numbers for k and ε, denoted as σ_k and σ_ε, are also included. The turbulent (or eddy) viscosity, μ_t, is calculated using the following relationship:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \tag{7}$$

2.4. Performance Parameters (Performans Parametreleri)

Key parameters contribute to determining the performance of a VT. Three temperature differences are calculated based on the inlet temperature (T_i), the cold exit fluid temperature (T_c), and the hot exit fluid temperature (T_h).

$$\Delta T_c = T_i - T_c \tag{8}$$

$$\Delta T_h = T_h - T_i \tag{9}$$

$$\Delta T_T = T_h - T_c \tag{10}$$

In the equations, the terms ΔT_c, ΔT_h, and ΔT_T represent the heating effect, cooling effect, and total effect, respectively [8]. μ, defined as the ratio of the mass flow rate of the cold exit (m_c) to the mass flow rate at the inlet (m_{in}), is a crucial metric as it directly impacts the performance of the VT [40].

$$\mu = \frac{\dot{m}_c}{\dot{m}_{in}} \tag{11}$$

The working fluid at a hot and a cold outlet can also be used to heat and cool the VT. The VT's heating and cooling capacity can be expressed as follows:

$$\dot{Q}_H = \dot{m}_h C_p (T_h - T_{in}) \tag{12}$$

$$\dot{Q}_C = \dot{m}_c C_p (T_{in} - T_c) \tag{13}$$

Calculation of coefficient of performance is given below [41]:

$$COP = \frac{Q_C}{W} = \frac{\mu_c C_p \Delta T_c}{\frac{\gamma}{\gamma-1} R T_i \left[\left(\frac{P_i}{P_a} \right)^{(\gamma-1)/\gamma} - 1 \right]} \tag{14}$$

Q_c represents the degree of cooling and W the work input ratio, C_p is the specific heat at constant pressure, and R is the specific gas constant.

2.5. Taguchi Method (Taguchi Metot)

The Taguchi method is an experimental design methodology developed to determine optimal results among extensive parameter settings. Introduced by Taguchi, this method enables engineers and researchers to maximize performance, durability, and quality while minimizing the costs associated with extensive experimentation [42,43]. Notably, the Taguchi method has demonstrated its efficacy even in single-response situations, where a multitude of studies attest to its effectiveness [44]. Particularly when applied to vortex tube (VT) optimization, this method yields high success rates; studies based on the Taguchi method for VT optimization often report confidence interval values and absolute percent change (R²) values exceeding 95% [45,46]. This substantiates why the method is favored in VT studies and underscores its effectiveness in determining VT design parameters. The application steps of the Taguchi design parameters are illustrated in Figure 5.

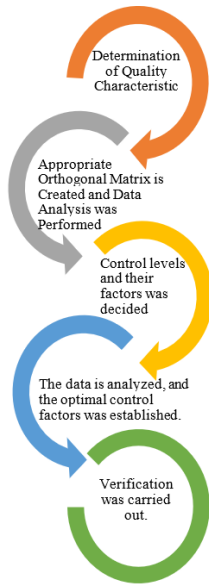


Figure 5. Steps of the Taguchi design parameters (Taguchi tasarım parametrelerinin adımları)

The design parameter steps help determine the effect of control factors in the VT. Based on the Taguchi approach, the control factors and parameters to be used in the numerical design are shown in Table 3. Although there are many parameters that can affect the performance of a VT, the four determined control factors - α , N, $D_{cold\ exit}$, and D_{nozzle} - have been selected due to their

significant impact on the cold exit temperature of the VT. The selection of each factor is critical, as

	Control Factor	Levels				
		1	2	3	4	5
A	Conical Valve Angle (α)	15°	30°	45°	60°	75°
B	Cold diameter ($D_{cold\ outlet}$), (mm)	5	6	7	8	9
C	Nozzle number (N)	4	5	6	7	8
D	Nozzle diameter (D_{nozzle}), (mm)	1	1.25	1.5	1.75	2

In the Taguchi method, the Signal-to-Noise (S/N) ratio is used to achieve the desired quality characteristic. The approach also incorporates a metric called the S/N ratio, which measures the robustness of the design against noise factors — variables that cause deviations from the desired performance but are difficult or costly to control in real-world conditions. The S/N ratio varies depending on each characteristic value, which is why it is used as a measurable criterion instead of standard deviation. There are three types of S/N characteristics: "Nominal is the better," "the Smaller the better," and "the Larger is better" [42,54,55]. In this study, due to the desire for high COP_{cooling}, the "Larger is better" characteristic has been used, and

previous studies and preliminary simulations have shown that these factors play key roles in optimizing VT performance. Specifically, α affects the flow dynamics within the VT, influencing energy separation efficiency and consequently the temperature difference between the hot and cold ends. This parameter plays a central role in the thermal separation process, and even minor adjustments can lead to significant changes in temperature separation [47–49]. N increases the amount of air flowing through the system, thereby increasing the total volume of air involved in energy conversion processes, which enhances the VT's cooling capacity [18,19,44].

D_{cold} determines how efficiently the cooled air is expelled from the VT, affecting the system's pressure balance and the temperature distribution within the tube [50,51]. D_{nozzle} controls the volume and initial speed of air entering the system, directly affecting the VT's thermal separation performance [52,53]. These four control factors, selected for the L_{25} orthogonal array consisting of four columns and 25 cases, are shown in Table 4. Orthogonal arrays are matrices created to determine which factor level combinations will be used in each case for analysis; the cases represent the levels of the factors in the study, while the columns represent the factors, i.e., the independent variables.

the equation for this characteristic is provided below.

$$\frac{S}{N} = -10 \log \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \tag{15}$$

In the given equation, 'n' represents the number of observations, and 'y' indicates the observed data. The unit of the S/N ratio is decibels. For the "Larger is Better" characteristic, an increase in the S/N ratio implies that higher performance is achieved with the obtained result.

Table 4. L_{25} Orthogonal Array (L_{25} Orthogonal Array)

Run	A	B	C	D
1	1	1	1	1

2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	1	4	4	4
5	1	5	5	5
6	2	1	2	3
7	2	2	3	4
8	2	3	4	5
9	2	4	5	1
10	2	5	1	2
11	3	1	3	5
12	3	2	4	1
13	3	3	5	2
14	3	4	1	3
15	3	5	2	4
16	4	1	4	2
17	4	2	5	3
18	4	3	1	4
19	4	4	2	5
20	4	5	3	1
21	5	1	5	4
22	5	2	1	5
23	5	3	2	1
24	5	4	3	2
25	5	5	4	3

3. RESULT AND DISCUSSION (SONUÇLAR VE TARTIŞMA)

3.1. Analysis of Taguchi Approach (Taguchi Yaklaşımının Analizi)

Based on the Taguchi approach, 25 different three-dimensional case designs were numerically analyzed. The $COP_{cooling}$ values obtained from the numerical analyses and the S/N ratio values derived from Eq. 15 are shown in Table 5. Among the 25 design cases, the most efficient S/N ratio and $COP_{cooling}$ values were observed in case 1, with values of 33.5161 and 0.073062468, respectively, while the lowest results were obtained in case 21, with values of 30.5260 and 0.01485463. There was a difference of 0.89 times in $COP_{cooling}$ between case 1 and case 21.

3.2. Determination of optimum VT geometry parameter (Optimum VT Geometri Parametresinin Belirlenmesi)

Due to the ideal condition being a high $COP_{cooling}$ in this study, the "larger is better" equation has used in Figure 6 to determine the S/N ratio. According to Eq.15, the peak level value of factors in the S/N graph produces the most optimal result. Therefore, when examining the means (S/N) ratio values shown in Figure 6, A2B1C1D1 represents the best

levels for each factor. However, A2B1C1D1 (optimal case), as defined by the factor levels in Table 5, is not included in the L_{25} orthogonal design. Consequently, a model designated as case 26 with the design factor levels of A2B1C1D1, as shown in Table 6, was created and numerically analyzed in terms of cooling load performance. According to the results obtained, the $COP_{cooling}$ in case 26 conducted with the A2B1C1D1 was 0.07454, which is higher than the values found in the 25 cases analyzed. Moreover, at 0.07454, the optimal case's $COP_{cooling}$ ratio is 1.98% higher than case 1's $COP_{cooling}$ of 0.073062468. This indicates the effectiveness of the Taguchi approach in optimizing VT geometries based on $COP_{cooling}$. Table 7 presents the design factors and corresponding levels for A3B3C3D3, derived from the average factor values.

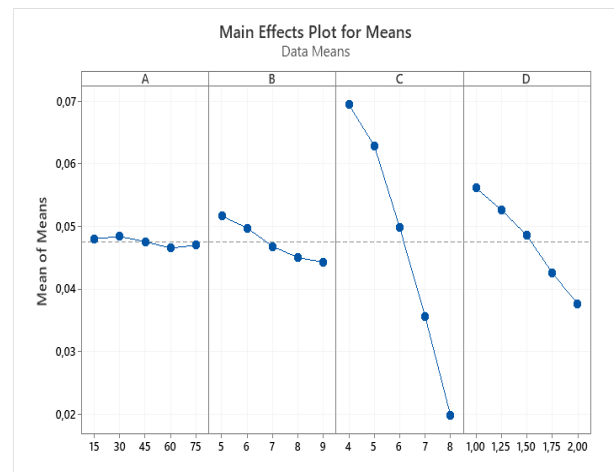


Figure 6. Mean S/N ratio graph for cooling Effect (Soğutma etkisi için ortalama S/N oranı grafiği)

The correlation among the four control factors was determined through regression analysis. Using Minitab 20, a regression analysis was conducted, resulting in an empirical equation that includes the four control factors, as seen in Eq. 16. In the equation, all four factors are included as independent variables, while $COP_{cooling}$ is the dependent variable.

$$COP_{cooling} = 0.16369 + 0.000038 * \alpha - 0.001778 * N - 0.011803 * D_{cold\ outlet} - 0.01811 * D_{nozzle} \quad (16)$$

As shown in Table 8, the actual cooling load obtained from numerical analyses using optimal VT geometries is compared with the predicted cooling effects derived from the empirical equation Eq. 16.

Table 5. Temperature Difference Results and S/N Ratio Values for the L₂₅ Orthogonal Array (L25 Ortogonal Dizisi için Sıcaklık Farkı Sonuçları ve S/N Oranı Değerler)

Run	A	B	C	D	COP _{cooling}	S/N Ratio
1	1	1	1	1	0,0730625	-22,7261
2	1	2	2	2	0,0651542	-23,7212
3	1	3	3	3	0,0450014	-26,9355
4	1	4	4	4	0,0244801	-32,2237
5	1	5	5	5	0,0154116	-35,3335
6	2	1	2	3	0,0618173	-24,1778
7	2	2	3	4	0,0421680	-27,5003
8	2	3	4	5	0,0216177	-33,3038
9	2	4	5	1	0,0223182	-33,0268
10	2	5	1	2	0,0654596	-23,6805
11	3	1	3	4	0,0401680	-27,9224
12	3	2	4	1	0,0412621	-27,6890
13	3	3	5	2	0,0187804	-34,5259
14	3	4	1	3	0,0613986	-24,2368
15	3	5	2	4	0,0476042	-26,4471
16	4	1	4	2	0,0389068	-28,1995
17	4	2	5	3	0,0166284	-35,5830
18	4	3	1	4	0,0571261	-24,8633
19	4	4	2	5	0,0438807	-27,1545
20	4	5	3	1	0,0480513	-26,3659
21	5	1	5	4	0,0148546	-36,5628
22	5	2	1	5	0,0540166	-25,3495
23	5	3	2	1	0,0640328	-23,8720
24	5	4	3	2	0,0451160	-26,9134
25	5	5	4	3	0,0295073	-30,6014

Table 6. Optimal Levels of Factors According to Obtained S/N Ratios (Elde Edilen S/N Oranlarına Göre Faktörlerin Optimum Seviyeleri)

Factor	Conical Valve Angle (α)	D _{cold outlet}	Nozzle number	D _{Nozzle}
Optimal Model (Run 26 (A2B1C1D1))	30°	5 mm	4 Nozzle	1 mm

Table 7. Factors and Their Levels for the A3B3C3D3 Design (A3B3C3D3 Tasarımı İçin Faktörler ve Seviyeleri)

Factor	Conical Valve Angle (α)	D _{cold outlet}	Nozzle number	D _{Nozzle}
Average (initial) Model (A3B3C3D3)	45°	7 mm	6 Nozzle	1,5 mm

A significant difference of 40.3% is observed between the study designated as case 26 with A2B1C1D1 and the initial case designated as A3B3C3D3. This demonstrates clear evidence that Taguchi optimization has improved the COP_{cooling} of the VT by 40.3% compared to the average values obtained without such optimization. Case 26

exhibits approximately 2% higher performance than case 1, which is the highest case in orthogonal array, which holds the highest value prior to optimization. The improvement in S/N ratio from the initial operating parameters to the level of optimal operating parameters was 9.669 dB.

Table 8. Factor Levels for the Optimized Model (Optimize Edilmiş Model İçin Faktör Seviyeleri)

	Initial parameters	Optimal parameters	
		Prediction	Numerical
Level	A3B3C3D3	A2B1C1D1	A2B1C1D1
COP _{cooling}	0,0445	0,0746571	0,07454
S/N ratio (dB)	-32,221	-20,8929	-22,5522
Improvement of S/N ratio	9.669 dB		
Prediction error (dB)	1.6593		

3.3. Analysis of Variance (ANOVA) (Varyans Analizi (ANOVA))

In the VT, determining the most effective control factor on COP_{cooling} is conducted using analysis of variance (ANOVA). ANOVA was performed to assess the relative importance of the design parameters and their interactions in affecting the performance characteristics. This step is crucial for understanding which factors most significantly impact the outcome and should therefore be the focus of optimization efforts [56]. The ranking of control factors affecting the cooling effect in the VT was determined using ANOVA, which is utilized to decide the impact levels of design parameters. The impact degrees of the control factors given in Table 3 were examined in ANOVA applications with the percent contribution ratio (PCR). The PCR is

formulated as seen in Eq. 17 [57] and the findings obtained are expressed in Table 9.

$$\%PCR = \frac{(SS_A - (V_e)(v_A))}{SS_T} * 100 \quad (17)$$

The F-Test and P-value indicate the confidence levels of the control factors [58]. Upon reviewing Table 9, the N, identified as factor C, affects the COP_{cooling} as the most significant parameter with 78.82%, while the D_{nozzle}, with 10.54%, is the second most important parameter; the D_{cold exit}, at 1.85%, is identified as the third important parameter. The parameter A, the α , has the lowest effect among the four factors, with 0.64%. Additionally, the error rate obtained from the ANOVA results is 8.15%, which is considered acceptable in the literature.

Table 9. Results of ANOVA and PCR (ANOVA ve PCR Sonuçları)

Source	DF	Seq SS	Adj MS	F	P	%PCR
A	4	13.45	3.361	1.47	0.297	0.64
B	4	21.6	5.400	2.36	0.14	1.85
C	4	540.04	135.011	59.03	0	78.82
D	4	80.13	20.032	8.76	0.005	10.54
Residual Error	8	18.3	2.287			91.85
Total	24	673.51				

3.4. Confirmation Test (Doğrulama Testi)

For the confirmation test in the VT, the numerically obtained ΔT_c data were divided into two parts: training data and testing data. A total of 19 values were used for training in the regression analysis, while 6 values were designated for testing, resulting in 25 different case trials. The predicted values of ΔT_c for both testing and training data were obtained by the empirical Eq. 17 formulated through regression analysis. The comparison of predicted and numerical results for both training and testing

data is illustrated in Figure 7. The predicted results from both training and testing data closely match the numerical outcomes. Furthermore, the R² for the cooling effect in the testing data is 0.9802 in the regression analysis (RA), indicating a strong agreement between numerical and predicted values. The R² value being close to 1 supports the reliability of the findings, while similar results have also been obtained in the study conducted by Sarıoğlu et al.[59] which is another expression showing the alignment. RA proves to be a highly useful and reliable method for examining the difference in

cooling effect and for VT geometry optimizations. Additionally, the ΔT_c obtained from RA and the ΔT_c values obtained from numerical analysis are shown in Figure 8.

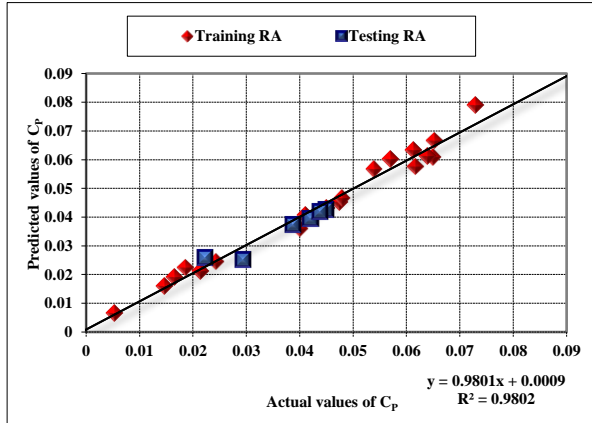


Figure 7. Comparison of regression results with numerical results for the ΔT_c (ΔT_c için regresyon sonuçlarının sayısal sonuçlarla karşılaştırılması)

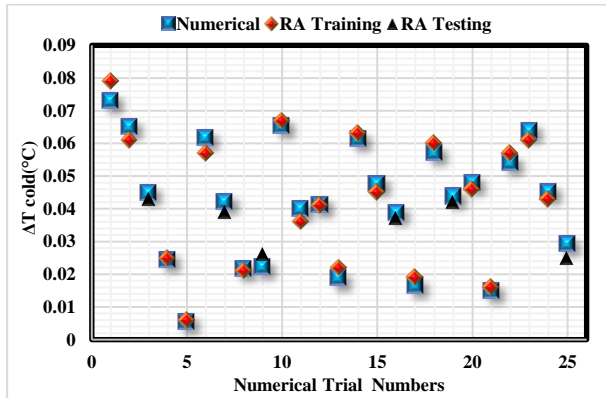


Figure 8. Comparison of numerical and predicted ΔT_c (Sayısal ve tahmini ΔT_c değerlerinin karşılaştırılması)

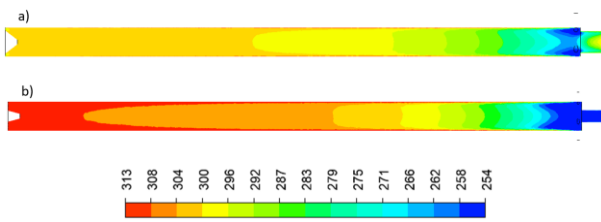


Figure 9. Comparison of temperature distribution in the longitudinal cross sections of a) Run 21 and b) Run 26 (Boyuna kesitlerde sıcaklık dağılımının karşılaştırılması: a) Çalışma 21 ve b) Çalışma 26)

In Figure 9, the total temperature fields in the longitudinal cross-sections of VTs case 26 and case 21 are displayed. The reason for selecting case 21 and case 26 is that they have the lowest and highest $COP_{cooling}$, respectively, among all the orthogonal arrays. This selection aims to clearly illustrate the difference between the two cases. When examining

the general temperature distributions of the cases, high temperature distributions are observed near the tube's wall and in the area where the hot exit is located, while low temperature distributions are found in the center of the tube and in the cold exit area, indicating a behavior similar to that observed in previous VT studies. The maximum temperature reached in the hot exit area is 304.52 K for case 21, whereas for case 26, this value is determined to be 312.71 K. Moreover, in the cold exit area near the conical valve, a lower temperature distribution (≤ 258 K) is much more pronounced in case 26 compared to the other case. The sharp difference between the hot and cold areas in case 26 indicates a high energy exchange, providing as evidence that case 26 generates a higher $COP_{cooling}$ compared to other cases.

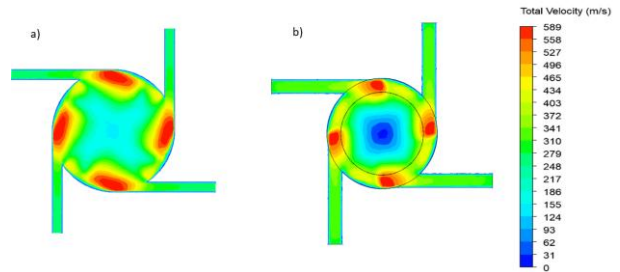


Figure 10. Comparison of the velocities in the inlet region of a) Run 21 and b) the Run 26. (Giriş bölgesindeki hızların karşılaştırılması: a) Çalışma 21 ve b) Çalışma 26)

The total velocity distributions in the cross-sectional areas of case 21 and case 26 are displayed in Figure 10. In case 21, a low-velocity region (≤ 120 m/s) forms in the center of the tube, while in case 26, the velocity in the same region drops to a minimum of 150 m/s. The presence of low velocity distribution in the center of the VT leads to a decrease in the fluid's temperature by the time it reaches the cold exit area. The results of this study successfully demonstrate the performance improvements achieved through the application of the Taguchi method for VT optimization. The study reveals that design parameters such as the N and D_{nozzle} have a significant impact on VT performance. Increasing the nozzle number enhances the VT's cooling capacity by maximizing energy separation, while optimizing the nozzle diameter increases the air flow speed and kinetic energy within the system, thereby improving cooling performance. These findings are consistent with those reported by Alsaghir et al. [44], emphasizing the sensitivity of VT performance to nozzle parameters. Conversely, reducing the number of nozzles negatively affects VT performance, a finding that aligns with the results presented by Pinar et al. [18,19]. The

outcomes of this study validate the effectiveness of the Taguchi method in optimizing VT design parameters aligning with similar studies in the literature using Taguchi and other advanced optimization techniques.

4. CONCLUSIONS (SONUÇLAR)

This study has successfully applied the Taguchi method to optimize the design parameters of a VT, significantly enhancing its performance based on a thorough analysis of the temperature difference and the COP_{cooling}. The RNG k-ε turbulence model was employed, and all 25 cases were conducted under the same boundary conditions. The key findings from the study include:

- **High Level of Predictive Accuracy:** The regression analysis showed an R² of 0.9802, indicating a very high level of accuracy in predicting the performance of VTs based on the optimized parameters. This underscores the reliability of the empirical equation derived from the regression analysis for forecasting cooling effects in VTs.
- **Significant Improvement in Performance:** The optimized case (case 26) demonstrated a remarkable 40.3% improvement in COP_{cooling} compared to the initial case, showcasing the effectiveness of the optimization process. The optimal case's parameters, featuring the best levels for factors A, B, C, and D, were 30° for the α, 4 nozzles, a D_{cold exit} of 5mm, and a D_{nozzle} of 1mm, designated as A3B1C1D1. Case 26 demonstrates an approximate 2% increase in performance compared to case 1, which was the top-performing case within the orthogonal array before optimization.
- **Notable Difference in Cooling Load Performance:** A significant difference in COP_{cooling}, specifically 0.89 times, between the best and worst-performing cases. This highlights the potential for performance variance in VT operations and underscores the importance of meticulous design optimization.
- **Impact of Design Parameters on Performance:** Upon reviewing Table 9, it was evident that the N had the most significant impact on the COP_{cooling}, contributing to 78.82% of the performance variation. The D_{nozzle} was the second most impactful at 10.54%, followed by the D_{cold exit} at 1.85%. Interestingly, the parameter with the least effect was the α, contributing only 0.64%.

- **Compatibility and Applicability of the Taguchi Method:** The findings from this study clearly illustrate the Taguchi method's suitability and applicability in optimizing VT designs. The method not only simplified the optimization process but also provided a structured approach to identifying the most influential design parameters for improving performance.

This study fills a significant gap in the research on VT optimization, demonstrating the effectiveness and applicability of the Taguchi method in optimizing the parameters affecting the performance of the VT. The Taguchi method has proven to be an effective tool in identifying the interactions between parameters and their effects on outcomes. The results highlight that this methodology is not only applicable in engineering and thermal system design but also in developing solutions that contribute to energy savings. The careful adjustment of VT parameters offers significant efficiency gains in industrial cooling, electronic cooling, and various process cooling applications.

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)

Himmet Erdi TANÜRÜN: He conducted the numerical analyses, interpreted the results, and wrote the manuscript. (Sayısal analizleri gerçekleştirdi, sonuçları yorumladı ve makaleyi yazdı.)

Adem ACIR: He processed the data, interpreted the results, and reviewed the manuscript. (Diğer yazar verileri işledi, sonuçları yorumladı ve makaleyi gözden geçirdi.)

CONFLICT OF INTEREST (ÇIKAR ÇATIŞMASI)

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

REFERENCES (KAYNAKLAR)

- [1] Ranque GJ. Experiments on Expansion in a Vortex with Simultaneous Exhaust of Hot Air

- and Cold Air. *Journal de Physique et le Radium*. 1933; 4:112–114.
- [2] Hilsch R. The Use of the Expansion of Gases in a Centrifugal Field as Cooling Process. *Review of Scientific Instruments*. 1947; 18:108–113.
- [3] Wang Z, Suen KO. Numerical comparisons of the thermal behaviour of air and refrigerants in the vortex tube. *Applied Thermal Engineering*. 2020; 164:114515.
- [4] Hartnett JP, Eckert ERG. Experimental Study of the Velocity and Temperature Distribution in a High-Velocity Vortex-Type Flow *Journal of Fluids Engineering*. 1957; 79(4):751–758.
- [5] Kurosaka M. Acoustic streaming in swirling flow and the Ranque–Hilsch (vortex-tube) effect. *Journal of Fluid Mechanics*. 1982; 124:139–172.
- [6] Takahama H. Studies on Vortex Tubes : (1) Experiments on Efficiency of Energy Separation : (2) On Profiles of Velocity and Temperature. *Bulletin of JSME*. 1965; 8:433–440.
- [7] Takahama H, Yokosawa H. Energy Separation in Vortex Tubes with a Divergent Chamber. *ASME Journal of Heat and Mass Transfer*. 1981; 103:196–203.
- [8] Dincer K, Avci A, Baskaya S, Berber A. Experimental investigation and exergy analysis of the performance of a counter flow Ranque–Hilsch vortex tube with regard to nozzle cross-section areas. *International Journal of Refrigeration*. 2010; 33:954–962.
- [9] Arjomandi M, Xue YP. An Investigation on the Effect of the Hot End Plugs on the Efficiency of the Ranque-Hilsch Vortex Tube. *Fifth International Conference on Fluid Mechanics*. Aug.15-19, 2007 Shanghai, China
- [10] Gao CM, Bosschaart KJ, Zeegers JCH, De Waele ATAM. Experimental study on a simple Ranque–Hilsch vortex tube. *Cryogenics*. 2005; 45(3):173–183.
- [11] Eiamsa-ard S, Promvong P. Numerical investigation of the thermal separation in a Ranque–Hilsch vortex tube. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2007; 50(5-6):821–832.
- [12] Liu X, Liu Z. Investigation of the energy separation effect and flow mechanism inside a vortex tube. *Applied Thermal Engineering*. 2014; 67(1-2):494–506.
- [13] Bagre N, Parekh AD, Patel VK. Exergy analysis and experimental investigation of various vortex tube material with different combination of vortex generators. *International Journal of Refrigeration* 2023; 150:113–124.
- [14] Chen W, Luo Z, Li X, Lu S, Guo F. Numerical study of temperature separation characteristics of vortex tubes: Effects of structural parameters and modeling of cooling performance correlations. *Thermal Science and Engineering Progress* 2023; 39:101715.
- [15] Rafiee SE, Sadeghiazad MM. Experimental and 3D CFD analysis on optimization of geometrical parameters of parallel vortex tube cyclone separator. *Aerospace Science and Technology*. 2017; 63:110–122.
- [16] Im SY, Yu SS. Effects of geometric parameters on the separated air flow temperature of a vortex tube for design optimization. *Energy*. 2012; 37(1):154–160.
- [17] Bazgir A, Khosravi-Nikou M, Heydari A. Numerical CFD analysis and experimental investigation of the geometric performance parameter influences on the counter-flow Ranque-Hilsch vortex tube (C-RHVT) by using optimized turbulence model. *Heat and Mass Transfer*. 2019; 55:2559–2591.
- [18] Pinar AM, Uluer O, Kirmacı V. Statistical Assessment of Counter-Flow Vortex Tube Performance for Different Nozzle Numbers, Cold Mass Fractions, and Inlet Pressures Via Taguchi Method. *Experimental Heat Transfer*. 2009; 22:271–282.
- [19] Pinar AM, Uluer O, Kirmaci V. Optimization of counter flow Ranque–Hilsch vortex tube performance using Taguchi method. *International Journal of Refrigeration*. 2009; 32(6):1487–1494.
- [20] Bramo AR, Pourmahmoud N. CFD simulation of length to diameter ratio effects on the energy separation in a vortex tube. *Thermal Science*. 2011; 15(3):833–848.

- [21] Pourmahmoud Nb, Abdol Reza. The effect of L/D ratio on the temperature separation in the counter-flow vortex tube. *International Journal of Research and Reviews in Applied Sciences*. 2011;6(1):59-68.
- [22] Dutta T, Sinhamahapatra KP, Bandyopdhyay SS. Comparison of different turbulence models in predicting the temperature separation in a Ranque–Hilsch vortex tube. *International Journal of Refrigeration*. 2010; 33(4):783–792.
- [23] Shamsoddini R, Abolpour B. A geometric model for a vortex tube based on numerical analysis to reduce the effect of nozzle number. *International Journal of Refrigeration*. 2018; 94:49–58.
- [24] Suresh Kumar G, Padmanabhan G, Dattatreya Sarma B. Optimizing the Temperature of Hot outlet Air of Vortex Tube using Taguchi Method. *Procedia Engineering*. 2014; 97:828–836.
- [25] Kirmaci V. Exergy analysis and performance of a counter flow Ranque–Hilsch vortex tube having various nozzle numbers at different inlet pressures of oxygen and air. *International Journal of Refrigeration*. 2009; 32(7):1626–1633.
- [26] Ahlborn BK, Gordon JM. The vortex tube as a classic thermodynamic refrigeration cycle. *Journal of Applied Physics*. 2000; 88(6):3645–3653.
- [27] Chen K, Liang S, Shen Z, Xu X, Wang B, Zhu Y. Thermodynamic assessment of a novel and efficient self-condensing transcritical CO₂ power cycle with a vortex tube. *Applied Thermal Engineering*. 2024; 245:122825.
- [28] Shaji K, Lee KK, Salmani F, Kim HD. Numerical analysis and an approach for optimization of the Ranque–Hilsch vortex tube for a compressible flow. *Applied Thermal Engineering*. 2024; 243:122590.
- [29] Xue Y, Arjomandi M. The effect of vortex angle on the efficiency of the Ranque–Hilsch vortex tube. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2008; 33(1):54–57.
- [30] Wang Z, Suen KO. Numerical comparisons of the thermal behaviour of air and refrigerants in the vortex tube. *Applied Thermal Engineering*. 2020; 164:114515.
- [31] Prabakaran J, Vaidyanathan S. Effect of orifice on vortex tube" Prabakaran & Vaidyanathan Effect of orifice and pressure of counter flow vortex tube. *Indian Journal of Science and Technology*. 2010; 3(4):374–376.
- [32] Behera U, Paul PJ, Kasthuriengan S, Karunanithi R, Ram SN, Dinesh K, Jacob S. CFD analysis and experimental investigations towards optimizing the parameters of Ranque–Hilsch vortex tube. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2005(10); 48:1961–1973.
- [33] Tanürün HE. Improvement of vertical axis wind turbine performance by using the optimized adaptive flap by the Taguchi method. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*. 2024; 46(1):71–90.
- [34] Tanürün HE, Acır A. Investigation of the hydrogen production potential of the H-Darrieus turbines combined with various wind-lens. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2022; 47(55):23118–23138.
- [35] Rafiee SE, Rahimi M. Experimental study and three-dimensional (3D) computational fluid dynamics (CFD) analysis on the effect of the convergence ratio, pressure inlet and number of nozzle intake on vortex tube performance–Validation and CFD optimization. *Energy*. 2013; 63:195–204.
- [36] Tanürün HE, Ata İ, Canlı ME, Acır A. Farklı Açıklık Oranlarındaki NACA-0018 Rüzgâr Türbini Kanat Modeli Performansının Sayısal ve Deneysel İncelenmesi. *Politeknik Dergisi*. 2020; 23(2):371–381.
- [37] Tanürün HE, Akın AG, Acır A, Şahin. Experimental and Numerical Investigation of Roughness Structure in Wind Turbine Airfoil at Low Reynolds Number. *International Journal of Thermodynamics* 2024; 27(3):26–36.
- [38] Tanürün HE, Acır A. Modifiye Edilmiş NACA-0015 Kanat Yapısında Tüberkül

- Etkisinin Sayısal Analizi. *Journal of Polytechnic*. 2018; 22(1):185–195.
- [39] Tanürün HE, Akın AG, Acır A. Rüzgâr Türbinlerinde Kiriş Yapısının Performansa Etkisinin Sayısal Olarak İncelenmesi. *Politeknik Dergisi*. 2021; 24(3):1219–1226.
- [40] Doğan A, Korkmaz M, Kirmaci V. Estimation of Ranque-Hilsch vortex tube performance by machine learning techniques. *International Journal of Refrigeration*. 2023; 150:77–88.
- [41] Subudhi S, Sen M. Review of Ranque–Hilsch vortex tube experiments using air. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2015; 52:172–178.
- [42] İc YT, Yurdakul M, Dengiz B, Sasmaz T. Investigation of the Importance of Machine Sequence Flexibility on A Flexible Manufacturing System Performance. *Gazi University Journal of Science*. 2023; 36(2):735–750.
- [43] Özoğlu Y. Genetic Algorithm and Fuzzy Based on The Taguchi Optimization to Improve The Torque Behavior of An Outer-Rotor Permanent-Magnet Machine. *Gazi University Journal of Science*. 2018; 31(1):82–98.
- [44] Alsaghir AM, Hamdan MO, Orhan MF, Awad M. Numerical and sensitivity analyses of various design parameters to maximize performance of a Vortex Tube. *International Journal of Thermofluids*. 2022; 13:100133.
- [45] Hu Z, Wang D, Gao F, Cao Y, Wu H. Experimental investigation on cooling performance of vortex tube with rectifier using Taguchi method. *Case Studies in Thermal Engineering*. 2023; 49:103373.
- [46] Kang MS, Park SG, Dinh CT. Heat transfer enhancement by a pair of asymmetric flexible vortex generators and thermal performance prediction using machine learning algorithms *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2023; 200:123518.
- [47] Rafiee SE, Sadeghiazad MM. Effect of Conical Valve Angle on Cold-Exit Temperature of Vortex Tube. *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*. 2014; 28(4):785–794.
- [48] Markal B, Aydın O, Avci M. An experimental study on the effect of the valve angle of counter-flow Ranque–Hilsch vortex tubes on thermal energy separation. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2010; 34(7):966–971.
- [49] Devade KD, Pise AT. Effect of Mach number, valve angle and length to diameter ratio on thermal performance in flow of air through Ranque Hilsch vortex tube. *Heat and Mass Transfer*. 2017; 53:161–168.
- [50] Nimbalkar SU, Muller MR. An experimental investigation of the optimum geometry for the cold end orifice of a vortex tube. *Appl Therm Eng*. 2009; 29:509–514.
- [51] Liu X, Liu Z. Investigation of the energy separation effect and flow mechanism inside a vortex tube. *Applied Thermal Engineering*. 2014; 67(2-3):494–506.
- [52] Dincer K, Baskaya S, Uysal BZ. Experimental investigation of the effects of length to diameter ratio and nozzle number on the performance of counter flow Ranque-Hilsch vortex tubes. *Heat and Mass Transfer*. 2008; 44:367–373.
- [53] Zhang K, Liu Z, Li Y, Li Q, Zhang J, Liu H. Experimental analysis of a Ranque–Hilsch vortex tube for optimizing nozzle numbers and diameter. *Applied Thermal Engineering*. 2013; 61(2):500–506.
- [54] Tanürün HE. Taguchi Yöntemiyle Sağlamlık Oranının Dikey Eksenli Rüzgâr Türbini Performansına Etkisinin Sayısal Olarak İncelenmesi. *Journal of Materials and Mechatronics: A (JournalMM)*. 2023; 4(2):355–372.
- [55] Seyhan M, Es HA, and Sarioglu M. Overall aerodynamic performance of the airfoils with different amplitudes via a fuzzy decision making based Taguchi methodology. *Applied Soft Computing*. 2024; 165: 112057.
- [56] Mola E, Ünsal Bayrak O, İrfan Baş F, Ferit Bayata H. Investigating the usability of kevlar and steel fibers as a hybrid in concrete pavements. *Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences*. 2024; 42(2):344–355.

- [57] Çakıroğlu R, Tanürün HE, Acır A, Üçgül F, Olkun S. Optimization of NACA 4412 augmented with a gurney flap by using grey relational analysis. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. 2023; 45:1–18.
- [58] Taguchi GH, ElSayed EA. *Quality Engineering in Production Systems*. 1989;1-173.
- [59] Sarıoğlu M, Seyhan M, Akansu YE. Drag force estimation of a truck trailer model using artificial neural network. *International Journal of Automotive Engineering and Technologies*. 2016; 5(4): 168-175.



Mimari Tasarım Sürecinde Kapsayıcı Sanal Gerçeklik Kullanımının Araştırılması

Gönenç KURPINAR¹ , Aslıhan ÇEVİK¹ , Yeliz KURPINAR^{1*}

¹İzmir Institute of Technology, Faculty of Architecture, Department of Architecture, İzmir, Turkey

Article Info

Research article
Received: 07/11/2024
Revision: 29/12/2024
Accepted: 01/02/2025

Keywords

Immersive virtual reality
Presence
Architectural
representation tool
Presentation Technique

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 07/11/2024
Düzeltilme: 29/12/2024
Kabul: 01/02/2025

Anahtar Kelimeler

Kapsayıcı sanal gerçeklik
Buradalık
Mimari temsil aracı
Sunum tekniği

Grafik Özet (Graphical/Tabular Abstract)

Bu makale, kapsayıcı sanal gerçeklik (iVR) teknolojisinin mimari tasarım sürecindeki rolünü ve projelerin mimari hizmet alan kişilere sunumundaki etkisini değerlendirmektedir. / This article evaluates the impact of immersive virtual reality (iVR) technology on the architectural design process and the presentation of projects to clients.

	1	2	3	4	5	6	7
Kapsayıcı Sanal Gerçeklik Ortamı	6,7	6,7	6,8	7	6,8	6,7	6,8
3 Boyutlu Görselleştirme ve Mimari Çözümler	3,8	4,2	5	5,5	5,2	4,7	4,3
İki Ortamın Ortalamalarının Farkı	2,9	2,5	1,8	1,5	1,6	2	2,5
Çift Köşüklü T-Test	0,001	0,012	0,003	0,063	0,055	0,007	0,001

Şekil A: Mimari hizmet alan kişiler ile yapılan anket çalışması
Figure A: Survey conducted with people receiving architectural service

Önemli Noktalar (Highlights)

- iVR teknolojisi, ölçü, malzeme ve mekansal düzenlemeler gibi tasarım unsurlarının doğrulanmasında mimarlar için etkili bir araç olduğu tartışılmıştır. / iVR is a highly effective tool for architects in verifying design elements such as dimensions, materials, and spatial configurations.
- iVR, müşterilerin mekân boyutları, ışık ve malzeme algısını güçlendirerek projeleri daha iyi anlamalarını ve değerlendirmelerini sağlar. / iVR helps clients better understand and evaluate projects by enhancing their perception of spatial dimensions, lighting, and materials
- iVR'nin geleneksel araçlarla entegrasyonunun, müşterilerin mekansal düzenlemeler gibi geniş tasarım unsurlarını daha iyi anlayabilmesini geliştirebileceği tartışılmıştır. / Integrating iVR with traditional tools could improve clients' understanding of broader design elements like spatial arrangements, as discussed

Amaç (Aim): Bu çalışmanın amacı, kapsayıcı sanal gerçeklik (iVR) teknolojisinin mimari tasarım sürecindeki rolünü, mekansal algı ve projelerin müşterilere sunumundaki rolü üzerindeki etkilerini değerlendirmektir. / The aim of this study is to evaluate the impact of immersive virtual reality (iVR) technology on the architectural design process, spatial perception, and its role in presenting projects to clients.



Özgünlük (Originality): Bu çalışma, kapsayıcı sanal gerçeklik (iVR) teknolojisinin mimari tasarım sürecindeki etkilerini, tasarımcı ve müşteri perspektifinden doğal süreçte (in vivo) değerlendirmesiyle özgündür. / This study is unique in evaluating the impact of immersive virtual reality (iVR) technology on the architectural design process from both designer and client perspectives in real-world settings (in vivo)

Bulgular (Results): Bulgular, iVR teknolojisinin mimari tasarım sürecini ve müşteri deneyimini önemli ölçüde geliştirdiğini, mimarlar için mekansal algıyı güçlendirdiğini ve müşterilerin projeleri daha iyi anlamasını ve değerlendirmesini sağladığını göstermektedir. / The findings highlight that iVR technology significantly enhances the architectural design process and client experience by improving spatial perception for architects and enabling clients to better understand and evaluate projects

Sonuç (Conclusion): iVR, mekansal algıyı güçlendirerek, tasarımcıların karar alma süreçlerini destekleyen ve müşterilerin projeleri daha iyi anlamasını sağlayan, mimari tasarım ve sunumlar için güçlü bir araçtır. / iVR enhances spatial perception, supports designers' decision-making, and helps clients better understand projects, making it a powerful tool for architectural design and presentations.



Mimari Tasarım Sürecinde Kapsayıcı Sanal Gerçeklik Kullanımının Araştırılması

Göneç KURPINAR¹ , Aslıhan ÇEVİK¹ , Yeliz KURPINAR^{1*} 

¹Izmir Institute of Technology, Faculty of Architecture, Department of Architecture, Izmir, Turkey

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 07/11/2024
Düzeltilme: 29/12/2024
Kabul: 01/02/2025

Anahtar Kelimeler

Kapsayıcı sanal gerçeklik
Buradalık
Mimari temsil aracı
Sunum tekniği

Özet

Bu çalışma, kapsayıcı sanal gerçeklik (iVR) teknolojisinin mimari tasarım sürecindeki rolünü ve mimari projelerin mimari hizmet alan kişilere yönelik sunumundaki etkisini değerlendirmeyi amaçlayan bir ön çalışmadır. Kapsayıcı sanal gerçeklik teknolojisi (iVR), kullanıcıların üç boyutlu sanal ortamlarda mekânsal algı ve etkileşim kapasitelerini artırarak mimari tasarım ve temsil süreçlerine yenilikler sunmaktadır. Araştırmada, kapsayıcı sanal gerçeklik teknolojisinin (iVR) mimari tasarımcılar ve mimari hizmet alan kişiler (müşteriler) üzerindeki etkisi iki ana yöntemle incelenmiştir. Bu yöntemler, altı adet tasarımcı ile yapılan yarı yapılandırılmış görüşmeler ve sekiz müşteriyle gerçekleştirilen anket çalışmalarıdır. Bu kapsamda, çalışma hem profesyonel tasarım sürecindeki hem de müşteri sunumlarındaki deneyimleri kapsamlı bir şekilde değerlendirmeyi hedeflemiştir. Araştırmanın temel amacı, iVR'nin mekânsal algı, tasarım süreçlerine etkisi ve müşteri memnuniyeti üzerindeki potansiyelini ortaya koymaktır. Araştırma bulgularının sonucu, iVR'nin özellikle tasarımcılar için tasarım doğrulama sürecinde güçlü bir araç olduğunu göstermektedir. Mimarlar, iVR'yi mesafe ve ölçülerin test edilmesi, malzeme kullanımının değerlendirilmesi ve iç mekân düzenlemelerinin doğrulanması açısından etkili bulmuştur. Çalışmada müşterilerin, iVR'nin sunduğu yüksek "buradalık" hissi sayesinde, projeleri daha iyi anladıkları ve değerlendikleri ortaya konmuştur. Müşteriler, iVR kullanımını sayesinde projenin sunduğu mekânsal deneyimi daha somut bir şekilde hissedebilmiştir. Bununla birlikte, iVR'nin plan şeması gibi daha üst ölçek sayılabilecek tasarım kararlarında sınırlı bir araç olduğu, alan yazını takiben, tekrar ortaya konmuştur. Bu durum, iVR'nin geleneksel temsil araçlarıyla birlikte kullanıldığında (diğer-merkezli bakış açısı sunan plan çizimleri ve kesit çizimleri gibi) daha etkili olabileceğini göstermektedir.

Investigating The Use Of Immersive Virtual Reality In Professional Architectural Design Process

Article Info

Research article
Received: 07/11/2024
Revision: 29/12/2024
Accepted: 01/02/2025

Keywords

Immersive virtual reality
Presence
Architectural
representation tool
Presentation Technique

Abstract

This study is a preliminary investigation aiming to evaluate the role of immersive virtual reality (iVR) technology in the architectural design process and its use in presenting architectural projects to clients. Immersive virtual reality technology (iVR) introduces innovations to architectural design and representation processes by enhancing users' spatial perception and interaction capacities within three-dimensional virtual environments. The study examines the impact of iVR technology on architectural designers and clients through two primary methods: semi-structured interviews with six designers and surveys conducted with eight clients. In this context, the research aims to comprehensively evaluate experiences in both the professional design process and client presentations. The primary objective of the study is to reveal the potential of iVR in enhancing spatial perception, influencing design processes, and improving client satisfaction. The findings of the study indicate that iVR is a particularly powerful tool for design validation for architects. Architects found iVR effective for testing distances and dimensions, evaluating material usage, and validating interior layouts. The study also revealed that clients benefited from the high sense of "presence" provided by iVR, which allowed them to better understand and evaluate the projects. Clients were able to experience the spatial qualities of the project more concretely through the use of iVR. However, the study, consistent with the literature, also emphasized that iVR is limited as a tool for broader design decisions, such as floor plans. This finding suggests that iVR can be more effective when used in conjunction with traditional representation tools (e.g., plan drawings and section drawings offering exocentric perspectives). Particularly in helping clients understand comprehensive planning elements and large-scale spatial arrangements, traditional tools emerge as important complements to iVR usage.

1. GİRİŞ: Kapsayıcı Sanal Gerçeklik Temsil Sistemlerinin Mimari Tasarımda Ve Sunumda Etkisi Ve Potansiyelleri (INTRODUCTION: The Effect and Potentials of Immersive Virtual Reality Representation Systems in Architectural Design and Presentation)

Son yıllarda yaygınlaşan, hem eğlence sektöründe hem de profesyonel açıdan birçok sektörde kullanılmaya başlanan kapsayıcı sanal gerçeklik (immersive virtual reality / iVR) teknolojisi başa takılan ve bir ekran ve iki elde bulunan kontrolcülerden oluşur (örn. Meta Quest 2, HTC VIVE). Başa takılan ekran her iki gözde ayrı ayrı görüntü oluşturur ve bu görüntüler kişinin kafa hareketlerine göre, kullanıcının gerçek dünyadan alışıktığı şekilde oluşturulur. Yani sanal gerçeklik gözlüğü takmış bir kişi, dijital olarak üretilmiş bir mekânı yürüyerek ve kafasını hareket ettirerek gerçek bir ortam gibi deneyimleyebilir (Şekil-1). Sanal gerçeklik teknolojisi, kullanıcılara yoğun şekilde gerçeklik hissiyatı yaşatan, dijitalleştirilmiş dinamik bir ortamla iletişim kurma olanağı sağlayan, sanal gerçeklik gözlüğü ile deneyimlenebilen bir üç boyutlu modeldir [1]. Sanal gerçeklik teknolojisinde kontrolün kullanıcıda olması, kullanıcının gideceği ve bakacağı noktayı kendisinin belirlemesini sağlamakta ve görme duygusunu büyük oranda kullanabilme olanağı sayesinde mekan algısını arttırmaktadır [2]. Bu teknoloji ile, dijital ortamda kullanıcının hareketleri ve kapsayıcı sanal gerçeklik cihazına verdiği geri bildirimleri, bilgisayar simülasyonlu modelde gezinirken kullanıcıların bir yerde olma, "buradalık" hissiyatı oluşturur [3]. Buradalık, bu araştırma için kritik öneme sahiptir. Daha önce yapılan birçok çalışmaya göre, sanal gerçeklik ortamında, buradalık hissi sayesinde mekânsal bilişin arttığı, ilişkileri hatırlama ve mekânda yön bulma yeteneğinin geliştiği bulgularına ulaşılmıştır [4].



Şekil 1. Kapsayıcı sanal gerçeklik ortamında mekan deneyimi (Spatial experience in immersive virtual reality)

Kapsayıcı sanal gerçeklik temsil ortamı, buradalık hissinin etkin olduğu ortamlardan biri sayılabilir.

Temsil sistemleri, tasarımın ayrılmaz bir parçasıdır. Seçilen temsil aracı, tasarım sürecinin tamamında belirleyici bir rol oynar. Her bir temsil sistemindeki bileşenler ve bunların tasarım sürecindeki kullanımları farklı yöntemlerle sağlanır. Bu farklı yöntemler, tasarımcının mekân algısını değiştirir ve tasarım yaklaşımını etkiler ve hatta tasarımcının kendi tasarım dünyasını inşa etmesine yardımcı olur [5]. Temsil sistemleri elbette ki yalnızca tasarımcılara yardımcı olmaz. Müşterilerin de farklı temsil biçimleri ile mekân algıları değişebilir. Örneğin sadece plan düzleminden anlatılan bir mekânsal temsilde, kişilerin planın sunabileceği mekânsal ilişkileri anlaması daha zordur, oysa bilgisayar ortamında oluşturulmuş üç boyutlu görseller sayesinde müşteriler mekana dair daha yüksek bir mekânsal algıya erişebilme olanağı bulurlar.

Tarihsel süreçlerde geliştirilen ve evrilen farklı temsil sistemlerinin mimari uygulama ve tasarım süreci üzerindeki etkisi kapsamlı bir şekilde inceleyen ve örneklendiren birçok araştırma bulunmaktadır. Bunun yanında temsil biçimlerinin farklı bilişsel süreçler üzerindeki etkilerini ortaya koyan çalışmalar da bulunmaktadır [6-7-8-9-10-11]. Bu anlamda, temsil sistemleri (*Bu makale boyunca temsil sistemleri dendiğinde "dışsal temsil sistemleri" (external representation systems) kastedilmektedir.*) güncel araştırmalarda, insanın tasarım bilişini etkileyen kritik faktörlerden biri olarak öne çıkmaktadır [12-13-14]. Özellikle mimarlık ve tasarım alanında, önemli bir konu olan temsil sistemleri, görsel düşünme ortamı sağlayacak bilişsel aktiviteleri mümkün kılan etkileşimli imgeler olarak tanımlanmaktadır [15]. Kapsayıcı sanal gerçeklik ortamının kapasitesini, geleneksel olarak kullanılan temsil sistemleriyle birlikte anlamak, özgün bir araştırma konusu olarak önem kazanmaktadır.

Sanal gerçeklik ortamlarını diğer geleneksel ve dijital temsil sistemlerinden ayıran dört temel özellik buradalık (presence), kapsayıcılık (immersion), etkileşim (interaction) ve bedenleşme (embodiment) olarak tanımlanabilir. Literatürde bu özelliklerin farklı derecelerde ele alındığı durumlar mevcut olsa da, bu çalışma kapsamında söz konusu dört özellik üzerinde durulmuştur.

Buradalık, iVR (kapsayıcı sanal gerçeklik) ortamında "orada olma", yani deneyimlenen yerde olma yanılması yaşatan bir araçtır. Gerçek bir ortamda olmadığınızı bilirsiniz, fakat bedeniniz belirli bir dereceye kadar gerçek bir ortamdaki gibi tepki verir [16]. Slater ve arkadaşları [17], buradalığı, kapsayıcı sanal ortam sistemi tarafından oluşturulan "orada olma" yanılması olarak

tanımlar. Benzer şekilde, Sheridan [18] bu durumu "inanmamayı askıya alma" (suspension of disbelief) olarak adlandırır. Yani kişi, içinde bulunduğu ortamın gerçek olmadığını bildiği halde bu durumu askıya alarak, 'buradalık' hissi yaşar.

Buradalık, bu araştırma için kritik öneme sahip bir anahtar kelimedir. Bazı çalışmalar, buradalığın, kapsayıcı sanal gerçeklik ortamında mekansal bilişi artırdığını ve ilişkileri hatırlama ve yön bulma konusunda fayda sağladığını göstermektedir [4]. Bedenleşme, etkileşim ve kapsayıcılık hissi buradalık hissini etkileyen önemli faktörlerdir. Bu faktörlerin hepsi birbirini beslemektedir. Başarılı bir iVR (kapsayıcı sanal gerçeklik) sunumunun (temsil) ana amacı, herhangi bir yolla yüksek bir buradalık düzeyine sahip olmaktır.

Kapsayıcılık ve buradalık kavramları birbirleriyle karıştırılabilen kavramlardır. Sanal gerçeklik literatüründe, kapsayıcılık genellikle sanal ortamın statik yönlerinin gerçek ortamı taklit etme yeteneğini ifade eder. Slater'a göre [16], kapsayıcılık VR sisteminin nesnel bir yönüdür, kullanan herkes için aynıdır. Kapsayıcılık özelliği, sistemin duysal ve algısal eylemleri ne kadar iyi desteklediğine bağlı olarak güçlü veya zayıf olabilir. Örneğin, daha geniş bir görüş alanı sunan bir sistem, diğer bir sisteme göre daha kapsayıcıdır [17]. Ya da sanal dünyada avatarla yürüdüğünde daha hızlı ve daha doğru gerçek zamanlı gölgeler oluşturan veya daha doğru sesler sunan bir sistem diğerine göre daha kapsayıcıdır. Özetle, buradalık, bedenin olmadığı bir yerde olma yanılması iken, kapsayıcılık, sanal ortamın temsilinin gerçek ortamı taklit etmede ne kadar becerikli olduğudur. Kapsayıcı bir deneyim yaratmada iVR'nin en güçlü araçlarından biri izolasyondur. Bir kullanıcının, gerçek dünyadan izole olma derecesi arttıkça o temsil sisteminin kapsayıcılığı da artar. Kapsayıcı sanal gerçeklik temsil ortamının izole etme stratejisi gerçek dış dünyadan bağımsız, kullanıcıya 360 derece bakabileceği, 3 boyutlu bir ortam sunmasıdır. Buradalık ile kapsayıcılık dereceleri her zaman birbirleri ile doğru orantılı değildir; Gomes ve arkadaşları, yüksek buradalık için yüksek kapsayıcılığın gerekli olmadığını belirtirler [19]. Örneğin, bir kitap okurken ya da film izlerken de yüksek kapsayıcılık olmadığı halde yüksek buradalık yaşanabilir. Ancak, bir sinema salonunda kapsayıcılık arttığı için buradalık hissi de güçlenecektir.

Kapsayıcı sanal gerçeklik ortamında, kullanıcı sanal gerçeklik gözlüğü ile deneyim yaşarken, **etkileşim** kullanıcının baş hareketlerine yanıt olarak

görüntünün değişmesi ve kullanıcının vücut hareketlerine (örneğin, yer değiştirme, yürüme, çömelme, eğilme, vb.) göre görüntünün (kameranın) konumunun değişmesiyle gerçekleşir. Kapsayıcı sanal gerçeklik temsil ortamında eğer program uygun kodlanmışsa, kullanıcı eşyaların yerini ellindeki kontrolcü ile tutma ve çekme hareketlerini yaparak dahi değiştirebilir. Bu durum etkileşim unsurunu güçlendirdiği için buradalık unsurunu da güçlendirir (Şekil2 ve Şekil-3).



Şekil 2. Kapsayıcı sanal gerçeklik ortamında bedensel hareket (Body movement in iVR)



Şekil 3. Kapsayıcı sanal gerçeklik ortamında bedensel hareket (Body movement in iVR)

Kapsayıcılık yaratmada sanal gerçeklik teknolojisinin bir diğer güçlü aracı **bedenleşme**dir [16]. Bedenleşme kavramı, dış mekanda etkileşime girilen temsillerin bilişsel işlenmesini etkileyen önemli bir bilgi akışı sağladığını öne sürer [20]. Bu aslında bisiklet kullanmayı teorik olarak mükemmel bir şekilde öğrenip, bisikleti kullanmak için seleye oturduğunda mükemmel kullanamamak gibi bir

durum ile benzeşmektedir. Araba kullanmak pratik yaparak ve beden eylemi ile öğrenilen bir aktivitedir. Kapsayıcı sanal gerçeklik ortamında günlük hayatta kullandığımız bedenleşmiş eylemlerin bir kısmını kullanabildiğimiz için mekanın daha kolay algılanmasını sağlar. Literatürde, "bedenleşme" terimi farklı alanlarda benzer ama tam olarak aynı olmayan anlamlar taşıyacak şekilde kullanılmaktadır. Kiltini ve diğerleri [21], karışıklığı azaltmak için sanal gerçeklik araştırmalarında bedenleşmeyi "bedenleşme hissi" (SoE - Sense of Embodiment) olarak adlandırır. Araştırmacılar, bedenlenme hissini üç ana unsura ayırır: kendini konumlandırma hissi, aracılık hissi ve beden sahipliği hissi. Kısacası bedenleşme hissi, bir beden içinde olma, bir bedene sahip olma ve onu kontrol etme hissidir.

Sanal gerçeklik (VR) araçları mimarlık alanında tasarlanmış bir projenin temsili ve deneyimi için kullanılsa da, bu teknolojinin tasarım süreçlerinde aktif araçlar olarak kullanımı günümüzde sınırlı kalmaktadır [22-23-24]. Donanım ve yazılım alanındaki ilerlemelere rağmen, arayüzlerin oluşturulmasındaki sınırlamalar ve tasarım süreçlerine entegrasyonun zorlukları, bu araçların mimari tasarımda tam kapasiteyle kullanılamamasının nedenleri arasında sayılabilir [25-26]. Bu sorunlara rağmen, kapsayıcı sanal gerçeklik sistemlerinin mimari tasarımdaki potansiyelleri göz ardı edilmemelidir. Bunu destekler biçimde, bedensel-mekansal algının ve egosantrik perspektifin dijital tasarım araçlarının değişken ve dinamik doğasıyla birleşimi, kapsayıcı sanal gerçeklik teknolojisini benzersiz bir temsil aracı yapmaktadır [27-28].

Yukarıda kurulan kavramsal çerçeve ile, kapsayıcı sanal gerçeklik teknolojisi tasarım sürecinde mimarların bir tasarım aracından ziyade tasarım kararlarını doğrulama ve tasarımın diğer paydaşları ile karşılıklı uzlaşma aracı olarak ortaya çıktığını söylemek mümkündür. Bu temsil sisteminin tasarım aracı olarak etkin şekilde kullanılamamasının iki sebebi olduğu tartışılabilir. Bu sebeplerden birincisi, ben-merkezli bakış açısidir. Mimari tasarım genellikle bütüncül bir eylem olup, ben-merkezli perspektif bir mekânın tamamını algılamak için yeterli bir bakış sunamaz. (Bunu, oturma odanızda otururken yatak odanızı görememeniz gibi düşünebilirsiniz.) İkinci sebep ise, kapsayıcı sanal gerçeklik teknolojisi için geliştirilen az sayıda tasarım programının arayüzlerinin, mevcut bilgisayar destekli tasarım programlarına kıyasla çok daha yavaş çalışmasıdır. Klavye, ekran ve fare kullanılarak yapılan

tasarımlarda, klavyedeki her tuşa bir işlev atanabilir ve kullanıcılar rahatsızlık hissetmeden uzun süre bilgisayar başında çalışabilirler. Ancak sanal gerçeklik gözlüğü kumandaları bu düzeyde etkileşime izin vermediği gibi, VR gözlüğünün uzun süreli kullanımı genellikle yorgunluğa neden olmaktadır.

Kapsayıcı sanal gerçeklik temsil ortamı, uzman olmayan kişilerin mekânı daha iyi kavramasını sağlar. Bilgisayar ortamında alınan üç boyutlu görsellerle tam anlaşılabilen mekân, sanal gerçeklik gözlükleri ile daha net bir şekilde deneyimlenir. Bu bağlamda kapsayıcı sanal gerçeklik teknolojisi, mimarlık sektöründe, mimari hizmet alan müşterilerin tasarlanacak mekânı daha iyi algılaması için güçlü bir temsil aracı olarak kullanılabilir.

Kapsayıcı sanal gerçeklik teknolojisinin avantaj ve dezavantajları ışığında bu çalışmanın iki hipotezi vardır. Bunlardan birincisi, mimari hizmet müşterileri, kapsayıcı sanal gerçeklik ile bir mekânı deneyimlediklerinde daha yüksek buradalık hissederler ve mekâna dair algıları artar. İkincisi ise, sanal gerçeklik teknolojisi profesyonel ofis ortamında her ne kadar tasarım sürecinin üretken bir parçası haline gelemese de üretilen tasarımların etkin şekilde doğrulanmasında önemli bir rol oynayabilir. Bu bağlamda çalışma kapsamında mimari hizmet veren tasarımcı mimarlar ile işbirliği yapılmıştır. Mimarlar tasarım süreçlerinde iVR teknolojisi deneyimletmiştir. Mimari hizmet alan müşterilere ise iVR teknolojisi bir sunum yöntemi olarak deneyimletmiştir. Bu deneyim için konutlarını tasarlamak üzere hizmet alanı yapan kişileri bulmak ve sürece dahil olmak gerektiği için örneklem sayısı kısıtlı kalmıştır. Bu çalışma örneklem sayısı kısıtlılığı sebebi ile kendini bir ön çalışma olarak konumlandırmıştır.

2. YÖNTEM, BULGULAR VE TARTIŞMA (METHODS, RESULTS AND DISCUSSION)

Bu çalışma, profesyonel mimarlık ortamında sanal gerçeklik araçlarının kullanıldığı projelerde tasarımcılar ve müşterilerin bu araçlardan ne şekillerde yararlandığını araştırmaya yönelik keşfedici bir desene sahiptir. Literatürde kapsayıcı sanal gerçeklik ortamlarının mimari projeler ve mekânlara dair kavrayışı nasıl geliştirdiğine dair birçok çalışma bulunsa da mimar-müşteri ilişkisi ve mimari tasarım ortamında bu durumun deney ortamı olmaksızın doğal işleyişte (in vivo) incelendiği kaynaklara rastlamak oldukça zordur. Bu çalışma, bu boşluğun kapanmasında rol oynamayı hedeflemekte, mimari temsil biçimi olarak kapsayıcı sanal gerçekliğin mimarlık

sektörüne entegrasyondaki durumunu tartışmayı amaçlamıştır. Çalışma sektörel araştırmaların kısıtlı olduğu literatürdeki açığı kapatmayı amaçlaması yönüyle özgündür.

Bu sorulara yanıt verebilmek için çalışmada iki araştırma sorusu için iki tür veri toplama aracı kullanılmıştır. Bunlardan birincisi tasarım süreçlerinde kapsayıcı sanal gerçeklik teknolojisi kullanan mimari tasarımcılarla yapılan yarı yapılandırılmış görüşmedir (röportaj). İkincisi ise mimari hizmet alan ve inşa edilecek konutlarını kapsayıcı sanal gerçeklik teknolojisi ile deneyimleyen müşteriler ile yapılan anketlerdir.

Oluşturulmuş kapsayıcı sanal gerçeklik ortamları Unreal Engine 5 oyun motoruyla oluşturulmuştur ve Meta Quest 2 sanal gerçeklik gözlüğünde RTX 2070 ekran kartlı ve Intel i7 işlemcili bir laptopla deneyimlenmiştir.

2.1. Araştırma Sorusu 1: Mesleki Ortamda Kapsayıcı Sanal Gerçeklik Temsil Ortamı Kullanan Mimarlar ile Yarı-Yapılandırılmış Görüşmeler (Research Question 1: Semi-Structured Interviews with Architects Using Immersive Virtual Reality Rendering Environment in Professional Setting)

Araştırma sorusu-1: 'Kapsayıcı sanal gerçeklik temsil ortamları, mesleki ortamda mimarların tasarım süreçlerinde ne şekillerde kullanılmıştır ve söz konusu temsil sisteminden ne şekillerde faydalanılabilmektedir?' sorusuna cevap verebilmek için, veri toplama aracı olarak yarı-yapılandırılmış görüşmeler kullanılmıştır. Bu görüşmeler, çizdikleri projeleri kapsayıcı sanal gerçeklik ortamında deneyimlemiş altı tasarımcı mimar ile gerçekleştirilmiştir. Görüşmeler, 10-15 dakika arasında sürmüştür. Bu yöntemle, mimarların kapsayıcı sanal gerçeklik ortamında projelerini deneyimlediklerinde nasıl bir kavrayış geliştirdikleri ve kapsayıcı sanal gerçeklik araçlarını nasıl kullandıkları, sanal gerçeklik araçlarındaki deneyimlerinin tasarım sürecine nasıl etki ettiği sorulmuştur. Bunun dışında yarı-yapılandırılmış görüşme yöntemi kullanıldığı için görüşmelerdeki verilen cevaplara göre yeni sorular sorulmuştur. Çalışmadaki örneklem sayısının kısıtlı olması, mimari tasarım sürecinin uzun olmasından kaynaklanmaktadır.

2.1.1. Araştırma Yöntemi 1: Mesleki Ortamda Kapsayıcı Sanal Gerçeklik Temsil Ortamı Kullanan Mimarlar ile Yarı-Yapılandırılmış Görüşmeler (Research Method 1: Semi-Structured Interviews with Architects Using Immersive Virtual Reality Rendering Environment in Professional Setting)

Bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen yarı yapılandırılmış görüşmelere 3 kadın ve 3 erkek olmak üzere toplam 6 mimar katılımcı dahil edilmiştir. Katılımcıların yaş ortalaması 39 olup, 4 tanesi yüksek lisans derecesinde eğitime, 2 tanesi ise doktora derecesinde eğitime sahiptir. Görüşmelerde öne çıkan ifadeler özellikle Tasarımcı A ve Tasarımcı B tarafından dile getirilmiş olup, bu nedenle bu katılımcıların görüşlerine ayrıntılı bir şekilde yer verilmiştir.

Yarı yapılandırılmış görüşme yapılan tasarımcıların tümü kapsayıcı sanal gerçeklik teknolojisinin mimari tasarım sürecinde bir doğrulama aracı olarak kullanılmasının faydalı olduğunu vurguladı ve tasarım kararlarının doğruluğunu bedenlen test etme olanağının önemli olduğunu kanıslandı. Altı tasarımcıdan dört tanesi tasarladıkları yapıyı sanal gerçeklik teknolojisi ile deneyimledikten sonra tasarımlarında mesafe ve ölçülerde değişikliğe gittiklerini belirtti. Tüm tasarımcılar bu teknolojiyi kullanma olanağı oldukça kullanmaya devam etmek istediklerini belirtti. Tasarımcı A ve tasarımcı B'ye ait bazı önemli ifadeler aşağıdaki gibidir.

TASARIMCI-A. 'Sanal gerçeklik teknolojisi ile iki boyutlu kararların insan ölçeğindeki karşılığını görmek muhteşemdi. Bu sayede iki boyutta verilen kararların doğruluğunu test etme fırsatı buldum. Özellikle mesafeler ve ölçülerin doğruluğunu ya da yanlışlığını test etme konusunda fazlasıyla etkili olduğu söylenebilir. Bu doğrultuda tasarladığım yapıyı sanal gerçeklik teknolojisi ile deneyimledikten sonra özellikle iç mekandaki sabit elemanların mesafe ve ölçülerinde küçük değişikliklere gittim.'

TASARIMCI-B. 'Plan düzleminde tasarladığımız mekanı her ne kadar zihnimizde canlandırabilsek de özellikle tefrişler ile beraber birebir şekilde canlandırmak oldukça zor. Sanal gerçeklik teknolojisi ile tasarladığım mekanı tefrişler, malzeme, renk, ışık gibi diğer faktörler ile bedensel ve zihinsel ortaklığım ile deneyimleme fırsatı buldum. Bu sayede ölçek ile ilgili verdiğim kararların doğruluğunu, kapalı, yarı-açık ve açık mekan ilişkilerinin güçlülüğünü gerçekliğe çok yakın şekilde test edebildim. Genişlik, darlık, yükseklik algısı bu deneyim ile çok daha kollar ve doğru anlaşılıyor. Özellikle günün her saatinde doğal ve yapay aydınlatmayı deneyimleyebilmek, günün farklı saatlerinde mekanların güneş ışığını alma biçimini görebilmek önemliydi.'

2.1.2. Araştırma Yöntemi ve Sorusu 1'e Dair Tartışma (Discussion on Research Method-1 and Question-1)

Bu çalışmada elde edilen bulgular, kapsayıcı sanal gerçeklik (iVR) teknolojisinin mimari tasarım sürecinde doğrulama aracı olarak kullanılmasının, tasarımcıların mekânsal algılarını ve tasarım kararlarını nasıl derinleştirdiğini göstermektedir. Özellikle mesafe ve ölçülerin doğruluğunu test etme konusunda iVR'nin sunduğu avantajlar, tasarımcıların iki boyutlu çizimlerde verdikleri kararları üç boyutlu bir ortamda test edebilmelerine olanak tanımaktadır. Bu, iVR'nin, tasarımcıların mekânsal farkındalığını artırarak, kararların doğruluğunu ve tasarımın etkinliğini nasıl geliştirdiğini ortaya koymaktadır.

Goldschmidt'in "görsel düşünme" kavramına göre, tasarım sürecinde kullanılan dış temsiller, tasarımcıların mekânsal ilişkileri ve fonksiyonel özellikleri keşfetmelerine olanak tanır [15]. Çalışma kapsamında görüşülen mimarlar, iVR ortamında tasarımlarını deneyimlerken, bazı mekânsal ilişkiler ve ölçülerde değişiklik yapma gereği duydıklarını belirtmişlerdir. Bu durum, iVR'nin, tasarım sürecinde bilişsel yükü hafifleterek, tasarımcıların mekânı daha derinlemesine ve bütüncül bir şekilde değerlendirmelerine olanak sağladığını göstermektedir.

Simon'un problem çözme sürecinde temsil sistemlerinin önemine dair çalışmaları da bu noktada destekleyicidir. Simon, problem çözmenin, problemi temsil edecek bir yapı oluşturmakla başladığını savunur [29]. İVR, tasarımcıların zihinlerinde oluşturdukları mekânsal temsilleri somutlaştırarak, bu temsil yapısının doğruluğunu ve işlevselliğini test etme olanağı sunar. Bu, tasarımcıların tasarım sürecinde daha bilinçli ve doğru kararlar almasına katkıda bulunur.

Miller'ın kısa süreli bellek kapasitesi teorisi de burada önemlidir. Miller, kısa süreli belleğin yaklaşık 7 (+/- 2) bilgi parçasını (chunk) işleyebildiğini öne sürer [30]. İVR teknolojisi, tasarımcıların sınırlı bilişsel kapasitelerini zorlamadan, mekânsal ilişkileri ve ölçüleri doğru bir şekilde deneyimlemelerine olanak tanır. Bu, tasarımcıların bilişsel kaynaklarını koruyarak, tasarım süreçlerinde daha etkili olmalarını sağlar.

Bununla birlikte, iVR'nin plan şemaları gibi bütüncül tasarım kararları için yeterince etkili olup olmadığı da sorgulanabilir. Görüşülen tasarımcılar, iVR teknolojisi ile yalnızca belirli mekânlarda

bulunabildiklerini ve bu nedenle plan şemasının tamamını aynı anda göremediklerini belirtmişlerdir. Bu durum, iVR'nin plan şemalarının bütüncül bir şekilde algılanmasında yetersiz kalabileceğini düşündürmektedir. Ancak, iVR'nin belirli mekânları doğrulamak ve bu mekânlardaki yaşantıyı etüt etmek için güçlü bir araç olduğu sonucuna varılabilir.

Sonuç olarak, iVR teknolojisinin, tasarımcıların mekânsal algısını derinleştiren ve mekanı doğrulama süreçlerinde etkili bir araç olduğu açıktır. Ancak, bu teknoloji, plan şeması gibi daha geniş ölçekli tasarım kararlarının verilmesinde geleneksel temsil araçlarıyla birlikte kullanıldığında daha etkili olabilir.

Röportaj yapılan tasarımcıların hiçbiri genel plan şeması ile ilgili bir şey söylememiştir, zira sanal gerçeklik temsil ortamıyla tasarımcı aynı anda bedenene sadece bir mekânda bulunabilir, fakat plan şemasına dair kararların bütüncül olarak alınabilmesi için şemanın tamamının gözünün önünde olmasına ihtiyaç vardır. Sanal gerçeklik temsil ortamı (modifiye edilmediği müddetçe) bu şekilde bir etkileşime müsaade etmez. Kısacası tekil mekânları doğrulamak ve tekil ya da ardışık mekânlardaki yaşantıyı etüt etmek için güçlü bir araç olarak kullanılabilirken, plan şeması oluşturmada ve genel tasarım kararlarının verilmesinde geleneksel mimari araçlardan bir üstünlük kurabileceğini söylemek, bu teknolojinin şu an bizlere sunduklarının ışığında oldukça güçtür. Kısacası bu çalışmaya göre iVR teknolojisi günümüzde tasarım alanında yenilikçi fikirler geliştirmede kullanılan diğer araçlara henüz bir üstünlük kuramamıştır. Bunun en büyük sebepleri tasarımcıya sunulan arayüz kısıtlarının olması ve mekanı bütüncül olarak algılama kısıtlılığıdır. Fakat ileride geliştirilecek yeni arayüzler ile iVR teknolojisinin potansiyelleri değişebilecek ve bu teknolojinin tasarım alanındaki etkinliği artabilecektir.

2.2. Araştırma Sorusu 2: Kapsayıcı Sanal Gerçeklik Temsil Ortamından Yararlanmış Müşteriler ile Anket Çalışması (Research Question 2: Survey Study with Customers Who Have Used Immersive Virtual Reality Presentation Environment)

Araştırma sorusu-2: "Kapsayıcı sanal gerçeklik temsil ortamlarının, mimari hizmet alan ve uzman olmayan kişilerin (müşteriler) kendileri için tasarlanmış projeleri kavrayışını nasıl ve ne yönde etkiler?" sorusuna cevap vermek için, ilk olarak, mimari tasarım ofisinden talep ettikleri planları ve bilgisayar görüntülerini görmüş olan müşteriler,

tasarımın son halinin doğrulanması amacıyla sanal gerçeklik ortamında mimarların onlar için tasarladığı mekânları deneyimlemiştir. Ankette sorulan sorular, bu mekânları iVR ortamında deneyimlemeden önce ve sonrasında kavrayış farklarını ölçmeyi hedeflemiştir. Bu yöntemle, iVR ortamının mimari tasarım ofislerinde, sunum yöntemi olarak mimar-müşteri ilişkisindeki rolü tespit edilmeye çalışılmıştır. Bu çalışmada, konutlarının tasarlanması için mimari tasarım hizmeti alan ve tasarımcı olmayan sekiz kişi üzerinde mekân algılarını dair bir anket çalışması yapılmıştır. Çalışmadaki katılımcı sayısının kısıtlı olması kişisel konutu için mimari hizmet alan kişi sayısındaki kısıtlılık, tasarımın iVR teknolojisinde deneyimlenecek uygunluk derecesine ulaşmış projelerin bulunma zorluğundan ve sürecin uzun

olmasından kaynaklanmaktadır. Mimari hizmet alan ve ankete katılan katılımcıların bu konudaki görüşlerini almak üzere 7 çift sorudan oluşan 14 soruluk bir anket hazırlanmıştır. Soru numarası tek sayı olan sorular, sanal gerçeklik teknolojisini deneyimlemeden önce, soru numarası çift sayı olan sorular sanal gerçeklik teknolojisini deneyimledikten sonra elde edilen deneyimin değerlendirilmesine dair olan sorulardır. Anket soruları ve ölçek aşağıda sunulmuştur (Şekil 4). Bu iki veri toplama yöntemi sayesinde, kapsayıcı sanal gerçeklik temsil ortamlarının mimari tasarım süreçlerindeki etkisi, hem müşteri hem de mimar perspektifinden kapsamlı bir şekilde değerlendirilmiştir. Veri toplanan katılımcıların ortalama yaşı 50'nin üzerindedir. Anket katılımcılarının 3'ü kadın 5'i ise erkektir.

1 = Kesinlikle Katılmıyorum, 7 = Kesinlikle Katılıyorum

Kesinlikle katılmıyorum						Kesinlikle katılıyorum
1	2	3	4	5	6	7

- Üç boyutlu görseller ve mimari çizimler ile kendimi mekânın içinde hissettim.
- Sanal gerçeklik ortamında kendimi mekânın içinde hissettim.
- Üç boyutlu görseller ve mimari çizimler ile tasarımdaki mekânın boyutuna dair doğru bir fikrim oluştu.
- Sanal gerçeklik ortamında tasarımdaki mekânın boyutlarına dair doğru bir fikrim oluştu.
- Render, plan ve kesitlerle tasarımdaki odaların birbirlerine göre konumlarını ve geometrik ilişkilerini anlayabildim.
- Sanal gerçeklik ortamında tasarımdaki odaların birbirlerine göre konumlarını ve geometrik ilişkilerini anlayabildim.
- Üç boyutlu görseller ve mimari çizimler ile tasarımda nerede hangi malzeme kullanılacağını anladım.
- Sanal gerçeklik ortamında tasarımda nerede hangi malzeme kullanılacağını anladım.
- Üç boyutlu görseller ve mimari çizimler ile tasarımın araziye nasıl oturacağını anladım.
- Sanal gerçeklik ortamında tasarımın araziye nasıl oturacağını anladım.
- Üç boyutlu görseller ve mimari çizimler ile deneyimlediğim mekân bana cezbedici geldi.
- Sanal gerçeklik ortamında deneyimlediğim mekân bana cezbedici geldi.
- Üç boyutlu görseller ve mimari çizimler ile deneyimlediğim tasarımda hoşuma giden ve gitmeyen yerleri kolayca anladım.
- Sanal gerçeklik ortamıyla deneyimlediğim tasarımda hoşuma giden ve gitmeyen yerleri kolayca anladım.

Şekil 4. Mimari hizmet alan kişiler ile yapılan anket soruları (Survey questions conducted with people receiving architectural service)

2.2.1. Araştırma Yöntemi 2: Kapsayıcı Sanal Gerçeklik Temsil Ortamından Yararlanmış Müşteriler ile Anket Çalışması (Research Method 2: Survey with Customers Who Have Used Immersive Virtual Reality Representation Environment)

Araştırma kapsamında; öncelikle projelerinin bilgisayar görüntülerini ve planları ile deneyimlemiş, ardından aynı projeyi sanal gerçeklik ortamında deneyimlemiş 8 mimari hizmet alan müşteri ile anket çalışması yapılmıştır. Müşterilerin 3 tanesi kadın, 5 tanesi ise erkektir, yaş ortalamaları ise 50'dir. 8 kişinin tümü üniversite

mezunudur. Sorulan 7 çift sorunun (bilgisayar görüntüsü, plan / sanal gerçeklik ortamı) her birinin sonucuna göre, sanal gerçeklik ortamı müşterilerin gözünde daha üstün ve nitelikli bir temsil aracıdır. Sonuçlar 1'den 7'ye kadar olan ölçekte veriler cevapların ortalaması alınarak bulunmuştur.

Elde edilen veriler kapsayıcı sanal gerçeklik ortamı ve üç boyutlu görseller ve mimari çizimler olarak iki kategoride değerlendirilmiştir ve ortalamaları alınmıştır. Ayrıca verilen yanıtlarda iki temsil sistemi arasında kayda değer bir farklılık olup olmadığını bulmak için ilk ve ikinci kriter arasında

çift kuyruklu T-Test uygulanmıştır. Dördüncü ve beşinci soruda T-Test sonucu 0,05'ten büyük olduğu için istatistiksel olarak, bu deneydeki örneklemde özelinde tasarımın araziye nasıl oturacağını ve tasarımda kullanılan malzemelere dair algının kapsayıcı sanal gerçeklik ortamı tarafından etkilenmediğini söylemek mümkündür. Geri kalan sorularda ise T-Test sonucu 0,05'ten çok daha küçük olduğu için sanal gerçeklik temsil ortamının anlamlı bir fark oluşturduğunu ve etkili olduğunu söylemek mümkündür.

İki temsil ortamının oluşturduğu algının etkisinin büyüklüğü, iki temsil ortamının ilgili sorudaki ortalama cevapların birbirinden çıkarılmasıyla belirlenmiştir. Yani işlem yapıldıktan sonra çıkan

değer ne kadar büyükse kapsayıcı sanal gerçekliğin bahsedilen sorudaki kritere dair etkisi o kadar güçlüdür. Sorulara dair ortalama cevapların birbirlerinden çıkarılmasıyla elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibidir; tasarımdaki malzeme tercihleri ve uygulaması ($BG/P/K_{ort} - iVR_{ort} = 1,5$), tasarımın araziye nasıl oturduğu ve plan şemasının anlaşılması ($BG/P/K_{ort} - iVR_{ort} = 1,7$), mekanların birbirlerine göre konumları ve geometrik ilişkilerinin anlaşılması ($BG/P/K_{ort} - iVR_{ort} = 1,8$), deneyimlenen mekanın cezbedici bulunması ($BG/P/K_{ort} - iVR_{ort} = 2,0$), mekanın boyutlarına dair bir fikrin oluşması ve tasarıma dair katılımcının/müşterinin hoşuna giden ve gitmeyen yönleri anlaması ($BG/P/K_{ort} - iVR_{ort} = 2,5$) ve kendini sunulan mekanın içinde hissetme durumunun oluşması ($BG/P/K_{ort} - iVR_{ort} = 2,8$).

	1	2	3	4	5	6	7
	Kendimi Mekanın İçinde Hissettim	Tasarımdaki mekanın boyutlarına dair doğru bir fikrim oluştu	Tasarımdaki odaların birbirlerine göre konumlarını ve geometrik ilişkilerini anlayabildim.	Tasarımda nerede hangi malzeme kullanılacağını anladım.	Tasarımın araziye nasıl oturacağını anladım.	Deneyimlediğim mekân bana cezbedici geldi.	Deneyimlediğim tasarımda hoşuma giden ve gitmeyen yerleri kolayca anladım.
Kapsayıcı Sanal Gerçeklik Ortamı	6,7	6,7	6,8	7	6,8	6,7	6,8
3 Boyutlu Görseller ve Mimari Çizimler	3,8	4,2	5	5,5	5,2	4,7	4,3
İki Ortamın Ortalamalarının Farkı	2,9	2,5	1,8	1,5	1,6	2	2,5
Çift Kuyruklu T-Test	0,001	0,012	0,003	0,063	0,055	0,007	0,001

Şekil 5. Mimari hizmet alan kişiler ile yapılan anket çalışması (Survey conducted with people receiving architectural services)

2.2.2. Araştırma Yöntemi ve Sorusu 2'ye Dair Tartışma (Discussion on Research Method-2 and Question-2)

Anket çalışmasından elde edilen bulgular, kapsayıcı sanal gerçeklik (iVR) ortamlarının, müşterilerin mimari mekân algısını önemli ölçüde etkilediğini göstermektedir. Müşterilerin sanal gerçeklik ortamında deneyimledikleri mekânlarda daha yüksek bir "buradalık" (presence) hissetmeleri, mekân algısında pozitif bir fark yaratmıştır. Literatürde, buradalık hissini mekânsal bilişi artırdığı ve bireylerin mekânla olan ilişkilerini daha doğru bir şekilde anlamalarına olanak tanıdığı vurgulanmaktadır. Bu çalışmada da görüldüğü üzere, müşteriler iVR ortamında mekânın boyutlarını daha doğru algıladığını düşünmüş ve

tasarımın çeşitli yönlerini daha iyi değerlendirebilmiştir. Maneuvrier ve diğerlerinin (2020) çalışmaları, buradalık hissini kullanıcıların uzamsal algısını nasıl geliştirdiğini ortaya koymaktadır [4].

Görsel ve mekânsal algının iVR teknolojisiyle güçlendirilmesi, müşterilerin tasarıma dair daha güçlü ve net bir kavrayış geliştirmesine olanak tanır. Goldschmidt'in çalışmalarında da belirtildiği gibi, temsil sistemleri, bireylerin mekânsal ilişkileri ve tasarım kararlarını daha iyi anlamalarına yardımcı olur [15]. Bu bağlamda, iVR ortamlarının müşterilerin tasarım kararlarını değerlendirmede ve bu kararlarla ilgili geri bildirim sağlamada daha etkin olduğu ortaya çıkmıştır. Suwa ve Tversky'nin araştırmaları, dış temsillerin tasarım sürecinde nasıl

kritik bir rol oynadığını ve tasarımcıların bu temsillerle etkileşime girerek yeni fikirler geliştirdiğini göstermektedir [31].

Anket sonuçlarına göre, iVR teknolojisi, müşterilerin mekânın boyutlarını daha doğru bir şekilde algılamasına ve mekânın farklı yönlerini daha etkili bir şekilde değerlendirmesine olanak sağlamıştır. Bu bulgu, iVR'nin, müşterilerin tasarımın farklı unsurlarını somutlaştırmasına ve tasarımla ilgili daha bilinçli kararlar almasına katkıda bulunduğunu göstermektedir. Özellikle, müşterilerin iVR ortamında deneyimledikleri mekânlarda, mekânın cazibesini daha güçlü bir şekilde hissettikleri gözlemlenmiştir. Bu durum, Sheridan'ın "inanmamayı askıya alma" (suspension of disbelief) kavramıyla ilişkilendirilebilir; bireyler, sanal ortamın gerçek olmadığını bilseler bile, bu durumu bir kenara bırakıp, deneyimledikleri mekâna daha fazla odaklanabilirler [18].

Bununla birlikte, iVR teknolojisinin sunduğu buradalık hissi, tasarımın daha geniş bir perspektifte değerlendirilmesi gereken durumlarda sınırlı kalabilir. Plan şemalarının anlaşılması konusunda iVR'nin etkisinin daha düşük olması, bu teknolojinin ben-merkezli (birinci kişi) bakış açısı ile sınırlı kalmasından kaynaklanmaktadır. Tıpkı mimarlarla yapılan birinci yöntemde çıkan sonuçta olduğu gibi, müşterilerin de plan şemalarını daha iyi anlamaları için geleneksel iki boyutlu temsillerin (planlar, kesitler) daha etkili olabileceği gözlemlenmiştir.

Anket çalışmasında gözlemlenebilen birinci ve en büyük etki müşterilerin mimari mekân temsili kapsayıcı sanal gerçeklik ortamında olduğu zaman "buradalık" durumlarının artmış olmasıdır. Artan buradalığın uzamsal algıyı pozitif yönde etkileyeceğine dair literatürde birçok çalışma vardır [4]. Mekan algısının olumlu yönde etkilenmesi, müşteri için tasarlanan mekânın müşteri daha iyi aktarılmasını sağlayabilir, böylece tasarım sürecini ve mimar-müşteri ilişkilerini iyileştirebilir.

İkinci en büyük etki ise müşterilerin mekânın boyutunu dair algısında olan iyileşmeler ve müşterilerin mekânda hoşlarına giden ve gitmeyen yerleri daha iyi anlamalarıdır. Mekânın boyutlarına dair algının "buradalığın" artmasıyla birlikte artması literatürde sıklıkla bahsedilmiştir ve şaşırtıcı değildir. Kapsayıcı sanal gerçeklik ortamı daha yüksek "buradalık", "kapsayıcılık", "etkileşim" ve "bedenleşme" sunduğu için müşterinin mekânı keşfetme biçimi günlük hayatta mekânı keşfetme biçimiyle örtüşür. Örneğin

kafasını döndürdüğünde görüntü tekrar oluşur ya da yürüdüğünde mekânın içinde gerçekten yürüyormuş gibi görüntü yürüyüşe entegre olur, tüm bu deneyimler kullanıcının kendi bedeninden aşına olduğu göz hizasında ve yürüme hızında gerçekleşir. Bu hem etkileşimin hem de bedenleşmenin daha güçlü olduğu bir temsil ortamı yaratır. Bunun yanı sıra temsil sisteminin kapsayıcı olması yani dışarıdan gelen uyarıyı azaltacak şekilde gözlerin önünde ekranların bulunması kişinin mekâna daha iyi konsantre olabildiğini sağlar. Temsil sisteminin bu özelliği elbette müşterilerin mekâna dair algısını arttırdığı için hoşlarına giden ve gitmeyen yerlerin onlar tarafından tespit edilmesini de kolaylaştırır.

Üçüncü en büyük etki mekânın kullanıcıya "cezbedici" gelmesi durumudur. "Cezbedicilik" durumunun oluşması ticari anlamda önemli olsa da bu durumun oluşmasında başlıca etkenin çoğu müşterinin sanal gerçeklik gözlüğünü ilk defa deneyimlemesi olduğu tartışılabilir. Bu teknolojinin mimari ofislerde kullanımı yaygınlaştıkça "cezbedici" olma durumunun azalabileceği de düşünülebilir. Ayrıca, üç boyutlu görseller projelerin belirli ilham verici ve gösterişli yerlerinden oluşturulur. Sanal gerçeklik ortamında ise müşteri (program tarafından sınırlandırılmamışsa) tüm modeli gezebileceği için projenin eğer varsa zayıf ya da az tasarlanmış yönleri daha çok algılanacaktır. Sanal gerçeklik gözlüğü ulaşması kolay olsa da bu gözlükle sanal gerçeklik ortamlarını yüksek gerçekçilikte, bilgisayarları buna yetecek kadar optimize şekilde çalıştırmak bir mimarlık ofisinin beceri setinin yetersiz kalabileceği bir araç olabilir.

Dördüncü etki mekânların ilişkilerinin ve geometrik konumlarının algılanması ile ilgilidir. Farkın diğer sorulardaki kadar yüksek çıkmamasının sebebinin kullanılan kapsayıcı sanal gerçeklik uygulamasının ben-merkezli/birinci kişi kamerasından bakılarak kullanılıyor olmasıdır. Bütüncül bir mekân anlayışı için plan gibi "diğer-merkezli" bakış açıları daha yararlı olduğu tartışılabilir.

Altı anket sorusundan beşinci büyük ve "kayda değer olmayan" (t-test sonuçlarına göre) fark ise tasarımın araziye nasıl oturduğunun ve plan şemasının anlaşılması sorusundadır. Bu soru ikinci en düşük puanı almıştır. Sanal gerçeklik ortamları kişilerin plan şemalarını daha iyi anlamasında çok etkili değildir, çünkü sanal gerçeklik ortamı ben-merkezli bir perspektifle çalışır. Bütüncül bir mimari algı için diğer-merkezli temsil biçimleri gerekli olduğu tartışılabilir (plan ve kesit gibi). Bu

bakımdan bilgisayar görüntüleri ve planları incelenen bir projenin ekstra olarak sanal gerçeklik ortamında deneyimlenmesi, mekanın algısına yönelik pek bir katkıda bulunmaz. Yalnızca aynı mekan farklı bir temsil biçimiyle daha deneyimlendiği için katkıda bulunmasının muhtemel olduğunu söylemek yanlış olmaz.

En küçük etki ise bilgisayar modelinde kullanılan malzemelere dair algıdır. Sanal gerçeklik gözlüğü kullanmak istatistiksel olarak bu sorunun cevaplarında bir fark üretmemiştir. Bu durum şu şekilde yorumlanabilir: malzemeler yalnızca 2 boyutlu dokulardır ve hem bilgisayar görüntüsü ortamında hem de sanal gerçeklik ortamında benzer şekilde işlenir. Dokuları kapsayıcı sanal gerçeklik ortamında ya da plan proje düzleminde görmenin kişilere kazandırdığı fazladan bir kazanım olmadığını söylemek mümkün olabilir.

Sonuç olarak, iVR teknolojisi, birçok açıdan müşterilerin tasarımları daha doğru algılamasına ve değerlendirdikleri mekânın tüm yönlerini daha kapsamlı bir şekilde keşfetmesine olanak sağlamaktadır. Ancak, bu teknoloji, daha geniş tasarım kararlarının alınmasında, geleneksel temsillerle birlikte kullanıldığında en etkili sonucu verebilir. Gelecekte yapılacak araştırmalar, iVR'nin müşterilerin tasarım sürecine katılımını ve karar verme süreçlerini nasıl etkilediğini daha derinlemesine inceleyebilir.

3.SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışma, kapsayıcı sanal gerçeklik (iVR) teknolojisinin mimari tasarım sürecinde mimari tasarımcılar ve mimari hizmet alan kişiler (müşteriler) üzerindeki etkilerini araştırmayı amaçlamıştır. Araştırmanın temel hedefi, iVR'nin mekânsal algı, tasarım doğrulama ve müşteri sunumlarındaki etkinliğini değerlendirmektir. Bulgular, iVR'nin tasarım sürecine getirdiği yenilikler ve sınırlamalar hakkında çıkarımlar sunmaktadır.

Elde edilen sonuçlar, iVR teknolojisinin tasarımcıların mekânsal algısını derinleştirerek tasarım kararlarının doğruluğunu artırmada etkili bir araç olduğunu göstermektedir. Özellikle mesafe ve ölçülerin test edilmesinde sağladığı avantajlar, tasarım sürecindeki bilişsel yükü azaltarak mimarlar için daha verimli bir tasarım süreci sağlamaktadır. Ancak, mevcut iVR arayüzlerinin kullanım zorluğu ve işlevsellik açısından yetersizliği nedeniyle, iVR ortamı mimarlar için tasarım yapma ortamından çok, tasarım kararlarını doğrulama aracı olarak öne

çıkılmaktadır. Fakat ileride geliştirilecek yeni arayüzler ile iVR teknolojisinin potansiyelleri değişebilecek ve bu teknolojinin tasarım alanındaki etkinliği artabilecektir.

Müşteri perspektifinden bakıldığında, iVR'nin sunduğu yüksek "buradalık" hissi, müşterilerin mekânları daha doğru algılamasına ve tasarım hakkında net geri bildirimler vermesine olanak tanımıştır. Bu, mimari projelerin müşteri tarafından daha iyi anlaşılmasını ve değerlendirilmesini sağlayarak müşteri memnuniyetini artırabileceğini göstermektedir. Ancak, iVR'nin plan şemalarının anlaşılması gibi daha geniş ölçekli tasarım kararlarında sınırlı kaldığı gözlemlenmiştir. Bu durum, iVR'nin daha etkili olabilmesi için geleneksel temsillerle birlikte kullanılmasını gerekli kılmaktadır. Bu sınırlamanın temel nedeni olarak, ben-merkezli bakış açısının mekânın bütününe anlamak ve parçalar arasındaki ilişkileri doğru kurmak için yeterince etkili olmaması gösterilmiştir.

Sonuç olarak, iVR teknolojisi hem tasarımcıların hem de müşterilerin mekânsal algısını geliştiren ve tasarım sürecini daha etkili hale getiren güçlü bir temsil aracı olarak değerlendirilebilir. Ancak, bu teknolojinin sınırlamaları dikkate alınarak, daha üst ölçekli ve çeşitli örneklem gruplarıyla yapılacak gelecekteki araştırmalar, iVR'nin mimarlık pratiğindeki yerini daha da netleştirecektir

Çalışmada, iVR teknolojisinin mimarlık pratiğinde nasıl yeni bir perspektif sunduğunu ve mevcut temsili sistemlerle nasıl entegre edilebileceğini teorik olarak ele almıştır. Araştırmada, Simon'un problem çözme teorileri ve Goldschmidt'in görsel düşünme kavramlarıyla uyumlu olarak, iVR'nin tasarım sürecinde temsil sistemlerinin önemi vurgulanmaktadır. Bununla birlikte, araştırmanın bir ön çalışma olduğunu vurgulamak önemlidir. Katılımcı sayısının sınırlı olması, elde edilen bulgulardan genel ve geçerli bir sonuç çıkarılmasını sınırlayabilir. Altı mimar ve sekiz müşteri ile yapılan bu çalışma, iVR teknolojisinin potansiyel faydalarını ortaya koysa da, daha geniş kapsamlı ve çeşitli örneklem grupları ile yapılacak çalışmalar bu bulguları daha da sağlamlaştıracaktır.

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)

Çalışmada tüm yazarların eşit katkısı vardır.

All authors have equal contributions to the study.

CONFLICT OF INTEREST (ÇIKAR ÇATIŞMASI)

There is no conflict of interest in this study.

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Pimental, K. ve Teixeira, K. (1993): Virtual Reality Through the New Looking Glass, 2nd Ed., McGraw-Hill.
- [2] Bayraktar, E., & Kaleli, F. (2007). Sanal gerçeklik ve uygulama alanları. *Akademik Bilişim*, 1(6).
- [3] Hoffman, H. G., Hullfish, K. C. ve Houston, S. J. (1995). Virtual-reality monitoring, Virtual Reality Annual International Symposium 1995, March 11-15, 1995 Research Triangle Park, North Carolina, 48-54.
- [4] Maneuvrier, A., Decker, L. M., Ceyte, H., Fleury, P., & Renaud, P. 2020. "Presence promotes performance on a virtual spatial cognition task: Impact of human factors on virtual reality assessment", *Frontiers in Virtual Reality*, 1, 571713. <https://doi.org/10.3389/frvir.2020.571713>
- [5] Mitchell, W. J. 1990. "Design Worlds". Sayfa 36-57. The logic of architecture: Design, computation, and cognition. Cambridge, MA: MIT Press.
- [6] Evans, R. 1989. "Architectural Projection". Sayfa 19. Architecture and Its Image. MIT Press.
- [7] Frascari, M. (2013). A reflection on paper and its virtues within the material and invisible factures of architecture. In M. Frascari, J. Hale, & B. Starkey (Eds.), *From Models to Drawings*. Routledge. <https://doi.org/10.4324/9781315881386>
- [8] Perez-Gomez, A., & Pelletier, L. 1997. Architectural representation and the perspective hinge. Cambridge, MA: MIT Press.
- [9] Carpo, M. 2011. The Alphabet and The Algorithm. MIT Press.
- [10] Olson, D. R. 1996. "Towards a psychology of literacy: On the relations between speech and writing", *Cognition*, 60, 83-104. [https://doi.org/10.1016/0010-0277\(96\)00705-6](https://doi.org/10.1016/0010-0277(96)00705-6)
- [11] Zhang, J., & Norman, D. A. 1995. "A representational analysis of numeration systems", *Cognition*, 57, 271-295. [https://doi.org/10.1016/0010-0277\(95\)00674-3](https://doi.org/10.1016/0010-0277(95)00674-3)
- [12] Donald, M. 1991. *Origins of the modern mind: Three stages in the evolution of culture and cognition*. Harvard University Press.
- [13] Cross, N. 2011. *Design thinking: Understanding how designers think and work*. Berg.
- [14] Paes, D., Arantes, E., & Irizarry, J. (2017). Immersive environment for improving the understanding of architectural 3D models: Comparing user spatial perception between immersive and traditional virtual reality systems. *Automation in Construction*, 84, 292–303. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2017.09.016>
- [15] Goldschmidt, G. 1994. "On visual design thinking: the vis kids of architecture", *Design studies*, 15(2), 158-174. [https://doi.org/10.1016/0142-694X\(94\)90022-1](https://doi.org/10.1016/0142-694X(94)90022-1)
- [16] Slater, M. (2018). Immersion and the illusion of presence in virtual reality. In *British Journal of Psychology* (Vol. 109, Issue 3, pp. 431–433). John Wiley and Sons Ltd. <https://doi.org/10.1111/bjop.12305>
- [17] Slater, M., Spanlang, B., & Corominas, D. (2010, July 26). Simulating virtual environments within virtual environments as the basis for a psychophysics of presence. *ACM SIGGRAPH 2010 Papers, SIGGRAPH 2010*. <https://doi.org/10.1145/1778765.1778829>
- [18] Sheridan, T. B. (2000). Interaction, imagination and immersion some research needs. *Proceedings of the ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology*, 1–7. <https://doi.org/10.1145/502390.502392>
- [19] Gomes, M. G., Ogliari, A., Fernandes, R. B., & Marques, K. O. 2022. "Evaluation of physical models as creative stimuli in conceptual design of products", *Design Studies*, 81.
- [20] DeSutter, D., & Stieff, M. (2017). Teaching students to think spatially through embodied actions: Design principles for learning environments in science, technology, engineering, and mathematics. *Cognitive Research: Principles and Implications*, 2(1). <https://doi.org/10.1186/s41235-016-0039-y>
- [21] Kilteni, K., Groten, R., & Slater, M. (2012). The Sense of Embodiment in virtual reality. In *Presence: Teleoperators and Virtual Environments* (Vol. 21, Issue 4, pp. 373–387). MIT Press Journals. https://doi.org/10.1162/PRES_a_00124
- [22] Portman, M. E., Natapov, A., & Fisher-Gewirtzman, D. 2015. "To go where no man has gone before: Virtual reality in architecture, landscape architecture and environmental planning". *Computers, Environment and Urban Systems*, 54, 376-384. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbysys.2015.05.001>
- [23] Bashabsheh, A. K., Alzoubi, H. H., & Ali, M. Z. 2019. "The application of virtual reality technology in architectural pedagogy for building constructions", *Alexandria Engineering Journal*, 58(2), 713-723. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2019.06.002>

- [24] Klerk, R., Duarte, A. M., Medeiros, D. P., Duarte, J. P., Jorge, J., & Lopes, D. S. 2019. "Usability studies on building early stage architectural models in virtual reality", *Automation in Construction*, 103, 104-116.
- [25] Su, P., & Wang, S. 2012. "Virtual reality practice in architecture design" (Sayfa 98-101). 2012 IEEE Symposium on Electrical & Electronics Engineering (EESYM).
- [26] Delgado, J. M. D., Oyedele, L., Demian, P., & Beach, T. 2020. "A research agenda for augmented and virtual reality in architecture, engineering and construction", *Advanced Engineering Informatics*, 45, 101122. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2020.101122>
- [27] Doma, O. O., & Şener, S. M. 2022. "An investigation of architectural design process in physical medium and VR", *A|Z ITU Journal Of The Faculty Of Architecture*, 19(3), 631-649.
- [28] Chandrasekera, T., & Yoon, S. Y. 2018. "Augmented reality, virtual reality and their effect on learning style in the creative design process", *Design and Technology Education: An International Journal*, 23(1), 55-75.
- [29] Simon, H. A. (1996). *The Sciences of the Artificial* (3rd ed.). MIT Press.
- [30] Miller, G. A. 1956. "The magical number seven, plus or minus two: Some limits on our capacity for processing information", *Psychological review*, 63(2), 81. <https://doi.org/10.1037/0033-295X.101.2.343>
- [31] Suwa, M., & Tversky, B. (1997). What do architects and students perceive in their design sketches? A protocol analysis. *Design Studies*, 18(4), 385-403. [https://doi.org/10.1016/S0142-694X\(97\)00008-2](https://doi.org/10.1016/S0142-694X(97)00008-2)

MAG Kaynak Yöntemiyle Farklı Kaynak Parametreleri Kullanılarak Birleştirilen S235 ve S355 Çeliklerinin Kaynak Bölgelerinin İncelenmesi

Halil GÜLTOPLAYAN¹  Mehmet Serkan YILDIRIM^{2*}  Yakup KAYA¹ 

¹Karabük Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İmalat Mühendisliği Bölümü, Karabük, Türkiye

²Gazi Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksek Okulu, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, Ankara, Türkiye

Makale Bilgisi

Research article
Received: 24/10/2024
Revision: 25/11/2024
Accepted: 06/12/2024

Anahatar Kelimeler

S235
S355
MAG kaynağı
Mikro yapı
Makro yapı

Article Info

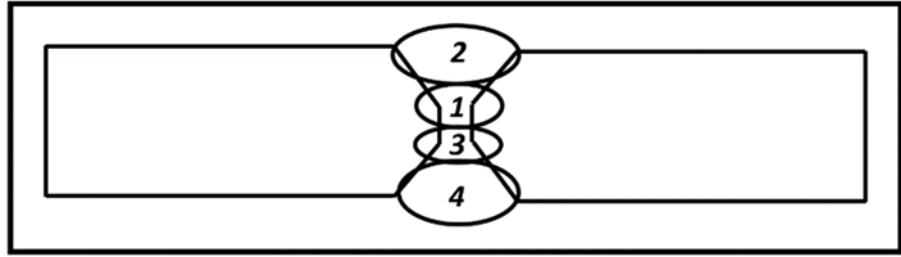
Araştırma makalesi
Başvuru: 24/10/2024
Düzeltilme: 25/11/2024
Kabul: 06/12/2024

Keywords

S235
S355
MAG welding
Micro structure
Macro structure

Grafik Özet (Graphical/Tabular Abstract)

Bu çalışmada, S235 ve S355 çelikleri MAG kaynak yönteminde farklı kaynak parametreleri kullanılarak birleştirilmiştir. Kaynaklı bölgeler tahribatsız olarak, manyetik parçacık yöntemi ile sıvı penetrant test yöntemi kullanılarak incelenmiştir. Ayrıca kaynak bölgelerinde optik mikroskop kullanılarak mikroyapı incelemeleri gerçekleştirilmiştir. Kaynaklı numunelerin çekme dayanımlarının belirlenmesi amacıyla çekme testleri uygulanmıştır. / In this study, S235 and S355 steels were joined using different welding parameters in the MAG welding method. Welded areas were examined non-destructively using the magnetic particle method and liquid penetrant testing method. In addition, microstructure examinations were carried out in the welded areas using an optical microscope. Tensile tests were applied to determine the tensile strength of the welded samples.



Şekil A: Kaynak pasoları düzenlemesi şematik görüntüsü / Figure A: Schematic view of the weld pass arrangement

Highlights (Önemli noktalar)

- S235 ve S355 çelikleri MAG kaynak tekniği kullanılarak birleştirilmiştir. / S235 and S355 steels were joined using MAG welding technique.
- Kaynak işlemleri farklı kaynak amperleri kullanılarak 4 pasoda gerçekleştirilmiştir. / Welding operations were carried out in 4 passes using different welding amperes.
- Kaynak bölgeleri tahribatsız muayene yöntemleri ve mikroyapı incelemeleri uygulanmıştır. / Non-destructive testing methods and microstructure examinations were applied to the welded areas.

Aim (Amaç): Güç trafoları kazan imalatında kullanılan S235 ve S355 çelikleriNİN MAG kaynağı kullanılarak birleştirilmesi. / Joining of S235 and S355 steels used in power transformer boiler manufacturing using MAG welding.

Originality (Özgünlük): S235 ve S355 çelikleri MAG kaynak yöntemi kullanılarak, kendi aralarında ve birbirleri ile MAG kaynak yöntemi ile birleştirilmiş hem tahribatsız hem de tahribatlı testler uygulanmıştır. / S235 and S355 steels were joined to each other and to each other using the MAG welding method, and both non-destructive and destructive tests were applied.

Results (Bulgular): Tahribatsız testler sonucunda tolerans dışı herhangi bir hataya rastlanmamıştır. Ayrıca mekanik testler kaynaklı bağlantıların güvenilirliğini doğrulamıştır. / As a result of non-destructive tests, no out-of-tolerance errors were found. In addition, mechanical tests confirmed the reliability of the welded connections.

Conclusion (Sonuç): S235 ve S355 çeliklerinin belirlenen parametrelerle MAG kaynak yöntemi ile yapılan birleştirmelerinin basınçlı kap üretiminde kaynağa uygunluğu tespit edilmiştir. / It has been determined that the joints of S235 and S355 steels made with the MAG welding method with the determined parameters are suitable for welding in pressure vessel production.



MAG Kaynak Yöntemiyle Farklı Kaynak Parametreleri Kullanılarak Birleştirilen S235 ve S355 Çeliklerinin Kaynak Bölgelerinin İncelenmesi

Halil GÜLTOPLAYAN¹ Mehmet Serkan YILDIRIM^{2*} Yakup KAYA¹

¹Karabük Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İmalat Mühendisliği Bölümü, Karabük, Türkiye

²Gazi Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksek Okulu, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, Ankara, Türkiye

Makale Bilgisi

Research article
Received: 24/10/2024
Revision: 25/11/2024
Accepted: 06/12/2024

Anahatar Kelimeler

S235
S355
MAG kaynağı
Mikro yapı
Makro yapı

Öz

Bu çalışmada, S235 ve S355 çelikleri MAG kaynak yönteminde farklı kaynak parametreleri kullanılarak birleştirilmiştir. Kaynaklı bölgeler tahribatsız olarak, manyetik parçacık yöntemi ile sıvı penetrant test yöntemi kullanılarak incelenmiştir. Ayrıca kaynak bölgelerinde optik mikroskop kullanılarak mikroyapı incelemeleri gerçekleştirilmiştir. Kaynaklı numunelerin çekme dayanımlarının belirlenmesi amacıyla çekme testleri uygulanmıştır. Sıvı penetrant ve manyetik parçacık testleri sonucunda üretilen kaynaklı numunelerin yüzeylerinde herhangi bir kaynak hatasının oluşmadığı tespit edilmiştir. Mikroyapı incelemeleri sonucunda, ITAB'ların ergime sınırına yakın olan bölümlerinde tane irileşmesinin olduğu, ana malzemeye yakın olana bölümlerinde ise ince yapıya sahip tanelerin olduğu belirlenmiştir. Ayrıca akım değerlerindeki artışla birlikte tane boyutunun da irileştiği belirlenmiştir. Yapılan çekme testleri sonrasında boyun verme ve kopmanın ana malzemenin gerçekleştiği tespit edilmiştir. Ayrıca çekme numunelerinin kaynak bölgelerinde herhangi bir hasar oluşmadığı belirlenmiştir. Çekme testleri sonrasında en yüksek çekme dayanımı (587 ± 5 N/mm²) 3 numaralı kaynak akım değeri kullanılarak birleştirilen S355-S355 malzeme çiftinde elde edilmiştir.

Investigation of Welding Areas of S235JR And S355JR Steels Joined by MAG Welding Method Using Different Welding Parameters

Article Info

Araştırma makalesi
Başvuru: 24/10/2024
Düzeltilme: 25/11/2024
Kabul: 06/12/2024

Keywords

S235
S355
MAG welding
Micro structure
Macro structure

Abstract

In this study, S235 and S355 steels were joined using different welding parameters in the MAG welding method. Welded areas were examined non-destructively using magnetic particle method and liquid penetrant testing method. In addition, microstructure examinations were carried out in welded areas using optical microscope. In addition, tensile tests were applied to determine the tensile strength. As a result of liquid penetrant and magnetic particle tests, it was determined that no welding defects occurred on the surfaces of the welded samples produced. As a result of microstructure examinations, it was determined that grain coarsening occurred in the parts of HAZs close to the melting limit, and finely structured grains were formed in the parts close to the base material. In addition, it was determined that the grain size became larger with the increase in current values. After the tensile tests, it was determined that necking and rupture occurred in the main material. It was also determined that no damage occurred in the weld areas of the tensile samples. After the tensile tests, the highest tensile strength (587 ± 5 N/mm²) was obtained in the S355-S355 material pair combined using the welding current value number 3.

1. INTRODUCTION (GİRİŞ)

Çelik malzemelerin ihtiyaca göre istenildiği gibi kesilip, bükülmesi ayrıca çoğu kaynak yöntemi kullanılarak kaynatılması çelik malzemeleri daha da değerli hale getirmektedir [1]. Özellikle yapı çelikleri kullanımı çelik yapılarda kiriş ve döşeme imalatında kullanılmasından dolayı 80'li yıllarla birlikte çok tercih edilen bir malzeme olmuştur [2,3]. Daha sonrasında bu çelikler ulaşım, tarım,

inşaat, savunma gibi birçok modern endüstri uygulamasında kaynakla birleştirilmiş olarak kullanılmaktadır [4].

S355 yapısal çeliğinin sahip olduğu kimyasal bileşimi ve mekanik özellikleri EN 10025-2 tanımlanmıştır. S355 çelikleri kaynaklanabilirlik açısından iyi özelliklere sahip bir malzeme çeşididir. Bundan dolayı da özellikle aşındırıcı ortamlar dahil olmak üzere birçok enerji, metalürji

ve makine imalatı uygulamasında sıklıkla kullanılmaktadır [5]. S235 yapısal çeliği alaşım elementlerinin az olmasından dolayı düşük maliyet gerektiren yapısal işlemlerde sıkça kullanılmaktadır [6]. Bu yapısal çelikler genellikle yük taşıyan, dinamik yüklemeler yapılan, kaynaklı olarak yorulma yüküne sahip malzemelerin imalatında kullanılmaktadır [7].

Yapısal çelikler çok farklı uygulamalarda sıkça kullanılan karbonlu çeliklerdir. Bu çeliklerin kaynaklı imalatlarında özellikle düşük maliyetlerinden dolayı genellikle MAG ve TIG kaynak yöntemleri kullanılmaktadır [5,8-10]. Bu çalışmada S355 ve S235 yapısal çelikleri MAG kaynak yöntemi kullanılarak birleştirilmiştir. MAG kaynak yöntemi koruyucu gaz atmosferi altında yapılan bir manuel metal ark kaynak yöntemidir [5,11,12]. MAG kaynak yönteminin birçok değişkeni vardır. Değişkenler kaynaklı malzemenin yapısı, kimyasal içeriği, metalürjik ve mekanik özellikleri üzerine önemli etkileri bulunmaktadır [13]. S355 ve S235 yapı çelikleri minimum akma dayanımı değerlerine göre sınıflandırılmıştır [6].

Bu çalışmada, S235 ve S355 yapı çeliklerinin MAG kaynak yöntemi kullanılarak, kendi aralarında ve birbirleri ile üç farklı kaynak parametresi kullanılarak birleştirilmesi araştırılmıştır. Deneysel çalışmanın amacı, özellikle güç trafoları kazan

imalatında kullanılan bu çeliklerin üretim endüstrisinde MAG kaynağı ile yapılacak olan birleştirmeleri için kaynak parametrelerini belirlemektir. Bu amaçla kaynak bölgeleri makro olarak, manyetik parçacık testi (MT) ve sıvı penetrant testiyle (PT) incelenmiştir. Ayrıca kaynak bölgelerine mikro yapısal olarak da optik mikroskop kullanılarak incelemeler yapılmıştır. Ancak, kusurlar olmadan kabul edilebilir bir kaynak sağlayan kaynak parametrelerini kullanmak, kaynağın kabul edilebilir mekanik özelliklere sahip olacağı anlamına gelmez. Bu sebeple ayrıca kaynaklı numunelerin dayanımlarının belirlenmesi amacıyla çekme testleri uygulanmıştır.

2. MATERIALS AND METHODS (MATERİYAL VE METOD)

Deneysel, 500x125x10 mm ebatlarında S235 ve S355 hazırlanan malzemeler, S235-S355, S235-S235 ve S355-S355 olacak şekilde gruplandırılmıştır. Hazırlanan malzemeler farklı kaynak parametreleri kullanılarak MAG kaynak yöntemi ile birleştirilmiştir. Kaynak işlemlerinde kullanılan S235, S355 ve EN 10204-3.1 ESAB özlü ilave tel (1.2 mm) malzemelerin mekanik özellikleri Tablo 1’de kimyasal içerikleri ise Tablo 2’de, verilmiştir. Deneysel çalışmalar 15 lt/dk gaz debisinde, %8 CO₂ + %92 Ar koruyucu gaz ortamında gerçekleştirilmiştir.

Tablo 1. Deneysel çalışmalarda kullanılan çelik levhaların ve özlü tellerin mekanik özellikleri [14]. (Mechanical properties of steel plates and cored wires used in experimental studies)

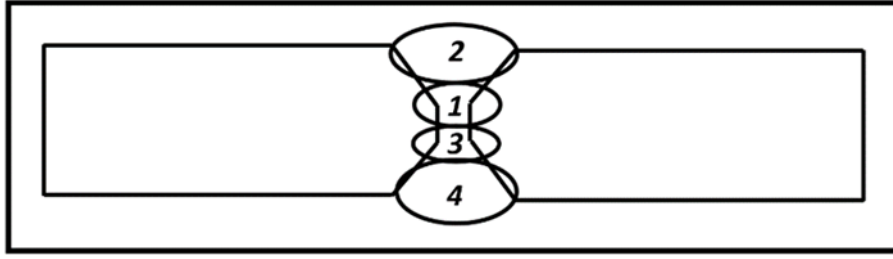
	Akma Dayanımı (N/mm ²)	Çekme Dayanımı (N/mm ²)	Uzama (%)
S235	235	360-510	24
S355	355	470-630	20
3Si-ESAB	470	560-600	26

Tablo 2. Deneysel çalışmalarda kullanılan çelik levhaların ve özlü tellerin kimyasal birleşimi [14]. (Chemical composition of steel plates and cored wires used in experimental studies)

Malzeme	C	Mn	P	S	Si	Cu	N	Mo	Cr	Ni	Fe
S235	0.17	1.40	0.035	0.035	0.40	0.55	0.012	-	-	-	Kalan
S355	0.24	1.60	0.035	0.035	0.55	0.55	0.012	-	-	-	Kalan
EN ISO 14341-A: G	0.08	1.47	0.014	0.013	0.87	0.04	-	0.01	0.02	0.02	Kalan

Kaynak yapılacak parçalara TS EN ISO 9692-1 standartlarına göre çift taraflı olacak şekilde V kaynak ağızları açılmıştır. Daha sonra kaynaklanacak parça çiftleri aralarında 2 mm

boşluk bırakılarak sabitlenmiştir. Hazırlanan parçalar Şekil 1’de gösterildiği gibi 4 pasoda PA pozisyonu kullanılarak birleştirilmiştir. Kullanılan kaynak parametreleri Tablo 3-5’de verilmiştir.



Şekil 1. Kaynak pasoları düzenlemesi şematik görüntüsü (Schematic view of the weld pass arrangement)

Tablo 3. 1 numaralı kaynak işleminde kullanılan kaynak parametreleri (Welding parameters used in welding process number 1)

Paso	Akım (A)	Gerilim (V)	Akım türü	Tel besleme hızı (mm/dk)	Hız (mm/sn)	Isı girdisi (KJ/mm)
1	150-170	16-17	DC (+)	4.1	120	0.017
2	220-240	23-24		8.8	70	0.050
3	150-170	16-17		4	120	0.020
4	220-240	23-24		7.3	80	0.050

Tablo 4. 2 numaralı kaynak işleminde kullanılan kaynak parametreleri (Welding parameters used in welding process number 2)

Paso	Akım (A)	Gerilim (V)	Akım türü	Tel besleme hızı (mm/dk)	Hız (mm/sn)	Isı girdisi (KJ/mm)
1	170-190	16-17	DC (+)	4.8	110	0.020
2	270-290	23-24		8.8	70	0.070
3	170-190	16-17		4.8	110	0.020
4	270-290	23-24		8.8	70	0.070

Tablo 5. 3 numaralı kaynak işleminde kullanılan kaynak parametreleri (Welding parameters used in welding process number 3)

Paso	Akım (A)	Gerilim (V)	Akım türü	Tel besleme hızı (mm/dk)	Hız (mm/sn)	Isı girdisi (KJ/mm)
1	180-200	18-19	DC (+)	5.2	80	0.035
2	340-360	27-29		12.2	55	0.140
3	180-200	18-19		5.2	80	0.035
4	330-350	27-29		12.5	55	0.140

Kaynak işlemlerinin ardından numunelere standartlara uygun olarak manyetik parçacık testi ve sıvı penetrant testi uygulanmıştır. Yapılan tüm testler NDT Level 2 seviyesinde uzmanlar tarafından gerçekleştirilmiş ve raporlanmıştır. Sıvı penetrant testlerinde, MARKER MR 311-R penetrant, MR 85 cleaner ve MR 70 developer kullanılmıştır. Testler 15 dakika bekleme süresi ve 15 dakika gelişme süresi kullanılarak yüzey temizleme üstüpuyle gerçekleştirilmiştir. Manyetik parçacık testleri MARKER MR 51 manyetik parçacık test cihazında MR 76 S manyetik toz süspansiyon ve MR 72 beyaz arka fon boya

kullanılarak yapılmıştır. Ayrıca kaynaklı parçaların kaynak mikroyapıları Nikon Epiphot 200 optik mikroskop kullanılarak incelenmiştir. Mikroyapı incelemeleri öncesi numunelere standart metalografik numune hazırlama işlemleri uygulanmıştır. Daha sonrasında numuneler %2 Nital (%98 saf su + %2 Nitrik Asit) karışımı ile dağlanmış ve mikroyapı incelemeleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca DIN EN ISO 6892-1 standartlarına uygun olarak hazırlanan çekme numunelerine TS EN ISO 4136 standartlarına uygun olarak 5 mm/dk çekme hızında, Shimadzu Ag-S1 marka test cihazı kullanılarak yapılmıştır.

3. BULGULAR (RESULTS)

3.1. Sıvı penetrant testi (PT) (Liquid penetrant test)

Kaynaklı numunelere sıvı penetrant testleri uygulanmış ve testler TS EN ISO 23277 standardına uygun olarak raporlandırılmıştır. Şekil 2’de sıvı penetrant testi rapor örneği (S235-S235 1 nolu kaynak akımı) görülmektedir. Şekil 3-5’te sıvı penetrant test numunelerinin görüntüleri verilmiştir.

Yalçın vd. [15] P265GH ve P355NH çeliklerini MAG kaynak yöntemi, Atılgan vd. [16] ASTM A36 çeliğini tozaltı ark kaynak yöntemini kullanarak birleştirmiştir. Yapılan iki çalışmada da birleştirmelere sıvı penetrant testleri uygulanmış incelemeler sonunda kaynaklı numunelerin yüzeylerinde standart dışı herhangi bir hataya rastlanmadığı bildirilmiştir.

ASTOR		ASTOR ENERJİ A.Ş. KAYNAK SIZDIRMAZLIK TEST VE KONTROL FORMU (WELD SEALING TEST AND CONTROL FORM)			
Müşteri / Customer		Uygulama Standartı / Execution Standard		TS EN ISO 23277	
Malzeme Tanımı / Material Description		Sıvı Penetrant / Penetrant		Sıvı Penetrant / Penetrant	
PENE TRASYON SÖZLEŞME KONTROLÜ / Control of Penetration		KAYNAK SIZDIRMAZLIK KONTROLÜ / Weld Sealing Control			
KONTROL TANIMI / Control of Description	KURULUVA SÖZLEŞME / Execution Contract				
	İLK KONTROL / First Control	YARAKAT SÖZLEŞME KONTROLÜ / Post-Execution Control			
	Parametre Uygulama Saati / Parameter App. Time	10 EK.			
	Bakım Saati / Wait Time	11 EK.			
Kontrol Yapılan Saati / Control of the Time	10 EK.				
Plasi Kayıt / The Number of Lot					
KAYNAK KONTROLÜ / Control of Welding		KAYNAK KONTROLÜ / Control of Welding		KAYNAK KONTROLÜ / Control of Welding	
KAYNAK KONTROLÜ / Control of Welding		KAYNAK KONTROLÜ / Control of Welding		KAYNAK KONTROLÜ / Control of Welding	
YANMA DEĞİŞİ / Undercut	<input type="checkbox"/> D07 / No <input checked="" type="checkbox"/> H008 / No	YERİNEZ NERFİZİYET / Lack of Penetration	<input type="checkbox"/> D07 / No <input checked="" type="checkbox"/> H008 / No	İNİ YEMERİ SİRİZE ÇATLAKLARI / IZAF Cracks	<input type="checkbox"/> D07 / No <input checked="" type="checkbox"/> H008 / No
GÖRÜNME / Penetration	<input type="checkbox"/> D07 / No <input checked="" type="checkbox"/> H008 / No	ANIZ NERFİZİYET / Excess Penetration	<input type="checkbox"/> D07 / No <input checked="" type="checkbox"/> H008 / No	KAYNAK KALINLIĞI VE GENİŞLİĞİ / Weld Thickness and Height	<input type="checkbox"/> D07 / No <input checked="" type="checkbox"/> H008 / No
KAYNAK KESİMİ / Non-Fill Area	<input type="checkbox"/> D07 / No <input checked="" type="checkbox"/> H008 / No	KAYNAK METAL ÇATLAKLARI / IZAF Metal Cracks	<input type="checkbox"/> D07 / No <input checked="" type="checkbox"/> H008 / No	KAYNAK KALINLIĞI VE GENİŞLİĞİ / Weld Thickness and Height	<input type="checkbox"/> D07 / No <input checked="" type="checkbox"/> H008 / No
NOT: Kaynak hataları için ilgili standartlara göre ölçülen ölçüm hatası kontrol aşamasında olup olmadığı belirlenip kontrol edilmiştir. (TS EN ISO 23277, TS EN 4320-1, s.3.)					
KONTROL EDEN - İMZA / Control / Signature		ONAY - İMZA / Approval / Signature		SONUÇ / Result	
SELANATTIN GÖRÜM DİYARDI (NDTC/2021-202)		SELANATTIN GÖRÜM DİYARDI (NDTC/2021-202)		<input checked="" type="checkbox"/> İYİ / Acceptable <input type="checkbox"/> DÜŞÜK / Rejected <input type="checkbox"/> İZAF / Rejected	

Şekil 2. Sıvı penetrant testi rapor örneği (Liquid penetrant test report example)



Şekil 3. S235-S235 1, 2 ve 3 numaralı parametreler kullanılan numunenin PT görüntüsü (S235-S235 PT image of the sample using parameters number 1, 2 and 3).



Şekil 4. S235-S355 1, 2 ve 3 numaralı parametreler kullanılan numunenin PT görüntüsü (S235-S355 PT image of the sample using parameters number 1, 2 and 3).




Şekil 5. S355-S355 1, 2 ve 3 numaralı parametreler kullanılan numunenin PT görüntüsü (S355-S355 PT image of the sample using parameters number 1, 2 and 3).

3.2. Manyetik parçacık testi (MT) (Magnetic particle test)

Kaynaklı numunelere manyetik parçacık testleri uygulanmış ve testler TS EN ISO 9934 standardına

uygun olarak raporlandırılmıştır. Şekil 6'da manyetik parçacık testi rapor örneği (S235-S235 1 nolu kaynak akımı) görülmektedir. Şekil 7-9'da manyetik parçacık test numunelerinin görüntüleri verilmiştir.

ASTOR		ASTOR ENERJİ A.Ş. KAYNAK MANYETİK TEST VE KONTROL FORMU (WELD MAGNETIC TEST AND CONTROL FORM)			
Alınan / Customer	-	Değerlendirme Standartı / Assessment Standard	EN 50160 EN 50161		Rapor No-Rapor Tarihi / Report No-Report Date
Alınan Form / Material Description	S235-S235	İzlemeler / Specifications	-		Form No / Form No
MANYETİK PARÇACIK MEYDANI KONTROL Control after magnetic particle testing			KAYNAK GİZLİMLİK KONTROLÜ Weld Impermeability Test		
KONTROL TARİHİ Control of Date	KUTULAMA İZLEMELERİ After Scratching				
	İLK KONTROL First Control	YENİDEN GÖRÜLME KONTROLÜ Re-inspection Control			
Adaptör Parametre Çıplama Testi Magnetic particle application test	1 DN				
Baklava İzlemi Weld Test					
Control Uygulama Testi Control after Test	1 DN				
Yük İzlemi The Amount of Loading					
KAYNAK KONTROLÜ Control of Welding		Kaynak İzlemi var mı ? Is there a welding defect?	KAYNAK KONTROLÜ Control of Welding	Kaynak İzlemi var mı ? Is there a welding defect?	KAYNAK KONTROLÜ Control of Welding
YANMA GÜÇÜ Underburn	<input type="checkbox"/> EYİT / No <input checked="" type="checkbox"/> HAYIR / Yes	YETERLİ NEFİSİYET Lack of Penetration	<input type="checkbox"/> EYİT / No <input checked="" type="checkbox"/> HAYIR / Yes	DE YETERLİ BÖLGE KATLANLARI JMF Uzunluk	<input type="checkbox"/> EYİT / No <input checked="" type="checkbox"/> HAYIR / Yes
GÖRÜNME Porosity	<input type="checkbox"/> EYİT / No <input checked="" type="checkbox"/> HAYIR / Yes	AKIKI NEFİSİYET Excess Penetration	<input type="checkbox"/> EYİT / No <input checked="" type="checkbox"/> HAYIR / Yes	KAYNAK KALINLIĞI VE GENİRLİĞİ Weld Thickness and Width	<input type="checkbox"/> EYİT / No <input checked="" type="checkbox"/> HAYIR / Yes
KAYNAK KALINLIĞI Weld Thickness	<input type="checkbox"/> EYİT / No <input checked="" type="checkbox"/> HAYIR / Yes	KAYNAK METALLERİ Weld Metal Cracks	<input type="checkbox"/> EYİT / No <input checked="" type="checkbox"/> HAYIR / Yes	KAYNAK BAĞLAMA BİTİRLERİ Flare Bevel Points	<input type="checkbox"/> EYİT / No <input checked="" type="checkbox"/> HAYIR / Yes
NOT: Kaynak izlemi için uygun maddelerle (örneğin alüminyum) test yapıldığından sonuçlar değerlendirilmelidir. (EN 50160 EN 50161, EN 50162 EN 50163)					
KONTROL EDEN - İMZA Control - Signature		ONAY - İMZA Approval - Signature		SONUÇ / Result	
SELAMETTİN GÖKEM DİYARCI (NOTC/2023-201)		SELAMETTİN GÖKEM DİYARCI (NOTC/2023-201)		<input checked="" type="checkbox"/> KAYIRLI / Acceptance <input type="checkbox"/> ÇUKURLUK / Rejection <input type="checkbox"/> HESAP / Partial	

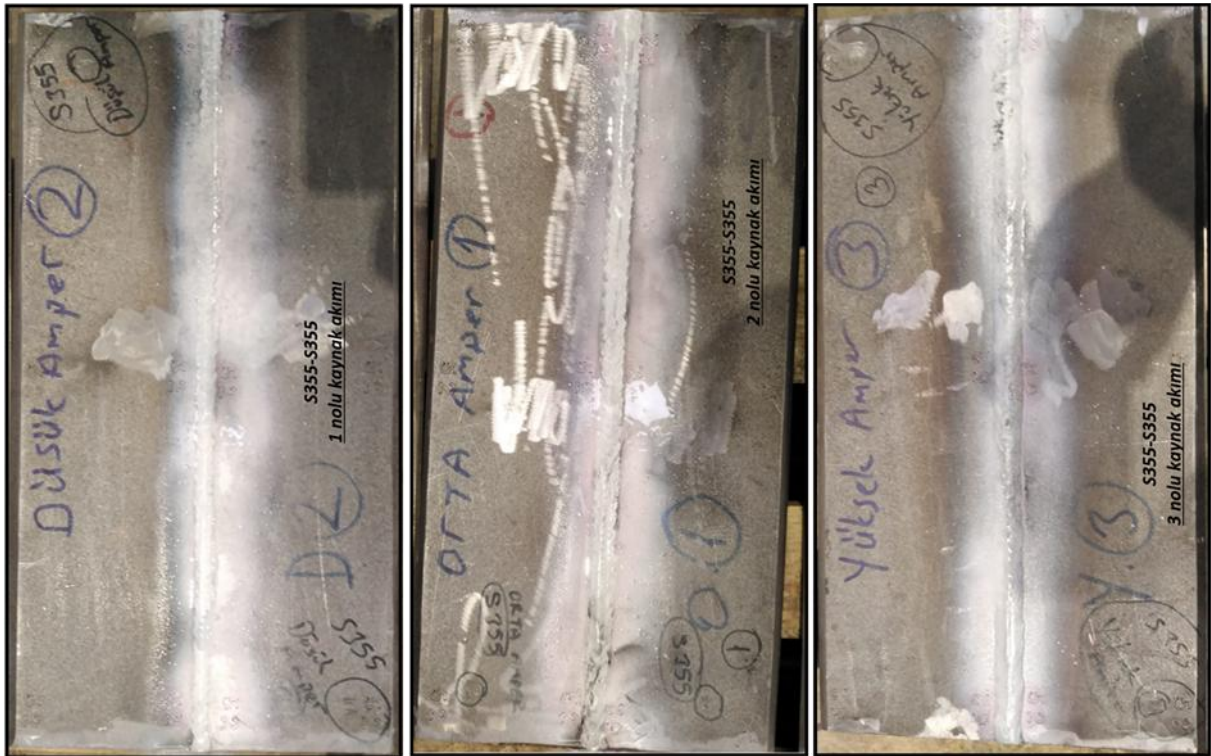
Şekil 6. Manyetik parçacık testi rapor örneği (Magnetic particle testing report example)



Şekil 7. S235-S235 1, 2 ve 3 numaralı parametreler kullanılan numunenin MT görüntüsü (S235-S235 MT image of the sample using parameters number 1, 2 and 3)



Şekil 8. S235-S355 1, 2 ve 3 numaralı parametreler kullanılan numunenin MT görüntüsü (S235-S355 MT image of the sample using parameters number 1, 2 and 3)



Şekil 9. S355-S355 1, 2 ve 3 numaralı parametreler kullanılan numunenin MT görüntüsü (S355-S355 MT image of the sample using parameters number 1, 2 and 3)

Kaynaklı numunelere uygulanan manyetik parçacık testleri sonrasında hazırlanan uzman raporlarında kaynak yüzeylerinde görülebilen herhangi bir hata tespit edilmediği ve kaynakların standartlara uygun oldukları belirtilmiştir. Öntürk, [17] S355J2N yapı

çeliklerini MAG kaynak yöntemi kullanarak birleştirmiştir. Yapılan birleştirmelere manyetik parçacık testleri uygulanmış, incelemeler sonunda kaynaklı numunelerin yüzeylerinde standart dışı herhangi bir hataya rastlanmadığı bildirilmiştir.

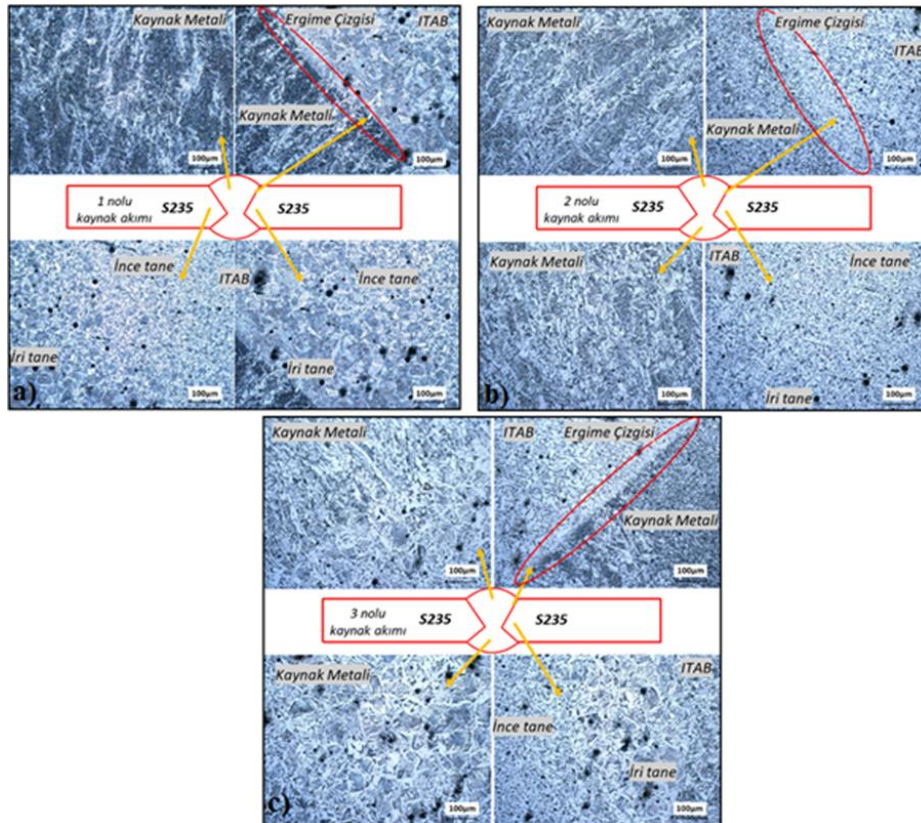
3.3. Mikroyapı incelemeleri (Microstructure investigations)

MAG kaynak yöntemi kullanılarak birleştirilen S235 ve S355 yapı çeliklerinin kaynak bölgelerine ait mikroyapı resimleri Şekil 10-12'de verilmiştir.

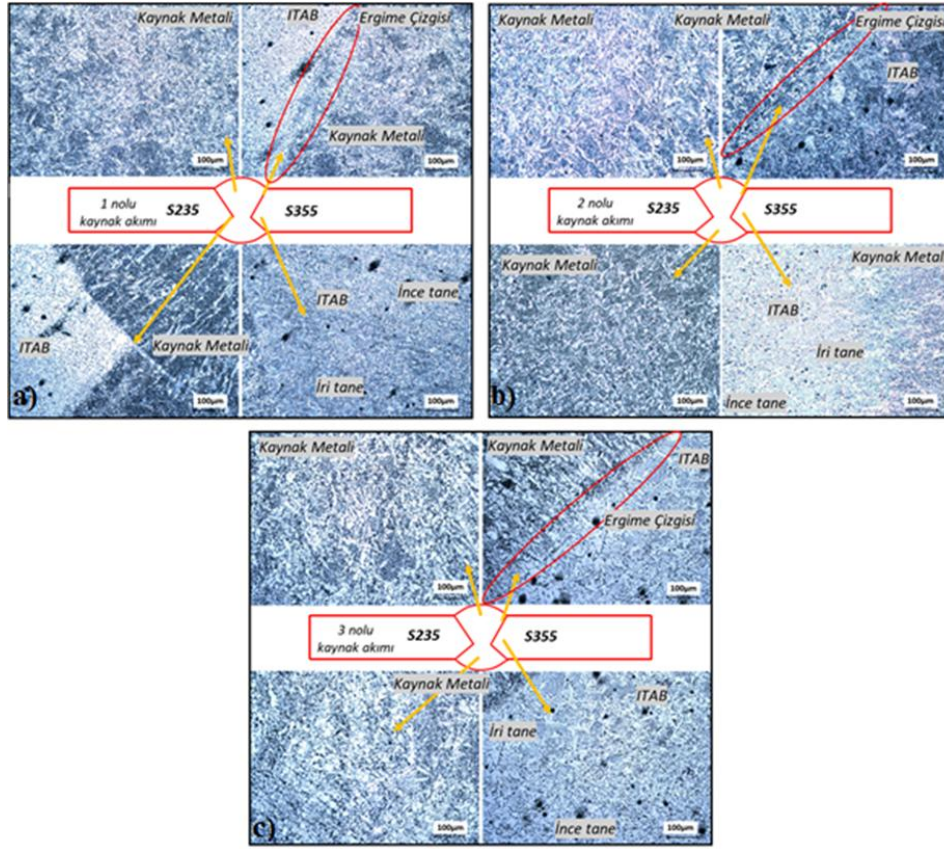
MAG kaynak yöntemi kullanılarak birleştirilen S235 ve S355 yapı çeliklerine ait numunelerin mikroyapı görüntülerine yapılan incelemelerde, kaynak bölgelerinde tane yapılarında irileşme olduğu görülmüştür. Tanelerin dendiritik kollar oluşturarak ergime çizgisinden kaynak merkezine doğru yönlendiği belirlenmiştir. Ayrıca kaynak metalinde asiküler ferrit oluşumu tespit edilmiştir. Numunelerin ITAB'larının ergime sınırına yakın bölümlerindeki tanelerde irileşme meydana geldiği (S235 ve S355 ana malzemelere göre), ITAB'larının ana malzemeye yakın bölümlerindeki tanelerde ise incelleme meydana geldiği tespit edilmiştir. S235-S355 malzeme çiftlerinde oluşan kaynaklı bölgelerin numunelerde S235 çeliği tarafındaki ITAB'ın tanelerinin S355 çeliği tarafındaki ITAB'ın tanelerine göre daha küçük olduğu belirlenmiştir. Bunların yanı sıra bütün

kaynaklı numenlerde kaynak metalinden ITAB'a geçişi ve oluşan ergime çizgileri net olarak tespit edilmiştir. Ayrıca akım değerlerindeki artışla birlikte tane boyutlarında gözle görülür bir irileşmenin olduğu belirlenmiştir.

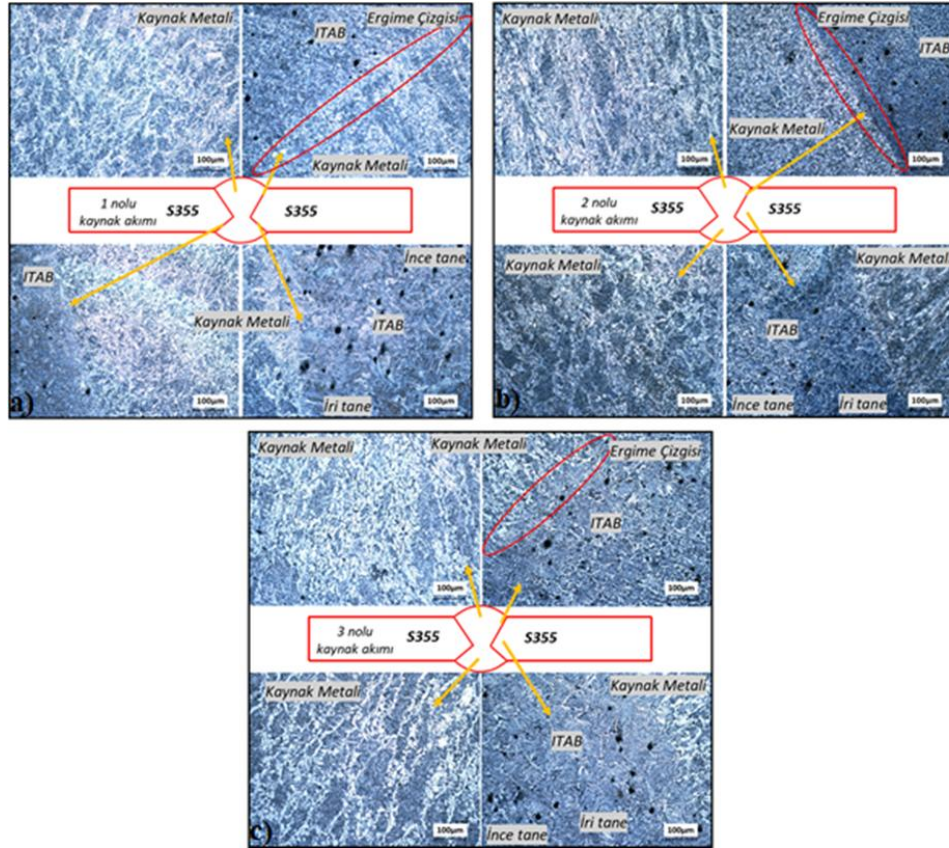
Kaya [3] S355 ve S355 çelikleri MAG kaynak yönteminde özlü tel elektrot kullanarak birleştirmiştir. Kaynaklı numunelere gerçekleştirdiği mikroyapı incelemelerinde, kaynak metaline komşu bölgelerde tane irileşmesinin meydana geldiği ergime sınırının net olarak belirlendiği ve ayrıca ergime sınırından kaynağın merkezine doğru dendiritik kollara oluştuğu bildirmiştir. Ayrıca kaynak metali içinde asiküler ferrit oluşumu olduğunu tespit etmiştir. Son olarak S235 ve S355 malzemelerin kaynaklandığı uygulamada S235 çeliğe ait ITAB'ın tanelerinin S355 çeliğin ITAB'nın tanelerine kıyasla küçük olduğunu bildirmiştir.



Şekil 10. S235-S235 numunelerin mikroyapı görüntüleri a) 1 numaralı parametreler b) 2 numaralı parametreler c) 3 numaralı parametreler (Microstructure images of S235-S235 samples a) parameters number 1 b) parameters number 2 c) parameters number 3)



Şekil 11. S235-S355 numunelerin mikroyapı görüntüleri a) 1 numaralı parametreler b) 2 numaralı parametreler c) 3 numaralı parametreler (Microstructure images of S235-S355 samples a) parameters number 1 b) parameters number 2 c) parameters number 3)



Şekil 12. S355-S355 numunelerin mikroyapı görüntüleri a) 1 numaralı parametreler b) 2 numaralı parametreler c) 3 numaralı parametreler (Microstructure images of S355-S355 samples a) parameters number 1 b) parameters number 2 c) parameters number 3)

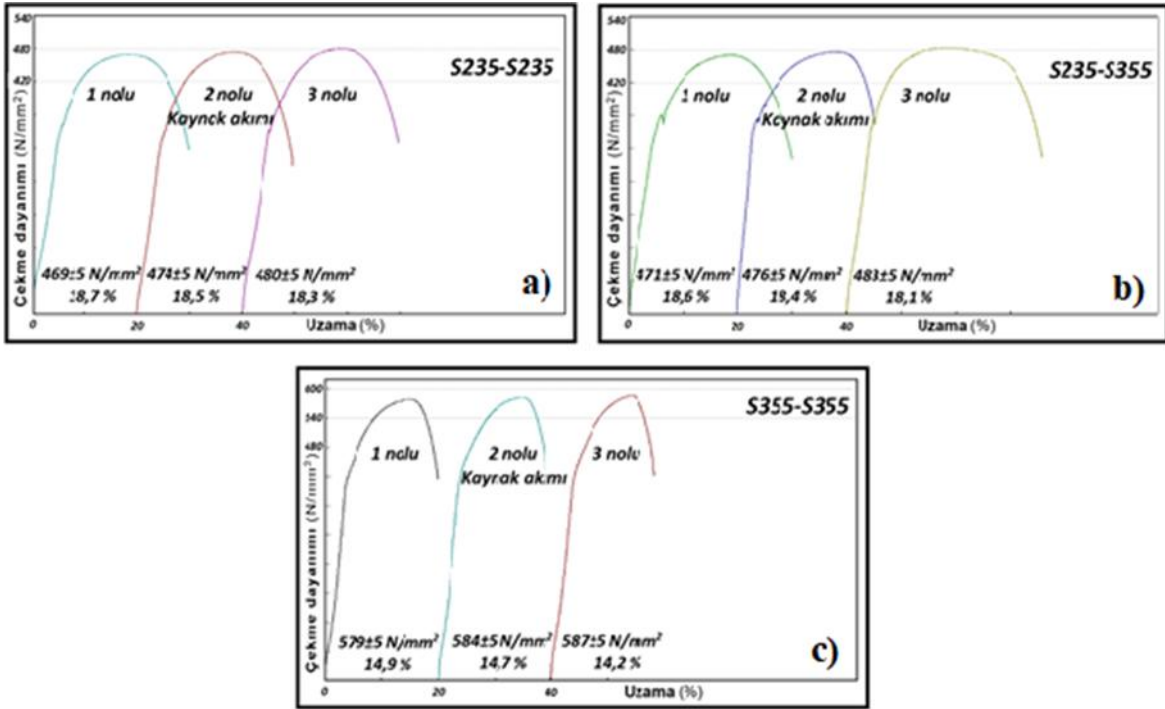
3.4. Çekme testi (Tensile test)

Yapılan çekme testleri sonrasında S235-S235, S235-S355 ve S355-S355 malzeme çiftlerine ait çekme grafikleri Şekil 13'de, sonuçlar ise Tablo 6'da verilmiştir. Ayrıca çekme testleri sonrasında oluşan kopma görüntüleri de Şekil 14'te görülmektedir. S235-S235 kaynaklı malzeme çiftlerinin çekme dayanımlarının sonuçları incelendiğinde, en yüksek çekme dayanımı değerinin 3 numaralı kaynak akım değeri kullanılarak birleştirilen numuneden (480 ± 5 N/mm²) elde edilmiştir. S355-S355 kaynaklı malzeme çiftlerinin çekme sonuçları incelendiğinde, en yüksek çekme dayanımı

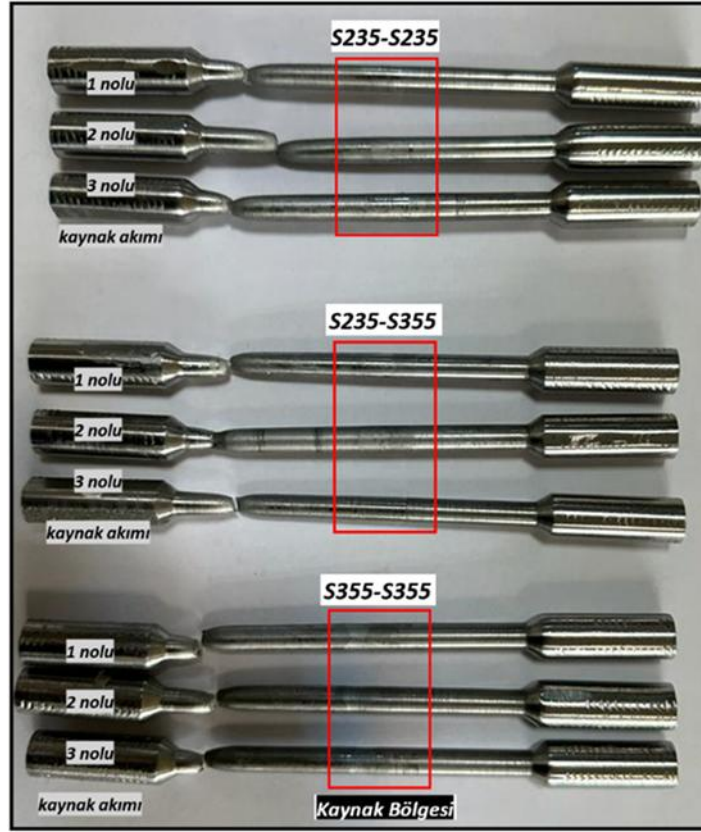
değerinin 3 numaralı kaynak akım değeri kullanılarak birleştirilen numuneden (587 ± 5 N/mm²) elde edilmiştir. S235-S355 kaynaklı malzeme çiftlerinin çekme sonuçları incelendiğinde, en yüksek çekme dayanımı değerinin 3 numaralı kaynak akım değeri kullanılarak birleştirilen numuneden (483 ± 5 N/mm²) elde edilmiştir. Bu sonuçlar göstermektedir ki en yüksek sertlik değeri 3 numaralı kaynak akım değeri kullanılarak birleştirilen S355-S355 malzeme çiftinde elde edilmiştir. Ayrıca çekme dayanımı sonuçları incelendiğinde tüm malzeme çiftleri için 3 numaralı akım değerinde en yüksek sertlik değerleri elde edilirken onu sırasıyla 2 ve 1 numaralı kaynak akım değerleri takip etmektedir.

Tablo 6. Çekme test sonuçları a) S235-S235 b) S235-S355 c) S355-S355 (Tensile test results a) S235-S235 b) S235-S355 c) S355-S355)

	Çekme Dayanımı (N/mm ²)	Uzama (%)
S235JR-S235JR (1 no)	469	18.7
S235JR-S235JR (2 no)	474	18.5
S235JR-S235JR (3 no)	480	18.3
S235JR-S355JR (1 no)	471	18.6
S235JR-S355JR (2 no)	476	18.4
S235JR-S355JR (3 no)	483	18.1
S355JR-S355JR (1 no)	579	14.9
S355JR-S355JR (2 no)	584	14.7
S355JR-S355JR (3 no)	587	14.2



Şekil 13. Çekme testi grafikleri a) S235-S235 b) S235-S355 c) S355-S355 (Tensile test graphs a) S235-S235 b) S235-S355 c) S355-S355)



Şekil 14. Çekme testleri sonrasında oluşan kopma görüntüleri (Rupture images after tensile tests)

Çekme dayanımları ve çekme sonrası oluşan kopma yüzeyleri birlikte incelendiğinde tüm birleştirmelerin ana malzeme tarafından boyun verdikleri ve kopmaların sünek olarak ana malzemelerde meydana geldiği görülmektedir. Ayrıca çekme işlemi sırasında numunelerin kaynak bölgelerinde herhangi bir hasar oluşmadığı da gözlemlenmiştir. Yapılan çekme testleri S235-S235 ve S235-S355 kaynaklı malzeme çiftlerinin çekme dayanım değerlerinin birbirine yakın olduğunu göstermiştir. Bu durum birleştirmelerde kopmanın S235 ana malzemede gerçekleşmesinden kaynaklanmaktadır. Ayrıca çekme testleri sonrasında elde edilen çekme dayanımı sonuçları Tablo 2’de verilen S235 ve S355 malzemelere ait çekme dayanımları ile karşılaştırıldığında kaynaklı birleştirmelerin kaynaklı malzemelerden daha yüksek yüksek çekme dayanımına sahip oldukları görülmektedir.

Çekme testleri sonrasında elde edilen % uzaması değerleri incelendiğinde S235-S235 kaynaklı malzeme çiftlerinin % uzama değerleri incelendiğinde, en yüksek % uzaması değerinin 1 numaralı kaynak akım değeri kullanılarak birleştirilen numuneden (%18,7) elde edilmiştir. S355-S355 kaynaklı malzeme çiftlerinin % uzaması değerleri incelendiğinde, en yüksek % uzaması değerinin 1 numaralı kaynak akım değeri kullanılarak birleştirilen numuneden (%14,9) elde

edilmiştir. S235-S355 kaynaklı malzeme çiftlerinin % uzaması değerleri incelendiğinde, en yüksek % uzaması değerinin 1 numaralı kaynak akım değeri kullanılarak birleştirilen numuneden (%18,6) elde edilmiştir. Tüm kaynaklı malzeme çiftlerinde en yüksek % uzama değerleri 1 numaralı kaynak akım değeri kullanılarak yapılan birleştirmelerden elde edilmiştir. Onu sırasıyla 2 ve 3 numaralı kaynak akım değerleri kullanılarak yapılan birleştirmeler takip etmiştir. Sonuçlar incelendiğinde kaynak akım değerleri arttıkça % uzama değerlerinin azaldığı görülmektedir. Bu azalmanın kaynak bölgesindeki sertlik artışı ile ilgili olduğu düşünülmektedir. Ayrıca çekme testleri sonrasında elde edilen % uzama değerleri Tablo 2’de verilen S235 ve S355 malzemelere ait % uzama değerleri ile karşılaştırıldığında kaynaklı birleştirmelerin % uzama değerlerinde bir azalma meydana geldiği görülmektedir.

Atılğan [18] ASTM A36 çelikleri tozaltı kaynak yöntemi kullanarak birleştirmiş mekanik özelliklerini incelemiştir. Gerçekleştirilen çekme testlerinde kaynaklı numunelerin % uzama değerlerinin kaynaklı ana malzemeye göre azaldığını belirtmiştir. Bu azalmanın kaynak bölgesindeki ısı girdisinin sebep olduğu sertlik artışından kaynaklandığını bildirmiştir. Ünlü vd [19], MIG-MAG kaynak yöntemi ile S235JR çeliğini MIG-MAG kaynak yöntemini kullanarak

farklı amper değerlerinde birleştirdiği çalışmasıyla, Yalçın [20] P355NH ve P265GH çeliklerini MAG kaynak yöntemi kullanarak birleştirdiği çalışmada uygulanan çekme testlerinin hepsinde kopmaların esas metalde gerçekleştiği belirtilmiştir.

4. CONCLUSIONS (SONUÇLAR)

- Uygulanan sıvı penetrant ve manyetik parçacık testleri sonucunda, S235 ve S355 yapı çeliklerine belirlenen kaynak parametreleri uygulanarak MAG kaynak yöntemi kullanılarak üretilen kaynaklı numunelerin yüzeylerinde herhangi bir kaynak hatasının oluşmadığı tespit edilmiştir.
- Uygulanan mikroyapı incelemeleri sonucunda, kaynak bölgelerinde tanelerin irileştiği, tanelerde dendiritik kollar oluşturarak ergime çizgisinden kaynak merkezine doğru bir yönelme olduğu ve kaynak metalinde asiküler ferrit oluşumu olduğu tespit edilmiştir. ITAB'ların ergime sınırına yakın olan bölümlerinde tane irileşmesinin olduğu, ana malzemeye yakın olana bölümlerinde ise ince yapıya sahip tanelerin oluştuğu belirlenmiştir. S235-S355 malzeme çiftine yapılan kaynak işlemlerinde S235 çeliği tarafındaki ITAB'ın tanelerinin S235 çeliği tarafındaki ITAB'ın tanelerine göre küçük olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca tüm numunelerde kaynak metali ITAB geçişi ve ergime çizgisinin belirgin olarak görüldüğü tespit edilmiştir. Bunlara ek olarak akım değerlerindeki artışla birlikte tane boyutunun da irileştiği belirlenmiştir.
- Yapılan çekme testlerinde boyun verme ve kopma ana malzemedan gerçekleşmiştir. Kopma sünek olarak meydana gelmiştir. Ayrıca çekme numunelerinin kaynak bölgelerinde herhangi bir hasar oluşmamıştır. En yüksek çekme dayanımı (587 ± 5 N/mm²) 3 numaralı kaynak akım değeri kullanılarak birleştirilen S355-S355 malzeme çiftinde elde edilmiştir.

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)

Ferhat YALÇIN: Deneyleeri yapmıştır.
Perofrmed the experiments.

Mehmet Serkan YILDIRIM: Sonuçlarını analiz etmiş ve makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

He analyzed the results and completed the writing process of the article.

Yakup KAYA: Sonuçlarını analiz etmiştir.

He analyzed 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] Uslu G., İnanoğlu A., “Kalın S235JR Malzemelerinin Mekanik Özelliklerine Kök Boşluklu ve Boşluksuz Kaynağın Etkisi”, İmalat Teknolojileri ve Uygulamaları, 4(2):59-71, (2023).
- [2] Şık A., “MIG/MAG kaynak yöntemi ile birleştirilen çelik malzemelerde ilave tel türleri ve koruyucu gaz karışımlarının eğmeli yorulma ömürlerine etkilerinin araştırılması”, Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 22 (4): 769-777, (2007).
- [3] Kaya Y., “S235JR ile S355JR yapı çeliklerinin özlü tel elektrotla mag kaynak yöntemiyle birleştirilebilirliğinin araştırılması”, Politeknik Dergisi, 21(3): 597-602, (2018).
- [4] Öztürk T. Z., Pehlivan A., K., “Investigation of Mechanical Properties of Welding Electrodes Used For High Strength Low Alloy Steels”, Journal of Naval Sciences and Engineering, 16(2):171-192, 2020.
- [5] Irsel G., “Study of the microstructure and mechanical property relationships of shielded metal arc and TIG welded S235JR steel joints”, Materials Science & Engineering A, 830, (2022). <https://doi.org/10.1016/j.msea.2021.142320>.
- [6] Başyığıt B. A., Solak B., “The Effects of Flux Type on Mechanical and Microstructural Properties of S235 Structural Steel by Submerged Arc Welding”, El-Cezerî Fen ve Mühendislik Dergisi, 7(2): 659-666, 2020. DOI :10.31202/ecjse.688582.

- [7] Miturska I., Rudawska A., “Structural factors influence on strength properties of S235JR steel welded joints”, Journal of Physics: Conference Series, 1736, 2021. doi:10.1088/1742-6596/1736/1/012004
- [8] W. Guo, S. Dong, W. Guo, J.A. Francis, L. Li, Microstructure and mechanical characteristics of a laser welded joint in SA508 nuclear pressure vessel steel, Mater. Sci. Eng. 625 (2015) 65–80, <https://doi.org/10.1016/j.msea.2014.11.056>
- [9] Aksöz, S., Ada, H. ve Özer, A., “Microstructure and Mechanical Properties of API 5L X70 Grade Steel Pipes Produced by Submerged Arc Welding Method”, GU J Sci, Part C, 55:(1), 55-64, 2017.
- [10] Aksöz, S., Ada, H., Fındık, T., Çetinkaya, C., Bostan, B. ve Candan İ., “API 5L X65 çeliklerinin elektrik ark kaynak yöntemi ile birleştirilmesinde, kaynak işleminin mikroyapı ve mekanik özelliklere etkisinin incelenmesi”, El-Cezeri 4:(1), 72-81, 2017.
- [11] M.K. Agrawal, R.P. Singh, Materials Today : proceedings Effect of external magnetic field on impact strength and hardness of weld of shielded metal arc welding process, Mater. Today Proc. (2021), <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.1219>.
- [12] Ada, H., Aksöz, S., Fındık, T., Çetinkaya, C., Bostan, B. ve Candan İ., “API 5L X65 çeliklerinin MAG kaynak yöntemi ile birleştirilmesinde, kaynak işleminin mikroyapı ve mekanik özelliklere etkisinin incelenmesi”, Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi 31:(ÖS1), 1-10, 2016.
- [13] Kolhe P., K., Teshome F., Aragaw Mulu A., “Effects of Shielded Metal Arc Welding Process Parameters on Mechanical Properties of S355JR Mild Steel”, Advances of Science and Technology, 308:525–536, 2020. https://doi.org/10.1007/978-3-030-43690-2_38.
- [14] Gültöplayan, H., “Güç Trafoları Kazan İmalatında Kullanılan Sacların MAG Kaynak Yöntemi İle Kaynaklanabilirliğinin Araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 1-97, 2023.
- [15] Yalçın F., Yıldırım M. S. ve Kaya Y., “Basınçlı kap çeliklerin MAG kaynak yöntemi kullanılarak birleştirilmesi ve mekanik özelliklerinin araştırılması”, Politeknik Dergisi, 27:(5), 1889 – 1901, 2024. <https://doi.org/10.2339/politeknik.1385257>
- [16] Atılğan Y., Yıldırım M. S. ve Kaya Y., “Depolama Tanklarının İmalatında Farklı Amperlerde Tozaltı Kaynağının Uygulanması ve Kaynak Bölgesinin İncelenmesi”, Politeknik Dergisi, *(*) : *, (*).
- [17] Öntürk N., Özkan E., “Kaynak Uygulaması ile S355J2N Yapı Çeliğinde Artık Gerilme Oluşturulması ve Mekanik Özelliklere Etkisi”, European Journal of Engineering and Applied Sciences, 1(1):39-42, 2018
- [18] Atılğan, Y., “Depolama tankı imalatında tozaltı ark kaynağı uygulaması ve kaynak bölgesinin incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 1-88, 2022.
- [19] Ünlü, B. S., Yılmaz, S. S., Uzkuş, M., “MIG/MAG kaynağı ile farklı akım şiddetlerinde birleştirilmiş Fe 37 çeliğinin kaynak bölgesinin mekanik özellikleri”, 6. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS’11), Elazığ, 356-359, 2011.
- [20] Yalçın, F., “Basınçlı kap çeliklerinin MAG kaynak yöntemi ile birleştirilmesi ve tahribatsız/tahribatlı muayenesi”, Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 1-80, 2023.

Evaluating the Trade-Off Between Energy Efficiency and Energy Saving in Spray Drying Operations

Gülşah KARACA DOLGUN¹ * 

¹Muğla Sıtkı Koçman University, Technology Faculty, Department of Energy Systems Engineering, 48000, Menteşe/Muğla

Article Info

Research article
Received: 07/10/2024
Revision: 17/12/2024
Accepted: 18/12/2024

Keywords

Spray dryer
Energy efficiency
Energy saving
Milk powder

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 07/10/2024
Düzeltilme: 17/12/2024
Kabul: 18/12/2024

Anahtar Kelimeler

Püskürtmeli kurutucu
Enerji verimliliği
Enerji tasarrufu
Süt tozu

Graphical/Tabular Abstract (Grafik Özet)

In this study, the relation between energy recovery and energy efficiency for milk powder production in spray dryer was investigated. / Bu çalışmada spray kurutucuda süt tozu üretimi için enerji geri kazanımı ve enerji verimliliği arasındaki ilişki incelenmiştir.

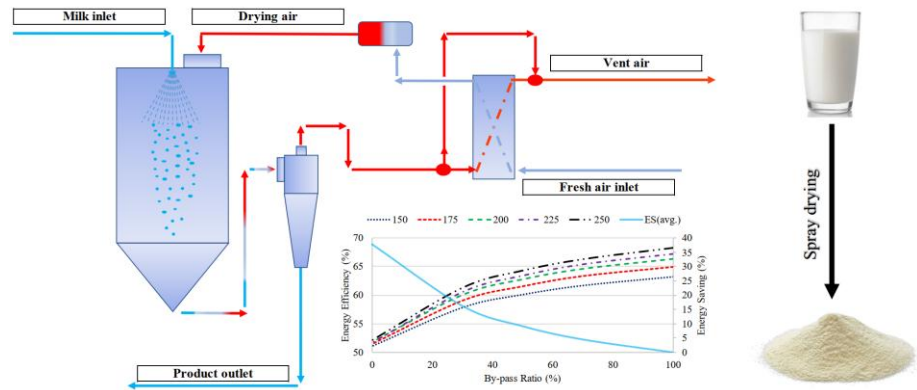


Figure A: Spray dryer system for milk powder production / Şekil A: Süt tozu üretimi için püskürtmeli kurutucu sistemi

Highlights (Önemli noktalar)

- Using energy recovery to reduce energy consumption in spray dryer / Püskürtmeli kurutucuda enerji tüketiminin azaltılması için enerji geri kazanımının kullanılması
- Analysis of factors affecting milk powder production in spray dryer / Püskürtmeli kurutucuda süt tozu üretimini etkileyen faktörlerin incelenmesi
- Examining the relation between energy saving and energy efficiency / Enerji tasarrufu ve enerji verimliliği arasındaki ilişkinin incelenmesi

Aim (Amaç): This study aims to explore the integration of heat recovery systems with proportional by-pass application in spray drying processes, examining their applicability for increasing energy efficiency. / Bu çalışmanın amacı, püskürtmeli kurutma proseslerinde orantılı by-pass uygulaması ile ısı geri kazanım sistemlerinin entegrasyonunu araştırarak enerji verimliliğini artırmada uygulanabilirliğini incelemektir.

Originality (Özgünlük): In spray dryers, three key parameters significantly impact system performance: drying air flow rate, drying air temperature, and product flow rate. This study simplified the three-variable equation by reducing two variables (drying air flow rate and temperature) to a linear constant coefficient. This approach facilitated the simultaneous examination of all three input parameters and allowed for an understanding of their individual effects on system efficiency. / Püskürtmeli kurutucularda, üç temel parametre sistem performansını önemli ölçüde etkiler: kurutma hava debisi, kurutma havası sıcaklığı ve ürün debisi. Bu çalışma, iki değişkeni (kurutma hava debisi ve sıcaklık) doğrusal bir sabit katsayıya indirgeyerek üç değişkenli denklemi basitleştirdi. Bu yaklaşım, üç girdi parametresinin eş zamanlı olarak incelenmesini kolaylaştırdı ve bunların sistem verimliliği üzerindeki bireysel etkilerinin anlaşılmasına olanak sağladı.

Results (Bulgular): At a 30% bypass ratio, energy efficiency and energy savings were found to be approximately 60% and 16%, respectively. / %30 bypass oranında enerji verimliliği ve enerji tasarrufu sırasıyla yaklaşık %60 ve %16 bulunmuştur.

Conclusion (Sonuç): The optimal bypass ratio was found 30%. At this ratio, energy efficiency decreased by 5%, while energy savings increased by approximately 16%. / Optimum bypass oranı %30 olarak bulundu. Bu oranda enerji verimliliği %5 azalırken, enerji tasarrufu yaklaşık %16 arttı.



Evaluating the Trade-Off Between Energy Efficiency and Energy Saving in Spray Drying Operations

Gülşah KARACA DOLGUN¹

¹Muğla Sıtkı Koçman University, Technology Faculty, Department of Energy Systems Engineering, 48000, Menteşe/Muğla

Article Info

Research article
Received: 07/10/2024
Revision: 17/12/2024
Accepted: 18/12/2024

Keywords

Spray dryer
Energy efficiency
Energy saving
Milk powder

Abstract

In this study, modeling simulations were employed to analyze the effects of inlet drying air flow rate and temperature, product flow rate, and heat recovery ratio in a spray dryer. The energy efficiency, energy savings, and final product outlet temperature were investigated. As the heat recovery ratio increased, total energy savings improved, though energy efficiency declined at a slower rate compared to energy savings. The modelling study was conducted with five different bypass ratios: 100%, 70%, 50%, 30%, and 0%, indicating that the optimal bypass ratio was 30%. At this ratio, energy efficiency decreased by 5%, while energy savings increased by approximately 16%. Additionally, at lower bypass ratios, the product outlet temperature rose significantly. To maintain product quality, it was found that the maximum acceptable temperature of 60°C could be achieved at bypass ratios of 30% or higher.

Sprey Kurutma İşlemlerinde Enerji Verimliliği ile Enerji Tasarrufu Arasındaki Dengenin Değerlendirilmesi

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 07/10/2024
Düzeltilme: 17/12/2024
Kabul: 18/12/2024

Anahtar Kelimeler

Püskürtmeli kurutucu
Enerji verimliliği
Enerji tasarrufu
Süt tozu

Öz

Bu çalışmada, bir sprej kurutucuda giriş kurutma havası debisi ve sıcaklığı, ürün debisi ve ısı geri kazanım oranının etkilerini analiz etmek için modelleme simülasyonları kullanılmıştır. Enerji verimliliği, enerji tasarrufları ve son ürün çıkış sıcaklığı incelenmiştir. Isı geri kazanım oranı arttıkça, toplam enerji tasarrufu iyileşmiş, ancak enerji verimliliği enerji tasarruflarına kıyasla daha yavaş bir oranda düşmüştür. Beş farklı by-pass oranıyla (100%, 70%, 50%, 30% ve 0%) gerçekleştirilen modelleme çalışması, optimum by-pass oranının %30 olduğunu göstermiştir. Bu oranda enerji verimliliği %5 azalırken, enerji tasarrufu yaklaşık %16 artmıştır. Ayrıca, daha düşük by-pass oranlarında ürün çıkış sıcaklığı önemli ölçüde artmıştır. Ürün kalitesini korumak için, %30 veya daha yüksek by-pass oranlarında kabul edilebilir maksimum sıcaklık olan 60°C'ye ulaşılabilceği bulunmuştur.

1. INTRODUCTION (GİRİŞ)

Spray drying is a widely used in diverse fields, where it serves as an efficient and effective method for manufacturing dry powders or granules from liquids or slurries. This method transforms a liquid or slurry into a fine spray pattern, quickly dried with hot air, resulting in a dry powder or granule with a highly uniform particle size and moisture content. Although spray drying is a key process in various industries due to its efficiency and effectiveness, it is also recognized as an energy-intensive process. The high thermal energy requirement due to producing large volumes of heated air have led to research and development efforts to increase energy

efficiency and reduce energy consumption. Several systems have been proposed to reduce energy consumption in spray drying, including exhaust air recovery, exhaust air recirculation, and the combination of a spray dryer with a fluid bed dryer. [1]. One of the ways to reduce energy consumption in drying systems is energy recovery. There were studies in the literature on the use of energy recovery in dryers. However, there were few studies on heating fresh air by utilizing the energy of waste heat they [1–5] performed model simulations to evaluate energy recovery potential of reusing of exhaust air in spray drying process. The drying process of alumina-based ceramic composite slurry has been assessed. The effects of temperatures and

flow rates of the inlet drying air and product feed are investigated on both energy saving and efficiency for different exhaust air recirculation ratio.

Patel and Bade (2022) achieved a 26% improvement in energy savings and an 83% increase in energy efficiency for a spray dryer utilizing a 70% exhaust air recirculation ratio [6]. Oliveira et al. (2021) used spray drying for lipid microencapsulation process. Simulated and experimental results were compared, and the difference was about 9%. The decreases in the thermal load for drying air were 18% and 32% when direct heat recovery (DHR) and indirect heat recovery (IDHR) were used, respectively. IDHR, the energy was extracted from the waste heat and given to the fresh air with the heat exchanger. IDHR, after the waste air passed through the humidifier, it was given to the drying cabinet [7]. Patel and Bade (2020) compared the energy recovery configurations of a spray dryer with both literature data and a base case using pinch analysis. The base case was defined as a spray dryer without any heat recovery (HR), while the other configurations included an IDHR system (case 1) and a hybrid heat recovery (HHR) system with 80% exhaust air recirculation (case 2). Dryer efficiencies of the base case, case 1 and 2 were 21%, 41% and 68%, respectively. Energy savings of the case 1 and 2 according to the base case were 57% and 75%, respectively. Recirculation ratios of 0.2, 0.6, and 0.8 resulted in enhanced energy saving potential of 63%, 70%, and 74%, respectively. For RR of 50% and 80%, the difference in the dryer's height from the base scenario was 17.2% and 45.86%, respectively. Thus, DHR must be considered during the design phase of the new spray dryer, particularly for larger recirculation ratios (over 50%) [8]. Camci (2020) theoretically investigated spray drying process assisted with solar powered renewable system. Photovoltaic panels and parabolic trough collectors were utilized for electricity and heat to the system. Energy efficiencies of the spray dryer, evaporator and overall were 64.24%, 86.56% and 75.01%, respectively, in the PTC-SP milk powder production system. The overall exergy efficiency of the system was 11.10% [9]. Julkland et al. (2015) examined the energy efficiency of a large-scale spray dryer combined with an exhaust HR system for drying dilute slurry. Both energy efficiency and savings were determined using a detailed mathematical model of the spray dryer. The highest energy savings of 52.4% resulted from the interplay between the adverse impact of the slurry feed rate and the beneficial effect of the drying air temperature. The highest energy efficiency of

43.3% was achieved at a high feed rate of the dilute slurry [2]. Golman and Julklang (2014) simulated exhaust gas HR from a spray dryer for drying of large amount of dilute slurry. Waste heat was utilized with an air-to-air heat exchanger, thus energy efficiency increased by 16% and energy saving was 50% [4]. Patel and Bade (2019) compared different HR system according to the environmental impact and energy saving potential. Spray dryer with HHR system at 80% recirculation ratio dryer efficiency was 66% and energy saving was 82800 kJ/hr. The energy efficiency of spray dryer without energy recovery configuration and with DHR system were 21% and 51%, respectively, at same recirculation ratio 80%. Reduction in heat load and dryer efficiency of HR system were 23.8% and 29% higher than that's of the DHR system [10]. Caglayan and Caliskan (2017) calculated the sustainability index of a spray dryer with a heat exchanger based on varying dead state temperatures between 0 and 20°C. At 0°C, the sustainability indexes of the spray dryer and the overall system were 1.351 and 1.308, respectively. The energy efficiency of the heat exchanger was 63.32%, while that of the overall system was 5.56%, indicating that the combination of the two was more effective [11].

Ai et al. (2016) proposed a HR system for a spray dryer aimed at reducing energy consumption in the drying of soy protein powder. A water loop was established between the exhaust air and fresh air to prevent bacterial growth during air recirculation. The drying air was preheated using a HR heat exchanger and a heat pump before entering the boiler. The total initial cost of the HR system was \$501,000, accounting for 15% of the total initial investment. The payback period for the HR system was approximately 2.4 years, with an energy savings rate of 21% compared to the traditional system [12]. In another study, Walmsley et al. conducted a techno-economic optimization to determine the most effective heat exchanger for recovering heat from the exhaust air of a milk spray dryer. They concluded that a finned tube heat exchanger with 14 tube rows and a face velocity of 4 m/s was the best option. This configuration yielded an internal rate of return of 71% and a net present value of NZ\$2.9 million [11]

Chen et al. (2022) investigated a desiccant wheel-assisted high-temperature heat pump (HTHP) technology for heating the inlet air of milk spray dryers up to 150 °C by utilizing HR from the dryer exhaust. Using a desiccant wheel assisted HTHP was reduced evaporator size about 50–60 % according to the HTHP. Using of desiccant wheels with heat pump were especially important for

recovery exhaust air under diverse ambient conditions and high humidity [12]. Moejes et al. (2018) optimized and simulated closed loop spray drying system to decrease energy consumption for dairy industry. The offered technologies were a zeolite wheel, membrane contactor, and monodisperse droplet atomizer. Sensible and latent heats from dryer exhaust were used to preheat milk and the drying air. The energy usage significantly decreased from 8.4 to 4.9 MJ of heat per kg of milk powder by integrating the adsorber-regenerator system with the spray dryer and the prior milk concentration process [3]. Currently, producing skim milk powder used about 10 MJ of energy per kilogram of powder. Integrating reverse osmosis with membrane distillation, monodisperse droplet drying, and zeolites has the potential to decrease the energy needed for milk powder production to 4-5 MJ/kg. Other feasible combinations, however, would require more energy, approximately 5-7 MJ/kg of powder. [13]. The drying system should be run at low product feed rate, high recirculation ratio of exhaust air and high product concentration in order to ensure the maximum energy saving [5]

As understood from previous studies, one promising approach to increase the energy efficiency and reduce the energy consumption of a spray drying system is the integration of a HR system which is applied to the exhaust heat line to capture and reuse thermal energy that would otherwise be lost. By this application, the required thermal energy to produce hot air can significantly decrease, and energy efficiency can be increased. This not only improves the energy efficiency of the spray dryer but also reduces operational costs and the carbon footprint by minimizing energy waste and gas emissions. This study aims to explore the integration of HR systems with proportional by-pass application in spray drying processes, examining their applicability for increasing energy efficiency. Through a detailed heat and mass transfer analysis, the goal is to find the optimized by-pass ratio to achieve highest possible energy efficiency for various hot air temperatures, liquid feed flow rates, and hot air flow rates. In spray dryers, three key parameters significantly impact system performance: drying air flow rate, drying air temperature, and product flow rate. Although other parameters also influence efficiency, these three parameters play a decisive role. However, analyzing these three parameters simultaneously is like solving a three-variable equation, which is exceedingly challenging. In previous studies documented in the literature, these three input parameters were varied continuously while maintaining energy efficiency as constant.

However, such studies failed to elucidate the mutual interactions or stepwise effects of these parameters on the system. To address this limitation and fill the gap in the literature, the present study simplified the three-variable equation by reducing two variables (drying air temperature and drying air flow rate) to a linear constant coefficient, thus enabling a more straightforward analysis. This reduction to a linear constant coefficient was performed based on a review of existing literature. Studies indicated that the ratio of drying air flow rate to drying air temperature consistently ranges between 13 and 15 [4,5]. At lower temperatures, this ratio started at approximately 13 and increased towards 15 as the temperature rises. In this study, the ratio was fixed as a constant linear coefficient in alignment with the literature, and subsequent analyses were conducted. This approach facilitated the simultaneous examination of all three input parameters and allowed for an understanding of their individual effects on system efficiency.

2. METHODOLOGY (METODOLOJİ)

Fresh air is heated in a heat exchanger and directed to the dryer. Atomizing air is utilized to remove water from the milk, which is sprayed from the top of the drying chamber. The drying air leaves the dryer at low temperature and high relative humidity. Solid agglomerates formed during the drying process are discharged from the lower part of the drying chamber along with the exhaust air. A cyclone separates the agglomerates from the exhaust drying air and sending them to the final product line. If necessary, the exhaust air can be further cleaned using a bag filter. When in recovery mode, the exhaust air heats fresh air in a cross-flow heat exchanger. However, due to the high relative humidity of the exhaust air, a portion of it is bypassed. Fresh air is preheated by passing through the heat recovery exchanger (HX2) and then heated to the desired temperature in additional main heat exchanger (HX1). This study investigates the impact of preheating fresh air with exhaust air using HR the specified conditions. The schematic diagram of the milk spray drying system, with and without HR, is illustrated in **Figure 1**.

Three parameters affecting the dryer's performance are drying air temperature, drying air flow rate, and product flow rate. A heat exchanger is placed on the exhaust side for HR. However, since the relative humidity of the exhaust air is at 50-60%, there is a risk of condensation in the exchanger when it meets fresh air. For this reason, some of the air is bypassed and given to the mixing chamber at the heat exchanger outlet. To prevent condensation in the

heat exchanger, the drying air flow rate or temperature can be increased. However, these are assumed to be constant coefficient. The other

alternative is to reduce the product flow rate, which will result in lower relative humidity in the drying air because less water will evaporate.

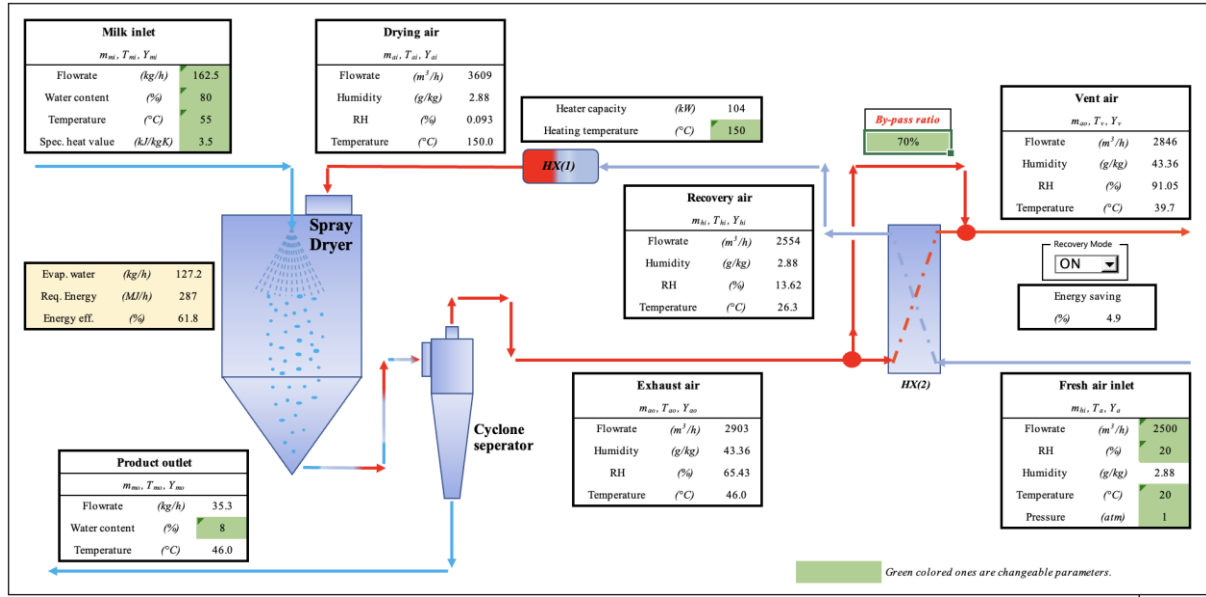


Figure 1. Schematic diagram of the milk spray drying with and without heat recovery (Isı geri kazanımlı ve ısı geri kazanımsız püskürtmeli süt kurutmanın şematik diyagramı)

The analysis procedure is as follows:

- Calculations are performed so that the outlet air relative humidity (in HX2) would be 90%.
- The M_{da}/T_{da} ratio is accepted as a constant coefficient that varies linearly with temperature by referring to the literature (between 13 and 15) [4,5].
- Analyses are performed for drying air temperatures of 150, 175, 200, 225 and 250 °C, respectively. The temperature range used in the literature is between 160-300 °C [4,5].
- As stated in item 2, drying air mass flow rate is determined according to the M_{da}/T_{da} ratio for each temperature.
- With the fixed inputs determined because of items 2 and 3, only M_p remains as a variable. Iterative analysis is performed to obtain the highest energy efficiency result for the values given for M_p .
- The M_p value is determined for the highest energy efficiency value and the M_{da}/M_p ratio is calculated.
- The product outlet temperature is determined according to heat and mass transfer analyses.

It is assumed that there is no loss in the system and the inlet energy is equal to the outlet energy.

$$Q_{in} = Q_{out} \quad (1)$$

The energy balances of the whole system are given Eqs. 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 and 8. Heat input to the spray

drying system comes from milk feed, drying air, HX1 and HX2.

$$\begin{aligned} \text{Milk feed} \quad Q_{mi} &= m_{mi} \cdot (c_{p,solid} \\ &+ x_{mi} \cdot c_{p,liquid}) \cdot (T_{mi} \\ &- T_{ref}) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\text{Air inlet} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} Q_{ai} &= m_{ai} \cdot [(c_{p,ai} \\ &+ Y_{ai} \cdot c_{p,vapour}) \cdot (T_{hi} - T_{ref}) \\ &+ Y_{ai} \cdot \lambda_{ref}] = m_{ai} \cdot h_{ai} \end{aligned} \quad (4)$$

Through first HX

$$\begin{aligned} Q_h &= m_{ai} \cdot (c_{p,ai} \\ &+ Y_{ai} \cdot c_{p,vapour}) \cdot (T_{ai} - T_{hi}) \\ &= m_{ai} (h_{ai} - h_{hi}) \end{aligned}$$

Through second HX

$$\begin{aligned} Q_{rec} &= m_{ao} \cdot (c_{p,ao} \\ &+ Y_{ao} \cdot c_{p,vapour}) \cdot (T_{ao} \\ &- T_{ref}) \cdot \eta_{hx,2} \\ &= m_{ai} (h_{ao} - h_e) \end{aligned}$$

$$\text{Total} \quad Q_{in} = Q_{mi} + Q_{ai} + Q_h - Q_{rec} \quad (5)$$

Heat output from the system occurs through solid product and exhaust air.

$$\begin{aligned} \text{Solid product discharge (milk powder)} \quad Q_{mo} &= m_{mo} \cdot (c_{p,solid} + x_{mo} \cdot c_{p,liquid}) \cdot (T_{mo} - T_{ref}) \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \text{Exhaust air} \quad Q_{ao} &= m_{ao} \cdot [(c_{p,ao} + Y_{ao} \cdot c_{p,vapour}) \cdot (T_{ao} - T_{ref}) + Y_{ao} \cdot \lambda_{ref}] \\ &= m_{ao} \cdot h_{ao} \end{aligned} \quad (7)$$

$$\text{Total heat input} \quad Q_{out} = Q_{mo} + Q_{ao} \quad (8)$$

The mass balances of the dryer are given in Eqs. 9, 10 and 11.

$$\text{Dry solids} \quad m_{mi,d} = m_{mo,d} \quad (9)$$

$$\text{Dry air} \quad m_{ai,d} = m_{ao,d} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \text{Moisture} \quad m_{mi} \cdot X_{mi} + m_{ai} \cdot Y_{ai} &= m_{mo} \cdot X_{mo} + m_{ao} \cdot Y_{ao} \end{aligned} \quad (11)$$

where Y is the humidity on dry basis kg kg⁻¹ and X is the mass fraction of water on dry basis kg kg⁻¹. Specific enthalpies of air streams of high humidity are calculated with Eq. 12. [14].

$$\begin{aligned} h_i &= c_{p,a} \cdot (T_{i,a} - T_{ref}) \\ &+ Y_{i,a} \cdot [c_{p,liquid} \cdot (T_{dew} - T_{ref}) + \lambda_{dew} \\ &+ c_{p,v} \cdot (T_{i,a} - T_{dew})] \end{aligned} \quad (12)$$

where T_{dew} is the dew point temperature and λ_{dew} is the latent heat of vaporization of water at T_{dew}. The humidity of exhaust air is calculated by Eq. 13.

$$Y_{ao} = \frac{m_{mo,d}(X_{mi} - X_{mo}) + m_{ai,d} \cdot Y_{ai}}{m_{ao,d}} \quad (13)$$

Energy efficiency can be defined as the ratio of the energy required for evaporation to the energy supplied to the dryer.

$$\eta_R = \frac{Q_{req}}{Q_{in}} \cdot 100 \rightarrow \% \quad (14)$$

$$Q_{req} = (X_{mi} - X_{mo}) \cdot m_{mi,d} \cdot \lambda \quad (15)$$

When the inlet air is heated using HR, the amount of energy savings is calculated with Eq. 16.

$$\text{energy saving} = \frac{Q_{rec}}{Q_h} \quad (16)$$

The specific enthalpy of water vapor can be calculated as:

$$h_{v,i} = \lambda_{ref} + c_{p,v} \cdot (T_i - T_{ref}) \quad (17)$$

λ_{ref} is the latent heat of vaporization of water at T_{ref} and, c_{p,v} is the specific heat capacity of water vapor.

Mujumdar [14] were recommended using a more precise equation for calculating h_{v,da} in the cases of high gas humidity, i.e. Y_i > 0.05 :

$$\begin{aligned} h_{v,i} &= c_{p,l} \cdot (T_{dew} - T_{ref}) + \lambda_{dew} \\ &+ c_{p,v} \cdot (T_i - T_{dew}) \end{aligned} \quad (18)$$

Where T_{dew} is the dew point temperature and λ_{dew} is the latent heat of vaporization of water at T_{dew}.

The specific enthalpies of dry air, dry solids and water in state i can be calculated as:

$$h_{a,i} = c_{p,a} \cdot (T_i - T_{ref}) \quad (19)$$

$$h_{m,i} = c_{p,m} \cdot (T_i - T_{ref})$$

$$h_{l,i} = c_{p,l} \cdot (T_i - T_{ref})$$

Specific enthalpy of drying air stream is defined by:

$$h_i = h_{a,i} + Y_i \cdot h_{v,i} \quad (20)$$

h_{a,i} and h_{v,i} are the specific enthalpies of dry air and water vapor, respectively, and Y_i is the humidity.

3. RESULTS AND DISCUSSION (BULGULAR VE TARTIŞMA)

A heat exchanger and a bypass system, which can be proportionally controlled are placed at the exhaust outlet to provide heat recovery. Drying system is examined at different bypass ratios. Heat recovery is not used when the bypass ratio (BR) is 100%. Drying air leaves the dryer at low temperature and high relative humidity, if this air encounters a cold surface, condensation occurs. To prevent exhaust air from condensing, some air is bypassed and mixed at the heat exchanger outlet. The humidity level of the air entering the recovery must be reduced to prevent condensation. There are three ways to reduce the relative humidity of the air; i) increasing the drying air temperature, ii) increasing the drying air flow rate iii) reducing the product flow rate. However, increasing the air flow

rate is not a desirable situation as it will increase energy consumption. While the drying air temperature and flow rate are constant, the variable is the product flow rate. This situation is repeated for five different drying air temperatures and five different bypass ratios. The changes in energy efficiency and energy saving are examined. Drying air temperature, drying air flow rate and product flow rate are changeable parameters. However, in order to solve this equation with three unknowns, two unknowns are accepted as a constant coefficient that varies linearly with temperature and the effect of the third one on the others is examined with its change. Here, the constant is accepted as M_{da}/T_{da} . For this reason, it is seen that such a ratio is accepted in the literature study [4,5]. The ratio of the drying air temperature and flow rate is taken as constant, and the product mass flow rate is taken as variable. This situation is repeated for five different drying air temperatures and five different bypass ratios. The change in both energy efficiency and savings is examined.

The change in the ratio of the drying air mass flow rate to the product mass flow rate according to five different drying air temperatures and bypass ratios is given in **Figure 2**. When the bypass ratio is reduced (recovery is increased) some parameters need to be changed to prevent condensation in the exchanger. In this study, there are three parameters: drying air temperature, drying air mass flow rate and product mass flow rate. Since the solution of an equation with three variables is complex, the first two parameters are taken as constant, and the product mass flow rate is considered variable. This situation is repeated at five different drying air temperatures and bypass ratios. As the bypass ratio decreases, the mass flow rate of the product decreases, so the M_{da}/M_p ratio increases (from right to left). The air flow rate required to dry one unit of product increases. A high drying air flow rate is undesirable situation because it will increase heating costs.

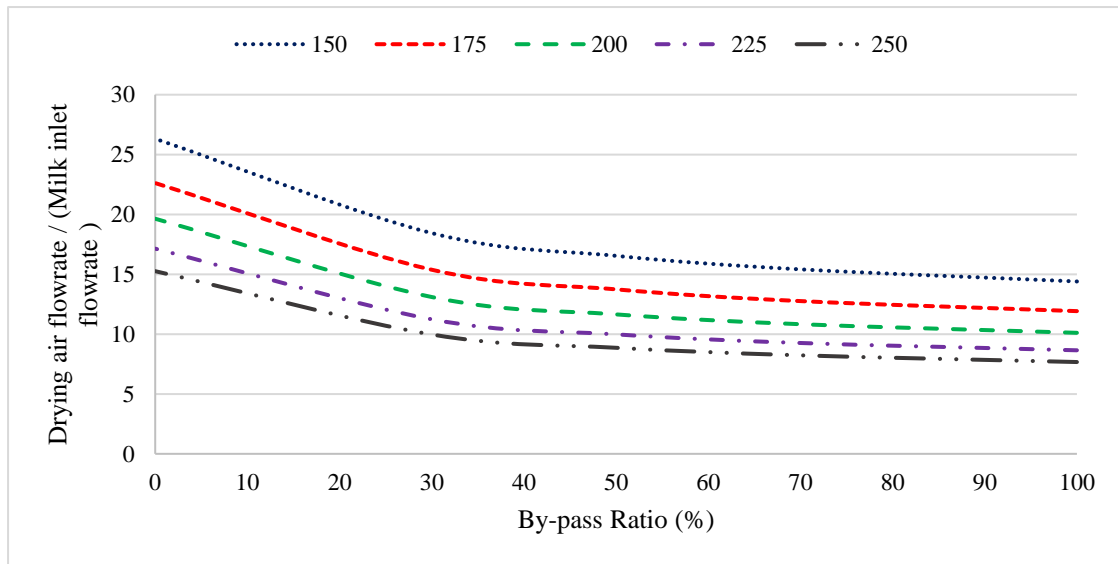


Figure 2. Changing of the M_{da}/M_p according to the bypass ratio and drying air temperature (Bypass oranına ve kurutma havası sıcaklığına göre M_{da}/M_p 'nin değişimi)

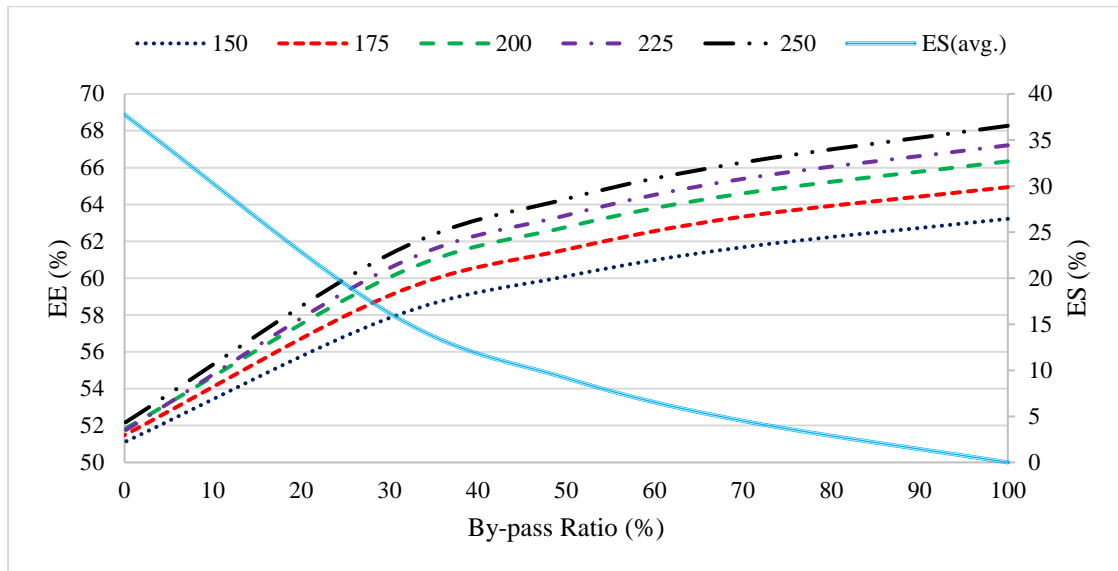


Figure 3. Changing of the energy efficiency and energy saving according to the bypass ratio and drying air temperature (By-pass oranına ve kurutma havası sıcaklığına göre enerji verimliliğinin ve enerji tasarrufunun değişimi)

The changes in energy efficiency and energy saving according to bypass ratio and temperature are given in **Figure 3**. It is seen that energy efficiency is higher at higher temperatures. However, the drying air temperature should be decided by paying attention to the maximum temperature that the product to be dried can withstand. Average energy saving values are taken for five different temperatures. After the bypass ratio of 30%, EE gradually increases, and ES decreases significantly. For this reason, the most suitable bypass ratio is 30%, EE values are 57.84 59.06 60.05 60.55 61.3%, ES values are 17.08 16.74 16.23 15.79 15.18% for 150, 175, 200, 225 and 250 °C, respectively. As bypass ratio increases, energy saving decreases due to the reduced drying air flow rate entering the heat recovery system, while energy efficiency increases. The increase in EE value progresses rapidly up to BR30 and then slows down. **Fig. 3** and **Fig. 2** should be evaluated together. The analyses indicate that the maximum energy efficiency for this system design is approximately 68%, while at the optimal bypass ratio of 30%, the efficiency stabilizes around 60%. A review of the literature confirms that these values are consistent with previous findings [1,5,8]. As the bypass ratio increases, the amount of drying air required for a unit of product decreases, but after BR30 there is no significant change in the M_{da}/M_p ratio (**Fig. 2**).

The case where there is no bypass is given as BR0, and the case where all the exhaust air is discharged through bypass without passing through the heat exchanger is given as BR100. Five different bypass ratios (BR) of 0, 30, 50, 70 and 100% are examined. The changes in M_{da}/M_p , M_{da}/T_{da} , and product outlet temperature are examined according to different

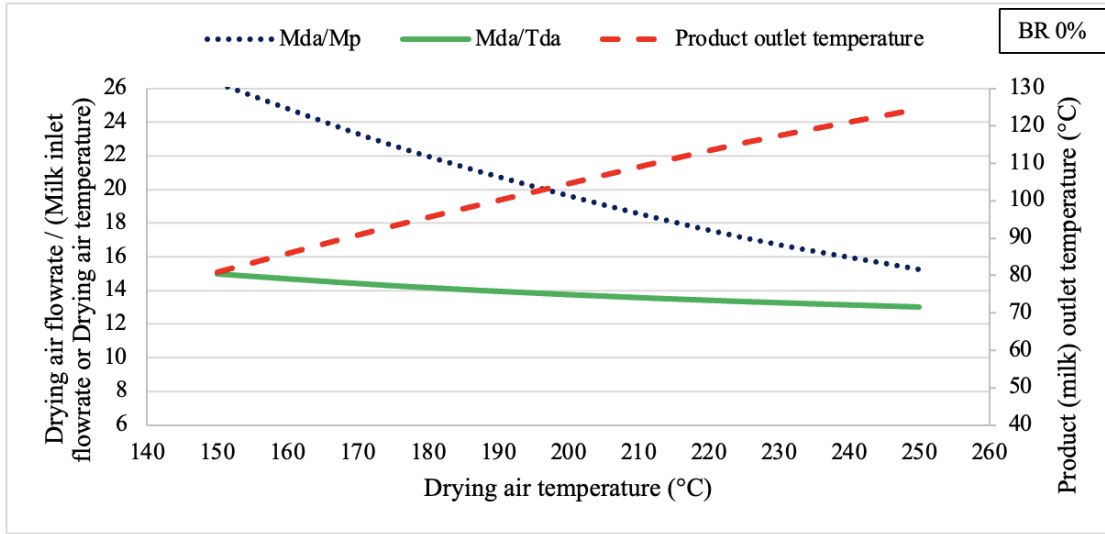
drying air temperatures and different bypass ratios such as 0% (**Fig. 4a**), 30% (**Fig. 4b**), 50% (**Fig. 4c**), 70% (**Fig. 4d**) and 100% (**Fig. 4e**).

As the bypass ratio is reduced, that is, as recovery increases, a decrease in the EE value is observed. Because although the amount of energy given to the air is the same, the amount of evacuated water will also decrease since the amount of product entering the dryer is reduced. To find the most effective bypass ratio, it is not enough to look at **Fig. 4** alone; it must be evaluated together with **Figs. 2** and **3**. When looking at the M_{da}/M_p graph according to bypass ratios, a breaking point has occurred in the curve for five different temperatures, this value is 30% bypass ratio. As the bypass ratio decreases, it is seen that the amount of air per unit product increases. Also, when looking at **Fig. 3**, ES is at its highest value at BR 0%, but EE is at its lowest value. As the bypass ratio increases, ES decreases and EE increases. In this case, the most optimum result is seen at 30% BR.

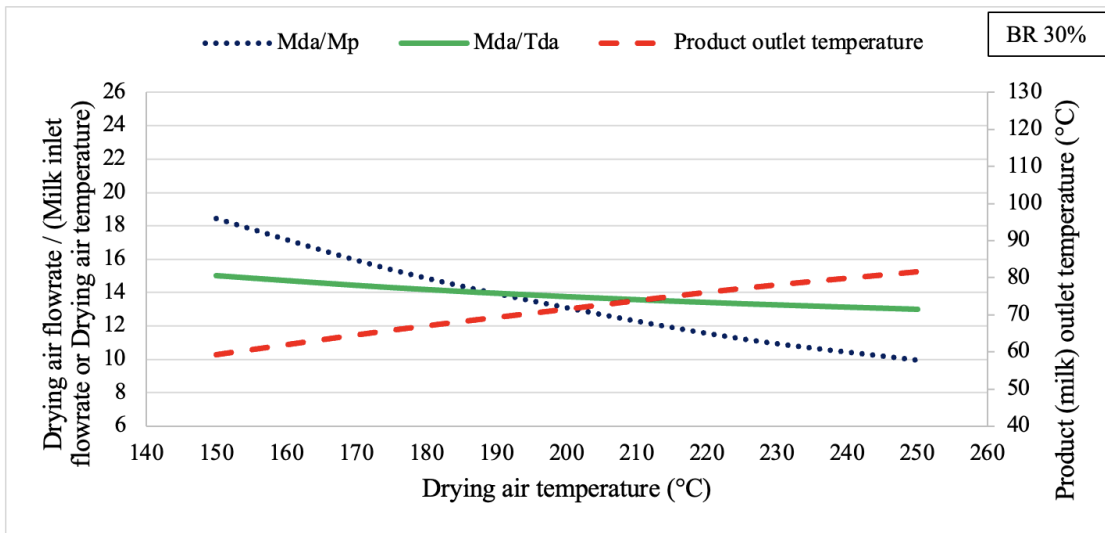
When the bypass ratio is zero, the amount of air required per unit product increases as the product flow rate is reduced to prevent condensation. Drying air at high temperature and flow rate also increases the temperature of the product. High product temperature is not a desired situation for food materials. In addition, a significant decrease is observed in EE. The M_{da}/T_{da} ratio varies between 13-15 in the literature and the average is taken as 14. For this reason, it is seen as a green line with a very low slope in the figures. When BR100, it is seen that the product surface temperature is very low and the M_{da}/M_p ratio decreases, but the energy saving is zero. It is desirable to reduce the amount of air

required for a unit of product. The most optimum conditions are seen at BR30%. A review of the literature reveals that Golman and Julklang (2014) [5] and Patel and Bade (2020) [8] align with the findings of this study. The statement of 80%

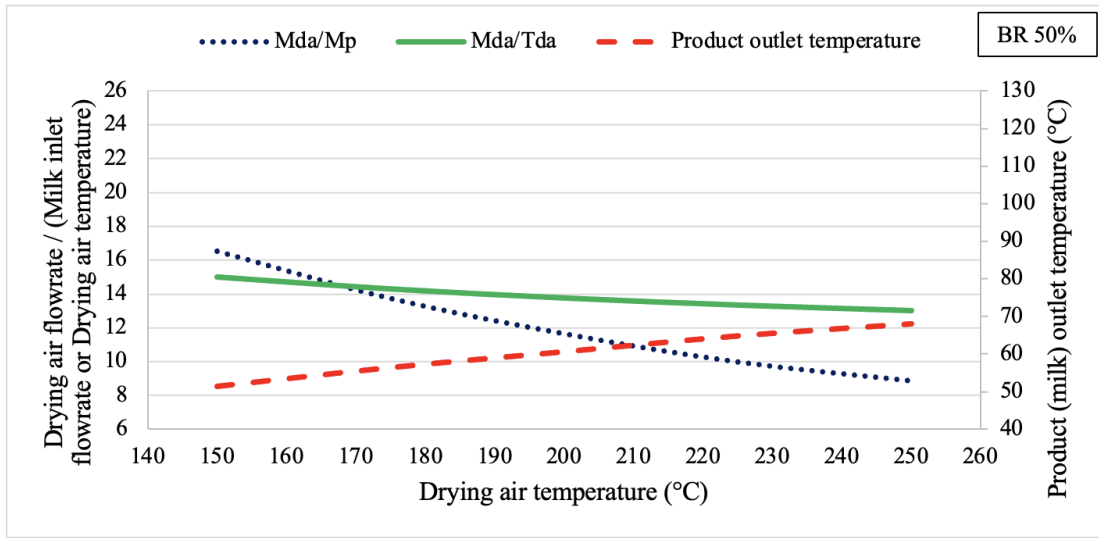
recirculated air in Golman and Julklang's (2014) study [5] is explained with a 20% bypass rate in this study. Similarly, Patel and Bade (2020) [8] which references [5] concludes that a BR ratio of 20% to 30% represents the most optimal conditions.



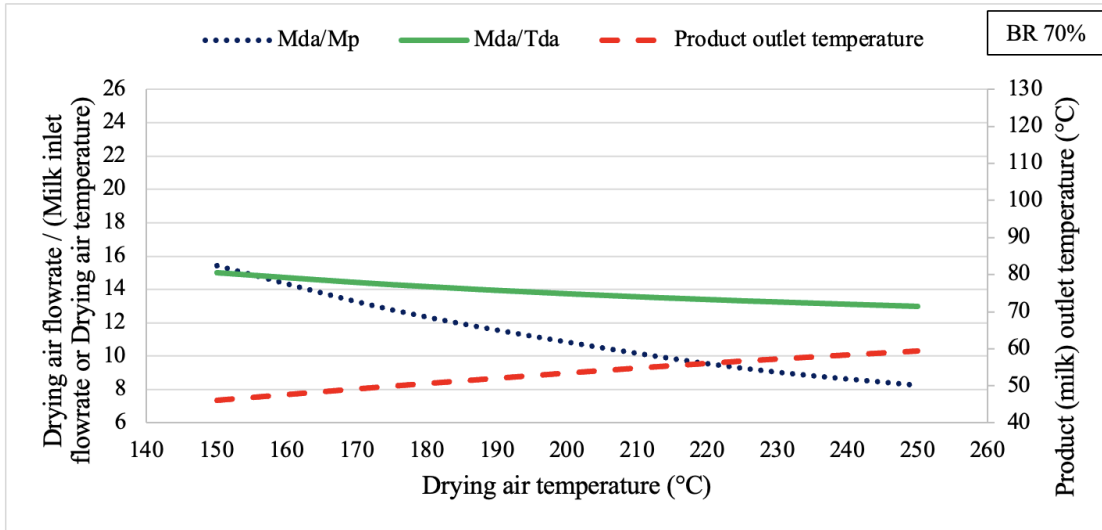
a



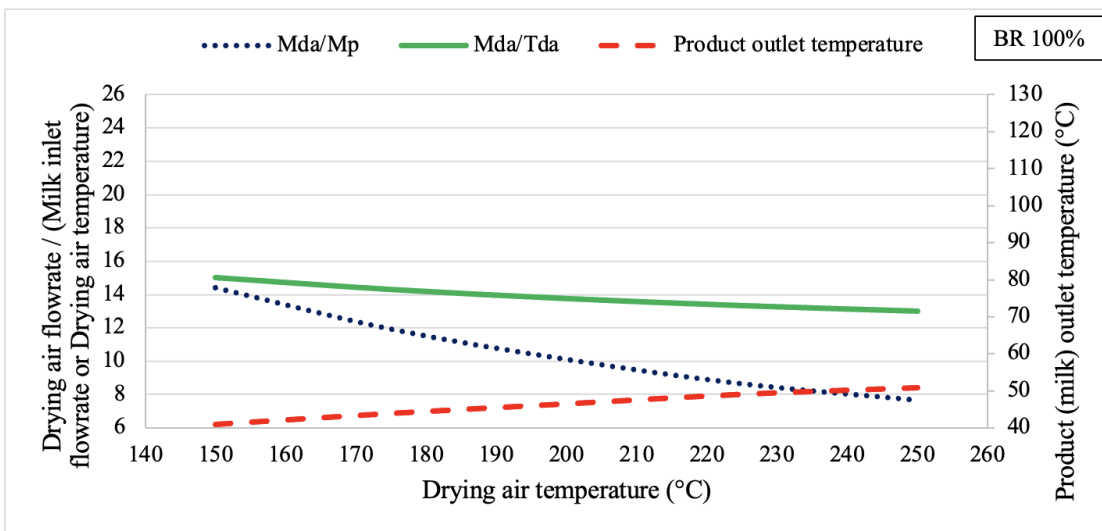
b



c



d



e

Figure 4. Comparison of the M_{da}/M_p , M_{da}/T_{da} and product outlet temperature according to the drying air temperature and bypass ratio (Kurutma havası sıcaklığı ve bypass oranına göre M_{da}/M_p , M_{da}/T_{da} ve ürün çıkışı sıcaklığının karşılaştırılması)

4. CONCLUSIONS (SONUÇLAR)

In this study, a spray dryer is designed for milk powder production. A heat exchanger is placed at the exhaust outlet to benefit from the exhaust air temperature. If high humidity air meets cold air in the heat exchanger, the RH value of the air will increase, condensation may occur. While exhaust air is discharged, some of the air is bypassed and mixed at the exchanger outlet to prevent condensation. The effects of different bypass ratios on energy efficiency and energy saving are investigated.

There are three main parameters affecting the dryer performance: drying air flow rate, drying air temperature, and product flow rate. Initially, the ratio of first two parameters is kept constant, and the performance is examined by varying a single parameter at time. A heat exchanger is placed at the dryer outlet to recover heat from the exhaust air. However, since the relative humidity of the exhaust air is at 50-60%, there is a risk of condensation in the exchanger when it meets the fresh air. In order to prevent condensation in the exhaust air, some of the air is bypassed and given to the mixing chamber at the exchanger outlet. When the bypass ratio is 100% (when recovery is not used), EE reaches its highest value, because more product is dried, but ES is zero. In order to prevent condensation in the heat exchanger, the drying air flow rate or drying air temperature can be increased. However, these are assumed as constant coefficient. Another alternative is to reduce the product flow rate, in this way the drying air will be at a lower RH level because less water will be evaporated. This process is repeated for five different drying air temperatures and bypass ratios. When the results are examined, it is seen that the best bypass ratio is 30%. At drying air temperatures between 150-250°C and a BR30%, EE varies between 57.8% and 61.3%, while ES ranges from 15.18% to 17.08%. As the BR decreases, a drop in EE is observed due to the reduced product mass, which prevents condensation. Additionally, at lower BRs, the product outlet temperature rises significantly. To maintain product quality, it was found that the maximum acceptable product outlet temperature of 60°C could be achieved at BRs of 30% or higher. However, the best energy efficiency and energy saving values are obtained at bypass ratios of 40% and below. It is thought that the results obtained in this study will guide future studies.

As a result of this study, it is found that the greatest challenge for spray dryers with high air consumption is the condensation of the exhaust air, which exits the drying chamber at high temperatures and relative humidity, within a HR system. Two popular methods to prevent condensation in the HR unit are dehumidification via cold surfaces and the use of additional materials like silica gel. While condensation could be prevented through dehumidification on cold surfaces, the heat transfer performance significantly reduced. Moreover, the application of silica gel are extremely costly solutions for these systems with high air consumption and would require constant replacement, making them impractical.

DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS (ETİK STANDARTLARIN BEYANI)

The author of this article declares that the methodology she uses in her work does not require ethical committee approval and/or legal specific permission.

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

AUTHORS' CONTRIBUTIONS (YAZARLARIN KATKILARI)

Gülşah KARACA DOLGUN: She conducted the calculations, analyzed the results and performed the writing process.

Hesaplamaları yapmış, sonuçları analiz etmiş ve yazım sürecini gerçekleştirmiştir.

CONFLICT OF INTEREST (ÇIKAR ÇATIŞMASI)

There is no conflict of interest in this study.

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

NOMENCLATURE (TERMİNOLOJİ)

c_p	specific heat capacity (kJ/kg K)
h	enthalpy (kJ/kg)
h_e	evaporation enthalpy (kJ/kg)
m	mass (kg)
T	temperature (°C)
Q	heat transfer amount (kJ)
X	the mass fraction of water on dry basis (kg kg ⁻¹)
Y	the humidity on dry basis (kg kg ⁻¹)

λ_{ref}	the latent heat of vaporization of water at T_{ref} (kJ/kg)
η_R	energy efficiency (%)
<i>Subscripts</i>	
a	fresh air inlet
ai	drying air inlet
ao	drying air outlet
hi	recovery air
in	inlet
i	in state i
mi	milk inlet
mo	milk powder outlet
out	outlet
rec	recovery
ref	reference
req	required
v	vent air

REFERENCES (KAYNAKLAR)

- [1] M.J. Atkins, M.R.W. Walmsley, J.R. Neale, Integrating heat recovery from milk powder spray dryer exhausts in the dairy industry, *Appl Therm Eng* 31 (2011) 2101–2106. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2011.03.006>.
- [2] W. Julklang, B. Golman, Effect of process parameters on energy performance of spray drying with exhaust air heat recovery for production of high value particles, *Appl Energy* 151 (2015) 285–295. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.04.069>.
- [3] S.N. Moejes, Q. Visser, J.H. Bitter, A.J.B. van Boxtel, Closed-loop spray drying solutions for energy efficient powder production, *Innovative Food Science and Emerging Technologies* 47 (2018) 24–37. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2018.01.005>.
- [4] B. Golman, W. Julklang, Simulation of exhaust gas heat recovery from a spray dryer, *Appl Therm Eng* 73 (2014) 899–913. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.08.045>.
- [5] B. Golman, W. Julklang, Analysis of heat recovery from a spray dryer by recirculation of exhaust air, *Energy Convers Manag* 88 (2014) 641–649. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.09.012>.
- [6] S.K. Patel, M.H. Bade, Parametric analysis of industrial spray dryer for performance enhancement applicable in effluent management, *Drying Technology* 40 (2022) 2880–2903. <https://doi.org/10.1080/07373937.2021.1975291>.
- [7] K.S. Oliveira, N. Bojorge, S.P. Freitas, Lipid microencapsulation process using spray drying: modeling and heat recovery study, *Brazilian Journal of Chemical Engineering* 38 (2021) 641–652. <https://doi.org/10.1007/s43153-021-00182-7>.
- [8] S.K. Patel, M.H. Bade, Energy targeting and process integration of spray dryer with heat recovery systems, *Energy Convers Manag* 221 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113148>.
- [9] M. Camci, Thermodynamic analysis of a novel integration of a spray dryer and solar collectors: A case study of a milk powder drying system, *Drying Technology* 38 (2020) 350–360. <https://doi.org/10.1080/07373937.2019.1570935>.
- [10] S.K. Patel, M.H. Bade, Energy analysis and heat recovery opportunities in spray dryers applied for effluent management, *Energy Convers Manag* 186 (2019) 597–609. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.02.065>.
- [11] T.G. Walmsley, M.R.W. Walmsley, M.J. Atkins, J.R. Neale, A.H. Tarighaleslami, Thermo-economic optimisation of industrial milk spray dryer exhaust to inlet air heat recovery, *Energy* 90 (2015) 95–104. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.03.102>.
- [12] Q. Chen, D.J. Cleland, J.K. Carson, T.G. Walmsley, Integration of desiccant wheels and high-temperature heat pumps with milk spray dryers, *Appl Therm Eng* 216 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.119083>.
- [13] S.N. Moejes, A.J.B. van Boxtel, Energy saving potential of emerging technologies in milk powder production, *Trends Food Sci Technol* 60 (2017) 31–42. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2016.10.023>.
- [14] A.S. Mujumdar, *Handbook of Industrial Drying* 3rd edition, 2007.

ZrO₂ Katkılanmış Karbon Fiber Takviyeli Polimer Kompozitlerin Yapısal ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi

Esra ÖZTÜRK^{1*}  Erdem MERMER²  Hanifi ÇİNİCİ³ 

¹Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İleri Teknolojiler Ana Bilim Dalı, Ankara, Türkiye

²TUSAŞ-Türk Havacılık ve Uzay Sanayii A.Ş., Ankara, Türkiye

³Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 12/11/2024
Düzeltilme: 14/12/2024
Kabul: 25/12/2024

Anahtar Kelimeler

Kompozit
Karbon Fiber
Epoksi Reçine
ZrO₂

Article Info

Research article
Received: 12/11/2024
Revision: 14/12/2024
Accepted: 25/12/2024

Keywords

Composites
Carbon Fiber
Epoxy Resin
ZrO₂

Grafik Özet (Graphical/Tabular Abstract)

Bu çalışmada, epoksi reçine içine farklı oranlarda ZrO₂ katkılanarak karbon fiber takviyeli polimer kompozitler üretilmiştir. ZrO₂ katkısının yapısal, termal ve mekanik özellikler üzerindeki etkisi incelenmiştir. / In this study, carbon fiber reinforced polymer composites were produced by adding different ratio ZrO₂ into epoxy resin and the effect of ZrO₂ addition on structural, thermal and mechanical properties was examined.



Şekil A: Karbon fiber takviyeli kompozitlerin üretim yöntemi / **Figure A:** Production method of carbon fiber reinforced composites

Önemli noktalar (Highlights)

- Karbon fiber takviyeli kompozitlerin termal ve mekanik özelliklerini geliştirmek için reçine içine ZrO₂ tozu katkılanmıştır. / ZrO₂ powder was added into the resin to improve the thermal and mechanical properties of carbon fiber reinforced composites.
- Epoksi reçine içine % 0.5, %1, %1.5 ve %2 ağırlık oranlarında ZrO₂ tozu katkılanmıştır. / ZrO₂ powder was added into the epoxy resin at 0.5%, 1%, 1.5% and 2% weight ratios.
- ZrO₂ katkılanması ile kompozitlerin yapısal, termal ve mekanik özellikleri etkilenmiştir. / The structural, thermal and mechanical properties of the composites were affected by ZrO₂ doping.

Amaç (Aim): Karbon fiber takviyeli kompozitlere ZrO₂ katkılayarak kompozitlerin termal ve mekanik özelliklerini incelemektir. / To investigate the thermal and mechanical properties of carbon fiber reinforced composites by adding ZrO₂

Özgünlük (Originality): Literatürde kullanılmamış olan mikron boyutunda ZrO₂ tozu katkılanarak kompozitlerin termal ve mekanik özellikleri incelenmiştir. / Thermal and mechanical properties of the composites were investigated by adding micron-sized ZrO₂ powder, which has not been used in the literature.

Bulgular (Results): En yüksek polimerleşme entalpi ve en yüksek ILSS değeri katkısız kompozitte elde edilmiştir. En yüksek çekme gerilimi %2 ZrO₂ katkılı kompozitte elde edilmiştir. / The highest polymerization enthalpy and the highest ILSS value were obtained in the undoped composite. The highest tensile stress was obtained in 2% ZrO₂ doped composite.

Sonuç(Conclusion): ZrO₂ katkısı kompozitlerin çekme gerilimini artırmış fakat ILSS ve polimerleşme entalpi değerlerini düşürmüştür. / ZrO₂ addition increased the tensile stress of the composites but decreased the ILSS and polymerization enthalpy values.



ZrO₂ Katkılanmış Karbon Fiber Takviyeli Polimer Kompozitlerin Yapısal ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi

Esra ÖZTÜRK^{1*} Erdem MERMER² Hanifi ÇİNİCİ³

¹Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İleri Teknolojiler Ana Bilim Dalı, Ankara, Türkiye

²TUSAŞ-Türk Havacılık ve Uzay Sanayii A.Ş., Ankara, Türkiye

³Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 12/11/2024
Düzeltilme: 14/12/2024
Kabul: 25/12/2024

Anahtar Kelimeler

Kompozit
Karbon Fiber
Epoksi Reçine
ZrO₂

Öz

Karbon fiber takviyeli polimer kompozitler özellikle havacılık endüstrisinde önemli bir yere sahiptir. Bu çalışmada, epoksi reçine içine ZrO₂ katkılanarak karbon fiber takviyeli polimer kompozitler üretilmiş ve ZrO₂ katkısının yapısal, termal ve mekanik özellikler üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bu amaçla, epoksi reçine içine % 0.5, %1, %1.5 ve %2 ağırlık oranlarında ZrO₂ tozu katkılanarak, el yatırma tekniği ile karbon fiber takviyeli kompozitler üretilmiştir. Üretilen numunelerin hacimsel hesaplamaları, shore D sertlik testi, DSC, çekme testi ve tabaklar arası kesme mukavemetinin belirlenmesi için eğme testi yapılmıştır. En yüksek hacimsel artış değeri %2 ZrO₂ katkılı numunede hesaplanmıştır. En yüksek sertlik değeri 85 shore D olarak katkısız numunede ölçülmüştür. En yüksek çekme gerilimi %2 ZrO₂ katkılı kompozitte elde edilmiştir. En yüksek tabakalar arası kesme mukavemeti (ILSS) ve en yüksek polimerleşme entalpisi katkısız kompozitte gözlemlenmiştir.

Investigation of Structural and Mechanical Properties of ZrO₂ Doped Carbon Fiber Reinforced Polymer Composites

Article Info

Research article
Received: 12/11/2024
Revision: 14/12/2024
Accepted: 25/12/2024

Keywords

Composites
Carbon Fiber
Epoxy Resin
ZrO₂

Abstract

Carbon fiber reinforced polymer composites have an important place especially in the aviation industry. In this study, carbon fiber reinforced polymer composites were produced by adding ZrO₂ into epoxy resin and the effect of ZrO₂ addition on structural, thermal and mechanical properties was examined. Carbon fiber reinforced composites were produced by hand lay-up method by adding 0.5%, 1%, 1.5% and 2% weight ratio of ZrO₂ powder into epoxy resin. Volumetric calculations, shore D hardness test, DSC, tensile test and bending test was performed to determine the interlaminar shear strength (ILSS) of the produced samples were performed. The highest volumetric increase was calculated in 2% ZrO₂ doped sample. The highest hardness value was measured as 85 shore D in the undoped sample. The highest tensile stress was obtained in 2% ZrO₂ doped composite. The highest interlaminar shear strength (ILSS) and the highest polymerization enthalpy were observed in undoped composite.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Kompozitler, farklı iki veya daha fazla malzemenin makro düzeyde bir araya gelerek oluşturduğu gelişmiş malzemelerdir [1]. Kompozitlerde, farklı malzemelerin üstün özelliklerinin bir araya gelmesi ile üretilen yeni malzeme ile fiziksel ve mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi amaçlanır [2,3].

Kompozit malzemeler geleneksel malzemelerle karşılaştırıldığında yüksek mekanik özelliklerle birlikte hafiflik ve düşük yoğunluk gibi avantaj sağladıkları için havacılık sektörü başta olmak üzere birçok sektörde kullanılmaktadır [3,4].

Kompozit malzemeler matris ve takviye fazı olarak iki ana bileşenden oluşur. Matris malzemesine göre, metal, seramik ve polimer matrisli kompozitler olarak 3 gruba ayrılır [5]. Polimer matrisli kompozitler düşük yoğunluk ve yüksek dayanım, hafiflik, üretim kolaylığı, düşük maliyet, iyi kimyasal kararlılık ve yüksek korozyon direnci gibi özelliklerinden dolayı uzay ve havacılık başta olmak üzere birçok endüstride kullanılmaktadır. Elyaf takviyeli kompozitlerde en yaygın kullanılan matris malzemesi polimerlerdir. Polimerler iç yapılarına göre, termoplastik ve termoset olmak üzere iki temel gruba ayrılmaktadır [2,6]. Termosetler, monomer moleküllerin kimyasal reaksiyon sonucunda çapraz bağlarla birbirlerine bağlanmasıyla meydana gelen malzemelerdir. Kovalent bağlarla üç boyutlu olarak bağlandıkları için oldukça rijit bir yapıya sahiptirler. Kürleme sürecinde polimerizasyon reaksiyonu gerçekleşirken çapraz bağlar oluştuğu için termosetlerin ısıtılarak yumuşatılmaları ve şekillendirilmeleri mümkün değildir. Poliester, vinilester ve epoksi yaygın olarak kullanılan termosetlerdir [2,7,8]. Epoksi, reçine ve sertleştirici olarak iki bileşenden oluşur. Bu bileşenlerin belirtilen oranlarda karıştırılması ve belirli bir sıcaklıkta kürlenmesi ile katı hale geçerler [3]. Epoksi reçinelerin büzülme oranı %2'den azdır ve tüm elyaf takviyeli kompozit malzemelerin üretimi için uygundur. Havacılıkta genellikle karbon elyaflarla birlikte kullanılırlar [9]. Kompozit malzemeler takviye malzemelerine göre de elyaf takviyeli, parçacık takviyeli, tabakalı ve hibrid kompozitler olarak 4'e ayrılabilir. Elyaf takviyeli kompozitler cam, grafit, karbon ve aramid fiber olarak ayrılır [4]. Karbon fiber, polimer matrisli kompozitlerde 1960'lardan beri modern bilim ve teknoloji için en önemli endüstriyel malzemelerden biri olarak kullanılmaya başlanmıştır. Karbon fiberler, insan gözüyle görülebilen çok ince filamentlerdir çapı yaklaşık 5–10 µm'dir. Karbon fiberlerin termal genleşme katsayısı yaklaşık sıfır olduğundan malzemenin termal genleşmesini düşürürler. Karbon fiberler çelikten 4,5 kat daha hafif olmasına rağmen 3 kat daha dayanıklıdır. Yüksek mukavemet/ağırlık oranı, yüksek termal kararlılık, yüksek iletkenlik ve korozyon direnci gibi mükemmel özellikleri nedeniyle kompozit malzeme kullanımı için öncelikli olarak tercih edilirler. Karbon fiber genellikle PAN (Poliakrilonitril), zift ve selülöz (Rayon)'dan elde edilir [10-15].

Literatürde yapılan çalışmalar, kompozitlerin ağırlığını arttırmadan ya da işlenebilirliğini olumsuz etkilemeden az miktarda (ağırlıkça %5'ten daha az) çeşitli katkı maddeleri eklenerek kompozitlerin

performansının iyileştirilebileceğini göstermiştir [16,17]. Farklı katkı maddelerinin polimer kompozitlerin sürtünme ve aşınma davranışları üzerinde farklı etkiler gösterdiğini bulmuştur. ZnO, ZnF₂, ZnS ve Zn(C₁₈H₃₅O₂)₂ gibi birçok çinko bileşiğinin katkı maddesi olarak kullanılmasıyla aşınma oranının önemli ölçüde azalabildiği gözlemlenmiştir. Son zamanlarda SiC, SiO₂ ve TiO₂ katkı maddeleri kullanılmıştır. SiO₂ ve TiO₂ katkıları kompozitlerin tribolojik özelliklerine etki ederken, SiC katkıları kompozitlerin tribolojik ve mekanik özelliklerine etki ettiğini gözlemlenmiştir [18-20]. Cam, alüminyum oksit (Al₂O₃), magnezyum hidroksit (Mg (OH)₂), kalsiyum karbonat (CaCO₃) parçacıkları katkı maddesi olarak kullanılmasıyla, kompozitlerin yüksek stabilite ve mekanik dayanıma sahip olduğu gözlemlenmiştir [21]. Katkı maddesi olarak kullanılan grafit oksit nanopartiküllerin çatlak ilerlemesine etki ettiğini gözlemlenmiştir [22]. Yüksek yoğunluklu polietilen içerisine çinko borat ve grafit tozları katılarak elde edilen polimer kompozitlerin mekanik özelliklerinde değişim meydana geldiği gözlemlenmiştir [23]. Polipropilen esaslı kompozit malzemelere alüminyum tozu katılmasıyla vizkozite değerlerinde değişiklikler gözlemlenmiştir [24]. Bor bileşikler katılarak üretilen polimer kompozitlerin termal ve mekanik özelliklerinde artma gözlemlenmiştir [25]. Zirkonyum dioksit, yüksek mukavemet, yüksek kırılma tokluğu, mükemmel aşınma direnci, yüksek sertlik ve kimyasal direnç gibi mükemmel özelliklere sahiptir. Bu sebeple ZrO₂ nanopartikülleri, gelişmiş performansla sahip kompozitler üretmek için katkı malzemesi olarak kullanılmıştır. Epoksilerin mekanik davranışını geliştirme ve bazı durumlarda özellikle tokluklarını iyileştirdiği gözlemlenmiştir [26].

Bununla beraber, reçine içine mikron boyutunda ZrO₂ katılarak karbon fiber takviyeli polimer kompozit üretimi ile ilgili çalışmaya literatürde rastlanmamıştır. Bu çalışmada, reçine içine farklı oranlarda ZrO₂ katkısının etkileri araştırılarak, termal ve mekanik özelliklerinin analiz edilmesiyle literatüre önemli bir katkı sağlamak ve endüstriyel uygulamalara örnek teşkil etmektedir.

2. MATERYAL VE METOT (MATERIAL AND METHOD)

2.1. Malzemeler (Materials)

Bu çalışmada takviye malzemesi olarak 300x300mm boyutlarında karbon fiber prepregler kullanılmıştır. Polimer matris malzemesi olarak LOCTITE EA 9396 AERO (Hysol EA 9396) epoksi

reçine kullanılmıştır. Epoksi, reçine ve sertleştirici olarak 2 bileşenden oluşur. Hysol EA 9396 düşük vizkozitelidir. Oda sıcaklığında saklama ve kürlenme özelliklerine sahiptir. Düşük ve yüksek sıcaklıklarda yüksek dayanım gösterir. Partikül olarak $5\mu\text{m}$ 'nin altında toz boyutuna sahip ZrO_2 kullanılmıştır.

2.2. Üretim Yöntemi (Production Method)

Bu çalışmada katkısız, %0.5, %1, %1.5 ve %2 ağırlık oranlarında ZrO_2 katkılı numuneler üretilmiştir. Belirtilen oranlarda ZrO_2 , epoksi reçine içine katılarak Speed Mixer'da 2500 rpm'de 5

dk karıştırılmıştır. Karıştırılan numuneler kalıplara alınarak 23°C , 46°C , 66°C ve 86°C 'de kürlenmiştir. Daha sonra aynı oranlardaki karışımlar el yatırma yöntemi ile $300 \times 300\text{mm}$ boyutlarında kesilmiş olan karbon fiberlere 5'er kat serim yapılarak uygulanmıştır. Serimleri yapılan numuneler, 23°C 'de 1 atmosferlik basınç altında vakum torbalama işlemi ile kürlenmiştir. Vakum, hava boşluklarının ortadan kaldırılmasına yardımcı olur ve reçinenin liflerin arasına nüfuz etmesini kolaylaştırarak fazla reçinenin de dışarı atılmasını sağlar. Şekil 1'de ZrO_2 katkılı reçinelerin Şekil 2'de karbon fiber takviyeli kompozitlerin üretim aşamaları gösterilmektedir.



Şekil 1. a) Speed mixer b) kalıba alınan karışım c) kürlenme için etüv d) kalıptan çıkarılan numune (a)Speed mixer b) sample taken into mold c) oven for curing d) sample removed from mold)



Şekil 2. a) El yatırma yöntemi ile kompozit üretimi b) vakum torbalama (a)Composite production by hand lay-up method b) vacuum bagging)

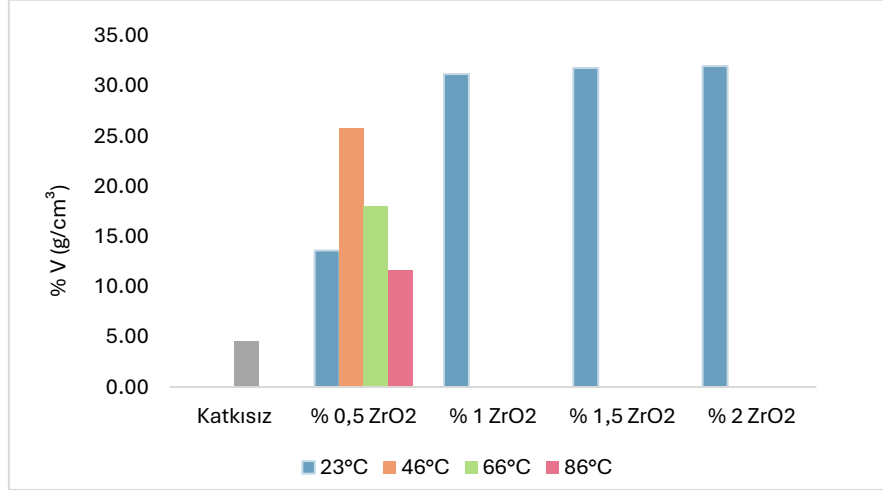
2.3. Karakterizasyon Teknikleri (Characterization Techniques)

ZrO_2 katkılı reçinelerin hacimsel hesaplamaları, arşimet prensibi ile ± 0.01 gr hassasiyetindeki terazi kullanılarak yapılmıştır. Shore D sertlik testi, TYPE D DUROMETER cihazı ile ASTM D2240 standartlarına göre yapılmıştır. Karbon fiber takviyeli polimer kompozitlerin DSC, çekme ve eğme testleri yapılmıştır. DSC testi Universal TA Instrument cihazı ile EN 6064 standartlarına göre, çekme testi INSTRON 34TM-30 cihazı ile ASTM D 638-10 standartlarına göre ve eğme testi INSTRON cihazı ile EN 2563 standartlarına göre yapılmıştır.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

3.1. ZrO_2 Katkılı Reçinelerin Analizi (Analysis of ZrO_2 Doped Resins)

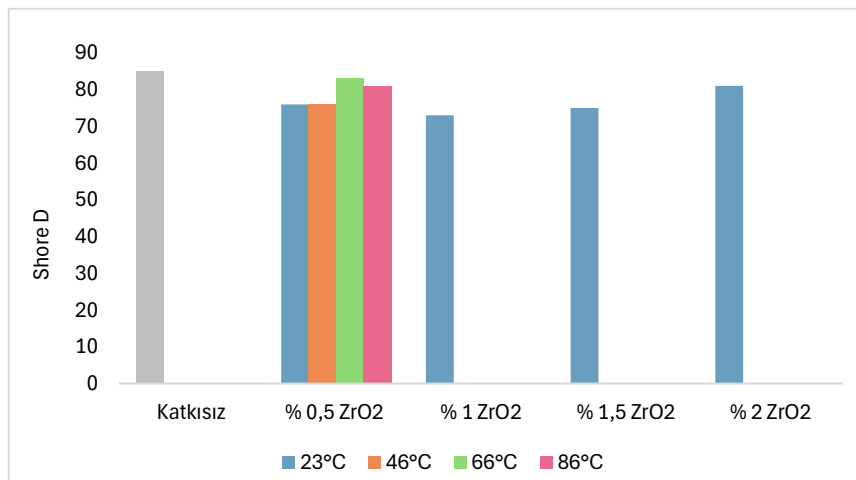
Hacimsel hesaplamalar sonucunda elde edilen değerler Şekil 3'te verilmiştir. En yüksek hacimsel artış $\%32 \text{ g/cm}^3$ ile $\%2 \text{ ZrO}_2$ katkılanmış numunede elde edilmiştir. Katkılanmış numunelerin tamamında katkısızdan daha fazla hacimsel artış görülmüştür. Epoksi reçine içine ZrO_2 katkısının hacimsel artışa neden olduğu tespit edilmiştir.



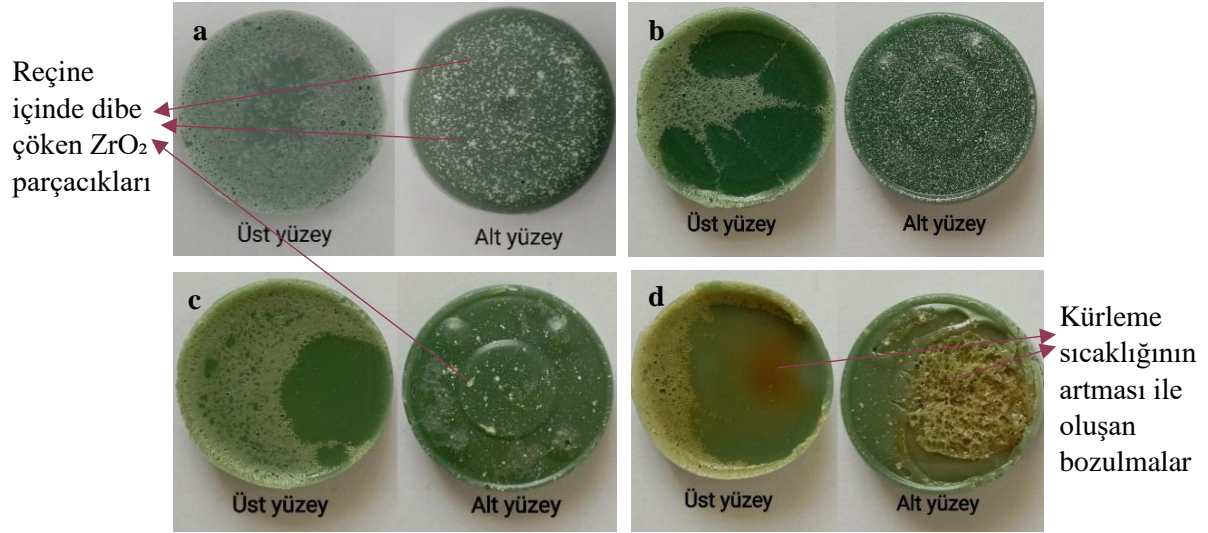
Şekil 3. Katkısız ve ZrO₂ katkılı reçinelerin hacimsel hesaplama değerleri (Volumetric calculation values of undoped and ZrO₂ doped resins)

Shore D sertlik ölçümlerinde birbirine yakın sonuçlar elde edilmiştir. Sertlik değerleri Şekil 4'te verilmiştir. En yüksek sertlik değeri 85 Shore D ile katkısız numunede ölçülmüştür. Epoksi reçine içine ZrO₂ katkısı numunelerin sertlik değerlerinde katkısız numuneye göre kısmi düşmelere sebep olduğu görülmüştür. Akıncı ve ark. yaptığı çalışmada ağırlıkça %5, %10, %20 ve %30 oranlarında ZrO₂ katkılı numuneler üretilmiş ve Shore D sertlik değerleri 79-82 arasında gözlemlenmiştir. ZrO₂ katkı oranı arttıkça numunelerin sertlik değerinde kısmi bir artış

gözlemlenmiştir [26]. Bu çalışmadaki Shore D sertlik sonuçları ile literatürdeki sertlik sonuçlarının yakın olduğu görülmüştür. Literatürde ZrO₂ katkısı sertlik değerinde kısmi bir artış sağlarken, bu çalışmada kısmi bir düşmeye neden olmuştur. Bunun nedeni, literatürdeki çalışmada kullanılan toz boyutu 1µm'nin altındayken, bu çalışmada 5 µm'nin altındadır. Zirkonyum dioksitin küçük toz boyutunda katkılanması numune sertliğinde artış sağlarken, büyük toz boyutunda katkılanması kısmi düşmeye neden olduğu görülmüştür.



Şekil 4. Katkısız ve ZrO₂ katkılı reçinelerin Shore D sertlik değerleri (Shore D hardness values of undoped and ZrO₂ doped resins)



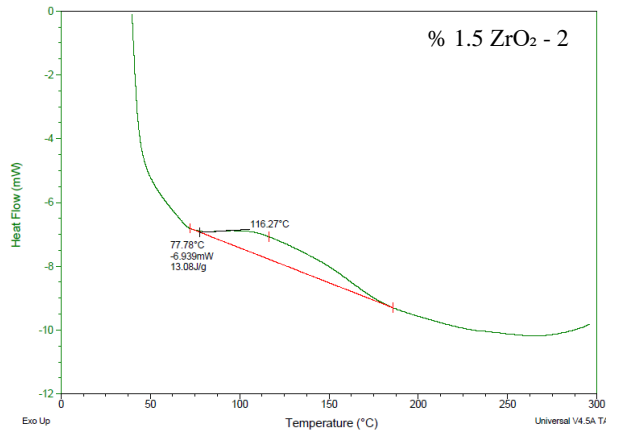
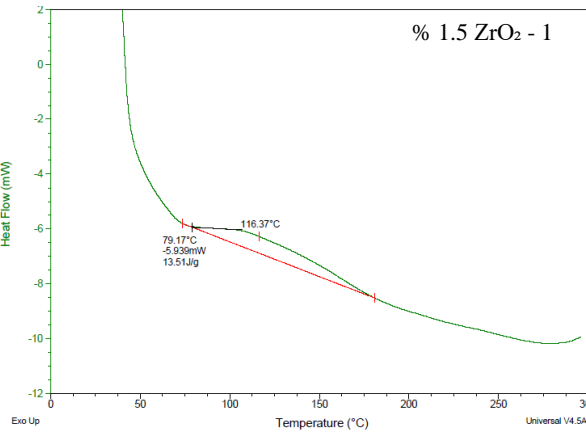
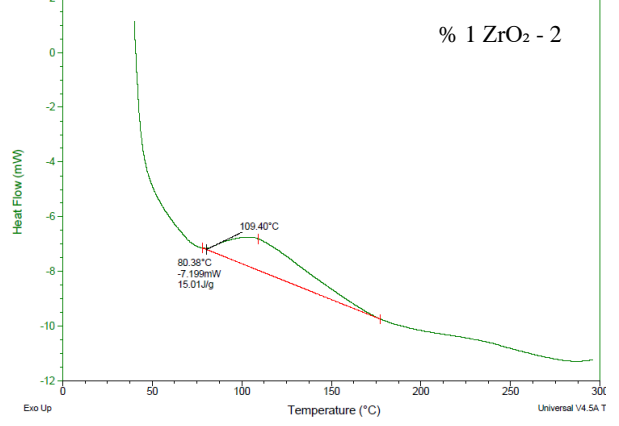
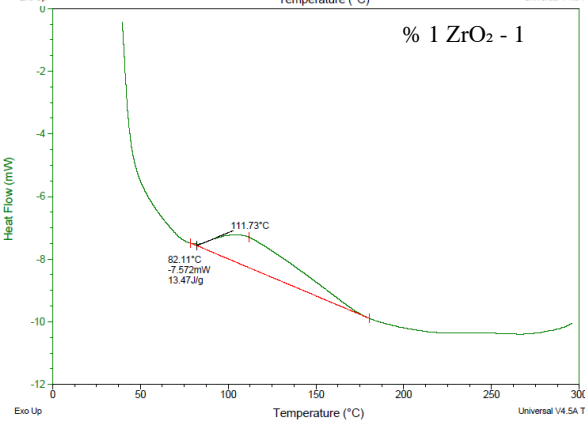
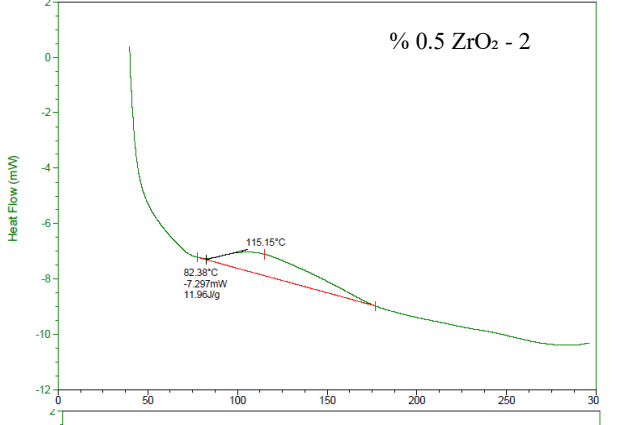
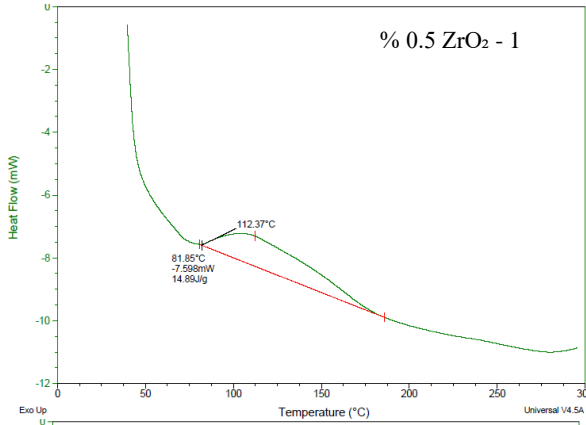
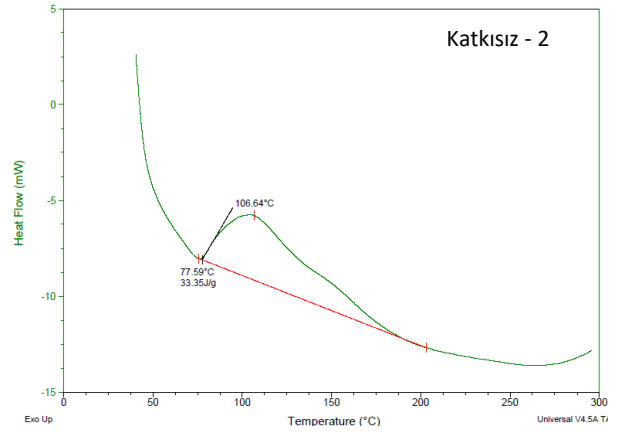
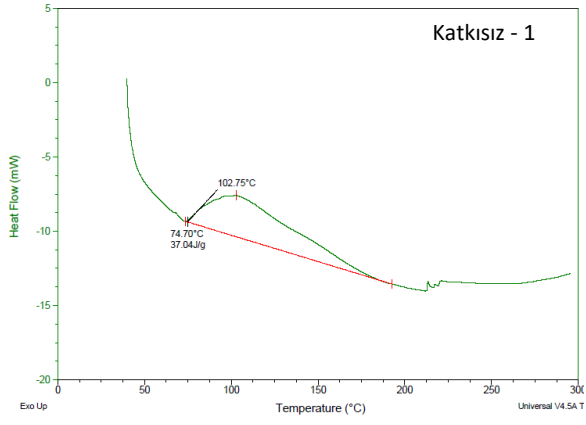
Şekil 5. %0.5 ZrO₂ katkılı numunelerin fotoğrafları a) 23°C, b) 46°C, c) 66°C, d) 86°C (Photos of ZrO₂ doped samples)

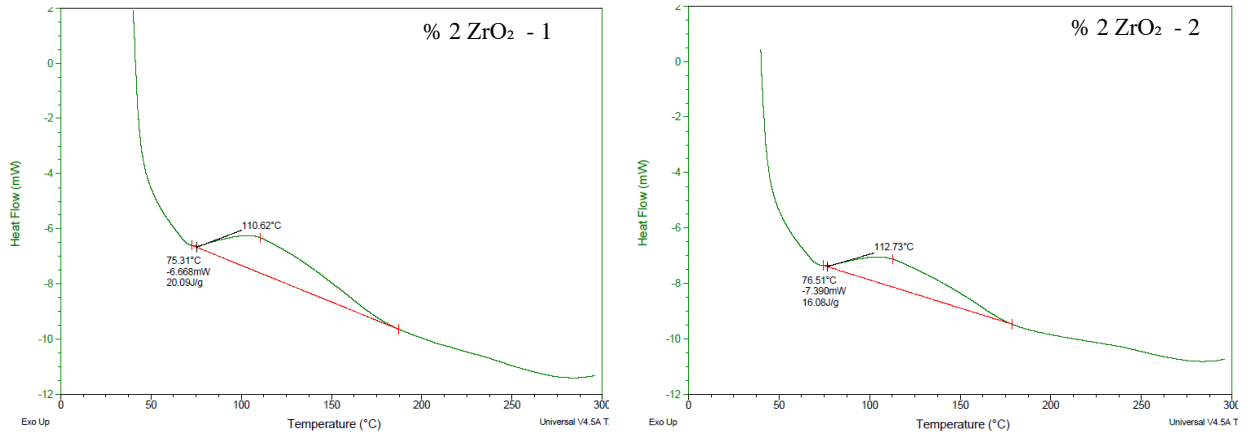
Reçinenin kürleme sıcaklığının artması, ZrO₂ partiküllerinin dibe çökme oranında azalma sağlarken, numune yüzeylerinde hasar oluşumuna neden olduğu görülmüştür. Sıcaklığın artması kürleme süresini kısalttığı için parçacıkların reçine içinde dibe çökmeden kürlenmesini sağlamıştır. Dibe çökme oranları ve sıcaklığın etkisiyle bozulmalar Şekil 5'te gösterilmiştir.

3.2. ZrO₂ Katkılı Karbon Fiber Takviyeli Polimer Kompozitlerin Analizi (Analysis of ZrO₂ Doped Carbon Fiber Reinforced Polymer Composites)

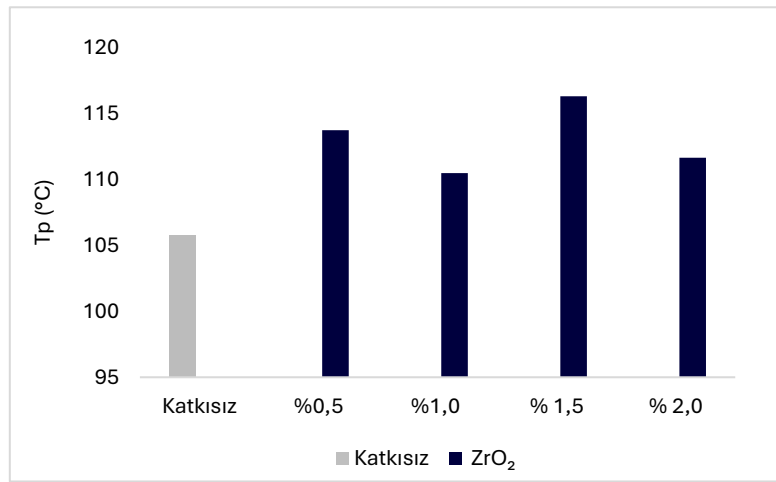
DSC testi ile polimerleşme sıcaklıkları ve polimerleşme entalpi değerleri elde edilmiştir. Bu değerler Şekil 6'daki DSC grafiklerinde görülmektedir. Üretilen tüm kompozitlerde polimerleşme sıcaklık değerleri 102°C-113°C arasında değişmektedir. En düşük polimerleşme sıcaklığı 102.75°C ile katkısız kompozitte görülmüştür. Polimerleşme sıcaklığı, termoset

polimerlerdeki çapraz bağların oluşum sıcaklığını vermektedir [27]. Dolayısıyla epoksi reçine içine ZrO₂ katkılanmasının çapraz bağların oluşum sıcaklığını kısmi oranda artırdığını göstermektedir. Ortalaması alınmış olan polimerleşme sıcaklıkları Şekil 7'de verilmiştir. ZrO₂ katkılanmış kompozitlerin polimerleşme entalpi (ΔH_p) katkısız numuneden düşük elde edilmiştir. En yüksek ΔH_p değerine 32.20 j/g ile katkısız kompozitte ulaşılmıştır. Ortalaması alınmış ΔH_p değerleri Şekil 8'de verilmiştir. Dorigato ve ark. yaptığı çalışmada, epoksi reçine içine nano boyutta ZrO₂ katkısı ile çapraz bağ yoğunluğunun azaldığı gözlemlenmiştir [28]. Bu çalışmada da literatürdeki çalışma ile benzer olarak ZrO₂ katkısının termoset polimerlerdeki çapraz bağlara etki ettiği ve çapraz bağ yoğunluğunda azalmaya neden olduğu değerlendirilmiştir. Oluşan çapraz bağ ve açığa çıkan enerji doğru orantılı olduğu için çapraz bağ yoğunluğu azaldıkça ΔH_p değerlerinin de azaldığı görülmüştür.

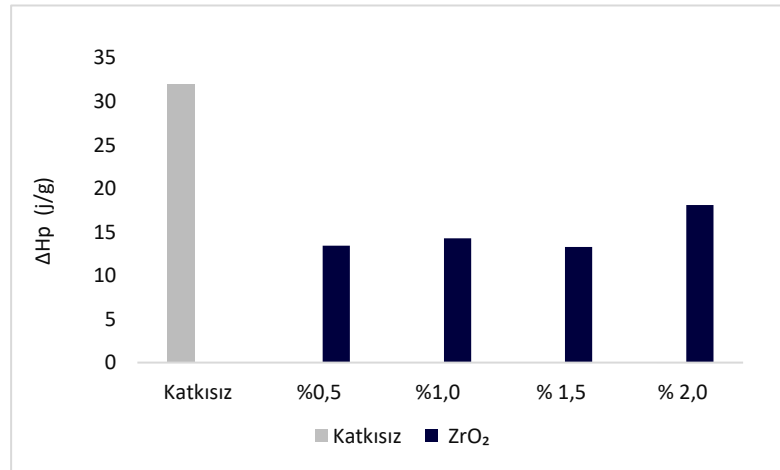




Şekil 6. Katkısız ve ZrO₂ katkılı kompozitlerin DSC grafikleri (DSC graphs of undoped and ZrO₂ doped composites)



Şekil 7. Katkısız ve ZrO₂ katkılı kompozitlerin polimerleşme sıcaklıkları (Polymerization temperatures of undoped and ZrO₂ doped composites)



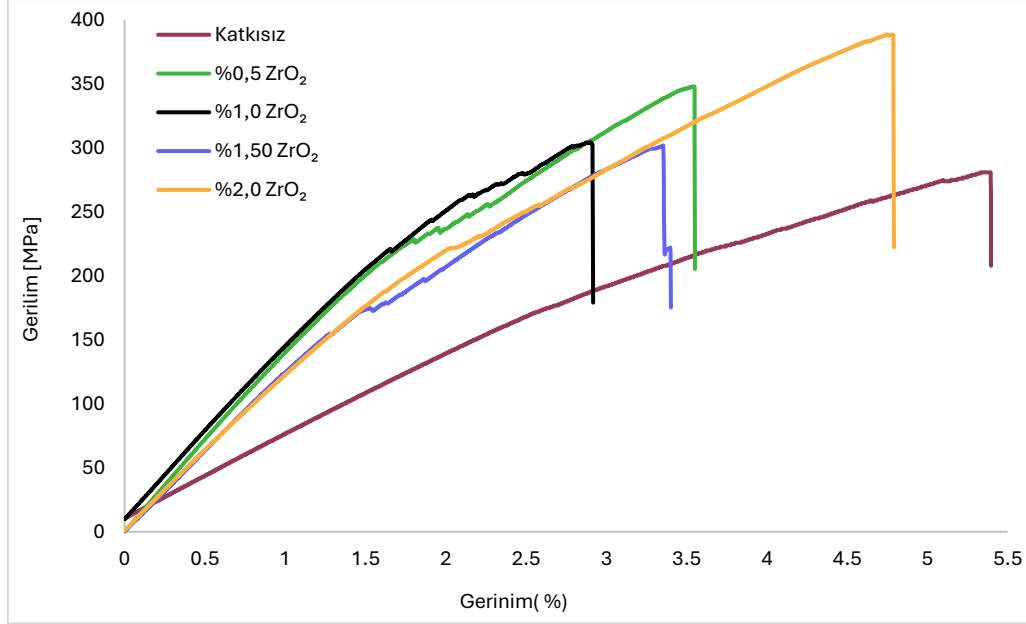
Şekil 8. Katkısız ve ZrO₂ katkılı kompozitlerin polimerleşme entalpisi (Polymerization enthalpy of undoped and ZrO₂ doped composites)

Çekme testinde gerilim-gerinim grafikleri elde edilmiştir. Şekil 9’da gerilim-gerinim grafiği görülmektedir. En yüksek çekme gerilimi 388 MPa ile %2 ZrO₂ katkılanmış numunede gözlemlenirken, en düşük 281 MPa ile katkısız numunede gözlemlenmiştir. Şekil 10’ da çekme gerilim

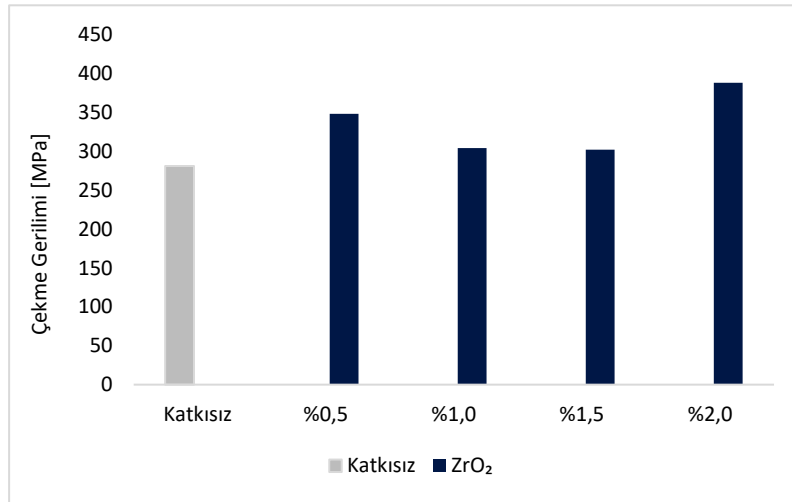
değerleri verilmiştir. ZrO₂ katkılı tüm numunelerdeki çekme gerilim değerlerinin, katkısız numuneden yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Rahmah’ın yaptığı çalışmada, epoksi reçine içine nano boyutta ZrO₂ katkısının katkısız kompozite

göre çekme gerilim değerlerini artırdığı gözlemlenmiştir. %4, %6 ve %8 oranlarında katkılanan ZrO₂ katkı oranı arttıkça çekme gerilim değerleri de aşamalı olarak arttığı gözlemlenmiştir [29]. Elyaf-matris arayüzey bağı ne kadar iyiye gerilim matristen elyafa daha iyi aktarılır [30]. Bu

çalışmada, ZrO₂ katkı maddesi gerilimin elyalara daha iyi aktarılmasını sağlamış ve bu yüzden kompozitlerdeki çekme gerilim değerlerinin arttığı görülmüştür. Literatürde yapılan çalışmalar da bunu desteklemektedir.



Şekil 9. Katkısız ve ZrO₂ katkılı kompozitlerin gerilim- gerilim grafiği (Stress-strain graph of undoped and ZrO₂ doped composites)



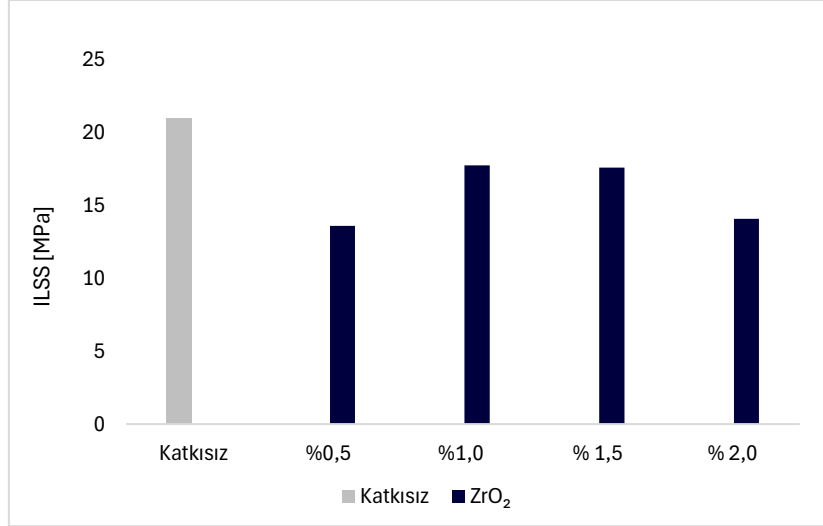
Şekil 10. Katkısız ve ZrO₂ katkılı kompozitlerin çekme gerilim değerleri (Tensile stress values of undoped and ZrO₂ doped composites)

Tabakalar arası kesme mukavemet (ILSS) değerleri eğme testi ile elde edilmiş ve elde edilen ILSS değerleri Şekil 11’de verilmiştir. En yüksek ILSS 21 MPa değeri ile katkısız numunede görülürken, katkılanmış tüm numunelerdeki ILSS değerlerinin, katkısız numuneden düşük olduğu görülmüştür. Bu sebeple epoksi reçine içine ZrO₂ katkısının polimer kompozitlerdeki tabakalar arası kesme

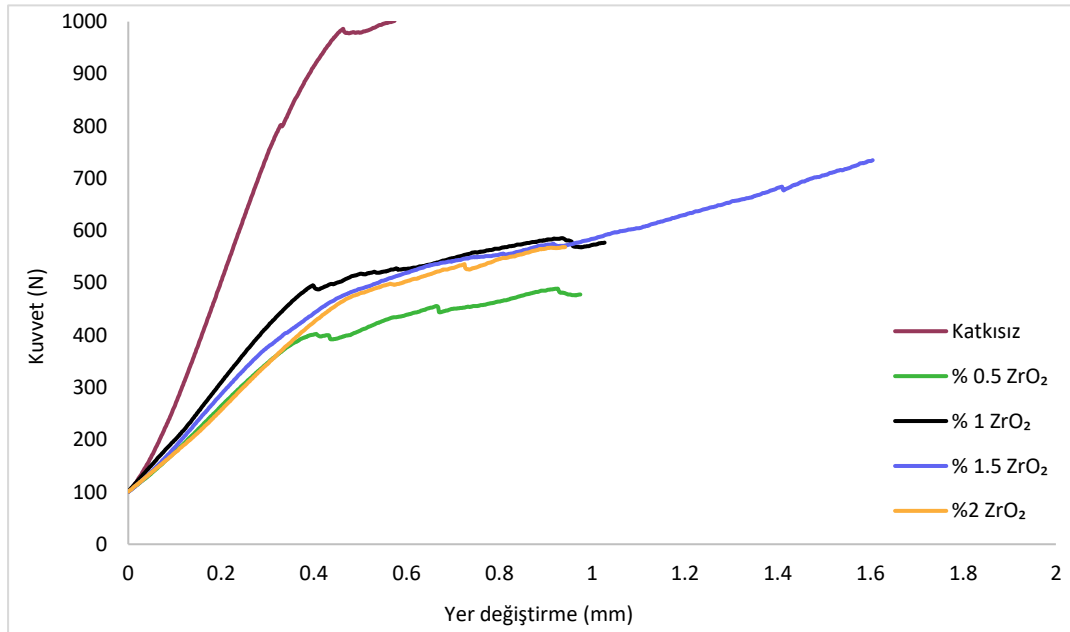
mukavemetini düşürdüğü tespit edilmiştir. Şekil 12’de kuvvet-yer değiştirme grafiği verilmiştir. Toorchi ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, epoksi reçine içine %1, %2 ve %3 oranlarında ZrO₂ katkılanarak üretilmiş kompozitlerdeki ILSS değerlerinin katkısız kompozitten yüksek olduğu gözlemlenmiştir. En yüksek ILSS değerine %2 ZrO₂ katkılanmış kompozitte ulaşılmış, %2’den

sonra ZrO₂ oranı arttığında ILSS değerinde düşme gözlemlenmiştir. Bunun nedeni artan ZrO₂ oranı ile aglomerasyonun artması ve elyaf-matris arayüzey bağını zayıflatmasıdır [31]. ILSS değerleri elyaf ve matris arasındaki yapışkanlık derecesini göstermektedir [32]. Bu çalışmada ZrO₂ katkısı elyaf matris arayüzey bağına etki ederek ILSS değerlerinde düşmeye neden olduğu tespit

edilmiştir. Literatürdeki çalışmadan farklı sonuçlar elde edilmesinin nedeni farklı toz boyutları kullanılması olarak değerlendirilmiştir. Literatürde yapılan çalışmada nano boyutta ZrO₂ kullanılırken, bu çalışmada mikro boyutta ZrO₂ kullanılmıştır. Nano boyuttaki tozlar arayüzey bağını artırırken mikro boyuttaki tozlar arayüzey bağının düşmesine neden olmuştur.



Şekil 11. Katkısız ve ZrO₂ katkılı kompozitlerin ILSS değerleri (ILSS values of undoped and ZrO₂ doped composites)



Şekil 12. Katkısız ve ZrO₂ katkılı kompozitlerin kuvvet- yer değiştirme grafiği (Force-displacement graph of undoped and ZrO₂ doped composites)

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada, reçine içine farklı oranlarda ZrO₂ katkısının üretilen reçine numuneleri ve karbon fiber takviyeli kompozitlerin üzerindeki etkileri incelenmiş ve sonuçlar aşağıda verilmiştir.

- Epoksi reçine içine ZrO₂ katkısının hacimsel artışa neden olduğu gözlemlenmiştir. En yüksek hacimsel artış oranı %32 ile %2 ZrO₂ katkılı numunede gözlemlenirken, en düşük oran %4.5 ile katkısız numunede gözlemlenmiştir.
- Shore D sertlik ölçümlerinde birbirine yakın sonuçlar elde edilmiştir. En yüksek sertlik değeri 85 Shore D ile katkısız numunede gözlemlenmiştir. Epoksi reçine içine ZrO₂ katkılanması numunelerin sertlik değerlerinde kısmi düşmelere sebep olduğu görülmüştür.
- Reçinenin kütleme sıcaklığının artması, ZrO₂ partiküllerinin dibe çökme oranında azalma sağlarken, numune yüzeylerinde hasar oluşumuna neden olduğu görülmüştür.
- En yüksek polimerleşme entalpi değerine 32.20 J/g ile katkısız kompozitte ulaşılmıştır. ZrO₂ katkısının polimerleşme entalpisini düşürdüğü tespit edilmiştir.
- En yüksek çekme gerilimi 388 MPa ile %2 ZrO₂ katkılı numunede elde edilirken, en düşük 281 MPa ile katkısız numunede elde edilmiştir. Epoksi reçine içine ZrO₂ katkısının polimer kompozitlerdeki çekme gerilimini arttırdığı tespit edilmiştir.
- En yüksek ILSS değeri 21 MPa ile katkısız numunede gözlemlenmiştir. Katkılı tüm numunelerdeki ILSS değerlerinin, katkısız numuneden düşük olduğu bu sebeple epoksi reçine içine ZrO₂ katkısının polimer kompozitlerdeki tabakalar arası kesme mukavemetini düşürdüğü tespit edilmiştir.

Bu çalışmada ZrO₂ katkı oranı %0.5'ten %2'ye kadar kullanılmıştır. Katkı oranı %1.5'tan %2'ye çıkarıldığında ILSS değerinde ciddi bir düşme görülmüştür. Artan katkı oranı ile aglomerasyonun arttığı ve ara yüzey bağımlı zayıflattığı şeklinde değerlendirilmiştir. Kumar ve ark. yaptığı bir çalışmada %2, %4 ve %8 oranlarında ZrO₂ katkılı kompozitlerde mekanik ve termal özelliklerin %4'e kadar yükseldiği %4'ten sonraki katkı oranında özelliklerin düştüğünü ve bunun sebebi olarak artan katkı oranı ile matris içindeki aglomerasyonun artması olarak göstermişlerdir [33]. Li ve ark. yaptığı çalışmada %1, %2, %3, %4 ve %5 oranlarında nano ZrO₂ katkılı kompozitlerde, %3 katkı oranında mekanik özelliklerin maksimum değere ulaştığı ve %3'ten sonraki katkı oranlarında

oluşan aglomerasyon ve arayüzey bağının zayıflaması ile mekanik özelliklerin düştüğü gözlemlenmiştir [30]. Bu çalışmada olduğu gibi literatürdeki çalışmalarda da artan ZrO₂ oranı ile aglomerasyon artmış ve elyaf-matris arayüzey bağına zarar vermiştir. Bu yüzden, bu çalışmada katkı oranı %2'de bırakılmış yüksek oranlara çıkılmamıştır.

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 (AUTHOR'S CONTRIBUTIONS)

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

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

Erdem MERMER: Deneylerin planlanması ve uygulanmasını sağlamış, sonuçların değerlendirilmesi, makalenin yazımı ve son düzenlemelerinde katkıda bulunmuştur.

He provided the planning and implementation of the experiments. He contributed to the evaluation of the results, writing and last editing of the article.

Hanifi ÇİNİCİ: Makaleyi gözden geçirmiştir.

He reviewed 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] Fan Q, Duan H and Xing X, "A review of composite materials for enhancing support, flexibility and strength in exercise" Alexandria Engineering Journal 94, 90–103, 2024

[2] Yöney H, "El Yatırma Yöntemi ile Elyaf Takviyeli Kompozit Yapıların Üretilmesi ve Özellikleri", Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2007

- [3] Yalman M. Kadir, Atar İ, Mengeloğlu F, “Epoksi esaslı kompozitlerin mekanik ve fiziksel özellikleri üzerine sodyum hidroksit ile modifiye edilmiş farklı güçlendirici malzemelerin etkisi”, Turkish Journal of Forestry, 25(3), 290-301, 2024
- [4] Evirgen K. Murat, “Havacılık Sektörü için Otoklavda Üretilen Karbon Fiber Takviyeli Epoksi Polimer Kompozitlerin Termal ve Mekanik Özelliklerine Otoklav Basıncının Etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, 2023
- [5] Anthony K, “Advanced Composite Materials for Aerospace Applications”, Journal of Engineering and Scientific Research, 3(2), 1-4, 2024
- [6] Barut E, “Farklı Seramik Katkılı Polimer Matrisli Karbon Fiber Kompozit Yapıların Özelliklerinin İncelenmesi”, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2016
- [7] Yeo K. B, Hamidi H. H, Choong W. H, “Self-healing efficiency study of thermoset-thermoplastic polymer material”, Materials Science and Engineering, 1217, 2022, doi:10.1088/1757-899X/1217/1/01200
- [8] Demir, M. E, Çelik Y ve Kılıçkap H. E, “Cam ve karbon elyaf takviyeli kompozitlerde elyaf cinsinin, yükün, kayma hızı ve mesafesinin abrasiv aşınmaya etkisi”, Politeknik Dergisi, 22(4), 811-817, 2019
- [9] Yavaş M. O, “Hafif Silahlara Karşı Bireysel Savunma Amaçlı Kompozit Malzeme Tasarımı ve Balistik Dayanımı”, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2009
- [10] Sharma M, Gao S, Mader E, Sharma H, Wei L. Y and Bijwe J, “Carbon fiber surfaces and composite interphases”, Composites Science and Technology, 102, 35–50, 2014
- [11] Liu L, Jia C, He J, Zhao F, Fan D, Xing L, Wang M, Wang F, Jiang Z and Yudong H, “Interfacial characterization, control and modification of carbon fiber reinforced polymer composites”, Composites Science and Technology, 2015 doi: 10.1016/j.compscitech.2015.08.002.
- [12] Newcomb B. A, “Processing, structure, and properties of carbon fibers”, Composites: Part A, 44552016, doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesa.2016.10.018
- [13] Wanga M., Kang Q and Pan N, “Thermal conductivity enhancement of carbon fiber composites”, Applied Thermal Engineering, 29, 418–421, 2009
- [14] Shirvanimoghaddam K, Hamim S.U, Akbari M. K, Fakhrhoseini S. M, Khayyam H, Pakseresht A. H, Ghasali E, Zabet M, Munir K. S, Jia S, Davim J. P, Naebe M, “Carbon fiber reinforced metal matrix composites: Fabrication processes and properties” Composites: Part A 92, 70–96, 2017
- [15] Yetkin S. H, Ünal H ve Hatipoğlu G, “Karbon Fiber Takviyesinin Poli-fital-amit (PPA) Polimerinin Tribolojik Özelliklerine Etkisinin Araştırılması”, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C, 11(3), 744-755, 2023
- [16] He H, Li K, Wang J, Sun G, Li Y and Wang J, “Study on thermal and mechanical properties of nano-calcium carbonate/epoxy composites”, Materials and Design, 32, 4521–4527, 2011
- [17] Taşdemir M & Ulutaş E, “Düşük Yoğunluklu Polietilenin Mekanik, Fiziksel ve Morfolojik Özelliklerine Alaşımli Demir Tozunun Etkisi”, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C, 12(3), 628-638, 2024
- [18] Li F, Hu K, Li J and Zhao B, “The friction and wear characteristics of nanometer ZnO filled polytetrafluoroethylene”, Wear, 249, 877–882, 2002
- [19] Zhang M. Q, Ronga M.Z, Yu S. L, Wetzel B and Friedrich K, “Effect of particle surface treatment on the tribological performance of epoxy based nanocomposites” Wear, 253, 1086–1093, 2002
- [20] Kaner S, “Polimer Matrisli Karbon Kompozit Malzemelerin SiC Takviye Oranlarının Mekanik ve Metalurjik Özelliklere Etkileri”, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C, 12(2), 605-614, 2024
- [21] Güneş A & Deniz M. E, “Yumurta Kabuğu Takviyeli Polimer Kompozitlerin Mekanik Davranışının İncelenmesi”, BEÜ Fen Bilimleri Dergisi, 10 (2), 453-468, 2021
- [22] Florek P, Król M, Jeleń P and Mozgawa W, “Carbon Fiber Reinforced Polymer Composites Doped with Graphene Oxide in Light of Spectroscopic Studies”, Materials, 14, 1835, 2021
- [23] Ulutaş E, Eker Gümüş B ve Taşdemir M, “The Effect of Graphene on the Mechanical Properties of

High Density Polyethylene (HDPE)/Zinc Borate Polymer Composite”, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C, 11(1), 133-142, 2023

[24] Güldaşı A, Altuğ M, Temel S, “Aluminyum Tozu Takviyeli Polipropilenin Viskozite Değerlerinin İncelenmesi”, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part:C, 4(3), 147-158 2016

[25] Kılınçel M & Yılmaz E, “Aerosil ve Tinkal Parçacık Takviyesinin Yığın Kalıp Bileşiği (BMC) Kompozitlerin Mekanik Özelliklerine Etkisinin İncelenmesi”, Gazi Üniversitesi Gazi University Fen Bilimleri Dergisi Part:C, 12(3), 724-733, 2024

[26] Akinci A, Sen S. and Sen S., “Friction and wear behavior of zirconium oxide reinforced PMMA composites” Composites: Part B, 56, 42–47, 2016

[27] Speight J.G. “Monomers, Polymers, and Plastics” Handbook of Industrial Hydrocarbon Processes, 499-537, 2011

[28] Dorigato A., Pegoretti A., Bondioli F. & Messori M., Improving Epoxy Adhesives with Zirconia Nanoparticles, Composite Interfaces 17, 873–892, 2010

[29] Rahmah N. M., Comparing the Effects of ZnO and ZrO₂ Nanomaterials on the Mechanical, Chemical, and Crystalline Properties of Epoxy Resin (DGEBA), Science des Matériaux, 48, 101-107, 2024.

[30] Li J., Peng C., Li Z., Wu Z. and Liac S., The improvement in cryogenic mechanical properties of nano-ZrO₂/epoxy composites via surface modification of nano-ZrO₂, The Royal Society of Chemistry, 6, 61393–61401, 2016

[31] Toorchi D., Khosravi H. and Tohidlou E., Synergistic effect of nano-ZrO₂/graphene oxide hybrid system on the high-velocity impact behavior and interlaminar shear strength of basalt fiber/epoxy composite, Journal of Industrial Textiles, 0(0) 1–20, 2019

[32] Nayak R. K., Mahato K. K. and Ray B.C., Water absorption behavior, mechanical and thermal properties of nano TiO₂ enhanced glass fiber reinforced polymer composites, Composites: Part A, 90, 736–747, 2016

[33] Kumar K., Ghosh P K., Kumar A. and Singh O., Enhanced Thermomechanical Properties of ZrO₂ Particle Reinforced Epoxy Nanocomposite, JMEPEG, 30, 145–153, 2021

CO₂ Emission Inventory in Türkiye and Estimation of CO₂ Concentration over Türkiye by Using Dispersion Modelling

Ali CAN^{1*} , Aysel T. ATIMTAY² , Turgut TOKDEMİR² 

¹Karabük University, Faculty of Engineering, Mechanical Engineering Department, Karabük, Türkiye

²Middle East Technical University, Engineering Faculty, Environmental Engineering Faculty, Ankara, Türkiye

Article Info

Research article
Received: 20/10/2024
Revision: 21/12/2024
Accepted: 25/01/2025

Keywords

Energy
CO₂ Emission Inventory
CO₂ Contours
ISCLT3
IPCC Methods

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 20/10/2024
Düzeltilme: 21/12/2024
Kabul: 25/01/2025

Anahtar Kelimeler

Enerji
CO₂ Emisyon Envanteri
CO₂ Konturları
ISCLT3
IPCC Yöntemleri

Graphical Abstract (Grafik Özet)

In the future if the fossil fuels are continued to be used for energy generation, the CO₂ emission will expected to increase. / Fosil yakıtlar kullanıldığı sürece CO₂ konsantrasyonu gelecekte de artmaya devam edeceği öngörülmektedir.

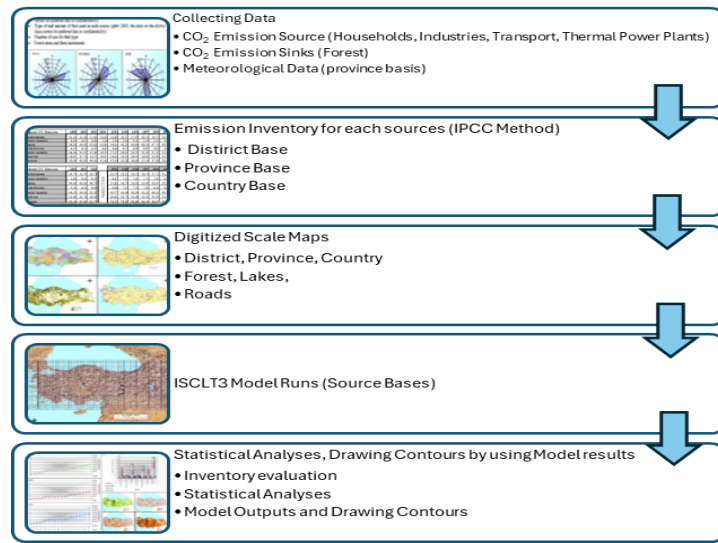


Figure A: Methodological Approach /Şekil A: Metodolojik Yaklaşım

Highlights (Önemli noktalar)

- The highest recorded CO₂ emissions, amounting to 207.97 million tons/year was in the year 2000. / En yüksek CO₂ emisyonun 2000 yılında 207.97 milyon ton/yıl'dır.
- The Marmara Region emitted the highest regional CO₂ emission throughout the years with a mean value of 54.76 million tons/year. /Marmara Bölgesi'nin yıllar boyunca ortalama 54.76 milyon ton/yıl değeri ile en yüksek bölgesel CO₂ emisyonunu yaratmıştır.
- Between 1990 and 2003, the contribution of Households to the ground-level CO₂ concentration had risen approximately 7%. / 1990 ile 2003 yılları arasında, Hanelerin yer seviyesindeki CO₂ konsantrasyonuna katkısı yaklaşık %7 oranında artmıştır.
- The trend shows an increase in CO₂ pollution from road vehicles. / Karayolu araçlarından kaynaklanan CO₂ kirliliğinde net bir artış tespit edilmiştir.

Aim (Amaç): To assess the results of CO₂ inventories and obtain the CO₂ concentration distribution in Türkiye in province and in district bases for the period of 1990 – 2003 by using dispersion modelling. / 1990 - 2003 döneminde il ve ilçe bazında CO₂ envanterini oluşturmak ve dağılım modellemesi yardımıyla Türkiye il ve ilçelerindeki CO₂ konsantrasyonunun dağılımını elde etmektir.

Originality (Özgünlük): The CO₂ emission inventory and the dispersion modelling calculations in this detail (regional, provincial, and district level) have not been done previously in Türkiye. / Türkiye'de daha önce bu detayda (bölge, il ve ilçe düzeyinde) CO₂ emisyon envanteri ve dağılım modellemesi hesaplamaları yapılmamıştır.

Results (Bulgular): The maximum annual average ground level CO₂ concentration in Marmara Region was observed in 2001 with a $22.3 \times 10^3 \mu\text{g}/\text{m}^3$. / En yüksek yer seviyesi CO₂ konsantrasyonları Marmara Bölgesi'nde 2001 yılında $22.3 \times 10^3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ olarak gözlemlenmiştir.

Conclusion (Sonuç): It was concluded that Marmara and Aegean Regions are responsible for half of the CO₂ pollution of Türkiye. / Türkiye'deki CO₂ kirliliğinin yarısından fazlasının Marmara ve Ege Bölgeleri'nden kaynaklandığı sonucuna varılmıştır.



CO₂ Emission Inventory in Türkiye and Estimation of CO₂ Concentration over Türkiye by Using Dispersion Modelling

Ali CAN^{1*} , Aysel T. ATIMTAY² , Turgut TOKDEMİR²

¹Karabük University, Faculty of Engineering, Mechanical Engineering Department, Karabük, Türkiye

²Middle East Technical University, Engineering Faculty, Environmental Engineering Faculty, Ankara, Türkiye

Article Info

Research article
Received: 20/10/2024
Revision: 21/12/2024
Accepted: 25/01/2025

Keywords

Energy
CO₂ Emission Inventory
CO₂ Contours
ISCLT3
IPCC Methods

Abstract

The main scope of this study is to assess the results of CO₂ inventories and obtain the CO₂ concentration distribution in Türkiye in province and district bases for the period of 1990 – 2003 by using dispersion modelling. The collected data from households, transportation, industry, and thermal power plants were used to estimate district base emissions for CO₂. However, after the year 2004, the collected data is not permitted to be used to estimate ground-level CO₂ concentrations due to the confidentiality of the data. Following the emission inventory, the dispersion of CO₂ in Türkiye was studied by using the USEPA's Industrial Source Complex Long Term Model, Version 3 ISCLT3. The results of the CO₂ emission inventory conducted in this study between 1990 and 2003 showed that the CO₂ emission in 1990 was 142.45 million tons/year. Notably, the highest recorded emissions, amounting to 207.97 million tons/year, was in the year 2000. The territorial distributions of CO₂ emission have shown that the Marmara Region emitted the highest regional CO₂ emission throughout the years with a mean value of 54.76 million tons/year. It was also concluded that the Aegean and Marmara Regions are responsible for half of the total CO₂ emission in Türkiye. The highest ground-level CO₂ concentrations were always obtained in the Marmara Region. It is predicted that this condition will still be maintained in the future if fossil fuels continue to be used for energy generation. Between 1990 and 2003, the contribution of Households to the ground-level CO₂ concentration had risen approximately 7%. There are serious local variations in the CO₂ concentrations when thermal power plants are considered. Although the percentage seems small, the registered number of vehicles has increased sharply since 1990. In conclusion, it can be stated that the trend shows an increase in CO₂ pollution from road vehicles.

Türkiye'de CO₂ Emisyon Envanteri ve CO₂ Konsantrasyonunun Dağılım Modeli Kullanılarak Hesaplanması

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 20/10/2024
Düzeltilme: 21/12/2024
Kabul: 25/01/2025

Anahtar Kelimeler

Enerji
CO₂ Emisyon Envanteri
CO₂ Konturları
ISCLT3
IPCC Yöntemleri

Öz

Bu çalışmanın amacı, 1990 - 2003 döneminde il ve ilçe bazında CO₂ envanterini oluşturmak ve dağılım modellemesi yardımıyla Türkiye il ve ilçelerindeki CO₂ konsantrasyonunun dağılımını elde etmektir. Hane halkı, ulaşım, sanayi ve termik santrallerden toplanan veriler ilçe düzeyinde CO₂ toplam emisyonlarını hesaplamak için kullanılmıştır. Ancak 2004 yılından sonra elde edilen veriler çalışmaları devam ettirmek için yeterli değildir. Emisyon envanteri kullanılarak, Ülkemizdeki CO₂ dağılımı, US Çevre Koruma Ajansı (EPA) tarafından geliştirilen Endüstriyel Kaynak Kompleksi Uzun Vadeli Modeli, Sürüm 3 ISCLT3 kullanılarak hesaplanmıştır. Bu çalışmada 1990-2003 yılları arasında yürütülen CO₂ emisyon envanteri sonuçları, 1990 yılında CO₂ emisyonunun 142.45 milyon ton/yıl olduğunu ve en yüksek emisyonun 2000 yılında 207.97 milyon ton/yıl değeriyle hesaplandığını göstermiştir. CO₂ emisyonlarının bölgesel dağılımı, Marmara Bölgesi'nin yıllar boyunca ortalama 54.76 milyon ton/yıl değeri ile en yüksek bölgesel CO₂ emisyonu yarattığını göstermiştir. Ayrıca, Marmara ve Ege Bölgelerinden Türkiye'nin toplam CO₂ emisyonunun yaklaşık yarısının atıldığı sonucuna da ulaşılmıştır. En yüksek yer seviyesi CO₂ konsantrasyonları her zaman Marmara Bölgesi'nde elde edilmiştir. Fosil yakıtlar kullanıldığı sürece bu durumun gelecekte de böyle devam edeceği öngörülmektedir. 1990 ile 2003 yılları arasında, Hanelerin yer seviyesindeki CO₂ konsantrasyonuna katkısı yaklaşık %7 oranında artmıştır. Termik santraller göz önüne alındığında CO₂ konsantrasyonunda ciddi yerel farklılıklar görülmüştür. Oransal olarak küçük görünse de, kayıtlı araç sayısı 1990'dan itibaren yoğun bir şekilde artmıştır. Ayrıca karayolu araçlarından kaynaklanan CO₂ kirliliğinde net bir artış tespit edilmiştir.

1. INTRODUCTION (GİRİŞ)

It is an observational fact that atmospheric CO₂ concentration, mainly formed during energy generation with combustion reactions, is increasing continuously and will keep growing in the future [1]. The rise of atmospheric CO₂ concentration derived from global sources over time is due to its long life [2]. The Industrial Revolution was considered the beginning of the growth of CO₂ concentration over the years [3]. This pollutant is highly released into the atmosphere owing to burning fossil fuels [4, 5]. The global CO₂ budget is complicated and involves the CO₂ transfer between the biosphere, the atmosphere and the oceans [6]. Together with CO₂ many other pollutants are generated. However, CO₂ cannot be removed from exhaust gases like other pollutants, and it causes the Green House (GH) effect. It is estimated that CO₂ concentration is responsible for approximately 60% of the total greenhouse (GH) effect [7, 8].

The quantity of growth is determined by the global carbon cycle of carbon sources and sinks or reservoirs [9, 10]. The increasing CO₂ concentration in the atmosphere means a significant CO₂ cycle through the atmosphere, biosphere, and ocean [11]. The main relationship between CO₂ emissions and atmospheric concentrations is mostly examined by carbon cycle models that consider all of the important sources and sinks [12]. The main CO₂ sources are the burning of fossil fuels and changes in land use. The main sinks of CO₂ are the forests and oceans [13]. However, there are still large uncertainties as to whether the coastal zones act as sinks or sources [14].

The most important atmospheric exchange of carbon is the one between the biosphere and the atmosphere. The biosphere removes carbon from the CO₂ of the atmosphere by photosynthesis. It again releases CO₂ into the atmosphere during the decay of plants [15]. The rate is equal to about 20-25 % of the total annual human-induced CO₂ emissions. Therefore, a significant proportion of global emissions come from this source. The overall strategy is to stabilize the atmospheric CO₂ concentration, and this must include forest protection as a key component [16].

Atmospheric climate change is taking an increasingly important place in the policy programs and decision-making process in both the private sector and the public, countries have designed to meet their national goals, are extremely diverse [17]. The main international agreement is the United Nations Framework Convention on Climate Change (FCCC) [18]. 189 Parties including Türkiye have

ratified the FCCC. Türkiye is formally in the Convention Annex I list [19]. The main objective of the Convention is to poise the concentration of greenhouse gases in the atmosphere to a level that will prevent dangerous anthropogenic emissions [20, 21].

In December 1997, the UNFCCC Conference of Parties (COP) held in Kyoto adopted the Kyoto Protocol. Kyoto conference has been accepted as a high-profile event because, for the first time, industrialized countries adopted emission reduction targets that are legally binding [22]. The Protocol offers no guidelines for implementation at the national level; rather, it provides freedom in respect of types of national legislation and policy. There are strict quantity norms in the Protocol. Improvement of energy efficiency, carbon storage in forests, and forming sustainable agriculture are some of the important topics [23]. Türkiye was included in the list of countries under the Kyoto Protocol in 2009. After the ratification of the protocol in 2009 without any target, Türkiye began to study Climate Change mitigation activities under the sustainable development plans' strategies [24, 25, 50, 51].

In this study, the emission inventory of CO₂ for Türkiye was done based on districts and provinces. The CO₂ inventory with this detail has not been done in Türkiye previously. This inventory was prepared by considering all possible emission sources. The basic source of CO₂ is fossil fuel combustion in households, manufacturing industries, thermal power plants, and road vehicles. The carbon content and emission factors of the fuels used were the main points for the estimation of CO₂ emissions. The inventory has been calculated between 1990 and 2003. Emissions in 1990 are important because the Kyoto Protocol adopts 1990 as the base year for CO₂ reductions. The CO₂ uptake rate of forests in Türkiye based on provinces and districts is also studied to determine the net CO₂ emission and ground-level concentrations. Following the emission inventory, the dispersion of CO₂ was studied by using the ISCLT3 model [26]. Based on the results of modeling calculations, the ground-level CO₂ concentration maps were prepared and superimposed on the geographical map of Türkiye by using Geographic Information System (GIS) techniques [27]. GIS techniques were used to map all the information [28].

2. METHODOLOGY (METODOLOJİ)

IPCC methods integrated with GIS techniques and statistical methods were used to predict the emission and uptake inventories. The inventories were calculated for each district, province, and region of

Türkiye. The following data types were gathered as a time series between 1990 and 2003.

- The households' number and the population in districts
- Industries concerning its size and its place (*after 2003, the data on the district base cannot be gathered due to confidentiality*)
- Type of and amount of fuel used in each source (*after 2003, the data on the district base cannot be gathered due to confidentiality*)
- Number of cars for fuel type
- Forest areas and their increments

The data for the annual fuel use from various sources between 1990-2003 was obtained from TurkStat (Turkish Statistical Institute), ENRM (Energy and Natural Resources Ministry), and MAF (Ministry of Agriculture and Forestry).

The data is gathered from many sources as described in the related sections. After gathering, the study period was decided. The study period is important for the determination of the base year and industrial development of districts in Türkiye because the energy consumption is one main consideration for economic inputs. Within this context, this study can be used locally in terms of energy consumption and its effect on the environment, especially on climate.

Emission Inventory: The IPCC methods were used to estimate national inventories of greenhouse gas emissions resulting from human activities. The primary technical guidelines for national inventories are based on the IPCC Guidelines [4, 5]. The IPCC establishes a standard framework for the categorization of emission sources. According to the IPCC, activities that originate naturally and do not create net greenhouse gas emissions are intentionally excluded from this study.

The general formula according to the IPCC for the CO₂ emission is given as:

$\text{CO}_2 \text{ emissions} = \sum \text{Fuel consumption in energy units (TJ) for each sector} * \text{Carbon Emission Factor} * \text{Fraction Oxidized} * \text{Convert Carbon Emission to CO}_2.$
--

Road Vehicles: The amount of fuel consumed on the roads of each district of Türkiye was calculated by using the following formula (Equ. 1).

$$H_a = \frac{A}{B} \times \frac{C}{D} \times F_a \quad (1)$$

- A : The number of households in districts
- B : The number of households in the province
- C : The number of cars in the province
- D : Total number of car
- H_a: Fuel consumption in the district according to fuel type a (tons)
- F_a: Fuel consumption by car according to fuel type a (tons)
- a : Gasoline or diesel

Households: The regional fuel consumption factors were used per household to estimate the total amount of fuel consumption in districts, provinces, and regions for the years 1990-2010. (Equ. 2). The following equation was used:

$$C = A \times B \quad (2)$$

- A : The number of households in districts (households number/region)
- B : Regional fuel consumption factors per household (tons/household)
- C : Fuel consumption in districts (Meteorological parameters are considered) (tons/region)

Manufacturing Industries: In this study, different types of data were gathered from the SIS and MOE. These data are:

- The number of manufacturing industries according to the size of establishments between 1990 and 2003 in each district [29].
- The total energy consumption (TOE) of the manufacturing industries in Türkiye according to the size of establishments [30, 31, 32, 33, 34, 35].
- The fuel consumption within the manufacturing industries across each province [36].
- The overall fuel consumption by manufacturing industries in Türkiye [37].

The annual fuel consumption across districts' manufacturing industries was estimated using the following formula (Eqn. 3).

$$D = \frac{A}{B} \times C \quad G_t = \frac{F}{C} \times D_n \times E \quad (3)$$

- A : The energy consumption factor of the manufacturing industries according to its size (TOE)
- B : Total number of manufacturing industries according to their size
- C : Total number of manufacturing industries in provinces according to its size
- D : The energy consumption factor of the manufacturing industries in provinces according to its size (TOE)
- D_n: The normalized energy consumption factor of the manufacturing industries in provinces according to their size
- E : The number of manufacturing industries in districts according to their size
- F : Total fuel consumption in provinces (tons)
- G_t: The fuel consumption in manufacturing industries in districts according to their size
- t : year (1990 – 2010)

GIS Techniques: The following scaled maps, given in Table 1, were digitized.

Their projection was Lambert Conformal Conic [38].

Table 1. The digitized scaled maps (Sayılaştırılmış ölçekli haritalar)

Maps	Scale	Description
Provinces	1/1 000 000	80 provinces (Düzce taken as Bolu)
Districts	1/1 000 000	911 districts
Lakes* ¹	1/1 000 000	All lakes and Dams
Forest* ²	1/1 000 000	According to 4 classes: Empty Land, Poor Forest, Intermediate Forest, Good Forest
Roads* ³	1/100 000	According to 3 classes: Railway, Highway, Others
Thermal Power Plants* ⁴	-	According to X and Y coordinate

Sources: ¹ Water Hydraulic Works; ² Ministry of Agriculture and Forestry; ³ General Directorate of Highways; ⁴ Turkish Electricity Generation - Transmission Corporation

Uncertainty Analysis: In this study, the probability density function of the annual emission is assumed as the normal distribution, and the range of uncertainty is expressed within 95% confidence intervals according to the IPCC Good Practice Guidance [39].

The probability density function of the differences of the mean values for the emissions of districts, provinces and regions in years X and Y is also normal with the following equations. Here, y is the base year series and x is the series of any year between 1991 and 2003 (Eqn 4. - 9.)

$$\text{mean} = \bar{x} - \bar{y} \quad (4)$$

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i ; \bar{y} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Y_i \quad (5)$$

$$\text{standard deviation} = (S_x^2 + S_y^2)^{1/2} \quad (6)$$

where,

$$S_x^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2 ; S_y^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Y_i - \bar{Y})^2 \quad (7)$$

then, the standard error of the mean (SEM) is given as:

$$\text{SEM} = \frac{\text{standard deviation}}{\sqrt{N}} \quad (8)$$

finally, the uncertainty interval from the set of data is estimated using classical method [39, 40].

$$\text{mean} \pm \text{SEM} \times t_{0.05,df} \quad (9)$$

N : Sample Size

df : Degrees of freedom

t_{0.05,df} : Student t-table value for (N-1) degrees of freedom and 95% of the confidence interval

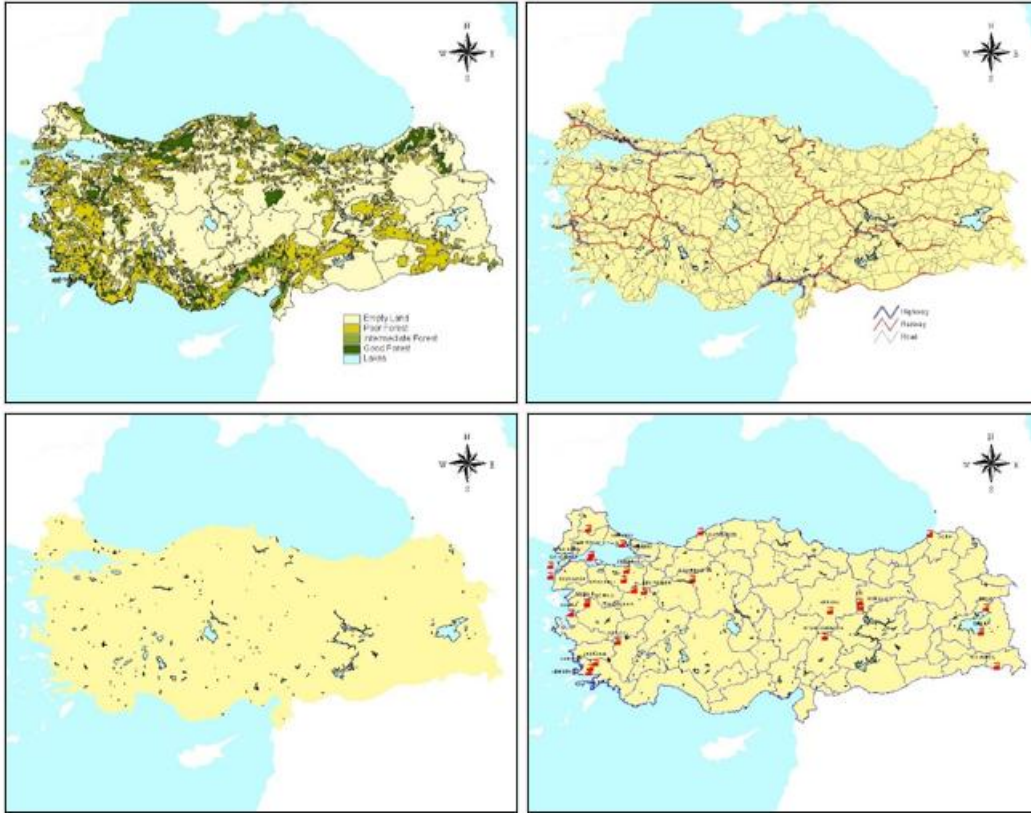


Figure 1. Forest, Roads, Lakes, and Thermal Power Plants in Türkiye (Türkiye'deki Ormanlar, Yollar, Göller ve Termik Santraller)

Forest Inventory: The net uptake of CO₂ is usually calculated by estimating the total forest area and the annual increment of biomass [4, 5].

The IPCC method for CO₂ uptake is defined as (Eqn 10. – 13.):

$$B = I \times D \quad (10)$$

$$TB = B \times (1 + RF) \quad (11)$$

$$CS = TB \times 0.45 \text{ (ton C/ton dry biomass)} \quad (12)$$

$$U = CS \times 44/12 \quad (13)$$

B : The volume of biomass (tons)
 I : Annual increment (m3)
 D : Dry biomass density (tons/m³)
 TB: Total biomass including roots
 RF : Root Factor (%)
 CS : Carbon Storage (tons)
 U : CO₂ uptake (tons)

ISCLT3 Dispersion Model: The basis of the ISCLT3 dispersion model is the steady-state GPE (Gaussian Plume Equation) [41]. The fundamental parameters for calculating the concentration of pollutants in the surrounding air at ground level are the emissions from the sources into the atmosphere, the meteorological variables, topography, and the parameters describing removal and transformation processes [42]. Then the results were superimposed to the GIS maps of the districts and provinces. The primary purpose of GIS in this study was to show the variations and changes in the districts and provinces as seen in Figure 2.

Basically, the ISCLT3 model inputs have been divided into two parts: “Runstream File” and “Meteorological Input File (STARDATA)”. The Runstream File contains modeling options, source location, receptor information, meteorological properties, and output options.

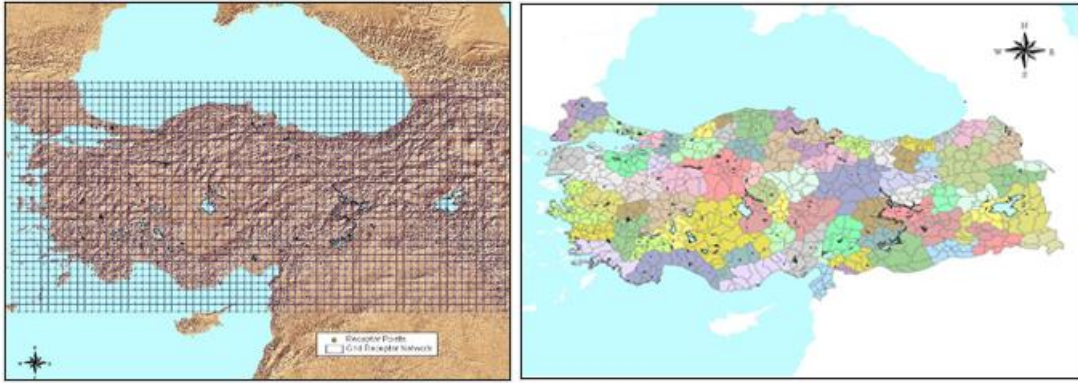


Figure 2. Determination of source and receptors for districts and provinces in Türkiye (Türkiye’de ilçe ve iller için emisyon kaynak ve yutakların tespiti)

The meteorological Input File contains wind speed, wind directions, mixing height (morning and afternoon values), and stability classes depending on many meteorological parameters such as sunbathing and cloudiness data. The meteorological

variables are very important parameters in air pollution modeling. Each meteorological variable (an example is given in Table 2.) was studied carefully on a province basis.

Table 2. Selected meteorological parameters for some provinces (Bazı iller için seçilmiş meteorolojik parametreler)

	Temperature (°C)		Mixing Height (m)				Wind Speed (m/s)	
	Minimum	Maximum	Z_{AM}		Z_{PM}		Minimum	Maximum
			Minimum	Maximum	Minimum	Maximum		
Value	4.3	19.5	166.2	784.1	911.0	2020.0	0	189
Province	Erzurum	Mersin	Diyarbakır	İstanbul	Samsun	Diyarbakır	Hakkari	Çanakkale

The usage of each meteorological parameter has some criteria. Mixing heights are determined according to the EPA standards [26] as given in Table 3. The stability classes have different mixing height calculations for the model. The annual average morning value (Z_{AM}) and average afternoon

value (Z_{PM}) mixing heights were obtained from the synoptic meteorological stations’ measurements. Wind roses were plotted to show the frequency distribution of wind direction for each province (Figure 3).

Table 3. EPA Standards for Mixing Height (EPA Karışım Yüksekliği Standartları)

Stability Class	A	B	C	D	E	F
Mixing Heights	$1.5 \times Z_{PM}$	Z_{PM}	Z_{PM}	$(Z_{PM} + Z_{AM}) / 2$	Z_{AM}	Z_{AM}

Model Evaluation: There isn’t any CO₂ concentration measurement station in Türkiye. Therefore, the CO₂ concentration over Türkiye is estimated by using the measured CO₂ concentration

data of the nearest CO₂ measurement stations around Türkiye by using the Kriging Method [43]. These data are used to compare model outputs using statistical methods.

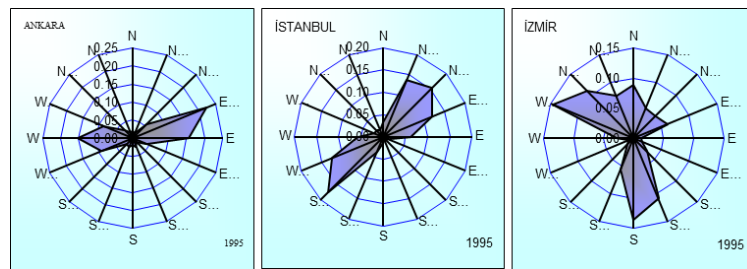


Figure 3. Wind roses of Ankara, İstanbul and İzmir provinces, 1995 (Ankara, İstanbul ve İzmir illerine ait rüzgar gülleri, 1995)

Dlugokency et al. [44] have used such types of approaches. Besides the trend analysis, “R² values” and “Correlation Coefficient” relationship between the two data sets were also tested [45]. The statistical methods are listed as follows: K-mean cluster analysis is used to identify the irrelevance of the value in the series [46]; Cronbach Alfa (α) Reliability Analysis determines the internal consistency of the model [47] and Mann-Kendall Rank correlation test is a non-parametric method used to identify any potential increasing or decreasing trends in the series [48].

3. RESULTS AND DISCUSSIONS (SONUÇLAR VE TARTIŞMA)

3.1. Emission Inventory (Emisyon Envanteri)

The CO₂ emission inventory is the basic requirement of the ISCLT3 model. The fuel consumption data at district, provincial, and regional levels have been studied in detail to prepare the input data for the modeling program. This inventory covers four types of sources. The sources are industrial, residential, road transportation, and energy production.

According to the inventory results of districts, the İskenderun district of Hatay province, Afşin district of K.Maraş province, and Üsküdar district of İstanbul province have emitted the highest quantity of CO₂ in Türkiye. İskenderun has the highest CO₂ emission for the durations of 1990-1998 and 2002-2003 with 5.7, 7.4, 7.1, 7.0, 10.8, 10.9, 10.4, 7.2 and 8.5 million tons, respectively. In 2000 and 2001, the highest levels of CO₂ emissions were observed in Üsküdar (7.5 and 8.1 million tons, respectively).

In the provincial emission series, the maximum annual CO₂ emission was observed in İstanbul with

an average value of 30 million tons per year between 1990-2003. The amount of increase in the CO₂ emission of İstanbul in 2003 compared with 1990 (base year) was 47.3%. The future increase in the emission of İstanbul will obviously continue and will probably reach 80 million tons in 2020. The second highest CO₂ emissions were observed in Ankara, İzmir, Hatay, and Manisa provinces with 12.3 (in 2001), 16.5 (in 1999), 12.1 (in 1997), and 8.3 (in 1994) million tons, respectively. The primary reason is the high fuel consumption in thermal power plants and industries present in these provinces.

During this study, GIS techniques were used to obtain the changes in the emission series in graphical forms. The CO₂ emissions from districts and the CO₂ emission from provinces are given in Figure 4 for 2003.

Analysis of the regional results, as illustrated in Figure 5, in the **Marmara Region** shows that the highest CO₂ emission was 65.8 million tons in 2002. The percentage emission increase as compared to the base year was found as 54.4%. The contribution of households, industries, power plants, and road vehicles in this region to the annual total CO₂ emission of Türkiye is 13.9%, 7.8%, 6.3%, and 4.1%, respectively. In the **Aegean Region**, the annual average CO₂ load from all the sources is around 40 million tons. Thermal power plants produce the highest levels of emissions. The CO₂ emissions from thermal power plants range from a minimum emission value of 11.9 million tons in 1990 to a maximum value of 21.8 million tons in 1999. The maximum emission increase compared to the base year is observed to be 77.0% in 2000. The contribution to the annual CO₂ emissions was 4.7 % for households, 6.3% for industries, 10.8% for power plants, and 2.3% for road vehicles in that year.

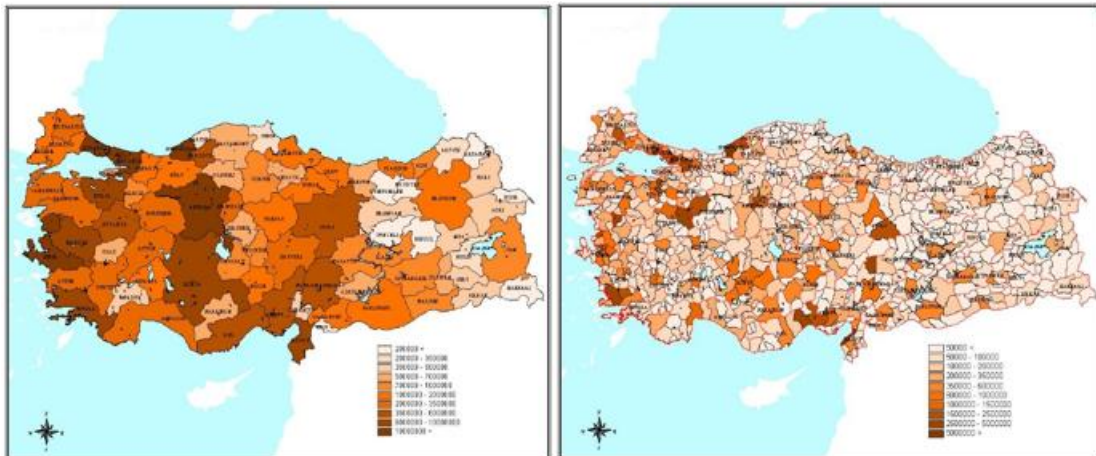


Figure 4. The CO₂ emission from provinces and districts for 2003 (2003 yılı il ve ilçelere ait CO₂ emisyonu)

In the Central Anatolia Region, the emission trend has been increasing since 2000. The total annual emission is around 30 million tons. The highest total emission is observed in 2000 with a value of 35.6 million tons and the lowest emission value is observed as 24.3 million tons in 1990. The maximum emission increase relative to the base year is 46.5%. According to the inventory results between 1990-2003, the annual CO₂ loads of households, industries, power plants, and road vehicles are 18.6, 4.9, 3.3, and 6.3 million tons, respectively. It is evident from the annual averages; the highest emission comes from households. The annual contribution of the households to the total CO₂ emissions in this region is around 10.0 %.

The regional CO₂ emission data is estimated for the years 2004 and 2010. After year 2010, the uncertainty value is increasing considerably as seen in Figure 11. Therefore, the projections were cancelled after the year 2010 (Figure 5).

In the **Mediterranean Region**, the results of inventory show that the highest emission is observed from the industries. Industries are responsible for 57.3% of the regional CO₂ emission with a value of 16.5 million tonnes in 2003. The regional contribution to the annual CO₂ emissions from all sources is around 28.8 million tons (13.8 % of total CO₂ emissions). In the **Black Sea Region**, the regional CO₂ emission trend of industries has shown peak values for the period of 1990-2003. These are 15.8 million tons in 1997 and 15.1 million tons in 2003. The contribution of this region to the

annual CO₂ emission of Türkiye is around 12.0%. However, in the **South-Eastern Anatolia Region**, the total CO₂ emission is approximately 5 million tons per year. The total contribution of this region to the CO₂ emission of Türkiye is not more than 3.0% throughout the years. The inventory of the **Eastern Anatolia Region** shows a 3.0% regional contribution to the total CO₂ emissions in Türkiye. However, the CO₂ emission trend is increasing. In 2003, the CO₂ emission was 6.6 million tons. Households are responsible for 61.5% of the regional CO₂ emissions because the climate is cold, and people burn a lot of fossil fuel during winter to warm up their houses. As an overall evaluation, the lowest CO₂ emission of all the regions was observed in 1990 and the highest in 2000. Although the Marmara and Aegean regions are responsible for half of the emissions of Türkiye, the other regions also show an increasing trend in CO₂ emissions. These results can be observed easily in Figure 6 and Table 4.

The CO₂ emission from **industries** is approximately 35% of the total emissions. The regional contribution to the total industrial CO₂ emission varies greatly from region to region. The highest emissions were observed in Marmara, Mediterranean, Black Sea, and Aegean regions with annual average values of 12.6, 12.3, 11.6, and 9.6 million tons, respectively, for the period of 1990-2003 (Figure 7). **Domestic heating** is another important source of CO₂ emissions in Türkiye.

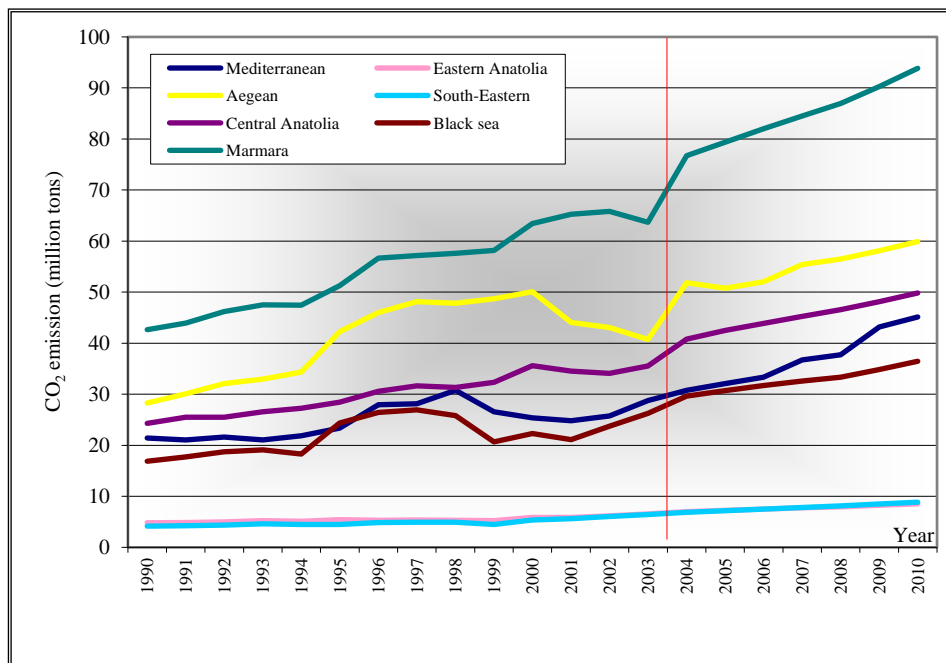


Figure 5. Regional CO₂ emission trend (Bölgesel CO₂ emisyon eğilimi)

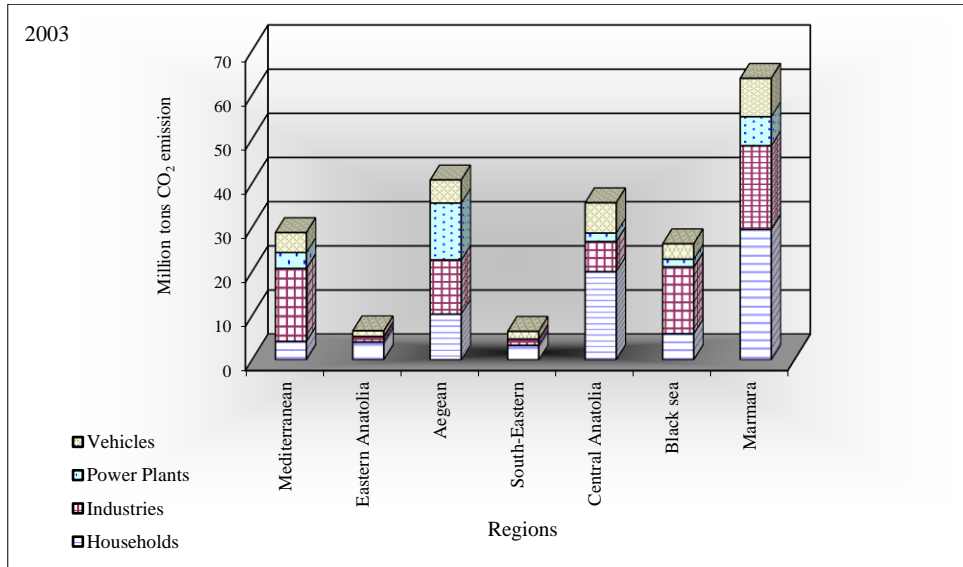


Figure 6. The regional CO₂ emission for 2003 (2003 yılı için bölgesel CO₂ emisyonu)

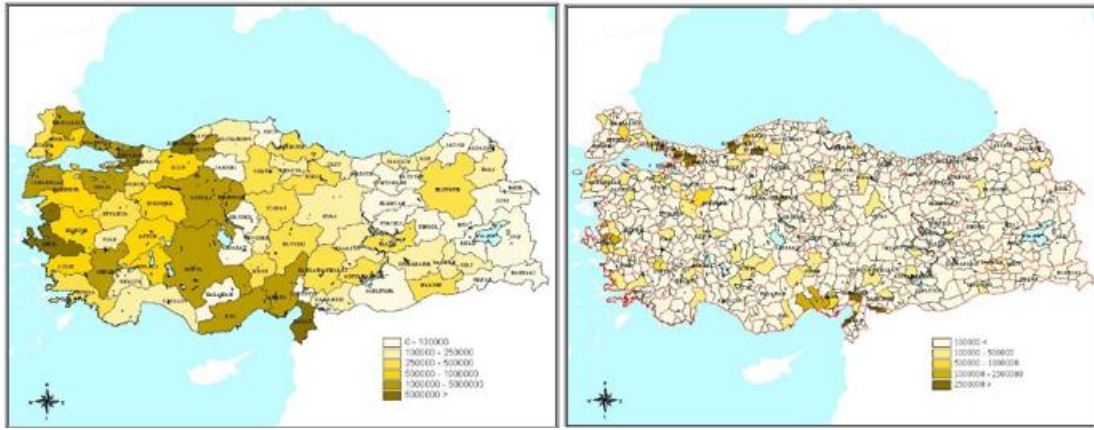


Figure 7. The industrial CO₂ emission for 2003 (2003 yılı endüstriyel CO₂ emisyonu)

Approximately 34.22% of total CO₂ emissions in Türkiye is due to households. CO₂ emissions from households mostly depend on the population density and the fuel type used for domestic heating.

Mainly, coal is burned in households for domestic heating. In large cities, like Ankara, İstanbul, Bursa, and Eskişehir, natural gas is commonly used for heating wherever it is available. The highest regional contribution to the total residential CO₂ load was determined in the Marmara Region. It is about 35%. The next region is Central Anatolia, which accounts approximately for 25% (Figure 8).

Thermal power plants are the third important CO₂ source in Türkiye. Approximately 20.0 % of total CO₂ emission in Türkiye is attributed to the thermal power plants. The highest emissions for two plants were observed in 1999 with 8.4 million tons from Afşin-Elbistan and 6.5 million tons from Soma. The

annual average CO₂ emissions from the two plants are 11.0 million tons in total (Figure 9).

Generally, local emission inventories are not available in Türkiye. Also, no data is available for **active traffic** even on the provincial level. Only the main highways were included in this inventory to fulfil the traffic option. The highest regional contribution to CO₂ emissions by traffic is obtained in Aegean Region, Central Anatolia Region and with annual average values of 4.4, 5.8 and 8.3 million tons per year. According to the inventory results in 2003, Konak district of İzmir, Çankaya district of Ankara and Bakırköy district of İstanbul show the highest emission with values of 0.5, 0.7 and 1.0 million tons CO₂ emissions. The approximate increments in the CO₂ emission of Bakırköy, Çankaya and Konak compared with the base year are obtained 9.4 %, 26.8 % and 17.6 % for the year 2003 (Figure 10).

Table 4. The regional CO₂ emission between the years 1990-2010 (1990-2010 yılları arasındaki bölgesel CO₂ emisyonu)

Regional CO ₂ Emission		1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000
million tons	Mediterranean	21,41	21,06	21,61	21,05	21,88	23,37	27,93	28,11	30,75	26,57	25,39
	Eastern Anatolia	4,82	4,87	4,96	5,24	5,14	5,41	5,30	5,35	5,31	5,26	5,87
	Aegean	28,28	30,08	32,09	32,95	34,31	42,25	45,98	48,11	47,79	48,70	50,05
	South-Eastern	4,16	4,20	4,38	4,62	4,49	4,51	4,86	4,95	4,91	4,46	5,35
	Central Anatolia	24,29	25,51	25,48	26,53	27,25	28,47	30,56	31,63	31,33	32,32	35,59
	Black sea	16,87	17,70	18,70	19,07	18,29	24,35	26,41	26,92	25,83	20,70	22,32
	Marmara	42,64	43,90	46,16	47,49	47,44	51,29	56,64	57,14	57,60	58,14	63,41

Regional CO ₂ Emission		2001	2002	2003	PREDICTION						
Regional CO ₂ Emission		2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010			
million tons	Mediterranean	24,78	25,74	28,78	30,74	32,10	33,31	36,71	37,72	43,16	45,13
	Eastern Anatolia	5,83	6,20	6,55	6,97	7,22	7,47	7,72	7,95	8,23	8,52
	Aegean	44,05	43,06	40,70	51,81	50,78	52,00	55,40	56,47	58,11	59,90
	South-Eastern	5,59	6,02	6,41	6,86	7,18	7,50	7,82	8,13	8,48	8,84
	Central Anatolia	34,53	34,12	35,53	40,77	42,49	43,84	45,25	46,56	48,13	49,83
	Black sea	21,08	23,76	26,24	29,61	30,71	31,68	32,58	33,35	34,83	36,46
	Marmara	65,28	65,84	63,70	76,72	79,40	81,99	84,54	86,97	90,27	93,85

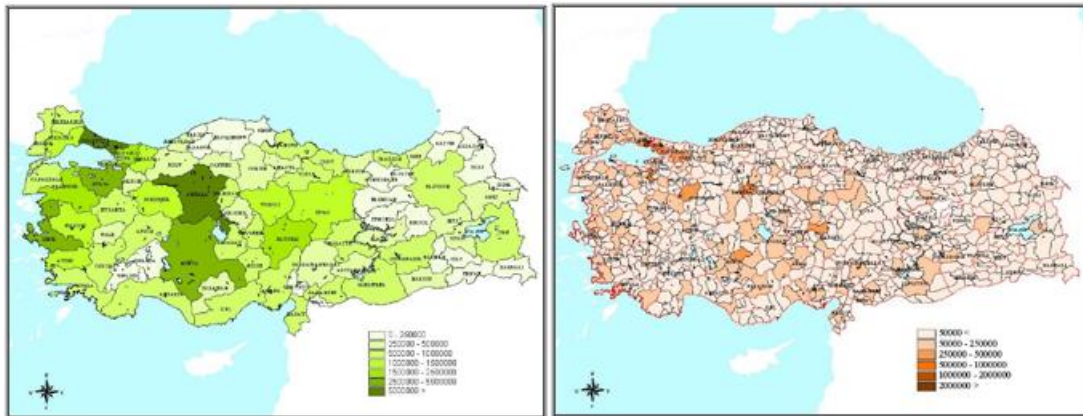


Figure 8. The CO₂ emission from households for 2003 (2003 yılı için hanelerden kaynaklanan CO₂ emisyonu)

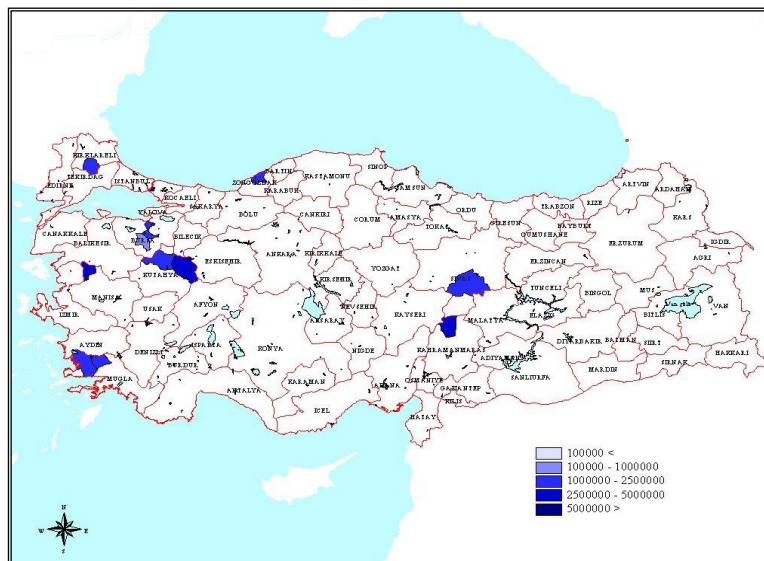


Figure 9. The CO₂ emission of thermal power plants for 2003 (2003 yılı için termik santrallerin CO₂ emisyonu)

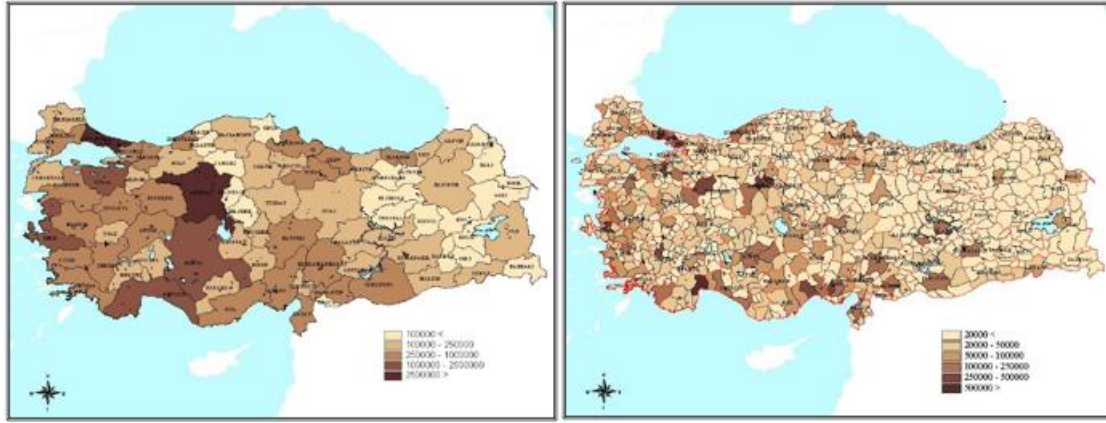


Figure 10. The CO₂ emission of road vehicles for 2003 (2003 yılı karayolu taşıtlarının CO₂ emisyonu)

Statistical and Uncertainty Analysis: By using the results of the statistical evaluations, it is concluded that the correlations between CO₂ emission of base year and that of each related year between 1991-2010 are very high for regional and provincial emission series. The highest correlation implies that there is an association between the series. However, the correlations of districts' emission series throughout the years compared to the base year are not high as regional and provincial ones.

Another important statistical variable is the SEM, which is the indication of the spread of the mean. The SEM of the annual emission series is decreasing while the number of the sample size is increasing. Briefly, the more the data are gathered, the less the uncertainty is observed in the measurement. Therefore, the uncertainty in the emissions data of the district is less than that of regions (Figure 11).

The used method in this study determines the significance of year-to-year differences and it considers the long-term trends in the inventories. A key issue in the compilation of uncertainties within inventories is the difference between the standard error of the sample mean and the standard deviation of the data set. The standard deviation's role in estimating confidence interval limits relies on the probability distribution of the data set.

Although it is recognized that there are many causes of uncertainties, the most important ones in this study are thought to be caused by the following:

- Application of IPCC emission factors associated with uncertainties since the fuel data characteristics are changing locally and regionally.
- The quality of the fuel consumption data is also changing from source to source. Although the official data sets are used for emission estimates.

- There is inconsistency in gathering the data. Because the total fuel consumptions are obtained from the different annual fuel consumption reports of sectors by MOE. And it is possible to change in the data within the following years.
- For future cases, the fuel consumption data do not exist. Therefore, the future estimation means some amount of uncertainties.

The uncertainties in emission estimates of greenhouse gases are a major concern to the countries. And most countries state that the uncertainty of the CO₂ emission is very low compared to the other gases because of the very small differences between the measured and estimated CO₂ emission.

3.2. CO₂ Uptake by Forests (Ormanların CO₂ Alımı)

The statistical data to calculate the CO₂ uptake over time is not easy to obtain. The inventories are not periodical and based on field surveys. For that reason, all possible sources of data are to be collected to form the CO₂ uptake inventories. The IPCC supplies a common framework to categorize CO₂ sinks. According to the IPCC [4, 5, 39] the following areas should be evaluated in the inventories to improve the comparability of the CO₂ uptake inventories.

- Forest and biomass stocks: CO₂ removals are estimated from biomass growth.
- Grassland conversion: CO₂ removals and emissions change seasonally. The net emission or uptake should be considered.
- Land-use change: According to the cultivated land, it could result in either CO₂ emission or CO₂ uptake. Satellite images, aerial photography, and land-based surveys are the possible sources of data. Natural forest fires (not anthropogenic in origin) are also not considered.

- Agricultural growing: Burning of agricultural biomass produces CO₂ emissions. However, the burned biomass is replaced by regrowth over the following year. The net CO₂ uptake and emissions are considered equal to zero.

The inventory of the annual increment of biomass started in the 1980s and finished in 1999. The entire forest area in Türkiye is covered. This inventory is not periodical, and the main aim is not the determine the increment of forest area. For that reason, there

are some uncertainties and errors associated with this information. However, this inventory is the only data source to estimate the CO₂ uptake of forests.

The data categorized for each type of forest biomass are gathered from MOE at the province level. Then, the inventory is linked by a provincial forest map. This map is intersected with the district map in order to obtain the inventory at the district level. (Figure 12 and Table 5).

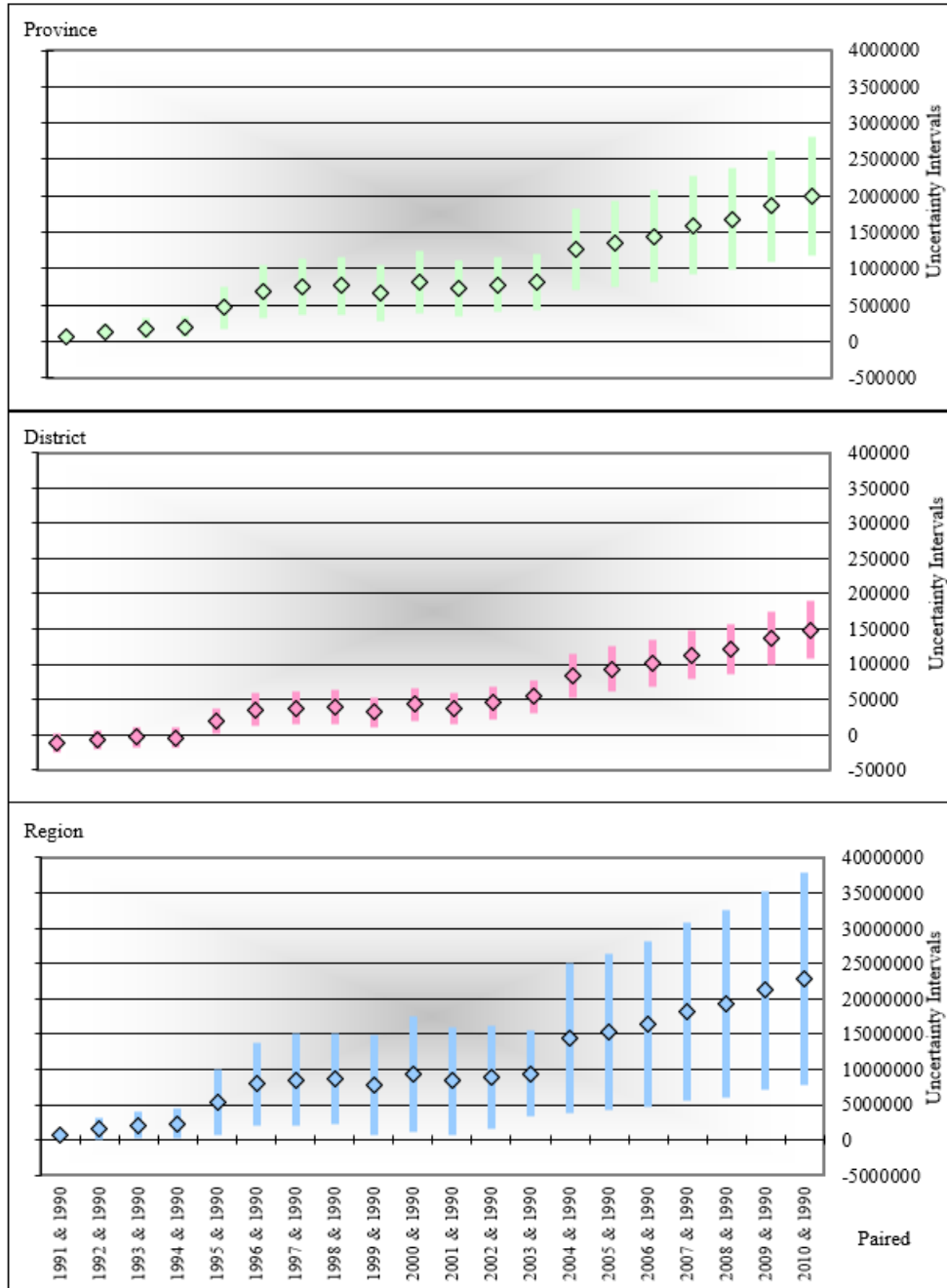


Figure 11. The uncertainty interval of the districts, provinces, and regions (İlçe, il ve bölgelerin belirsizlik aralıkları)

Table 5. Distribution of the forest area within regions and regional CO₂ uptake (Orman alanlarının bölgeler içindeki dağılımı ve bölgesel CO₂ alımı)

REGIONS	Empty Land	Poor Forest	Intermediate Forest	Good Forest	Lake	Total (unit: km ²)	CO ₂ Uptake (tons)
Mediterranean	32615	38889	8060	8952	1302	89818	6066457
Eastern Anatolia	119927	20167	1965	2393	1878	146330	1900288
Aegean	34863	44538	4808	4809	862	89881	5749523
South-Eastern	49815	25106	271	0	1316	76509	1093184
Central Anatolia	155657	23086	1754	3925	3630	188052	2635381
Black sea	59616	32574	7640	15931	479	116240	16351045
Marmara	36987	20312	8970	5846	913	73027	12014619
Total	489480	204672	33468	41856	10381	779857	45810497

Figure 12 (digitized map) and Table 5 show that, the coastline of Türkiye is covered with forest. The forest area is not broad enough in South-Eastern Anatolia, Eastern Anatolia and Central Anatolia regions. The total forest area in Türkiye is around 280000 km².

The forests are classified into three different kinds: Bad Forest area, standard coppice area, and high forest area. The bad forest and standard coppice areas spread in the Mediterranean, Aegean, and Marmara regions. High forest areas are present densely in the Mediterranean and Blacksea regions.

The uptake of CO₂ in coastal zones exceeds that of inland zones as seen in Figure 12. The CO₂ uptake in the South-Eastern Anatolia, Eastern Anatolia, and Central Anatolia regions are 1.1, 1.9, and 2.6 million tons/year, respectively. The maximum CO₂ uptake is in the Black Sea region with a value of 16.4 million tons/year. The Marmara region has the second biggest CO₂ uptake value which is 12.0 million tons/year. It is also observed that CO₂ uptake in the Aegean and Mediterranean regions is 5.7 and 6.1 million tons/year, respectively.

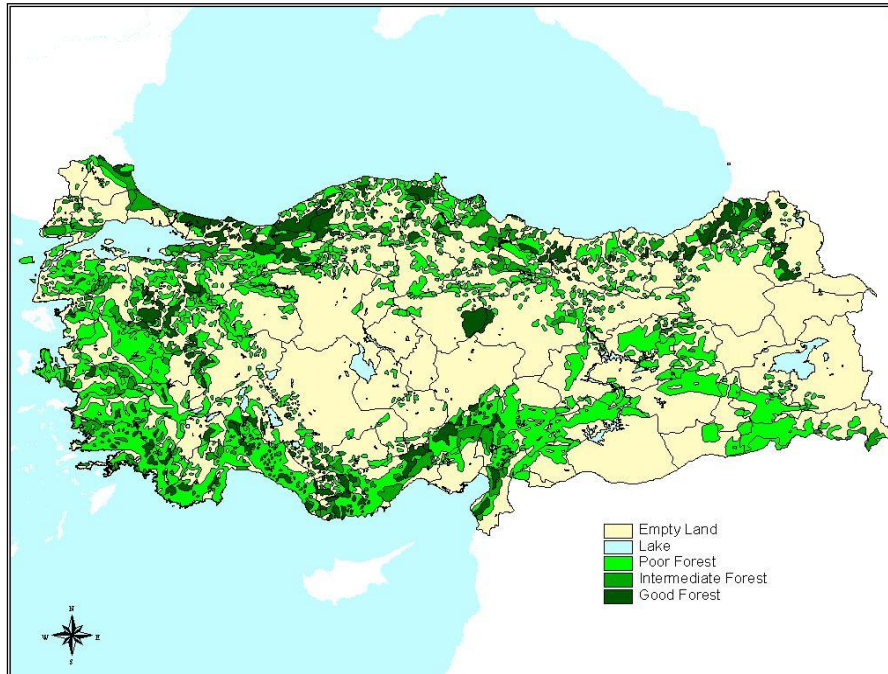


Figure 12. The land cover of Türkiye (Türkiye'nin arazi örtüsü)

The maximum CO₂ uptake values observed in the Demirköy district of Kırklareli province,

Dursunbey of Balıkesir, Can of Çanakkale are 1.16, 0.96, and 0.90 million tons/year (Figure 13).

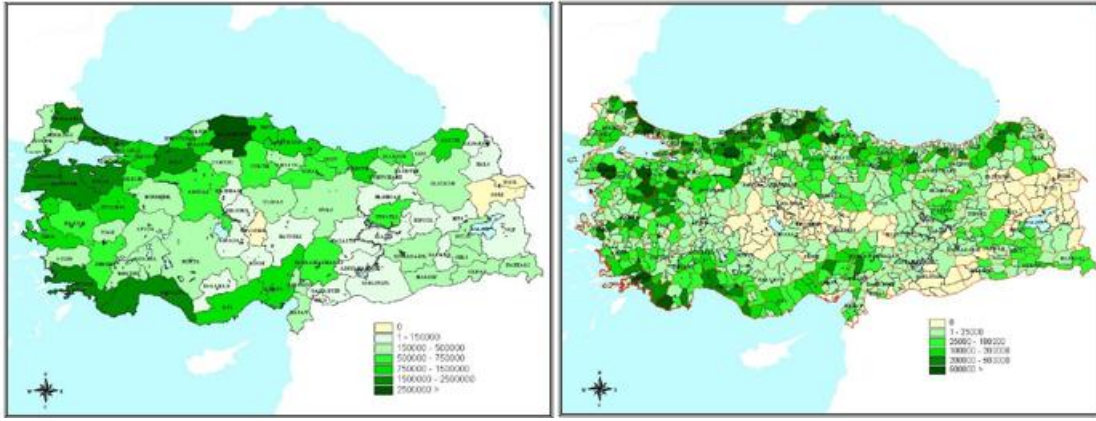


Figure 13. The CO₂ uptake of the provinces and the districts (il ve ilçelerin CO₂ alımı)

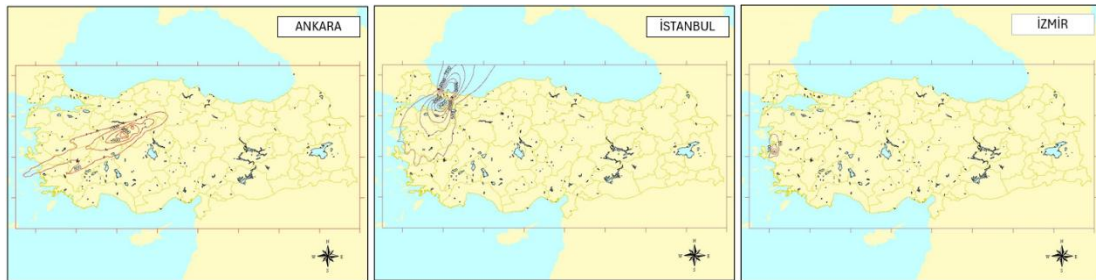
3.3. Dispersion Model (Dağılım Modeli)

The ground-level estimation of CO₂ concentration has been based on CO₂ emission and uptake inventory. A reliable model estimation can only be expected with good meteorological data [47]. The wind speed and the wind direction are important for transferring and diluting the gases. However, other meteorological data, such as air temperature, cloudiness, and sunbathing are also important for the stability or instability of the atmosphere. Therefore, the model estimation can be considered as the artificial state of the atmospheric transportation of CO₂ [46].

For the years 1990 to 2003, the CO₂ ground level concentrations are obtained separately for each source at the district level. The total CO₂ concentrations at the receptor points from each source were obtained by superimposing.

Additionally, the continuity of each model run was maintained by defining the receptors across the country. The model cannot be run for the years between 2005 and 2010. The main reason is the inadequacy of meteorological data for district basis model runs and emission source descriptions.

The model is only run for the projection year of 2004 by estimating and assuming many data. The model estimations due to projections of 2004 years' data for three big cities are given in Figure 14. The city maps are also obtained by using their district-level run for the entire Türkiye's receptor for each source separately by superimposing. Therefore, after the years 2004, the uncertainty levels and the model errors will be very high due to data assumptions. Therefore, the model results for the years between 1990 and 2003 are used for the ground-level concentrations.



Note: Detail maps are given in Appendix

Figure 14. The ISCLT3 output for the three big cities in the predicted year 2004 (Üç büyük şehir için tahmin edilen 2004 yılındaki ISCLT3 çıktısı)

The results of **dispersion modeling** calculations for CO₂ from different sources on an annual basis are given below. Total ground level CO₂ concentrations are given in Figure 15 for the year 1990. As shown in Figure, it may be concluded that some regions were affected highly by the ground-level concentrations. In 1990, the east of Mediterranean Region (around K.Maraş province), the west of Marmara Region (around Edirne province), the east of Central Anatolia Region (around Kırıkkale and

Kırşehir provinces) and the west of Aegean Region (around İzmir Provinces) were determined as the maximum polluted areas with the respective values of 18.2, 26.0, 20.0 and 16.0 x 10³ µg/m³. In Marmara Region, the observed result seems markedly noticeable. Although the industrial zones, the thermal power plants, and the areas with high population and traffic density seem to be in the center and east of Marmara Region, high CO₂ pollution was observed in the west of the Marmara

Region. The primary reason for this outcome could be summarized as the high transporting capacity of the winds and mainly due to the winds blowing from the North-East (NE) direction.

In comparison to the results from the 1990s, the high concentration regions seemed to be changed in 1995. $8 \times 10^3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ contour CO₂ concentration line passing over the Central and the Eastern Anatolia Regions was also due to the high-frequency winds blowing in the Eastern (E) and Western(W) directions. The maximum concentrations in these regions were obtained as $30.0 \times 10^3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ in Cihanbeyli district of Konya province and $26.0 \times 10^3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ in Tatvan district of Bitlis province, respectively. In 1998, Zonguldak province and Kastamonu province in the Blacksea Region and the intersection region of Ankara, Konya, and Eskişehir provinces in the Central Anatolia Region were also highly polluted areas with the respective maximum CO₂ concentrations that were 38.0 and $24.0 \times 10^3 \mu\text{g}/\text{m}^3$. The CO₂ pollution is also increasing gradually in 1999 and 2000. The Aegean, Central Anatolia, Blacksea, and Marmara Regions were

also polluted with CO₂ in these years. For 1999, the maximum ground-level CO₂ concentrations in the Aegean, Central Anatolia, Blacksea, and Marmara Regions were $24.0, 24.0, 30.0,$ and $36.7 \times 10^3 \mu\text{g}/\text{m}^3$, respectively. The respective concentrations for 2000 were $26.0, 25.0, 38.0,$ and $26.0 \times 10^3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ as seen in Figure 16. The results indicate that there was a significant decrease in CO₂ concentration in 2002. The Marmara (around Kırklareli province) and Eagean Region (around Manisa province) were the highest polluted areas.

Although the total CO₂ emission in 2002 and 2004 was as high as that in 2000 and 2001, the average ground level CO₂ concentration in these years was lower than in other years. This outcome can be attributed to the local winds as well as other meteorological conditions, like precipitation. In other words, the contribution of some nearby sources to the concentration of some receptor points in the district could be determined as zero or very small value owing to the transportation of the pollutant into the different areas by wind.

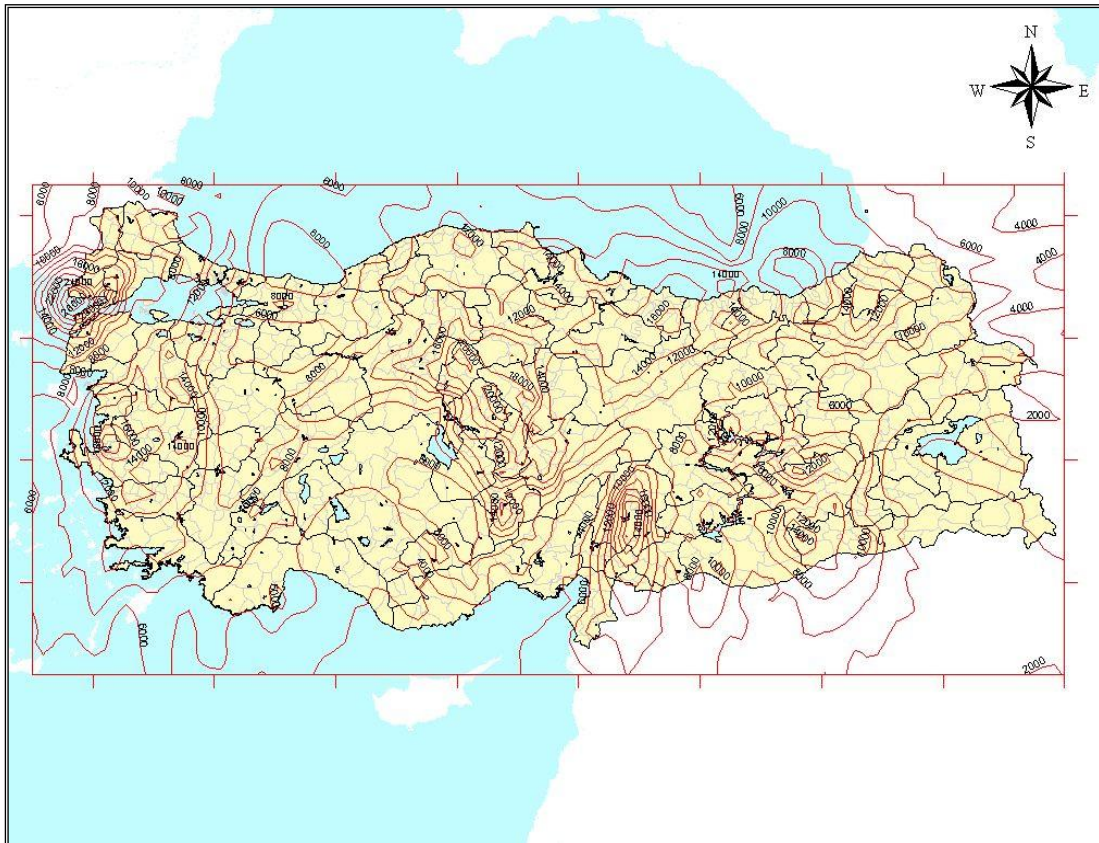


Figure 15. Total ground level CO₂ concentrations in 1990 (1990'da toplam yer seviyesi CO₂ konsantrasyonu)

According to the annual ground level concentrations of CO₂ estimated from the **industrial sources**, the CO₂ concentrations in Marmara Region, especially Istanbul province, were always the highest throughout the years. The

values obtained were 14.30 in 1995; $8.02, 8.71, 7.4$ in 1998; 7.0 in 2000; $14.0, 8.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ in 2002. In fact, the industries in Istanbul Province have accounted for 35% of the total industries in the country. The total numbers of industries employing

more than 10 and employing more than 500 people are shown in Figure 17. The data presented in these figures clearly illustrates that the total numbers of industries in both categories show an increasing

trend. About 33.3% of the (10+) industries are located in İstanbul area. However, the number of (500+) industries located in İstanbul area is less, about 15-20%.

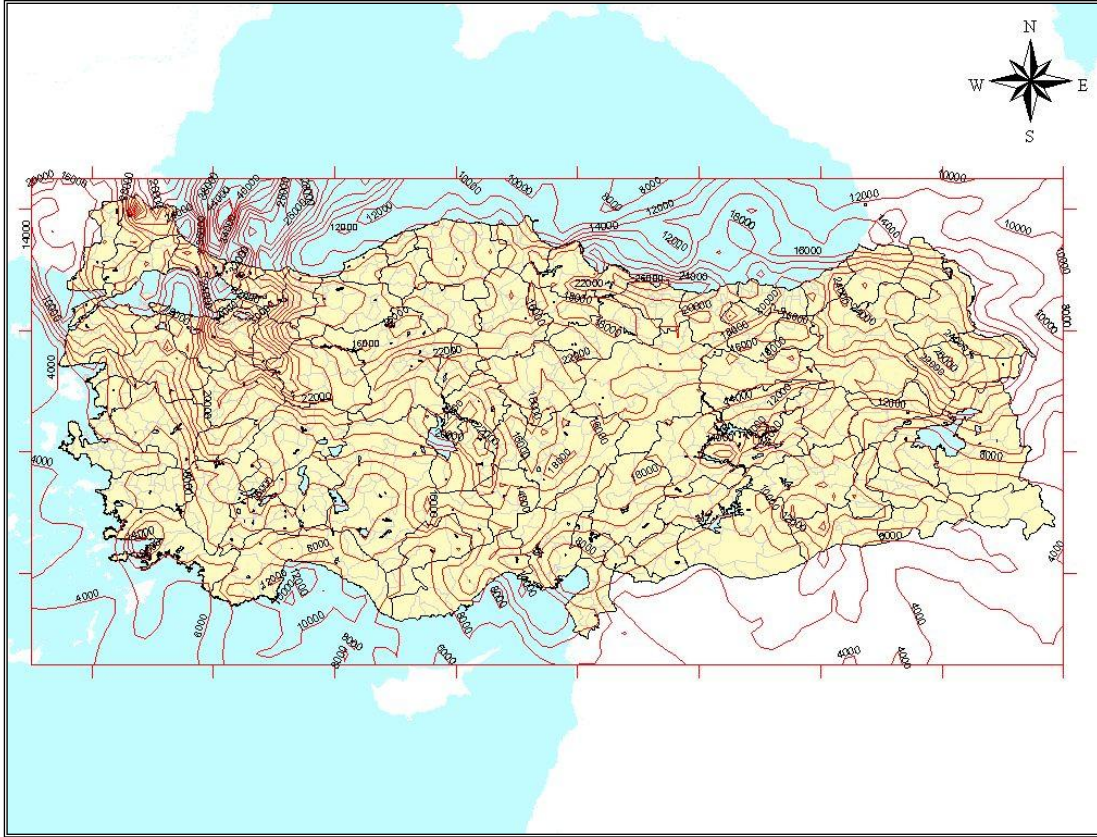


Figure 16. Total ground level CO₂ concentrations in 2000 (2000'de toplam yer seviyesi CO₂ konsantrasyonu)

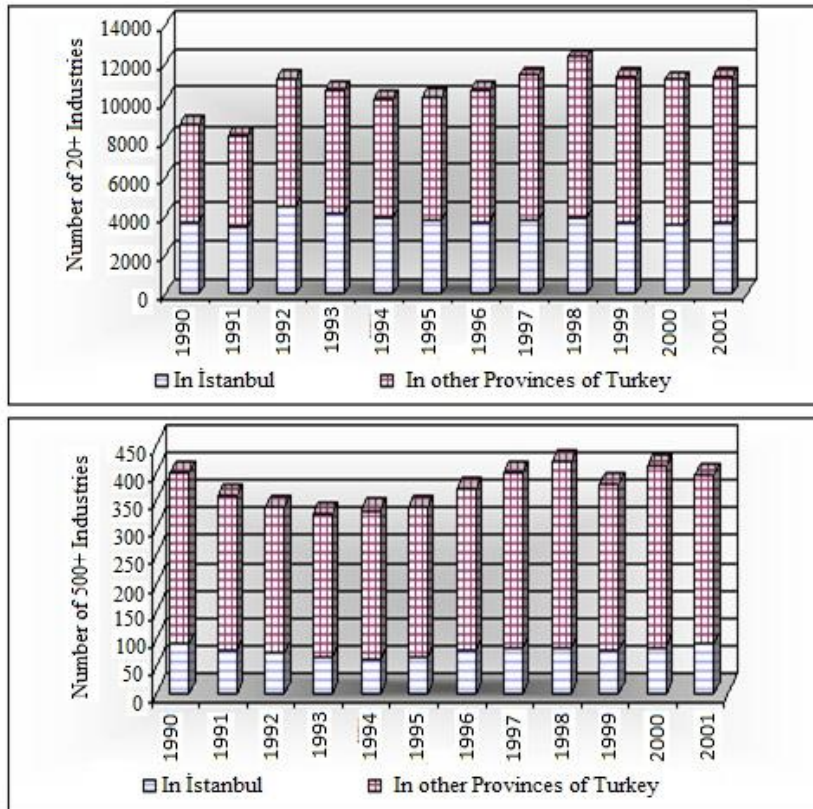


Figure 17. Number of the industries according to its size in Türkiye [30, 35] (Türkiye'de büyüklüklerine göre sanayi sayısı)

Between 1990-1993, the industries contributed approximately 28% of the total CO₂ emission. This percentage has increased to approximately 35% in 2003.

Between 1990 and 2003, the contribution of **Households** to the ground-level CO₂ concentration had risen approximately 7%. Compared with the overall results, the Marmara Region was also highly polluted with CO₂ from the households. The primary reason is the high population of the Marmara Region. In the 2000 census, the population of Türkiye was 67.8 million people and approximately 26% of this population was living in the Marmara Region [49].

There are serious local variations in the CO₂ concentrations when thermal power plants are considered. Between the years 1990 and 2003, the contribution of thermal power plants to the total CO₂ pollution was approximately 20%. Moreover, there was no thermal power plant in the South-Eastern Anatolia Region and Eastern Anatolia Region for the period of this study. Therefore, the concentration of CO₂ measured in these regions was the result of the transport of the pollutant from the other regions by winds.

Dispersion of ground-level CO₂ concentration was also studied for road vehicles. Although high ground-level CO₂ concentration was not observed due to road vehicles during the period between 1990 and 2003, some dispersion results gave high ground-level CO₂ concentrations. The highest polluted region was determined to be the Marmara Region throughout the years. Between the years 1990 and 2003, the contribution of road vehicles to the ground-level CO₂ concentration was approximately 15%. Although the percentage seems small, the registered number of vehicles has increased sharply since 1990. In conclusion, it can be stated that the trend shows an increase in CO₂ pollution from road vehicles.

3.4. Evaluation of Model Results (Model Sonuçlarının Değerlendirilmesi)

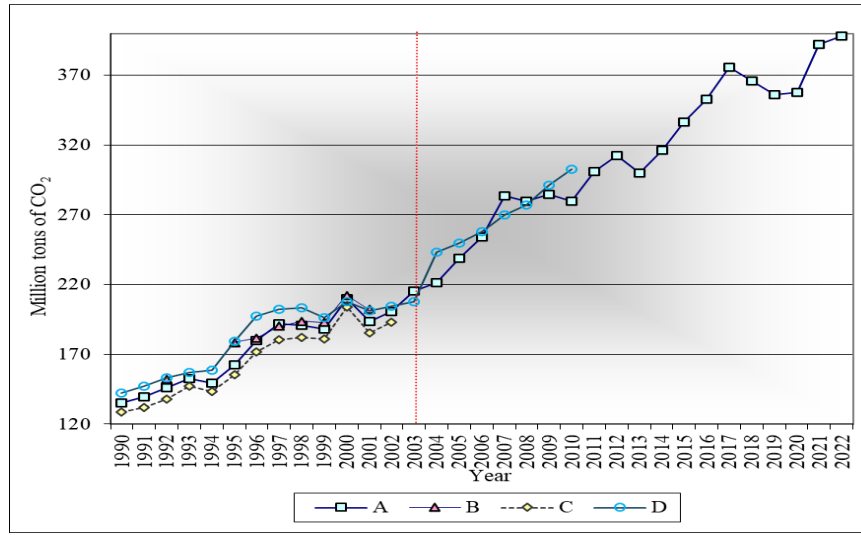
The determination of the model performance is very important because several assumptions made during the prediction of the ground-level CO₂ concentrations may cause some significant errors.

In order to decrease this error, the concentration data sets are compared statistically by observed values. The observed values are estimated by using CO₂ station measurements around Türkiye. There is no CO₂ concentration measurement station in Türkiye. The CO₂ concentration over Türkiye was obtained by using the Kriging Method [43]. The total number of CO₂ measurement stations around Türkiye is 12. Some station data were not included in the calculation of observed values due to missing data. The grid base average CO₂ concentrations over Türkiye have risen approximately 1.5 ppm/year. The highest CO₂ concentration interval which is the difference between the minimum and maximum concentration over Türkiye was observed in the years 1997 and 1999 with a value of 5 ppm.

The observed CO₂ concentration over Türkiye is estimated by using the measured CO₂ concentration of the nearest stations around Türkiye on grid bases. These values, however, are the upper atmospheric values. When the data are considered by using K-Cluster Analysis, the 1995, 1996, 1997, and 1998 data formed a homogeneous group. If the data set for 2002 is excluded, then the highest Cronbach Alfa Reliability values, which is 0.93, are obtained between the two data sets. The correlation coefficients between series also show that omitting the data from 2002 increased the relationship between series to 0.88, which shows a high relationship between the two series. Trend analyses of the series, using the Mann-Kendall Rank correlation test shows that the observed series have a statistically significant increasing trend, and the predicted series shows no trend with 2002 data. However, without 2002 data, both predicted and observed series show a statistically significant increasing trend according to the 0.05 significance level. Therefore, it can be concluded that the findings of the study are very reliable and acceptable.

3.5. The comparison of the study (Çalışmanın karşılaştırılması)

The inventory of this study has been also considered with many sources, and it is concluded that even the predicted emissions for this study are very close to the National Inventory Report as given in Figure 18.



A: SIS - TurkStat ; B: MOE; C: IEA; D: Study Result

Figure 18. The comparisons of study with other inventories (Çalışmanın diğer envanterlerle karşılaştırılması)

4. CONCLUSIONS (SONUÇLAR)

The CO₂ emission inventory and the dispersion modeling calculations in this detail (regional, provincial, and district level) have not been done previously in Türkiye. This type of study is very important, especially for regional and provincial development programs of the government. Therefore, this study could be used by policymakers, provincial authorities, air dispersion modelers, national inventory reporters, and some scientists. The results of the CO₂ emission inventory conducted in this study between 1990 and 2003 showed that the CO₂ emission in 1990 was 142.45 million tons/year and the highest recorded emissions occurred in 2000, reaching a value of 207.97 million tons/year for the period of this study. The Marmara Region consistently has the highest CO₂ emissions, averaging 54.76 million tons per year. It was also concluded that Marmara and Aegean Regions are responsible for half of the CO₂ emission of Türkiye. The predicted CO₂ emissions for the years 2004 and 2010 are also showing an increasing trend.

The highest ground-level CO₂ concentrations have been obtained in the Marmara Region for years under study. The maximum annual average ground level CO₂ concentration in this region was observed in 2001 with a $22.3 \times 10^3 \mu\text{g}/\text{m}^3$. The results obtained must be correlated with measured values. However, there isn't any CO₂ measurement station in Türkiye. The measured CO₂ concentration data of the nearest stations around Türkiye (Hungary (2), Italy (3), Romania (2), Kazakhstan (2), Malta (1), Kırgızstan (1) and Israel (1)) were used to estimate the synoptic CO₂ concentration over Türkiye. Without 2002 data, both predicted and observed

series were statistically correlated and it was found that there was an internal consistency between them.

DISCLOSURE (AÇIKLAMA): This article is produced by using the thesis “Can A. 2006. Investigation of Turkey's carbon dioxide (CO₂) problem by numerical modeling”. Web address: <http://etd.lib.metu.edu.tr/upload/3/12607088/index.pdf>”.

Bu makale “Can A. 2006. Türkiye'nin karbondioksit (CO₂) probleminin sayısal modelleme ile araştırılması” adlı tezden yararlanılarak üretilmiştir. Web adresi: <http://etd.lib.metu.edu.tr/upload/3/12607088/index.pdf>”.

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)

Ali CAN: He conducted collecting data, digitized maps, analyzed data and performed the writing process.

Veri toplama, haritaların sayısallaştırılması, verilerin analizi ve yazım aşamalarını gerçekleştirdi.

Aysel T. ATIMTAY: She edited the article, advised and commented on the inventory.

Makeleyi düzenleme, danışmanlık yapma ve envanteri yorumlama aşamalarını gerçekleştirdi.

Turgut TOKDEMİR: He advised the article and commented on the used modelling.

Makaleyi danışmanlık yapma ve kullanılan modeli yorumlama aşamalarını 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] Hummel, J.R., Reck, R.A. Carbon dioxide and climate: the effects of water transport in radiative-convective models. *J. Geophys. Res.* 86. 1981; 12035–12038.
- [2] Herzog, H., Carbon Dioxide Capture and Storage in the Economics and Politics of Climate Change. 2015.
- [3] Alcamo, J. Stabilizing greenhouse gases: global and regional consequences. *Clim. Chang. Res. Eval. policy Implic. Proc. Int. Clim. Chang. Conf. Maastricht, 1995; Two vols 135–149.*
- [4] IPCC. Revised 1996 Intergovernmental Panel on Climate Change Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. 1996; Volume 3, 1- 145.
- [5] IPCC. 2006 Intergovernmental Panel on Climate Change Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. 2006; Volume 2, 2.1-2.45
- [6] Xu, Y., Cui, G. Influence of spectral characteristics of the Earth's surface radiation on the greenhouse effect: Principles and mechanisms. *Atmos. Environ.* 2021; 244.
- [7] Sakata, S., A. Aklilu and R. Pizarro. "Greenhouse gas emissions data: Concepts and data availability", OECD Statistics Working Papers, No. 2024/03, OECD Publishing, Paris.
- [8] Soon, W., Baliunas, S.L., Robinson, A.B., Robinson, Z.W. Environmental effects of increased atmospheric carbon dioxide. *Energy Environ.* 1999; 10, 439–468.
- [9] IPCC. Climate Change 2022 – Impacts, Adaptation and Vulnerability, Climate Change 2022 – Impacts, Adaptation and Vulnerability.
- [10] Holmén, K. The Global Carbon Cycle. *Int. Geophys.* 1992; 50, 239–262.
- [11] Mutiibwa, D., Strachan, S., Albright, T. Land Surface Temperature and Surface Air Temperature in Complex Terrain. *IEEE Journal.* 2015; 8, 4762–4774.
- [12] Friedlingstein, P. Carbon cycle feedback and future climate change. *Philos. Trans. R. Soc. A Math. Phys. Eng. Sci.* 2015.
- [13] Balch, J.K., Nagy, R.C., Archibald, S., Bowman, D.M.J.S., Moritz, M.A., Roos, C.I., Scott, A.C., Williamson, G.J. Global combustion: The connection between fossil fuel and biomass burning emissions (1997–2010). *Philos. Trans. R. Soc. B Biol. Sci.* 2016; 371. <https://doi.org/10.1098/rstb.2015.0177>
- [14] Borges, A. V., Delille, B., Frankignoulle, M. Budgeting sinks and sources of CO₂ in the coastal ocean: Diversity of ecosystem counts. *Geophys. Res. Lett.* 2005; 32, 1–4.
- [15] Schimel, D.S., House, J.I., etc. all. Recent patterns and mechanisms of carbon exchange by terrestrial ecosystems. *Nature* 414. 2001; 169–172.
- [16] Kasting, J.F. The Carbon Cycle, Climate, and the Long-Term Effects of Fossil Fuel Burning. web address: <http://www.atmo.arizona.edu/students/courselinks/fall0/atmo551a/pdf/CarbonCycle.html> (date: 12.10.24).
- [17] IEA. International Energy Agency - CO₂ Emissions from Fossil Combustion (1971-2003). 2005 Edition – OECD/IEA. II. 74 – II.386.
- [18] Janerio, R. De. United Nations Conference on Environment & Development Rio de Janeiro , Brazil , 3 to 14 June 1992. Reproduction 351. ISBN: 9211005094.
- [19] MOEF. Information Concerning To The Multilateral Environment Agreements, Which Turkey Is A Party To. Ministry of Environment, Urbanization and Climate Change. 2024; web address: <https://ab.csb.gov.tr/en/agreements-i-100215> (date: 18.07.24).
- [20] France, P.B., Uk, N.P.G., Marengo, J.A., Brazil, O. Understanding and Attributing Climate Change. *Change.* 2007.
- [21] Sinha, U.K. Climate change: Process and politics. *Strateg. Anal.* 2010; 34, 858–871. <https://doi.org/10.1080/09700161.2010.512482>

- [22] İncecik S., Yardım P., Topçu S. Kyoto Protocol and Critical Review of Greenhouse Gas Emissions in Turkey. Proceedings of Second International Symposium on Air Quality Management at Urban, Regional and Global Scales. (25-28 September 2001, İstanbul – Turkey). 2001; 538 - 543.
- [23] National Climate Policies and the Kyoto Protocol, National Climate Policies and the Kyoto Protocol. OECD. 1999; <https://doi.org/10.1787/9789264174450-en>
- [24] F., Alkan-olsson, J. Turkey's Signature of the Kyoto Protocol. İstanbul Üniversitesi Siyasal Bilgiler Fakültesi Derg. 2013; İ.Ü.S., Dergisi.
- [25] DOCC, Kyoto Protocol. Ministry of Environment, Urbanization and Climate Change – Directorate of Climate Change. 2024; Web address: <https://iklim.gov.tr/en/kyoto-protocol-i-118> (date: 22.08.24).
- [26] U.S. EPA. User Guide for the Industrial Source Complex (Isc3) Dispersion Models. Volume I- User Instructions; Volume II-Description of Model Algorithms. 1995; Vol I.p.1.1 –H.1; Vol II.p.1.1-3.1.
- [27] Leake, C., Malczewski, J. GIS and Multicriteria Decision Analysis. J. Oper. Res. 2000; Soc. 51, 247. <https://doi.org/10.2307/254268>.
- [28] Black, F.A., MacDonald, B.H., Black, J.M.W. Geographic Information Systems: A New Research Method for Book History. B. Hist. 1998; 1, 11–31. <https://doi.org/10.1353/bh.1998.0001>
- [28] Kirby, R.S., Delmelle, E., Eberth, J.M. Advances in spatial epidemiology and geographic information systems. Ann. Epidemiol. 2017 27, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.annepidem.2016.12.001>
- [29] SIS. The number of manufacturing industries according to the size of establishments between 1990 and 2003 in each district. Industrial Statistics Division in State Institute of Statistics database, Republic of Turkey, Prime Ministry. 2004.
- [30] SIS. Energy Consumption in the Manufacturing Industry (1992) - (SIS-State Institute of Statistics), Republic of Turkey, Prime Ministry. 1992; (book). p.13.
- [31] SIS. Energy Consumption in the Manufacturing Industry - (SIS-State Institute of Statistics), Republic of Turkey, Prime Ministry. 1995; (book). p.11.
- [32] SIS. Energy Consumption in the Manufacturing Industry - (SIS-State Institute of Statistics), Republic of Turkey, Prime Ministry, 1996; (book). p.19.
- [33] SIS. Energy Consumption in the Manufacturing Industry - (SIS-State Institute of Statistics), Republic of Turkey, Prime Ministry, 1997; (book). p.23.
- [34] SIS. Energy Consumption in the Manufacturing Industry - (SIS-State Institute of Statistics), Republic of Turkey, Prime Ministry, 1998; (book). p.23.
- [35] SIS. Energy Consumption in the Manufacturing Industry (1999-2001) - (SIS-State Institute of Statistics), Republic of Turkey, Prime Ministry, 2001; (book). p.28.
- [36] SIS. The Fuel Consumption in the Manufacturing Industries of each Province. Mining and Energy Statistics Division in State Institute of Statistics' database, Prime Ministry Republic of Turkey. 2001.
- [37] MOE. The annual Energy and Petroleum Balance Tables - 1990-2010, Ministry of Energy. 2003; Web address: <https://enerji.gov.tr/eigm-raporlari> (date: 05.06.2001)
- [38] Snyder, J.P. Labelling projections on published maps. Am. Cartogr. 1987; 14, 21–27.
- [39] IPCC. Conceptual Basis for Uncertainty Analysis. IPCC Good Pract. Guid. Uncertain. Manag. Natl. Greenh. Gas Invent. 2000; 2.8 – 2.94.
- [40] Robinson, J.M. On uncertainty in the computation of global emissions from biomass burning. Clim. Change. 1989; 14, 243–261. <https://doi.org/10.1007/BF00134965>
- [41] de Nevers D. N. Air Pollution Control Engineering, USA, McGraw Hill, Inc. 1995; 105-125.
- [42] EPA. Air Quality Models. U.S. Environmental Protection Agency. 2024; Web address: <https://www.epa.gov/scram/air-quality-models>. (date: 10.10.24).

- [43] Delfiner P., Delhomme J.P. Optimum Interpolation by Kriging. In: Davis, J.C., McCullagh, M.J.(Eds.), Display and Analysis of Spatial Data. Wiley, London. 1975; 94 - 114.
- [44] Dlugokency E.J., Steele L.P., LangP.M., Mesarie K.A.M. The Growth Rate and Distribution of Atmospheric CH₄. J.Geophys.Res., 1994; 99, 17021-17043.
- [45] Draper, N.R., Smith, H. Applied regression analysis, Applied Regression Analysis. <https://doi.org/10.1002/9781118625590>. 2014; 1-35.
- [46] Wu, J. Advances in K-means Clustering. Adv. K-means Clust. A Data Min. Think.2012; 1 - 175.
- [47] Douglas, G.B., Thomas, A.W. Cronbach's alpha reliability: Interval estimation, hypothesis testing, and sample size planning. J. Organ. Behav. 2014; 36, 1–15.
- [48] Time Series Analysis - Data, Methods, and Applications. Time Series Analysis - Data, Methods, and Applications. <https://doi.org/10.5772/intechopen.78491>. 2019.
- [49] SIS. Census of Population, Social and Economic Characteristics of Population – (SIS - State Institute of Statistics), Republic of Turkey, Prime Ministry, 2000 (book), 113-133.
- [50] Sunay, N., Turgut, E.T. Eklemeli İmalat Teknolojilerinin Havacılık Sektöründe Enerji Verimliliğini Artırma ve Emisyon Azaltma Potansiyeli. GÜ Fen Bil. Der. Part C. Tas. Tek., 2024; 12.2, p. 548-566. <https://doi.org/10.29109/gujsc.1437824>
- [51] Yıldız, C. Binalarda Enerji Verimliliğinde Son Gelişmeler: Türkiye Örneği. GÜ Fen Bil. Der. Part C. Tas. Tek., 12.1, 2024; 176-213. <https://doi.org/10.29109/gujsc.1293759>.

APPENDIX:



Numerical Modal Analysis of Foams with Different Types and Configurations

Kübra Çağla ÇIBIKÇI^{1*}, Mustafa YAMAN²

¹Erzincan Binali Yıldırım University, Faculty of Engineering and Architecture, Erzincan, Turkey

²Atatürk University, Faculty of Engineering, Erzurum, Turkey

Article Info

Research article
Received: 05/11/2024
Revision: 04/12/2024
Accepted: 04/12/2024

Keywords

Closed-cell aluminum foam
EPS-filled syntactic foam
Vibration analysis
Layered hybrid foam
Modal analysis
Mode shape
Natural frequency

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 05/11/2024
Düzeltilme: 04/12/2024
Kabul: 04/12/2024

Anahtar Kelimeler

Kapalı hücreli alüminyum köpük
EPS dolgululu sentetik köpük
Titreşim analizi
Tabakalı hibrit köpük
Modal analiz
Mod şekli
Doğal frekans

Graphical/Tabular Abstract (Grafik Özet)

In this study, numerical modal analysis of foams with different types and configurations was carried out. / Bu çalışmada farklı tip ve konfigürasyonlara sahip köpüklerin nümerik modal analizi yürütülmüştür.

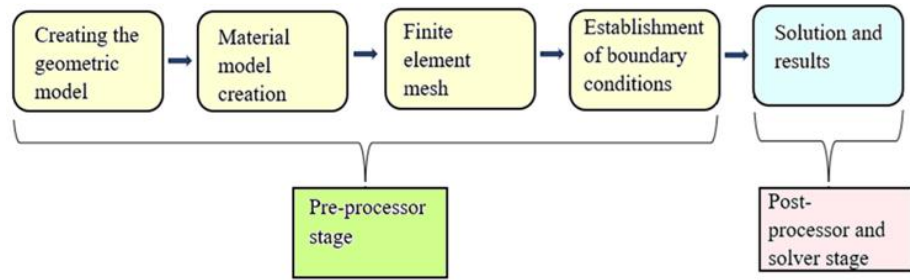


Figure A: Flow chart of design and analysis using ANSYS / Şekil A: ANSYS kullanılarak tasarım ve analizin akış şeması

Highlights (Önemli noktalar)

- The natural frequencies and mode shapes of foams with different types and configurations were investigated using the Finite Element Method under different boundary conditions. / Farklı tipte ve konfigürasyondaki köpüklerin doğal frekansları ve mod şekilleri, farklı sınır koşulları altında Sonlu Elemanlar Yöntemi kullanılarak araştırılmıştır.
- Changes in structural stiffness of the foams were analyzed depending on the volume fraction. / Köpüklerin yapısal sertliğindeki değişimler, hacim oranına bağlı olarak analiz edilmiştir.
- It provides guidance on optimum design conditions for researchers and engineers. / Araştırmacılar ve mühendisler için optimum tasarım koşulları hakkında yol gösterici bilgiler sağlamaktadır.

Aim (Amaç): The vibration behavior of foams with different types and configurations was investigated, and it was revealed how the changes in natural frequencies, mode shapes and structural stiffness of these structures are affected by parameters such as material properties, boundary conditions and volume fraction. / Farklı tipte ve konfigürasyondaki köpüklerin titreşim davranışını incelenmiş ve bu yapıların doğal frekansları, mod şekilleri ve yapısal sertliklerindeki değişimlerin malzeme özellikleri, sınır koşulları ve hacim oranı gibi parametrelere bağlı olarak nasıl etkilendiği ortaya konulmuştur.

Originality (Özgünlük): It presents original findings that guide engineering designs by examining in detail the vibration behavior of foams under different boundary conditions in terms of volume fraction, natural frequencies and structural stiffness. / Farklı sınır koşulları altında köpüklerin titreşim davranışını hacim oranı, doğal frekanslar ve yapısal sertlik açısından detaylı bir şekilde inceleyerek mühendislik tasarımlarına rehberlik eden özgün bulgular sunmaktadır.

Results (Bulgular): The effects of material configurations and volume fraction changes provided valuable information for the design of foams and optimum vibration performance to be used in engineering applications. These findings can provide guidance for preventing vibration-induced failures in engineering systems. / Malzeme konfigürasyonları ve hacim oranı değişimlerinin etkileri, köpüklerin tasarımı ve mühendislik uygulamalarında kullanılacak optimum titreşim performansı için değerli bilgiler sağlamıştır. Bu bulgular, mühendislik sistemlerinde titreşim kaynaklı arızaları önlemek için yol gösterici olabilir.

Conclusion (Sonuç): Natural frequencies and mode shapes of foams under different boundary conditions were determined, and the effects of material application and boundary conditions on the vibration behavior were revealed. / Farklı sınır koşulları altında köpüklerin doğal frekansları ve mod şekilleri belirlenmiş, malzeme uygulamasının ve sınır koşullarının titreşim davranışına etkileri ortaya konulmuştur.



Numerical Modal Analysis of Foams with Different Types and Configurations

Kübra Çağla ÇIBIKÇI^{1*}, Mustafa YAMAN²

¹Erzincan Binali Yıldırım University, Faculty of Engineering and Architecture, Erzincan, Turkey

²Atatürk University, Faculty of Engineering, Erzurum, Turkey

Article Info

Research article
Received: 05/11/2024
Revision: 04/12/2024
Accepted: 04/12/2024

Keywords

Closed-cell aluminum
foam
EPS-filled syntactic foam
Vibration analysis
Layered hybrid foam
Modal analysis
Mode shape
Natural frequency

Abstract

Thanks to the perfect combination of mechanical properties such as high strength and rigidity, along with functional properties like thermo-acoustic insulation and vibration damping, foam structures are becoming increasingly attractive in engineering applications. While most research has focused on the mechanical properties of foams. On the other hand, understanding the vibration behavior of foams is vital since most failures in engineering applications are associated with violent vibrations. This research focused on the vibration analysis of foams with different types and configurations. In the context of vibration, modal analysis is a highly preferred method for fully understanding the structural behavior of materials. The Finite Element Method is commonly employed for numerical modal analysis to reveal the vibration characteristics of structures, including natural frequencies and corresponding mode shapes. With this objective, the natural frequencies and mode shapes of hybrid foams have been revealed under both clamped-free and free-free boundary conditions. The effects of material application and boundary conditions were investigated. The changes in the stiffness of the structure, occurring under different vibration modes of the system and depending on the volume fraction, have also been investigated. Since closed-cell aluminum foam and EPS-filled syntactic foam have different mechanical properties, the changes in the structural stiffness of the material are revealed as the volume fraction changes. For the second and third modes, there was no significant change in structural stiffness in the volume ratio ranges of 0-0.2 and 30-1000, while a decrease in structural stiffness was observed in the volume ratio range of 0.2 to 30. The findings and results obtained can provide valuable information to researchers and engineers for optimum design conditions.

Farklı Tip ve Konfigürasyonlara Sahip Köpüklerin Sayısal Modal Analizi

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 05/11/2024
Düzeltilme: 04/12/2024
Kabul: 04/12/2024

Anahtar Kelimeler

Kapalı hücreli alüminyum
köpük
EPS dolgulu sentetik
köpük
Titreşim analizi
Tabakalı hibrit köpük
Modal analiz
Mod şekli
Doğal frekans

Öz

Yüksek mukavemet ve sertlik gibi mekanik özelliklerin termo-akustik yalıtım ve titreşim sönümlenme gibi işlevsel özelliklerle mükemmel birleşimi sayesinde, köpük yapıları mühendislik uygulamalarında giderek daha çekici hale geliyor. Çoğu araştırma köpüklerin mekanik özelliklerine odaklanmış olsa da köpüklerin titreşim davranışını anlamak hayati önem taşımaktadır, çünkü mühendislik uygulamalarındaki arızaların çoğu şiddetli titreşimlerle ilişkilidir. Bu araştırma, farklı tip ve konfigürasyonlardaki köpüklerin titreşim analizine odaklanmıştır. Titreşim bağlamında, modal analiz malzemelerin yapısal davranışını tam olarak anlamak için oldukça tercih edilen bir yöntemdir. Sonlu Elemanlar Yöntemi, doğal frekanslar ve karşılık gelen mod şekilleri dahil olmak üzere yapıların titreşim özelliklerini ortaya çıkarmak için sayısal modal analiz için yaygın olarak kullanılır. Bu amaçla, hibrit köpüklerin doğal frekansları ve mod şekilleri hem ankastre-serbest hem de serbest-serbest sınır koşulları altında ortaya çıkarılmıştır. Malzeme uygulamasının ve sınır koşullarının etkileri araştırılmıştır. Sistemin farklı titreşim modları altında ve hacim oranına bağlı olarak oluşan yapının sertliğindeki değişiklikler de araştırılmıştır. Kapalı hücreli alüminyum köpük ve EPS dolgulu sentetik köpük farklı mekanik özelliklere sahip olduğundan, malzemenin yapısal sertliğindeki değişimler hacim oranı değişikçe ortaya çıkar. İkinci ve üçüncü modlar için, 0-0,2 ve 30-1000 hacim oranı aralıklarında yapısal sertlikte önemli bir değişim olmazken, 0,2 ile 30 hacim oranı aralığında yapısal sertlikte bir azalma gözlemlenmiştir. Elde edilen bulgular ve sonuçlar, araştırmacılara ve mühendislere optimum tasarım koşulları için değerli bilgiler sağlayabilir.

1. INTRODUCTION (GİRİŞ)

Open and closed-cell foams are widely utilized in various industrial sectors, including marine, aerospace, construction, and automotive industries, due to their high strength-to-weight ratio and their ability to provide acoustic and vibration damping [1-2]. Generally, increasing the number of open cells in the structure enhances properties such as softness, flexibility, permeability, and absorption capacity. On the other hand, increasing the number of closed cells in the structure improves buoyancy, bending stiffness, compressive strength, and thermal insulation [3]. For these reasons, modal analysis of these materials is essential for understanding their dynamic behavior when exposed to external stimuli like acoustic or mechanical vibrations. Free vibration analysis provides valuable information on natural frequencies, mode shapes, and damping properties.

Syntactic foam is a closed-cell, lightweight composite material created by incorporating low-density hollow micro balloons into a matrix material [4-7]. The micro balloons used in syntactic foam production are made from various materials, including metals, ceramics, glass, polymers, and carbon. The matrix materials commonly used include silicones, phenolic resins, polyesters, polyurethanes, epoxy resins, and others [8-9]. The literature contains studies on the free vibration analysis of syntactic foams. Şansveren and Yaman examined how varying the volume fraction and density of carbon nanofibers and micro balloons affects the vibration behaviors of carbon nanofiber-reinforced syntactic foam. Their study investigated the natural frequencies and damping ratios through free vibration tests. The vibration test results indicated that the addition of carbon nanofibers increased the strength of the material but did not affect its damping characteristics [10]. Buddhacosa et al. developed epoxy syntactic foam by incorporating up to 23 wt% micro-sized elastomeric particles from recycled waste tires into syntactic foam (epoxy modified with 5 wt% hollow glass microspheres). They examined the vibration responses of the materials via laser Doppler vibrometry (LDV). They stated in their studies that the damping ratio increases as the weight ratio of elastomeric fillers is increased [11]. In their studies, Maraş and Yaman investigated the vibration properties of sandwich structures with syntactic foam cores using both numerical simulations and experimental methods. Initially, they derived the differential equations of sandwich syntactic foam beams using high-order shear deformation theory and then compared the natural frequencies with

experimental results to validate the numerical model. They validated the numerical model by comparing it with experimental findings [12]. Rahmani et al. applied an advanced model based on high-order sandwich panel theory for analyzing the free vibrations of syntactic foam sandwich beams featuring a functionally graded flexible core. Through numerical analysis, they investigated how beam design characteristics affected natural frequencies [13]. In their study, Waddar et al. investigated the experimental free vibration characteristics of silane-treated cenosphere/epoxy syntactic foams under axial pressure. An increase in filler content led to a rise in the natural frequency of the syntactic foam composites. Superior performance (up to an 11.46% increase in natural frequencies) was recorded with the silane-modified cenosphere embedded in the epoxy matrix compared to the untreated ones [14]. In their study, Maraş et al. numerically examined the vibration properties of laminated syntactic foam beams under unclamped boundary conditions. First, they obtained numerical results using the Finite Element Method based on first-order shear deformation theory and compared them with ANSYS results. They stated that there was good agreement between numerical and experimental results [15].

Metal foam is a porous material composed of metal with gas-filled pores [16-17]. Metal foams come in two types distinguished according to their geometric structures: open-cell and closed-cell [18]. These foams are widely used in various fields. Metal foams possess high energy absorption ability and characteristics such as lightness, thermal insulation, and damping resistance [19-20]. Aluminum-based metal foams hold a significant place in engineering applications. Aluminum foams can absorb more energy than most other metals. This material type can substitute composite materials in applications requiring vibration damping [21]. In their article, Rozskos et al. investigated the static and dynamic analysis of geometric models of closed-cell and open-cell aluminum foams using the homogenization technique and finite element analysis. At lower frequencies, the results indicated that both models (homogenized and optimized homogenized beam) showed similar natural frequencies and mode shapes. However, at higher frequencies, the influence of geometric shapes and imperfections became more significant in the results [22]. In their study, Dahil et al. measured the damping ratios of three aluminum foam samples with varying pore densities and investigated the influence of pore density on damping characteristics using experimental modal analysis. They stated that pore

density has an effect on the calculated damping ratios, with an increase in pore number correlating to higher damping values [23]. In their study, Wang et al. examined the free vibration characteristics of circular cylindrical metal foam shells under different boundary conditions. The results showed that the porosity coefficient notably influences the natural frequencies of metal foam shells [24]. Ma et al. used the time-averaged electronic speckle pattern interference (ESPI) method to investigate the vibration response of a cantilever beam made from closed-cell aluminum foam. In the experimental setup, they utilized the real-time subtraction ESPI method to study the vibration response of a cantilever beam made from closed-cell aluminum foam. Consistent with the results of the finite element method simulation, they stated that the vibration mode shapes observed via the ESPI method were in good agreement with the numerical predictions [25]. Lei et al. utilized modal analysis to explore the dynamic characteristics of closed-cell aluminum foam. They observed that the damping ratio exhibited an increasing trend with increasing porosity, decreasing natural frequency, and average pore size [26].

Syntactic foam and metal foam both play crucial roles in material-damping applications. Given their properties, metal and syntactic foams emerge as promising candidates for development of hybrid foams. Hybrid foam, as the name suggests, is created by combining various materials [27].

In this study, the modal behaviors of layered hybrid foams, consisting of closed-cell aluminum foam and EPS-filled syntactic foam, as well as their individual

components, were investigated numerically. Foams with different types and configurations were modeled under both clamped-free and free-free boundary conditions to investigate the effect of boundary conditions on natural frequencies and mode shapes. Elastic properties of EPS-filled syntactic foams and closed-cell aluminum foam were determined by experimental methods. Modal analysis was performed using ANSYS commercial finite element software package where the foams were modeled as homogeneous materials. This comprehensive investigation aims to provide insights into the dynamic behavior of hybrid foams for potential applications in vibration sensitive environments.

2. NUMERICAL STUDY (NÜMERİK ÇALIŞMA)

In this study, EPS-filled syntactic foams, closed-cell aluminum foam, and layered hybrid foams were subjected to free vibration analysis to determine their modal parameters. The 3D solid modeling of the foams, pre-processing, solving, and post-processing were performed using the ANSYS 18.1 Workbench package program. The methodology employed for foam design and analysis with the ANSYS package program is illustrated in Figure 1. During the pre-processing stage, the foam geometry, material properties, and boundary conditions were defined. In the post-processing stage, the results were graphically visualized, while in the solver stage, the frequencies were defined by modes. All produced foams were coded using a code system for easy reference. Table 1 lists the foam codes and their corresponding compositions.

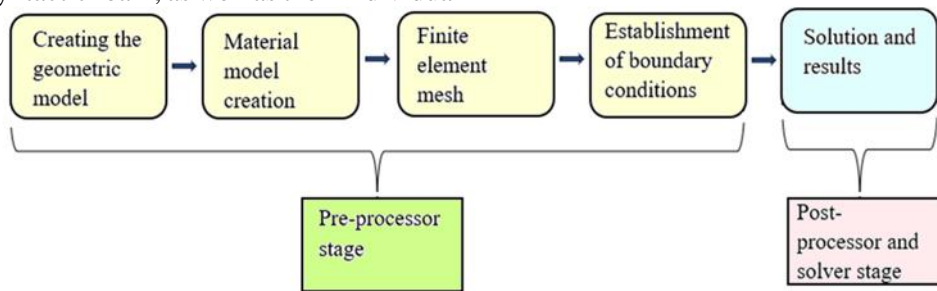


Figure 1. Flow chart of design and analysis using ANSYS (ANSYS kullanılarak tasarım ve analiz akış şeması)

Table 1. Designations of the foams used in this study (Bu çalışmada kullanılan köpüklerin tanımları)

Foam Code	Content
A ₁	Closed-cell aluminum foam
H ₁	20 mm aluminum foam / 10 mm syntactic foam with 10 kg/m ³ EPS density
H ₂	20 mm aluminum foam / 10 mm syntactic foam with 18 kg/m ³ EPS density
H ₃	20 mm aluminum foam / 10 mm syntactic foam with 30 kg/m ³ EPS density
H ₄	10 mm aluminum foam / 20 mm syntactic foam with 10 kg/m ³ EPS density

H ₅	10 mm aluminum foam / 20 mm syntactic foam with 18 kg/m ³ EPS density
H ₆	10 mm aluminum foam / 20 mm syntactic foam with 30 kg/m ³ EPS density
S ₁	Syntactic foam with 10 kg/m ³ EPS density
S ₂	Syntactic foam with 18 kg/m ³ EPS density
S ₃	Syntactic foam with 30 kg/m ³ EPS density

The dimensions of the foam materials were modeled as 100 x 30 x 30 mm. While modeling the layered hybrid foams, the adhesive material applied between the layers was excluded. The contact between the foams was modeled as perfectly bonded. This modeling serves the purpose of the adhesive layer. This approach ensured that the foams remained in full contact during the modal analysis. One of the most critical steps in the finite element method is the definition of material properties. Foam properties, including density, Young's modulus, and Poisson's ratio, were incorporated into the material library based on experimental data. The density of the foams was determined with the help of Archimedes' Principle. Young's modulus and Poisson's ratio of the foams were obtained from the compressive test carried out in the previous study [30]. To obtain the

compressive stress-strain curves of the foams, 30 x 30 mm thick and 30 mm thick samples were prepared according to ASTM C365/C365 M, and a compressive load was applied to the samples at a rate of 0.5 mm/min under displacement control. The elastic properties of foams were determined based on the linear region of the stress-strain curve [31]. In this study, five tests were performed for each condition, and average values were taken into account. The foam material properties assigned at the pre-processing stage of the ANSYS simulation are presented in Table 2. Closed-cell aluminum foam and EPS-filled syntactic foam are generally considered nearly isotropic, showing small changes in mechanical properties along the three principal directions. Therefore, mechanical properties in the x, y, and z directions are assumed to be equal (linear elastic isotropic assumption).

Table 2. Mechanical properties of different foams (Farklı köpüklerin mekanik özellikleri)

Property	Young's modulus	Poisson ratio	Density
Symbol	E	v	ρ
Unit	MPa	-	g/cm ³
A ₁	1726.0	0.33	0.400
S ₁	756.00	0.30	0.469
S ₂	687.70	0.30	0.479
S ₃	687.71	0.30	0.487

The finite element model of the structure was created using Solid 186 which is a higher-order 3D 20-node solid element that exhibits quadratic displacement behavior. Following the creation of the 3D model, mesh generation, which is the most important part of the 'Model' section, was carried out. The process of converting geometric elements into finite elements is called meshing [28]. The meshed solid model is shown in Figure 2. Various configurations were tested during the meshing process to achieve an optimal mesh size, with the element size refined until result convergence was obtained. The final mesh structure consisted of 8281 nodes and 1728 solid elements.

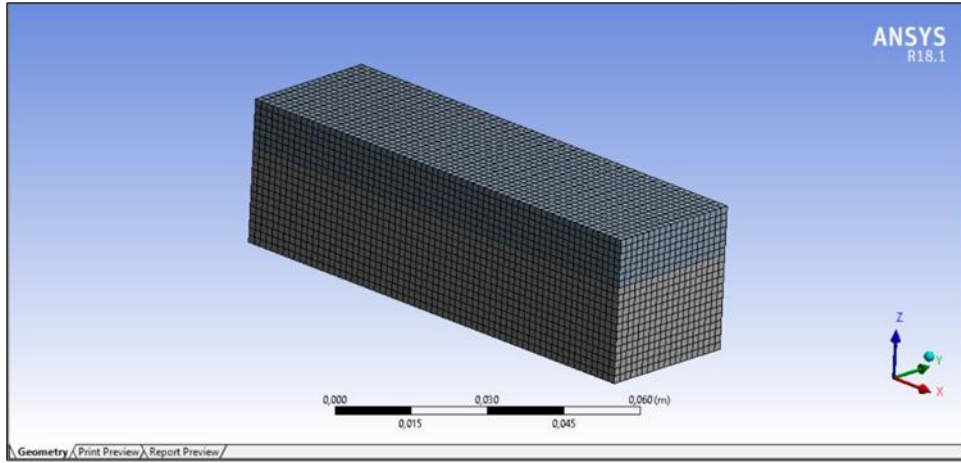


Figure 2. Finite element model of layered hybrid foam (Tabakalı hibrit köpüklerin sonlu eleman modeli)

Modal analysis was performed under two different boundary conditions:

Case 1: Free-Free Boundary Condition

In this condition, no support was applied to the end faces of the foam model. Modal analysis was performed for three modes under this configuration.

Case 2: Clamped-Free Boundary Condition

In this condition, one end surface of the foam model was fixed. Modal analysis was similarly performed for three modes under this configuration.

3. RESULTS (BULGULAR)

In this study, the effects of material application and boundary conditions were investigated numerically. The ANSYS software was used to perform vibration analysis on closed-cell aluminum foam, EPS-filled syntactic foams, and layered hybrid foams. To

validate the finite element (FE) model, the FE results obtained for foams coded H₁, H₂, and H₃ under clamped-free boundary conditions were compared with the experimentally determined natural frequencies of these materials [31]. It can be seen from Table 3 that the FE model accurately predicts the vibration behavior of foams. The highest difference is in H₂ coded foam with 2.89%.

Table 3. Natural frequencies of H₁, H₂, and H₃ coded foams obtained from the FE model compare with experimental results (FE modelinden elde edilen H₁, H₂ ve H₃ kodlu köpüklerin doğal frekanslarının deneysel sonuçlarla karşılaştırılması)

First natural frequency (Hz)			
Sample	H ₁	H ₂	H ₃
Experimental [31]	746.31	725.29	723.13
FEM (ANSYS)	765.85	746.91	744.51

Table 4 and Table 5 display the natural frequency values for the first three modes of numerically analyzed foams with various configurations. In addition to natural frequencies, mode shapes were also obtained during the numerical analysis to determine modal behavior. When Tables 4 and 5 are examined, the aluminum foam exhibits the highest natural frequency among all foam types. This indicates that the structure has high rigidity [29]. In contrast, EPS-filled syntactic foams demonstrate the lowest natural frequencies, reflecting their comparatively lower structural rigidity. As can be seen from Tables 4 and 5, the natural frequency of the EPS-filled syntactic foam is 583.42, 550.61, and 546.07 Hz under the clamped-free boundary conditions, and to 3110.4, 2935.5, and 2911.3 Hz

under the free-free boundary conditions, respectively. This change can be explained using the frequency equation $f = (1/2\pi \sqrt{(k/m)})$. Here, f is the natural frequency; k is the stiffness; m is the mass. The increase in the mass leads to a decrease in the natural frequency by increasing the value of m. The increase in the density of the EPS material causes a decrease in the frequencies because the effect of increasing the mass is greater than the effect of increasing the stiffness [2, 10]. Layered hybrid foams exhibit a smaller decline in natural frequencies compared to their closed-cell aluminum foam counterparts.

Table 4. Frequency values obtained as a result of numerical analyses of all foams under clamped-free boundary conditions (Tüm köpüklerin ankastre-serbest sınır koşulları altında nümerik analizleri sonucunda elde edilen frekans değerleri)

Clamped-Free Boundary Condition			
Natural Frequency (Hz)			
Sample	1 st Mode	2 nd Mode	3 rd Mode
A ₁	956.70	956.70	2939.2
H ₁	765.85	833.21	2456.4
H ₂	746.91	822.53	2406.3
H ₃	744.51	819.86	2397.7
H ₄	710.68	711.40	2151.2
H ₅	685.28	689.41	2070.4
H ₆	681.26	685.29	2059.2
S ₁	583.42	583.42	1816.6
S ₂	550.61	550.61	1714.4
S ₃	546.07	546.07	1700.3

Table 5. Frequency values obtained as a result of numerical analyses of all foams under free-free boundary conditions (Tüm köpüklerin serbest-serbest sınır koşulları altında nümerik analizleri sonucunda elde edilen frekans değerleri)

Free-Free Boundary Condition			
Natural Frequency (Hz)			
Sample	1 st Mode	2 nd Mode	3 rd Mode
A ₁	5067.2	5067.2	5829.8
H ₁	4044.3	4403.5	4866.5
H ₂	3936.6	4340.6	4760.9
H ₃	3921.4	4325.3	4743.0
H ₄	3716.1	3761.2	4249.3
H ₅	3565.6	3641.3	4082.7
H ₆	3543.6	3618.8	4061.2
S ₁	3110.4	3110.4	3614.5
S ₂	2935.5	2935.5	3411.2
S ₃	2911.3	2911.3	3383.1

Tables 4 and 5 also highlight the changes in frequency based on the boundary conditions. In the transition from clamped-free to free-free boundary conditions, the increase in the frequencies of the first and second modes, which were initially excited, rose up to fivefold, while the increase in the frequency of the third mode, excited later, was approximately twofold. When the tables are examined, it is observed that there is a difference only in the frequencies of the first and second bending modes of the hybrid foams. The reason for this difference is attributed to the change in the bending stiffness caused by the variation in the cross-sectional profiles. The change observed in frequencies due to variations in the thicknesses of the structures forming the hybrid foam provides design engineers with enhanced flexibility in preventing structural damage during vibration control.

Vibration modes for all foam configurations were analysed under clamped-free and free-free boundary conditions. Figure 4 illustrates the first three mode shapes for the layered hybrid foam (H₆) under clamped-free conditions, while Figure 5 presents the corresponding mode shapes for free-free boundary conditions. The modal analysis of H₆ reveals that the first two modes are translational, whereas the third mode is torsional. These results indicate that bending vibration modes are excited earlier than torsional or longitudinal vibration modes.

Under clamped-free boundary conditions, the first three natural frequencies of H₆ are 681.26 Hz, 685.29 Hz, and 2059.2 Hz, respectively. The proximity of the first two frequencies suggests similar stiffness in the foam's two transverse directions, as their values are identical.

Additionally, the third natural frequency is approximately three times higher than the first, indicating distinct torsional behaviour.

Furthermore, the mode shapes observed across all foam configurations were found to be consistent.

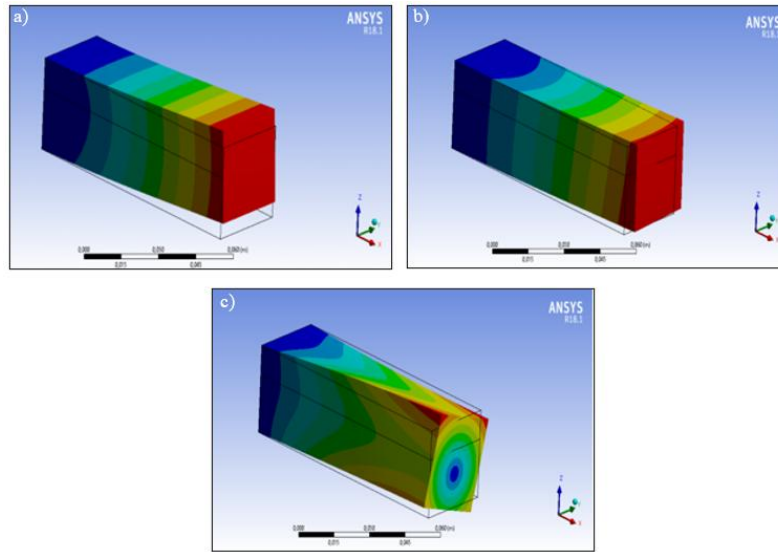


Figure 3. a) 1st mode b) 2nd mode c) 3rd mode of H₆ coded layered hybrid foam under clamped-free boundary condition (Ankastre-serbest sınır koşulu altında H₆ kodlu tabakalı hibrit köpüğün a) 1. mod b) 2. mod c) 3. modu)

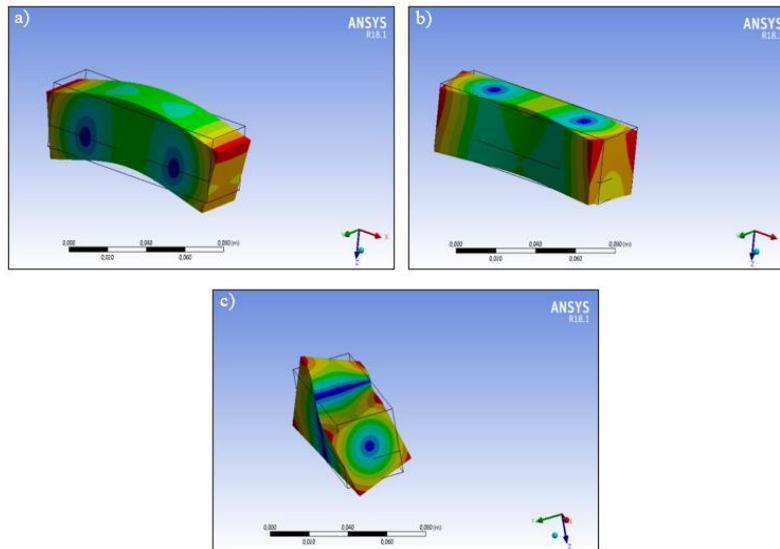


Figure 4. a) 1st mode b) 2nd mode c) 3rd mode of H₆ coded layered hybrid foam under free-free boundary condition (Serbest-serbest sınır koşulu altında H₆ kodlu tabakalı hibrit köpüğün a) 1. mod b) 2. mod c) 3. modu)

The relationship between structural stiffness and volume ratio is a critical factor in engineering applications. A precise understanding of this relationship is essential for accurately predicting and controlling structural vibration behavior. For this reason, the variations in structural stiffness as a function of the volume fraction of layered hybrid foam for the first three vibration modes under clamped-free boundary conditions are presented in

Figure 6. Equation (1) is utilized to calculate Structural stiffness (EI) values for different vibration modes.

$$\omega_n = (\beta l)^2 \sqrt{\frac{EI}{\rho A l^4}} \quad (1)$$

Where, ω_n : Natural frequency of the system. β : A geometric constant of the solution. l : Length of the

beam. E : Young's modulus of the material. I : Moment of inertia. ρ : Density of the material. A : Section area. Among the parameters in the graph, V_s represents the volume of EPS-filled syntactic foam,

V_{AL} represents the volume of closed-cell aluminum foam, and V_s/V_{AL} represents the volume ratio of syntactic foam and aluminum foam components of the layered hybrid foam.

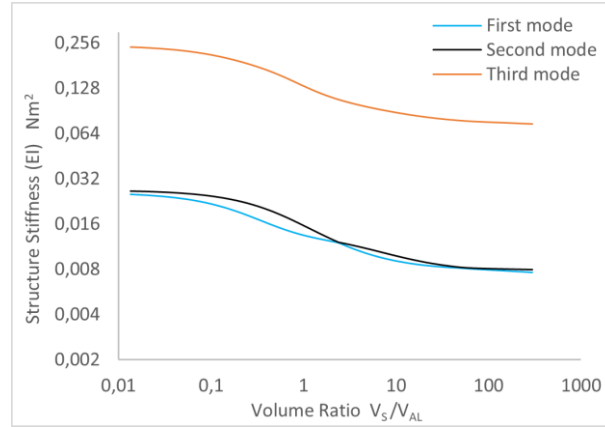


Figure 5. Structural stiffness variation of layered hybrid foam with respect to volumetric ratio and vibration modes under clamped-free boundary conditions (Ankastre-serbest sınır koşulları altında tabakalı hibrit köpüğün hacim oranı ve titreşim modlarına göre yapısal sertlik değişimi)

Figures 7a and 7b show how the first natural frequency of the layered hybrid foam varies in

relation to the second and third natural frequencies under clamped-free boundary conditions.

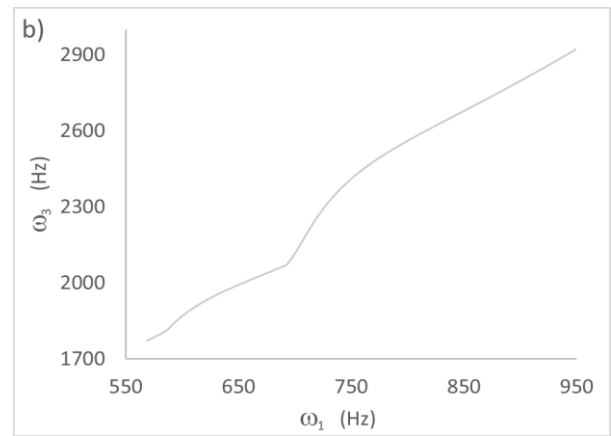
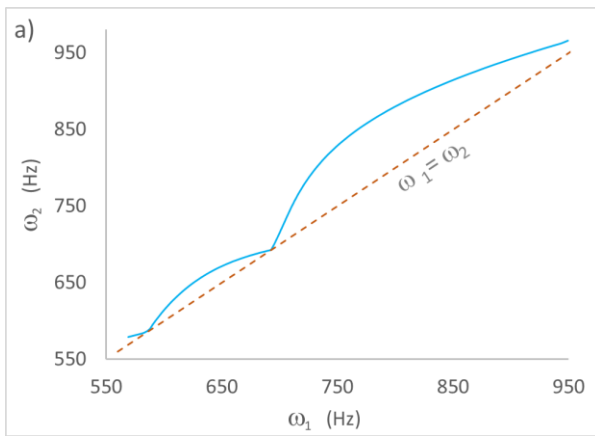


Figure 6. Variation of natural frequencies under clamped-free boundary conditions (Ankastre-serbest sınır koşulları altında doğal frekansların değişimi)

Figures 7a and 7b clearly illustrate the variation in natural frequencies by revealing the relationships between the first and second natural frequencies, as well as the first and third natural frequencies, respectively, of the hybrid structure. These figures demonstrate that the relationships between two natural frequencies vary in a nonlinear manner. The red dashed line added to the first graph represents the points at which the first and second natural frequencies are equal ($\omega_1 = \omega_2$). The curve indicates that, in the 800–900 Hz range, while the first natural frequency increases, the second natural frequency

exhibits a tendency for more rapid growth, only to subsequently decrease, aligning the two frequencies at 692 Hz. In this region, there is a risk of concurrent resonances emerging in designs. Following the point of equality, it is observed that as the first natural frequency continues to increase, the second natural frequency shows a rapid, nonlinear rise. These occurrences are critically significant for the dynamic stability of the structure. Another notable aspect of the graph is the abrupt changes in slope in certain regions. Upon examining Figure 7b, a similar trend is observed. The most prominent

difference in this graph appears in the variation of ω_1 within the 600–700 Hz range, where an approximately linear relationship is established between ω_1 and ω_2 .

In conclusion, understanding the relationship between the natural frequencies of the hybrid

system is essential for assessing the dynamic behavior of structures. The findings obtained from the graph should be considered in system design and stability analysis within engineering applications. Optimizing natural frequencies plays a crucial role in enhancing the safety and performance of structures.

4. CONCLUSIONS (SONUÇLAR)

Numerical investigations were conducted to study the free vibration behaviors of foams with different types and configurations under both clamped-free and free-free boundary conditions. The study analyzed how foam configuration and boundary conditions influence natural frequencies and mode shapes. The natural frequencies of layered hybrid foams were compared with those of closed-cell aluminum foam. It was observed that the frequency of layered aluminum foams was lower than that of closed-cell aluminum foam. For the same foams with a change in the boundary conditions, the natural frequency increased several folds. According to the experimental results reported in the previous study [31], it was determined that the differences between the numerical solutions we obtained from ANSYS, and the experimental natural frequencies varied from 0.41% to approximately 5%. The reason for this difference is attributed to errors during the production, adhesion, and measurement of the samples, as well as errors in the calculations. However, the calculation error rate can be further reduced by making changes to various parameters, such as the material properties and the mesh structure of the model created in ANSYS. In addition, the structural stiffness changes of the layered hybrid foam according to the volumetric ratio and vibration modes and how the first natural frequencies change with the second and third natural frequencies were investigated under clamped-free boundary conditions.

The findings of this study provided important data on optimum design conditions by determining structural stiffness changes depending on the volume ratio and vibration modes of layered hybrid foam structures. In particular, the combination of closed-cell aluminum foam and EPS-filled syntactic foam provided a suitable balance between lightness and durability according to structural performance requirements. Increasing the aluminum ratio in applications requiring high stiffness and preferring syntactic foam in cases where flexibility is required stands out as an effective approach to improving the performance and stability of the structure. This

study has provided important information about dynamic stability and resonance risk by revealing that the relationships between the natural frequencies of hybrid foam structures change in a nonlinear manner. Sudden slope changes and frequency equality points observed in certain frequency ranges play a critical role in determining resonance risk. Optimizing the natural frequencies of hybrid structures increases the safety and performance of structures and enables the development of more robust and stable designs in engineering applications.

ACKNOWLEDGMENTS (TEŞEKKÜR)

Not Applicable.

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)

Kübra Çağla ÇIBIKÇI: She conducted the experiments, analyzed the results and performed the writing process.

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

Mustafa YAMAN: He conducted analyzed the results.

Sonuçları analiz etmiştir.

CONFLICT OF INTEREST (ÇIKAR ÇATIŞMASI)

There is no conflict of interest in this study.

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

REFERENCES (KAYNAKLAR)

- [1] Ashby M. F. The properties of foams and lattices. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. 2006; 364(1838): 15-30.
- [2] Tagliavia G, Porfiri M, & Gupta N. Vinyl Ester/Glass Hollow Particle Composites: Dynamic Mechanical Properties at High Inclusion Volume Fraction. *Journal of Composite Materials*. 2009; 43(5):561–582.
- [3] Singh K, Ohlan A, Saini P, & Dhawan S. K. Composite – super paramagnetic behavior and variable range hopping 1D conduction mechanism – synthesis and characterization. *Polymers for Advanced Technologies*. 2007; 229–236.
- [4] Narita M, Higuchi M, Ogawa T, Wada S, Miura A, & Tadanaga K. Float zone growth and spectroscopic properties of Yb: CaYAlO₄ single crystal for ultra-short pulse lasers. *Optical Materials*. 2018; 80: 57-61.
- [5] Porfiri M, & Gupta N. Effect of volume fraction and wall thickness on the elastic properties of hollow particle filled composites. *Composites Part B: Engineering*. 2009; 40(2):166-173.
- [6] Narkis M, Gerchovich M, Puterman M, & Kenig S. Syntactic foams III. Three-phase materials produced from resin coated microballoons. *Journal of Cellular Plastics*. 1982; 18(4): 230-232.
- [7] Maraş S, Yaman M, & Şansveren MF. Dynamic Analysis of Laminated Syntactic Foam Beams. 3 rd International Conference on Advanced Engineering Technologies. 2019.
- [8] Huang C, Huang Z, Qin Y, Ding J, & Lv X. Mechanical and dynamic mechanical properties of epoxy syntactic foams reinforced by short carbon fiber. *Polymer Composites*. 2016; 37(7): 1960-1970.
- [9] Karthikeyan CS, Sankaran S, & Kishore. Influence of chopped strand fibres on the flexural behaviour of a syntactic foam core system. *Polymer international*. 2000; 49(2): 158-162.
- [10] Şansveren MF, & Yaman M. The effect of carbon nanofiber on the dynamic and mechanical properties of epoxy/glass microballoon syntactic foam. *Advanced Composite Materials*. 2019.
- [11] Buddhacosa N, Galos J, Khatibi A, & Kandare E. Mechanical and vibration damping properties of multifunctional composites incorporating elastomeric particulates. In 13th International Conference on the Mechanical Behaviour of Materials. 2019; 155.
- [12] Maraş S, & Yaman M. Experimental and numerical investigation of free vibration behaviours of sandwich syntactic foams. In *Structures*. 2023; 58: 105390.
- [13] Rahmani O, Khalili SMR, Malekzadeh K, & Hadavinia HJCS. Free vibration analysis of sandwich structures with a flexible functionally graded syntactic core. *Composite Structures*. 2009; 91(2):229-235.
- [14] Waddar S, Jeyaraj P, & Doddamani M. Influence of axial compressive loads on buckling and free vibration response of surface-modified fly ash cenosphere/epoxy syntactic foams. *Journal of Composite Materials*. 2018; 52(19): 2621-2630.
- [15] Maraş S, Yaman M, & Şansveren MF. Dynamic Analysis of Laminated Syntactic Foam Beams. 3 rd International Conference on Advanced Engineering Technologies. 2019.
- [16] Al-Waily M, Raad H, & Njim EK. Free vibration analysis of sandwich plate-reinforced foam core adopting micro aluminum powder. *Physics and Chemistry of Solid State*. 2022; 23(4): 659-668.
- [17] Wang YQ, Ye C, & Zu JW. Vibration analysis of circular cylindrical shells made of metal foams under various boundary conditions. *International Journal of Mechanics and Materials in Design*. 2019; 15: 333-344.
- [18] Ashby MF, Evans T, Fleck NA, Hutchinson JW, Wadley HNG, & Gibson LJ. *Metal foams: a design guide*. Elsevier. 2000.
- [19] Dahil L, Karabulut A, & Baspinar S. Damping properties of open pore aluminum foams produced by vacuum casting and NaCl dissolution process. *Metalurgija*. 2013; 52(4): 489-492.
- [20] Lei Q, Ren J, Ren H, Chao H, & Du W. Study on dynamic characteristics of closed-cell aluminum foam. *Vibroengineering Procedia*. 2019; 28:142-147.
- [21] Zapoměl J, Dekýš V, Ferfecki P, Sapietová, A, Sága M, & Žmindák M. Identification of material damping of a carbon composite bar and study of its effect on attenuation of its transient lateral vibrations. *International journal of applied mechanics*. 2015; 7(06):1550081.
- [22] Roszkos CS, Bocko J, Kula T, & Šarloši J. Static and dynamic analyses of aluminum foam geometric models using the homogenization procedure and the FEA. *Composites Part B: Engineering*. 2019;171: 361-374.
- [23] Dahil L, Karabulut A, & Baspinar S. Damping properties of open pore aluminum foams produced by vacuum casting and NaCl dissolution process. *Metalurgija*. 2013; 52(4): 489-492.

- [24] Wang YQ, Ye C, & Zu JW. Vibration analysis of circular cylindrical shells made of metal foams under various boundary conditions. *International Journal of Mechanics and Materials in Design*. 2019; 15: 333-344.
- [25] Ma YH, Tao N, Dai ML, Yang FJ, & He XY. Investigation on vibration response of aluminum foam beams using speckle interferometry. *Experimental Techniques*. 2018; 42: 69-77.
- [26] Lei Q, Ren J, Ren H, Cha, H, & Du W. Study on dynamic characteristics of closed-cell aluminum foam. *Vibro engineering Procedia*. 2019; 28: 142-147.
- [27] Cluff DRA, Esmaceli S. Compressive properties of a new metal – polymer hybrid material. *Journal of Materials Science*. 2009; 44:3867–3876.
- [28] Potluri R, Raju MN, & Babu KRP. The process of converting geometric elements into finite elements is called meshing Finite element analysis of cellular foam core sandwich structures. *Materials Today: Proceedings*. 2017; 4(2): 2501-2510.
- [29] Pandey R, Singh P, Khanna M, Murtaza Q. Metal foam manufacturing, mechanical properties and its designing aspects—a review. *Advances in Manufacturing and Industrial Engineering: Select Proceedings of ICAPIE*. 2021; 761-770.
- [30] Kübra Çağla Çıbıkçı, Alüminyum ve EPS Dolgulu Sentetik Köpükten Oluşan Tabakalı Hibrit Köpüklerin Mekanik ve Dinamik Davranışlarının Deneysel ve Nümerik Olarak İncelenmesi (Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi, 2024; 109.
- [31] Çıbıkçı KÇ, Yaman M. Experimental investigation of compressive behavior and vibration properties of layered hybrid foam formed by aluminum foam/EPS-filled syntactic foam. *J Mater Sci*. 2024; 59: 3636–365.



Analysis of Mechanical and Thermal Material Characteristics of GPL-Reinforced Double-FG Composite Nanoplates under Temperature Load

Kerim Gökhan AKTAŞ^{1*}

¹Karabük University, Faculty of Engineering, Department of Mechanical Engineering, Karabük, Turkey

Article Info

Research article
Received: 01/11/2024
Revision: 18/12/2024
Accepted: 18/12/2024

Keywords

Double-FG Material
GPL-Reinforced Nanoplate
Ti-6Al-4V
Silicon Nitride

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 01/11/2024
Düzeltilme: 18/12/2024
Kabul: 18/12/2024

Anahtar Kelimeler

Çift-FD Malzeme
GPL-Takviyeli Nanoplaka
Ti-6Al-4V
Silikon Nitriür

Graphical/Tabular Abstract (Grafik Özet)

In this article, the variation in mechanical and thermal material properties of double functionally graded composite nanoplates reinforced with graphene platelets subjected to thermal loading is investigated. / Bu makalede, termal yüklemeye maruz kalan grafen plakalar ile güçlendirilmiş çift fonksiyonel derecelendirilmiş kompozit nanoplakanın mekanik ve termal malzeme özelliklerindeki değişim incelenmiştir.

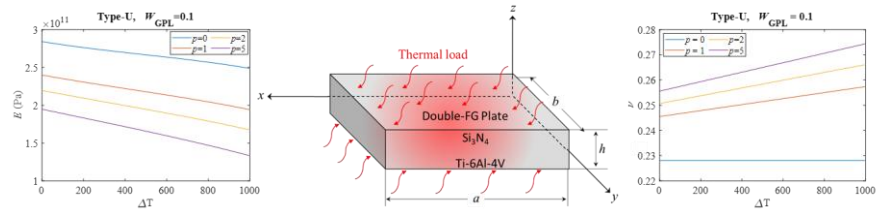


Figure A: Investigation of mechanical and thermal material properties of GPL-reinforced double-FG composite nanoplates / **Şekil A:** GPL ile güçlendirilmiş çift-FD kompozit nanoplakanın mekanik ve termal malzeme özelliklerinin incelenmesi

Highlights (Önemli noktalar)

- Halpin-Tsai micromechanical procedures, power-law distribution, and law of mixtures are employed to determine the effective properties of the proposed plate structure. / Önerilen plakanın efektif özelliklerini belirlemek için Halpin-Tsai mikromekanik prosedürü, power-law dağılımı ve karışımlar kanunu uygulanmıştır.
- Higher modulus of elasticity values are obtained in the Type-X dispersion model. Also, while modulus of elasticity decreases with temperature rise and power law parameter, it increases with GPL weight ratio. / Tip-X dağılım modelinde daha yüksek elastisite modülü değerleri elde edilmiştir. Ayrıca, elastisite modülü sıcaklık artışı ve kuvvet yasası parametresi ile azalırken, GPL ağırlık oranı ile artmaktadır.
- Higher values of the thermal expansion coefficient are observed in the Type-U dispersion model. / Tip-U dağılım modelinde daha yüksek termal genişleme katsayısı gözlenmiştir.
- Increasing power law index and GPL weight ratio increases the effective thermal conductivity coefficient of the composite plate. / Artan kuvvet yasası indeksi ve GPL ağırlık oranı, kompozit plakanın etkin termal iletkenlik katsayısını artırmaktadır.

Aim (Amaç): This article aims to analyze the change in mechanical and thermal material properties of double functionally graded composite nanoplates reinforced with graphene platelets subjected to thermal loading. / Bu makale, termal yüklemeye maruz kalan grafen plakalarla güçlendirilmiş çift fonksiyonel dereceli kompozit nanoplakanın mekanik ve termal malzeme özelliklerindeki değişimi analiz etmeyi amaçlamaktadır.

Originality (Özgünlük): The investigation of the thermal and mechanical properties of the presented double-FG GPLs-reinforced plate by considering the temperature dependent material properties is a subject that wasn't studied previously. / Sunulan çift-FD GPL takviyeli plakanın termal ve mekanik özelliklerinin sıcaklığa bağlı malzeme özellikleri dikkate alınarak incelenmesi daha önce çalışılmamış bir konudur.

Results (Bulgular): According to analysis, it is determined that the thermal and mechanical characteristics of the plate change significantly with temperature rise and exhibit quite different performance at room temperature and high temperature environments. / Analiz sonuçlarına göre, plakanın termal ve mekanik özelliklerinin sıcaklık artışıyla önemli ölçüde değiştiği ve oda sıcaklığı ile yüksek sıcaklık ortamlarında oldukça farklı performans sergilediği tespit edilmiştir.

Conclusion (Sonuç): With this work, it is expected to provide contribution to aerospace, marine and medical applications, micro and nano electromechanical devices that will operate in environments requiring high temperature and corrosion resistance. / Bu çalışma ile yüksek sıcaklık ve korozyon direnci gerektiren ortamlarda çalışacak havacılık, denizcilik ve medikal uygulamalara, mikro ve nano elektromekanik cihazlara, önemli katkı sağlanması beklenmektedir.



Analysis of Mechanical and Thermal Material Characteristics of GPL-Reinforced Double-FG Composite Nanoplates under Temperature Load

Kerim Gökhan AKTAŞ^{1*}

¹Karabük University, Faculty of Engineering, Department of Mechanical Engineering, Karabük, Turkey

Article Info

Research article

Received: 01/11/2024

Revision: 18/12/2024

Accepted: 18/12/2024

Keywords

Double-FG Material
GPL-Reinforced Nanoplate
Ti-6Al-4V
Silicon Nitride

Abstract

This article analyzes the variation in the mechanical and thermal material characteristics of graphene platelets (GPLs)-reinforced double-functionally graded (FG) composite nanoplates subjected to thermal load. Titanium alloy Ti-6Al-4V and silicon nitride (Si₃N₄) metal-ceramic matrix is preferred for the nanoplate matrix due to their potential for use in thermal environments. The double-FG properties of the structure are provided by the functional dispersion of the ceramic-metal matrix as well as the effective arrangement of the GPLs in two distinct patterns throughout the plate's thickness (Type-X and Type-U). The thermal and mechanical characteristics of the matrix materials and GPLs are temperature-dependent. The effective material properties of the double-FG nanoplate matrix are obtained using Voigt's rule of mixture. The analysis is conducted to evaluate the influence of variables like temperature rise, GPLs weight ratio and GPLs distribution patterns on the thermal and mechanical properties of the nanoplate such as effective modulus of elasticity, Poisson's ratio, coefficient of thermal expansion and coefficient of thermal conductivity. According to the results of the analysis, it is determined that the thermal and mechanical characteristics of the proposed plate change significantly with temperature rise and exhibit quite different performance at room temperature and high temperature environments. With the presented work, it is expected to provide significant contribution to aerospace, marine and medical applications, micro and nano electromechanical devices, microprocessors and transistors that will operate in environments requiring high temperature and corrosion resistance.

Sıcaklık Yükü Etkisi Altındaki GPL Takviyeli Çift-FD Kompozit Nanoplakaların Mekanik ve Termal Malzeme Özelliklerinin Analizi

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi

Başvuru: 01/11/2024

Düzeltilme: 18/12/2024

Kabul: 18/12/2024

Anahtar Kelimeler

Çift-FD Malzeme
GPL-Takviyeli Nanoplaka
Ti-6Al-4V
Silikon Nitrid

Öz

Bu makale, termal yüke maruz kalan grafen nano plaka (GPL) takviyeli çift fonksiyonel derecelendirilmiş (FD) nano plakaların mekanik ve termal malzeme özelliklerindeki değişimini analiz etmektedir. Termal ortamlarda kullanım potansiyelleri nedeniyle titanyum alaşımı Ti-6Al-4V ve silikon nitrid (Si₃N₄) metal-seramik matrisi, nano plaka matrisi için tercih edilmiştir. Plakanın çift-FG özellikleri, seramik-metal matrisin fonksiyonel dağılımının yanı sıra GPL'lerin plaka kalınlığı boyunca iki farklı düzende (Tip-X ve Tip-U) fonksiyonel bir şekilde düzenlenmesiyle sağlanmaktadır. Matris malzemelerinin ve GPL'lerin termal ve mekanik özellikleri sıcaklığa bağlıdır. Çift-FD nanoplaka matrisinin etkin malzeme özellikleri Voigt'in karışım kuralı kullanılarak elde edilmiştir. Analiz çalışmaları, sıcaklık artışı, GPL ağırlık oranı ve GPL dağılım paternleri gibi değişkenlerin nanoplakanın efektif elastisite modülü, Poisson oranı, termal genleşme katsayısı ve termal iletkenlik katsayısı gibi termal ve mekanik özellikleri üzerindeki etkisini değerlendirmek için gerçekleştirilmiştir. Analiz sonuçlarına göre, önerilen plakanın termal ve mekanik özelliklerinin sıcaklık artışı ile önemli ölçüde değiştiği ve oda sıcaklığı ile yüksek sıcaklık ortamlarında oldukça farklı performans sergilediği tespit edilmiştir. Sunulan çalışma ile havacılık, denizcilik ve medikal uygulamalara, yüksek sıcaklık ve korozyon direnci gerektiren ortamlarda çalışacak mikro ve nano elektromekanik cihazlara, mikroişlemcilere ve transistörlere önemli katkı sağlanması beklenmektedir.

1. INTRODUCTION (GİRİŞ)

The special thermal and mechanical characteristics of functionally graded materials (FGMs) make them

highly attractive for use in engineering applications where improved performance is required in a wide range of environments. Mechanical and thermal characteristics of FGMs change regularly along the

material's thickness direction due to the material's composition, which vary gradually. Material performance in fields including structural engineering, civil engineering, aerospace, and automotive can be modified by adjusting this gradient [1,2]. The mechanical properties of FGMs can be described through various methodologies, including power-law distributions, which represent the variation of parameters such as Young's modulus, Poisson's ratio and density between different surfaces. For example, Arefi's research [3] on functionally graded sandwich plates incorporating piezoelectric layers demonstrates the application of a power law function to depict the arrangement of mechanical characteristics, with the bottom surface composed of steel and the top layer of ceramic. This methodology is essential for comprehending the behavior of FGMs under mechanical stresses, as it facilitates the estimation of stress and deformation parameters that considerably vary from those of homogeneous elements [4]. Thermal characteristics of FGMs are also essential, especially in applications where temperature gradients exist. Findings from FGM thermal stress analyses show that residual stresses and thermal adaptability are strongly affected by the in-plane material composition gradient [5].

GPLs have become a crucial reinforcement material in different composite materials, especially in the manufacturing of graphene-reinforced plate structures. The integration of GPLs into composite structures has been thoroughly examined owing to their remarkable mechanical features, which encompass enhanced tensile strength, rigidity, and thermal conductivity. Due to these qualities, GPLs are an appealing option for improving the functionality of composites made of polymers and metals. The mechanical reinforcement provided by graphene is used in various structures. For example, the total mechanical characteristics of the composite are greatly improved as a result of the effective load transfer that occurs between the GPLs and the matrix material. This effect has been observed in research that evaluated the mechanical behavior of FG porous components that were reinforced with GPLs. The results of these studies demonstrated better stiffness and strength properties in comparison to their counterparts that were not reinforced [6–9]. The uniform distribution of GPLs within the matrix is essential for enhancing mechanical achievement, as it reduces deficiencies and improves interfacial bonding, which is critical for stress transmission [10,11]. The incorporation of GPLs into metal matrix composites has led to significant enhancements in mechanical characteristics. Researchers has shown that

composites containing graphene and metals, such as aluminum and copper, have higher tensile strength and hardness than those without graphene [12,13].

Dual functionally graded materials signify a notable progression in material science, integrating the distinct features of multiple materials in a gradient configuration to attain improved performance attributes [14]. The principal benefit of FGMs is their capacity to customize material qualities, including thermal resistance, mechanical strength, and wear resistance, by altering the composition and microstructure across the material [15]. Additionally, the incorporation of advanced materials such as graphene and carbon nanotubes into FGMs has been investigated to improve their mechanical and thermal characteristics. The integration of carbon nanotubes into ceramic materials enhances their mechanical properties and thermal stability, as reported by Estili and Sakka [16]. The vibration of a smart sandwich plate with auxetic core and dual-FG nanocomposite layers integrated with piezoceramic actuators has been studied by Nouraei et al [17]. Shen [18] proposed the idea of FG-CNT reinforced nanocomposites, wherein the CNTs are distributed throughout the structure's thickness using various FG patterns. Kamarian et al. [19] examined the impact of the temperature environment on the buckling behavior of a sandwich plate featuring FG-CNT reinforced nanocomposite face sheets.

Si_3N_4 is a ceramic substance that has attracted considerable interest owing to its remarkable thermal and mechanical characteristics, rendering it appropriate for many applications in engineering and materials research. Si_3N_4 possesses exceptional strength, toughness, and hardness, essential for use in challenging conditions. The thermal characteristics of Si_3N_4 are also remarkable. It has a high thermal conductivity that enables efficient heat dissipation in high-temperature applications. This feature is especially advantageous in electrical and aeronautical applications where temperature management is essential [20]. The improved strength-to-weight ratio facilitates the creation of lightweight constructions without reducing performance. Moreover, thermal shock resistance of Si_3N_4 enhances its utility in demanding environments, particularly within the aerospace and automotive fields [21]. Ti-6Al-4V is highly regarded for its outstanding thermal and mechanical characteristics, rendering it a preferred material in several technical applications, especially in aerospace and biomedical sectors. The alloy's composition provides high strength-to-weight ratio and corrosion resistance for high-performance

applications [22]. Ti-6Al-4V demonstrates comparatively low heat conductivity relative to other metals, which might be beneficial in applications requiring thermal insulation. The thermal expansion coefficient of Ti-6Al-4V is an essential parameter, especially in applications with temperature variations, since it can cause dimensional modifications that may impact construction and efficiency [23]. The Ti-6Al-4V and Si_3N_4 FGMs are of particular interest as they combine the high strength and ductility of the titanium alloy with the excellent thermal and wear resistance of the silicon nitride ceramic. These materials exhibit superior performance in terms of thermal protection, mechanical strength, and resistance to stress concentration, making them attractive for a wide range of applications, including aerospace, energy, and biomedical industries [24]. Materials with high temperature strength and corrosion resistance are required for applications involving severe temperature technology, such as aerospace, because of their extraordinary high temperature qualities, great mechanical capabilities, and high toughness and strength [25]. Conventional Si_3N_4 ceramics have low fracture toughness, as do most ceramics [26]. As a result, it is unavoidable to employ FGM structures to combine the superior mechanical and thermal capabilities of ceramic and metal materials.

As mentioned above, the mechanical and thermal properties of FG plates can vary considerably via temperature. Therefore, the issue important to include temperature dependent substance properties in the mechanical and thermal inspection of components operating in low and high temperature

regions. By conducting a comprehensive review of the existing literature, it is concluded that the investigation of the thermal and mechanical properties of the presented double-FG GPLs-reinforced plate by considering the temperature dependent material properties is a subject that wasn't studied previously. Si_3N_4 and Ti-6Al-4V titanium alloy have been selected as the matrix materials of the proposed plate, which can be used in many engineering fields due to their superior mechanical and thermal properties. It is expected that the proposed study will contribute to high temperature and corrosion applications in nanoelectromechanical systems, aerospace, marine and medical applications.

2.THEORY AND FORMULATION (TEORİ VE FORMÜLASYON)

2.1. A Summary of the Proposed Double-FG

Nanoplate (Önerilen Çift-FD Nanoplakanın Özeti)

The current investigation presents a FGM nanostructure characterized by dimensions length a , width b , and thickness h , as illustrated in Figure 1. The middle layer of the FGM plate contains the in-plane coordinates x and y , while the direction z extends across the thickness of plate. The nanoplate is under thermal load along the z -axis. Two distinct patterns of GPL distribution are proposed to reinforce the FG metal-ceramic matrix in the plate layer. As illustrated in Figure 2, these patterns comprise functionally graded distribution (Type-X) along the thickness axis and a uniform distribution (Type-U).

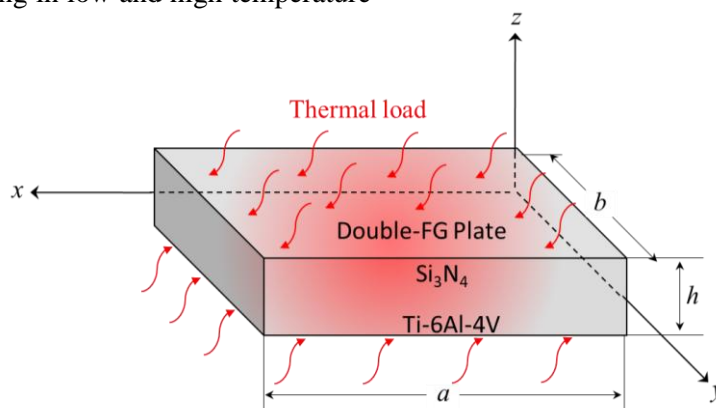


Figure 1. GPL-reinforced double-FG nanoplate structure (GPL ile güçlendirilmiş çift-FD nanoplaka yapısı)

2.2. Double-FG Properties (Çift-FD Özellikler)

Introducing GPLs with functionally graded dispersion arrangement within FG Si_3N_4 /Ti-6Al-4V core results in the double-FG characteristics of the suggested nanostructure. The double-FG plate structure consists of a ceramic (Si_3N_4) and a metal

(Ti-6Al-4V) matrix. The effective mechanical and thermal properties of the nanoplate are graded using power law dispersion. The top surface of the FGM plate is defined as Si_3N_4 , and the bottom surface as Ti-6Al-4V. The efficient features of the nanoplate matrix determined using the law of mixtures as follows [27]:

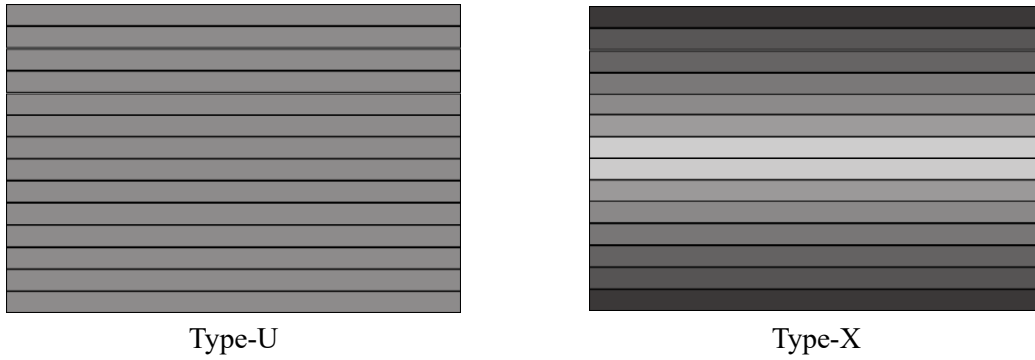


Figure 2. GPL dispersion patterns (GPL dağılım paternleri)

$$E_{matrix} = E_{met} + (E_{cer} - E_{met})V_{cer} \quad (1)$$

$$v_{matrix} = v_{met} + (v_{cer} - v_{met})V_{cer} \quad (2)$$

$$\rho_{matrix} = \rho_{met} + (\rho_{cer} - \rho_{met})V_{cer} \quad (3)$$

$$\alpha_{matrix} = \alpha_{met} + (\alpha_{cer} - \alpha_{met})V_{cer} \quad (4)$$

$$\kappa_{matrix} = \kappa_{met} + (\kappa_{cer} - \kappa_{met})V_{cer} \quad (5)$$

where *cer* denotes a ceramic matrix and *met* denotes a metal matrix. Furthermore, the ρ_{matrix} , v_{matrix} , α_{matrix} , κ_{matrix} , and E_{matrix} indicate the effective properties of nanoplate matrix. The subsequent method can be utilized in order to ascertain the volume ratio of the ceramic, indicated as V_{cer} , using the power-law distribution [17,27]:

$$V_{cer} = \left(\frac{1}{2} + \frac{z}{h}\right)^p \quad h_1 \leq z \leq h_2 \quad (6)$$

in which $h_1 = -h/2$ and $h_2 = +h/2$. The variable z represents the location toward the neutral axis, whereas the variable n symbolizes the power-law variable.

2.3. Distribution Patterns for GPLs (GPL'ler için Dağılım Paternleri)

Employing the following steps of the Halpin-Tsai micromechanical processes, the modulus of elasticity of the GPL-reinforced nanoplate can be determined as [28]:

$$E = \frac{3}{8} \left(\frac{\xi_L \eta_L V_{GPL}}{1 - \eta_L V_{GPL}} \right) E_{matrix} + \frac{5}{8} \left(\frac{1 + \xi_w \eta_w V_{GPL}}{1 - \eta_w V_{GPL}} \right) E_{matrix} \quad (7)$$

$$\xi_L = \frac{2l_{GPL}}{t_{GPL}} \quad (8)$$

$$\xi_w = \frac{2w_{GPL}}{t_{GPL}} \quad (9)$$

$$\eta_L = \frac{(E_{GPL}/E_{matrix}) - 1}{(E_{GPL}/E_{matrix}) + \xi_L} \quad (10)$$

$$\eta_w = \frac{(E_{GPL}/E_{matrix}) - 1}{(E_{GPL}/E_{matrix}) + \xi_w} \quad (11)$$

The parameters w_{GPL} , l_{GPL} , and t_{GPL} symbolize the GPLs' width, length, and thickness, respectively. The GPLs' modulus of elasticity is also denoted by E_{GPL} . The following equation could be used to compute the thermal and mechanical parameters of the nanoplate that has been reinforced with GPL [28]:

$$v = v_{GPL}V_{GPL} + v_{matrix}V_{matrix} \quad (12)$$

$$\rho = \rho_{GPL}V_{GPL} + \rho_{matrix}V_{matrix} \quad (13)$$

$$\alpha = \alpha_{GPL}V_{GPL} + \alpha_{matrix}V_{matrix} \quad (14)$$

$$\kappa = \kappa_{GPL}V_{GPL} + \kappa_{matrix}V_{matrix} \quad (15)$$

$$V_{matrix} = 1 - V_{GPL} \quad (16)$$

V_{GPL} and V_{matrix} stand for the volume ratio of the GPLs and $Si_3N_4/Ti-6Al-4V$ core, respectively. While GPLs are evenly distributed in the Type-U arrangement, the Type-X arrangement exhibits a declining GPL weight fraction between the lower and upper surfaces to the center layers. The Type-X design shows a declining GPL ratio from the lower and upper surfaces to the center, whereas GPLs are

evenly distributed in the Type-U distribution pattern. For Type-U model [29]:

$$V_{GPL}^* = \frac{\rho_{matrix} W_{GPL}}{\rho_{matrix} W_{GPL} + \rho_{GPL} (1 - W_{GPL})} \quad (17)$$

where the weight ratio of the GPLs is expressed by W_{GPL} , whereas the density of the GPLs is expressed by ρ_{GPL} . For the Type-X model [30]:

$$V_{GPL}(z) = V_{GPL}^* \left[1 - \cos\left(\frac{z\pi}{h}\right) \right] \quad (18)$$

$$h_1 \leq z \leq h_2$$

The physical characteristics of the double-FG nanoplate are temperature dependent. The mechanical and thermal characteristics can be expressed through a nonlinear temperature equation that incorporates E , ν , κ , and α as follows [31–33]:

$$P = P_0(P_{-1}T^{-1} + 1 + P_1T + P_2T^2 + P_3T^3) \quad (19)$$

where $T = T_0 + \Delta T$ and $T_0 = 300$ K. P_0 , P_{-1} , P_1 , P_2 , and P_3 denote the temperature-dependent material constants. The material constants of Si₃N₄, Ti-6Al-4V, and GPLs in which vary with temperature are listed in Table 1. The temperature is

regarded as exhibiting a nonlinear change. Under certain temperature constraints, Eq. (19) can be computed to find the top and bottom layer temperatures (T_t and T_b) of the plate [34].

$$-\frac{d}{dz} \left[\kappa(z, T) \frac{dT}{dz} \right] = 0, \quad (20)$$

$$T\left(\frac{h}{2}\right) = T_t, \quad T\left(-\frac{h}{2}\right) = T_b$$

3. NUMERICAL RESULTS AND DISCUSSION (SAYISAL SONUÇLAR VE TARTIŞMA)

In this section, the temperature-dependent effective material coefficients of the double-FG nanoplate are analyzed under thermal loads. The fundamental parameters of the nanostructure employed in the calculations are specified as $a = b = 500$ nm, $h = a/10$. Furthermore, the physical parameters of the GPLs are assumed to be $l_{GPL} = 2.5$ nm, $w_{GPL} = 1.5$ nm, and $t_{GPL} = 0.2$ nm. According to the literature, rising nanofiller concentration causes agglomeration, which reduces the mechanical characteristics of nanocomposites [35,36]. For this reason, the plate dimensions of the presented sandwich structure are chosen in such a way that the GPL effect can be clearly observed, and the agglomeration problem can be avoided.

Table 1. Mechanical and thermal constants of Si₃N₄/Ti-6Al-4V and GPL [33,37] (Si₃N₄/Ti-6Al-4V ve GPL'nin mekanik ve termal sabitleri)

Material	Properties	P_{-1}	P_0	P_1	P_2	P_3
Si ₃ N ₄	E (Pa)	0	348.43x10 ⁹	-3.070x10 ⁻⁴	2.160x10 ⁻⁷	-8.946x10 ⁻¹¹
	ν	0	0.24	0	0	0
	α (K ⁻¹)	0	5.8723x10 ⁻⁶	9.095x10 ⁻⁴	0	0
	κ (W/mk)	0	13.723	-1.032x10 ⁻³	5.466x10 ⁻⁷	-7.876x10 ⁻¹¹
	ρ (kg/m ³)	0	2370	0	0	0
Ti-6Al-4V	E (Pa)	0	122.56x10 ⁹	-4.586x10 ⁻⁴	0	0
	ν	0	0.2884	1.121x10 ⁻⁴	0	0
	α (K ⁻¹)	0	7.5788x10 ⁻⁶	6.638x10 ⁻⁴	-3.147x10 ⁻⁶	0
	κ (W/mk)	0	1	1.704x10 ⁻²	0	0
	ρ (kg/m ³)	0	4512	0	0	0
GPLs	E (Pa)	0	1087.8x10 ⁹	-0.261x10 ⁹	0	0
	ν	0	0.186	0	0	0
	α (K ⁻¹)	0	13.92x10 ⁻⁶	-0.029x10 ⁻⁶	0	0
	κ (W/mk)	0	2200	6.739x10 ⁻²	-2.585x10 ⁻⁴	0
	ρ (kg/m ³)	0	1060	0	0	0

3.1. Validation of the Proposed Methodology

(Önerilen Metodolojinin Doğrulanması)

To validate the proposed technique, a comparison is conducted with the current literature. In the first verification analysis, the dimensionless natural frequencies of multilayer functionally graded GPL/polymer plates with various GPL distribution arrangements are examined and compared with the results of Song et al [38]. Epoxy is preferred as the polymer matrix in the study. The dimensions of the plate are taken as $a=0.45$ m, $b=0.45$ m and $h=0.045$ m, and the dimensions of the GPLs are taken as $l_{GPL}=2.5 \mu\text{m}$, $w_{GPL}=1.5 \mu\text{m}$ and $h_{GPL}=1.5 \text{ nm}$. In addition, the mechanical properties of GPL and matrix are considered as $E_{GPL}=1.01$ TPa, $\rho_{GPL}=1.06$ g/cm³, $\nu_{GPL}=0.186$, $E_M=3$ GPa, $\rho_M=1.2$ g/cm³, and $\nu_m=0.34$. The obtained dimensionless natural frequencies are compared with reference work in

Table 2. As shown in the table, there is a high similarity between the natural frequency values. In the second validation study, the free vibration response of graphene platelet reinforced composite plates is investigated for different GPL distributions under the influence of temperature and compared with the results of Quaderi et al. [39]. In the study, GPLs are assumed to be dispersed in the epoxy matrix. Two different GPL patterns are discussed in comparison. In Pattern 1, the GPLs are homogeneously distributed, while in Pattern 2, the GPL weight ratio is higher in the center of the plate and decreases towards the top and bottom surface. The plate dimensions and material properties are the same as in the first validation study. As shown in Table 3, the natural frequency results obtained from the presented study and the reference study are in good agreement with each other.

Table 2. Comparison of dimensionless natural frequency $\bar{w} = w\sqrt{\rho_M/E_M}$ values for different GPL distributions. (Farklı GPL dağılımları için boyutsuz doğal frekans değerlerinin karşılaştırılması)

Mode (m, n)	Pattern 1		Pattern 2		Pattern 3	
	Ref. [38]	Present	Ref. [38]	Present	Ref. [38]	Present
(1,1)	0.1216	0.1288	0.1020	0.1104	0.1378	0.1487
(2,2)	0.4436	0.4578	0.3796	0.3935	0.4939	0.5133
(3,3)	0.8869	0.9123	0.7755	0.7901	0.9690	0.9814

Table 3. Validation of natural frequency values for temperature increase (Sıcaklık artışı için doğal frekans değerlerinin doğrulanması)

a/h	a/b	ΔT	Pattern 1		Pattern 2	
			Ref. [39]	Present	Ref. [39]	Present
10	1	0	1300	1299	1145	1143
		30	1194	1191	1023	1022
		60	1078	1080	885	882
		90	948	946	721	718
5	1	0	2368	2367	3104	3104
		30	2313	2311	3064	3062
		60	2257	2255	3024	3025
		90	2200	2197	2984	2981

Table 4. Comparison of the effective modulus of elasticity and coefficient of thermal conductivity of Si₃N₄ plate (Si₃N₄ plakanın efektif elastisite modülü ve termal iletkenlik katsayısının karşılaştırılması)

ΔT	E (Pa)		κ (W/mK)	
	Ref. [40]	Present	Ref. [40]	Present
300	3.05×10^{11}	3.03×10^{11}	0.82×10^{-5}	0.83×10^{-5}
400	2.97×10^{11}	2.92×10^{11}	0.89×10^{-5}	0.93×10^{-5}
500	2.92×10^{11}	2.90×10^{11}	0.98×10^{-5}	1.01×10^{-5}
600	2.88×10^{11}	2.83×10^{11}	1.09×10^{-5}	1.18×10^{-5}
700	2.83×10^{11}	2.80×10^{11}	1.19×10^{-5}	1.24×10^{-5}
800	2.79×10^{11}	2.75×10^{11}	1.31×10^{-5}	1.35×10^{-5}

In order to ensure the accuracy of the temperature dependent material properties and temperature equations, modulus of elasticity values and thermal expansion coefficients of Si₃N₄ plate are determined in the range of $\Delta T = 300-800$ K and the obtained results are compared with the analytical results of Koç et al. [40]. According to the data obtained from Table 4, it is seen that the results of the two studies are quite convergent.

3.2. Effective Material Properties of the Double-FG Plate (Çift-FD Plakanın Efektif Malzeme Özellikleri)

This chapter determines the temperature-dependent effective material properties of the double-FG nanoplate, utilizing different power law indices p and GPL weight fractions, while comparing two distinct GPL distribution methods (Type-U and Type-X). Analytical investigations are conducted for four specific power law values ($p=0, 1, 2,$ and 5) within the temperature range of 0 K to 1000 K. In addition, the GPL weight ratio gradually increased from 0 to 0.2. The material properties of GPL-reinforced double-FG nanoplate gradually approach from Si₃N₄ to Ti-6Al-4V with rising p .

The variation of the effective modulus of elasticity with respect to temperature rise ΔT , GPL weight fraction W_{GPL} and GPL distribution patterns (Type-U and Type-X) are depicted in Figure 3. The evaluation of Figure 3a and Figure 3c indicate that the modulus of elasticity of the FG plate significantly diminishes with rising temperature in both Type-U and Type-X distribution patterns. Furthermore, as the power law parameter increases, the modulus of elasticity decreases. The drop is attributed to the dominance of the Ti-6Al-4V characteristics of the plate as the power law index increases. The modulus of elasticity value of Si₃N₄ is significantly greater than that of Ti-6Al-4V, as indicated in Table 1. In addition, a comparison of Type-X and Type-U dispersion models with same ΔT and p values reveals that the Type-X dispersion model yields higher modulus of elasticity values. When Figure 3b and Figure 3d are evaluated, modulus of elasticity values of the nanoplate increase significantly with increasing W_{GPL} . From the comparison of Type-X and Type-U concepts for $W_{GPL} = 0.2$, it is apparent that higher E values are obtained in the Type-X.

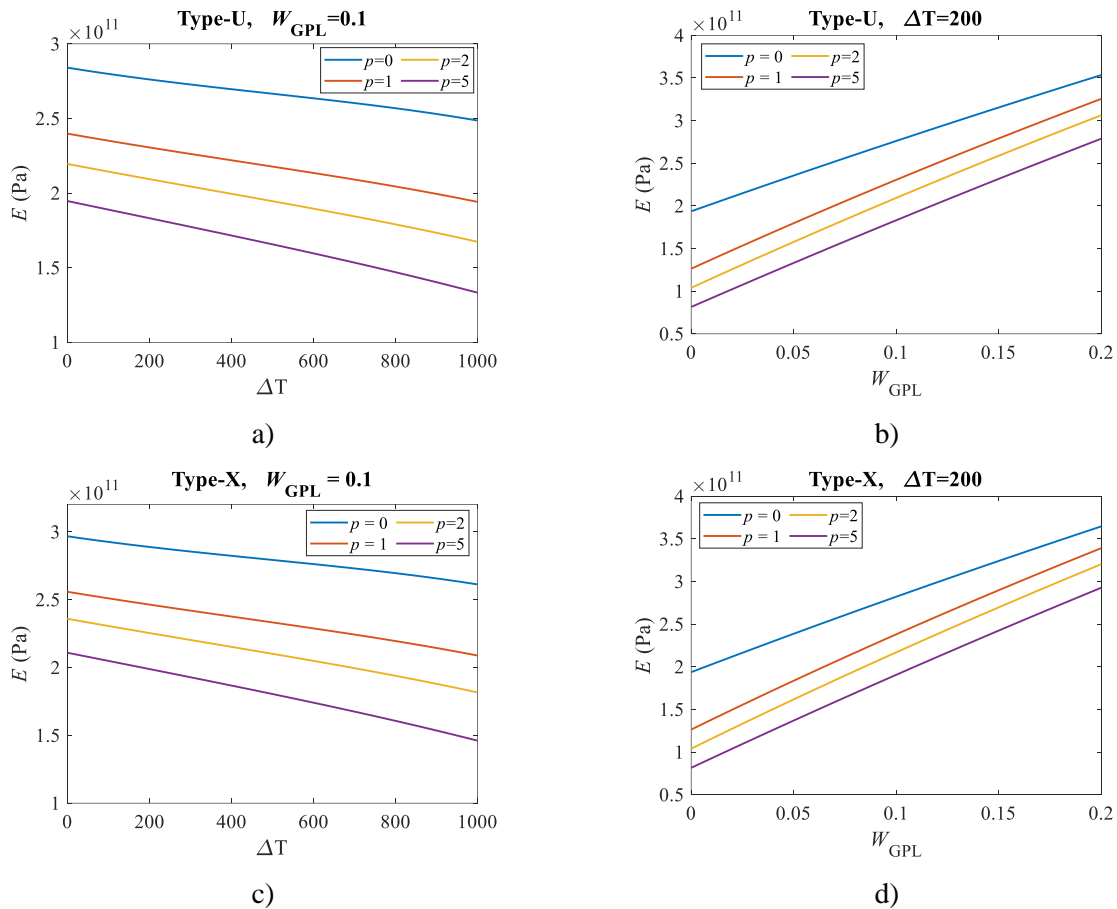


Figure 3. Evaluation of the effective modulus of elasticity depending on ΔT and W_{GPL} for Type-U and Type-X dispersion models (Tip-U ve Tip-X dağılım modelleri için ΔT ve W_{GPL} 'ye bağlı olarak etkin elastisite modülünün değerlendirilmesi)

Figure 4 illustrates the variation of effective Poisson's ratio of the FG nanoplate according to temperature increase ΔT , GPL weight ratio W_{GPL} . As shown in Figure 4a and Figure 4c, the effective Poisson's ratio of the plate increases with increasing temperature for $p=1, 2$ and 5 . For $p=0$, the Poisson's ratio remains constant. This is because at $p=0$ the plate is completely composed of Si_3N_4 . Moreover, when the Type-X and Type-U GPL dispersion models are examined for the same ΔT and p , it is observed that higher Poisson's ratio values are achieved in the Type-U dispersion model. As seen in Figure 4b and Figure 4d, increasing GPL weight ratio has a decreasing effect on Poisson's ratio value. The comparison of Type-X and Type-U distribution patterns for $W_{GPL} = 0.2$ reveals that the Type-U dispersion model provides greater Poisson's ratio values.

expansion constant. In Type-U dispersion scheme, a 221.55% increase in the thermal expansion coefficient is observed for $p=0$, while a 49.42% increase is observed for $p=5$. This difference is due to the variation in the temperature dependent thermal expansion coefficients of Si_3N_4 and Ti-6Al-4V matrices with the applied thermal load. Furthermore, as it is clearly seen from the figures, higher thermal expansion coefficients are achieved in Type-U compared to the Type-X, especially at higher power law index values. Figure 5b and Figure 5d demonstrate that the effective thermal expansion of the plate rises with an increasing GPL weight ratio at $p=0$ and $p=1$ power law parameters, however it remains almost constant at $p=2$ and decreases at $p=5$. The fluctuation is attributable to the GPL thermal expansion coefficient being lower than that of Ti-6Al-4V and higher than that of Si_3N_4 . Furthermore, Figure 5d shows that the GPL distribution pattern has no significant effect on the effective coefficient of thermal expansion except for the case where the plate has an all-ceramic matrix ($p=0$).

Figure 5 evaluates the fluctuation of the efficient thermal expansion parameter of double-FG nanoplate with increasing temperature, power law index and GPL weight ratio. As simulated in Figure 5a and Figure 5c, increasing power law index and temperature have an increasing effect on the thermal

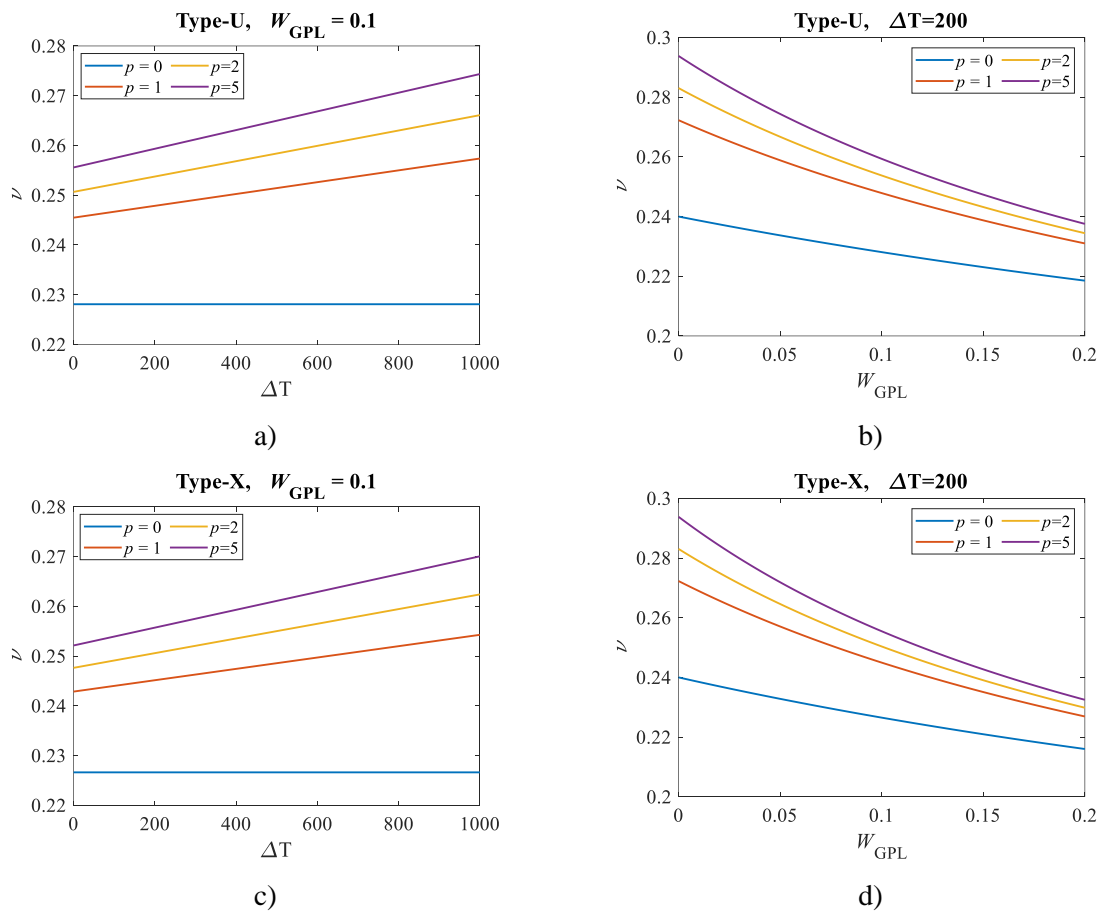


Figure 4. Evaluation of the effective Poisson's ratio depending on ΔT and W_{GPL} for Type-U and Type-X dispersion models (Tip-U ve Tip-X dağılım modelleri için ΔT ve W_{GPL} 'ye bağlı olarak etkin Poisson oranının değerlendirilmesi)

Figure 6 presents the variation of the effective thermal conductivity coefficient of the proposed double-FG nanoplate with respect to parameters ΔT , p and W_{GPL} . As presented in Figure 6a and Figure 6c, the effective thermal conductivity coefficient of the plate decreases with increasing temperature. Considering the plate components Si_3N_4 , Ti-6Al-4V and GPL separately and analyzing the thermal conductivity coefficients from Table 1 and Eq. (19), it is seen that the thermal conductivity coefficients of Si_3N_4 and GPL tend to decrease while the thermal conductivity coefficient of Ti-6Al-4V tends to increase. However, due to the superior thermal conductivity properties of GPL compared to other components, it is clearly seen that the FG plate shows a similar trend to the GPL behavior for thermal conductivity. Moreover, as depicted, the thermal conductivity coefficient of the double-FG nanostructure rises with increasing power law index. As given in Table 1, the initial Si_3N_4 thermal conductivity coefficient is higher than that of Ti-6Al-4V. However, despite this, lower values are obtained at $p=0$ than at $p=5$ because the density of Ti-6Al-4V is almost twice that of the ceramic matrix, which results in a higher V_{GPL} value. As

illustrated in Figure 6b and Figure 6d, the effective thermal conductivity coefficient of the FG plate increases significantly with increasing W_{GPL} . When $W_{GPL} = 0$ and $W_{GPL} = 0.2$ values are compared at power law parameter $p=5$, it is found that the thermal conductivity value of the plate increases from approximately 6.78 W/mK to 1079.8 W/mK. It is also found from the figures that with increasing temperature, the thermal conductivity coefficient decreases more in the Type-X than in the Type-U due to the percentage of GPL on the upper and lower surfaces of the plate, and similarly, with increasing W_{GPL} , the thermal conductivity coefficient increases more in the Type-X model.

To make the findings more versatile for different applications, the effect of high temperature and GPL ratio on the effective modulus of elasticity is presented in Figure 7. As shown in the figure, while there is a linear decrease until approximately $\Delta T = 1000$ K, it shows nonlinear behavior after this value. Also, for lower values of W_{GPL} , the difference between $p=0$ and $p=5$ curves are quite large, while for high values of W_{GPL} this difference decreases significantly.

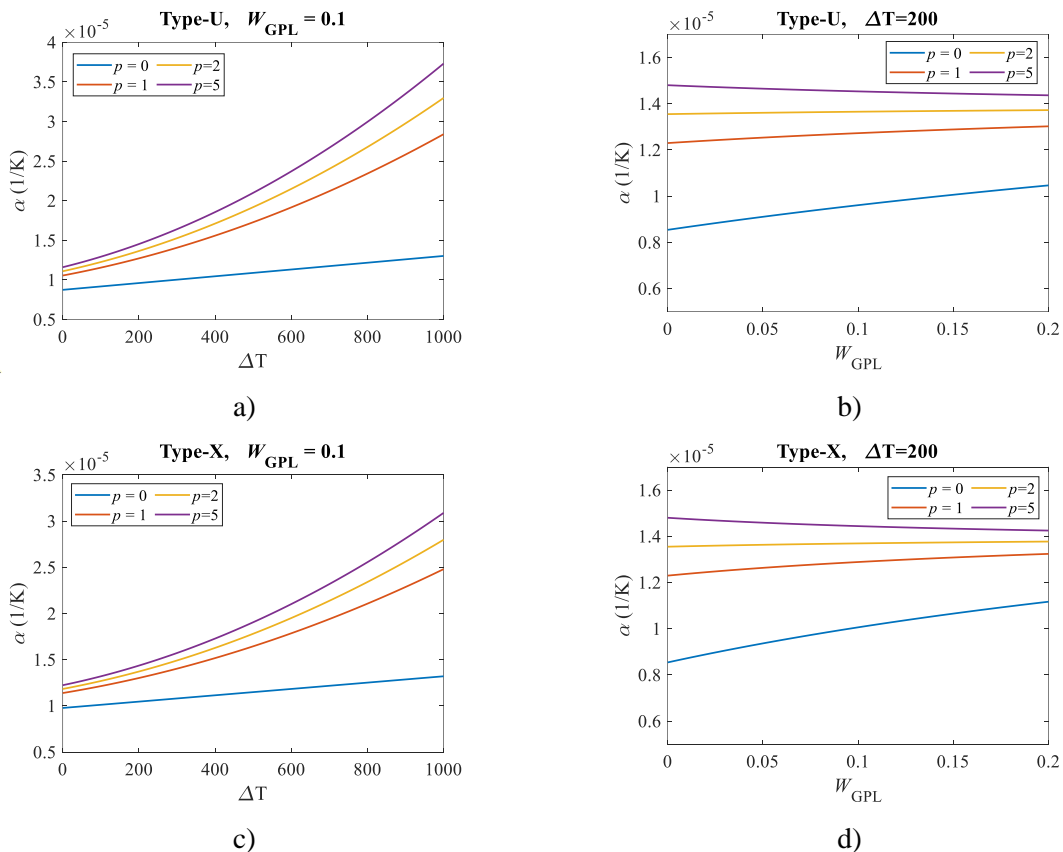


Figure 5. Evaluation of the thermal expansion coefficient depending on ΔT and W_{GPL} for Type-U and Type-X dispersion models (Tip-U ve Tip-X dağılım modelleri için termal genleşme katsayısının değerlendirilmesi)

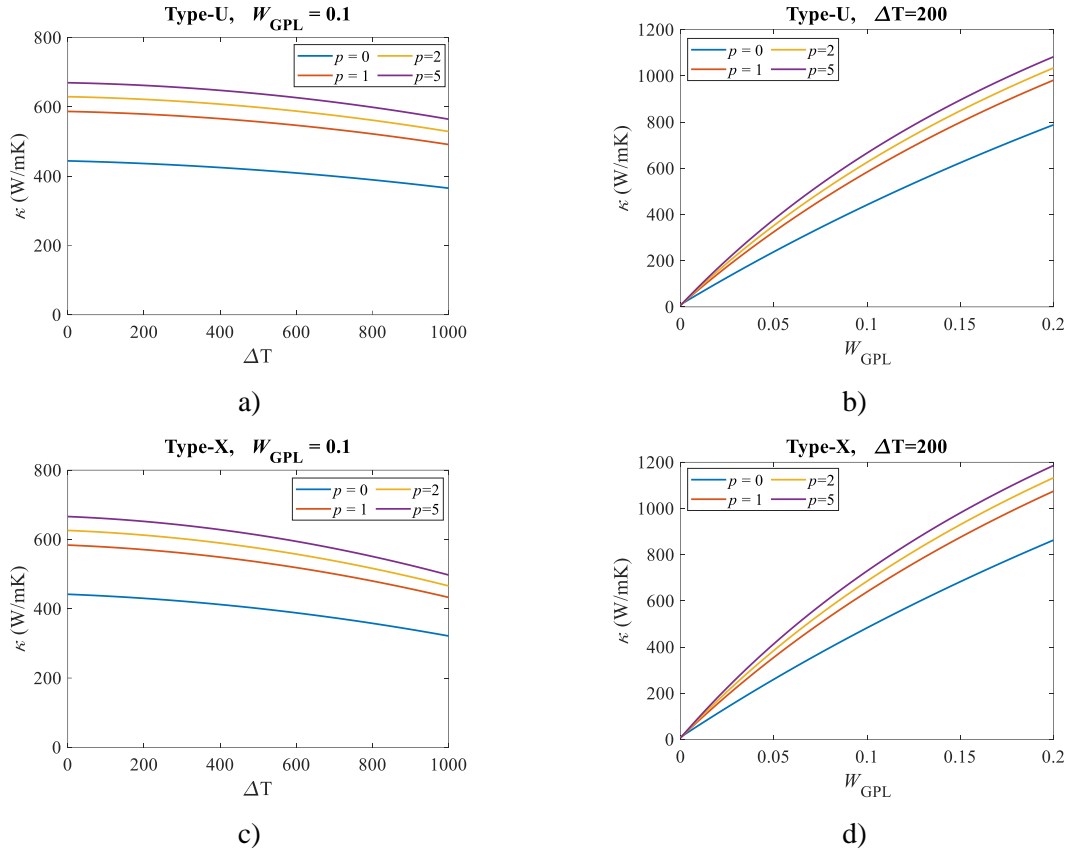


Figure 6. Evaluation of the thermal conductivity coefficient depending on ΔT and W_{GPL} for Type-U and Type-X dispersion models (Tip-U ve Tip-X dağılım modelleri için termal iletkenlik katsayısının değerlendirilmesi)

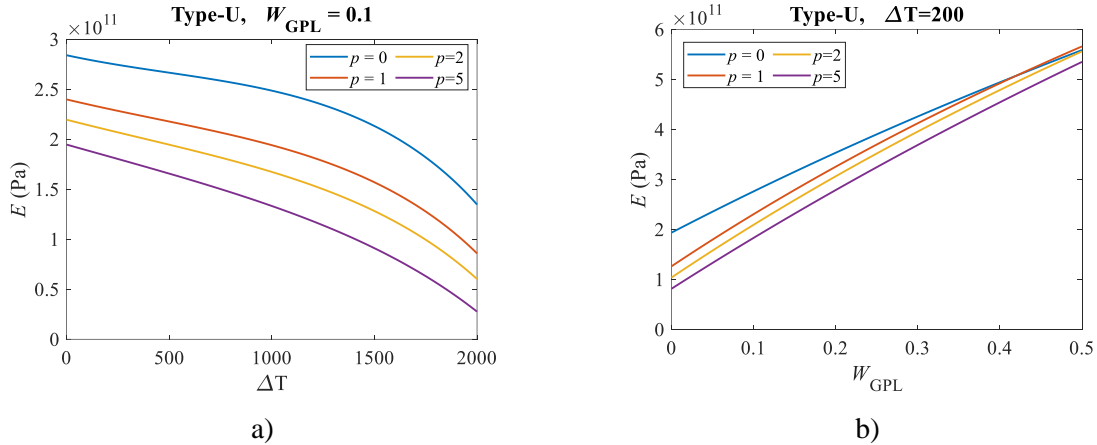


Figure 7. Variation of effective modulus of elasticity for extreme ΔT and W_{GPL} (ΔT ve W_{GPL} nin ekstrem değerleri için efektif elastisite modülünün değişimi)

A sensitivity analysis is carried out to examine how small changes in the ΔT , p and W_{GPL} parameters would impact the results. In the analysis, each parameter is increased by 10 % of the initial value for each step, finally reaching 50% above the initial value. As shown in Table 5, sensitivity analysis is carried out for E for mechanical properties and α for thermal properties. When the changes of the

modulus of elasticity obtained for small changes in all three parameters are analyzed, it is seen that in the specified range, the lowest effect is ΔT with 0.1 %, while the highest effect is W_{GPL} with 20.47 %. Similarly, when the coefficient of thermal expansion is analyzed, the lowest effect is at ΔT with 0.44 %, while the highest effect is at W_{GPL} with 4.13 %

Table 5. Sensitivity analysis for small variations in fundamental parameters (Temel parametrelerdeki küçük değişimler için duyarlılık analizi)

Parameters						
	$\Delta T=10$	$\Delta T=11$	$\Delta T=12$	$\Delta T=13$	$\Delta T=14$	$\Delta T=15$
E (GPa)	239.362	239.313	239.265	239.217	239.168	239.120
	$W_{GPL}=0.1$	$W_{GPL}=0.11$	$W_{GPL}=0.12$	$W_{GPL}=0.13$	$W_{GPL}=0.14$	$W_{GPL}=0.15$
E (GPa)	239.362	249.364	259.264	269.064	278.765	288.369
	$p=1$	$p=1.1$	$p=1.2$	$p=1.3$	$p=1.4$	$p=1.5$
E (GPa)	239.362	236.685	234.190	231.859	229.675	227.627
	$\Delta T=10$	$\Delta T=11$	$\Delta T=12$	$\Delta T=13$	$\Delta T=14$	$\Delta T=15$
α (K ⁻¹)(10 ⁻⁶)	10.654	10.664	10.673	10.682	10.691	10.701
	$W_{GPL}=0.1$	$W_{GPL}=0.11$	$W_{GPL}=0.12$	$W_{GPL}=0.13$	$W_{GPL}=0.14$	$W_{GPL}=0.15$
α (K ⁻¹)(10 ⁻⁶)	10.654	10.749	10.840	10.927	11.012	11.094
	$p=1$	$p=1.1$	$p=1.2$	$p=1.3$	$p=1.4$	$p=1.5$
α (K ⁻¹)(10 ⁻⁶)	10.654	10.735	10.808	10.874	10.934	10.990

4.CONCLUSIONS (SONUÇLAR)

In this research, the variation of effective mechanical and thermal material characteristics of double-FG GPLs-reinforced nanoplates with respect to temperature rise, GPL weight ratio and GPL dispersion patterns has been evaluated. According to the detailed parametric analysis, some important findings have been obtained. When the effects of temperature increase, GPLs weight ratio and GPLs dispersion patterns on the effective modulus of elasticity are examined, it is found that both temperature increase and increasing power law parameter significantly decrease the effective modulus of elasticity values. Additionally, it is discovered that the Young’s modulus rise noticeably with rising GPL fraction and higher E values are obtained in the Type-X dispersion model. Examining the effective Poisson's ratio variation curves, it is concluded that the Poisson's ratio increases significantly with increasing temperature and power law parameter and decreases as GPL fraction rises. In addition, the Type-U dispersion model provides higher Poisson's ratio. The coefficient of thermal expansion of the proposed double-FG plate increases with ΔT and p in both Type-U and Type-X dispersion models. The effect of increasing GPL weight ratio on the thermal expansion coefficient tends to increase or decrease according to the power law index. Moreover, higher values of the thermal expansion coefficient are observed in the Type-U dispersion model. In the

variation of the thermal conductivity coefficient, it is observed that the FG-plate shows more complex behavior. It is determined that the thermal conductivity coefficient of Si₃N₄, Ti-6Al-4V and GPL show different trends with increasing temperature, but the effective thermal conductivity coefficient of the plate tends to decrease due to the dominant thermal conductivity coefficient of GPL. Moreover, increasing power law index and GPL weight ratio increases the effective thermal conductivity coefficient of the plate. In addition, according to the sensitivity analysis performed with small changes in the determined parameters, W_{GPL} has the highest effect on the change in the modulus of elasticity, while ΔT has the least effect. Similarly, in the analysis for the coefficient of thermal expansion, it was determined that W_{GPL} has the highest effect and ΔT has the least effect. With this research, important results have been obtained on the determination of thermal and mechanical properties of double-FG GPL-reinforced nanoplates. These results are expected to contribute to the gap in the literature.

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)

Kerim Gökhan AKTAŞ: He constructed the mathematical model and the necessary codes for the analysis, performed the simulations, analyzed the results and wrote the manuscript.

Matematiksel modeli ve analiz için gerekli kodları oluşturmuş, simülasyonları 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] Saidi, H., Bouchafa, A., Tounsi, A., and Adda.Bedia, A. E.A., "Analysis of non-symmetric FG sandwich plates under Thermo-mechanical loading using a novel shear deformation theory with stretching effect," MATEC Web Conf., vol. 241, p. 1018, 2018.
- [2] D. İpci and B. Yıldırım, "Free Vibration Analysis of a Functionally Graded Micro-Beam with Tapered Cross Section," Gazi Üniversitesi Fen Bilim. Derg. Part C Tasarım ve Teknol., vol. 9, no. 2, pp. 272–282, 2021.
- [3] M. Arefi, "Buckling analysis of the functionally graded sandwich rectangular plates integrated with piezoelectric layers under bi-axial loads," J. Sandw. Struct. & Mater., vol. 19, no. 6, pp. 712–735, 2017.
- [4] R. Moradi-Dastjerdi and H. Malek-Mohammadi, "Biaxial buckling analysis of functionally graded nanocomposite sandwich plates reinforced by aggregated carbon nanotube using improved high-order theory," J. Sandw. Struct. & Mater., vol. 19, no. 6, pp. 736–769, 2017.
- [5] M. K. Apalak and M. D. Demirbas, "Thermal stress analysis of in-plane two-directional functionally graded plates subjected to in-plane edge heat fluxes," Proc. Inst. Mech. Eng. Part L J. Mater. Des. Appl., vol. 232, no. 8, pp. 693–716, 2018.
- [6] C. T. Binh, T. H. Quoc, D. T. Huan, and H. T. Hien, "Vibration characteristics of rotating functionally graded porous beams reinforced by graphene platelets," J. Sci. Technol. Civ. Eng. - HUCE, vol. 15, no. 4, pp. 29–41, 2021.
- [7] J. Yang, H. Wu, and S. Kitipornchai, "Buckling and postbuckling of functionally graded multilayer graphene platelet-reinforced composite beams," Compos. Struct., vol. 161, pp. 111–118, 2017.
- [8] D. Chen, J. Yang, and S. Kitipornchai, "Nonlinear vibration and postbuckling of functionally graded graphene reinforced porous nanocomposite beams," Compos. Sci. Technol., vol. 142, pp. 235–245, 2017.
- [9] S. Başkut and S. Turan, "Improving the Mechanical Properties of GPLs-SiAlON Composites by Microfluidization Technique as a New Approach to Dispersion of GPLs," Gazi Üniversitesi Fen Bilim. Derg. Part C Tasarım ve Teknol., vol. 10, no. 3, pp. 455–467, 2022.
- [10] V. Kumar Dwivedi and D. Kumar, "Graphene as a stimulus for mechanical strength in glass-fiber reinforced polymers composite," World J. Eng., vol. 20, no. 1, pp. 143–149, 2023.
- [11] Z. Li et al., "Uniform dispersion of graphene oxide in aluminum powder by direct electrostatic adsorption for fabrication of graphene/aluminum composites," Nanotechnology, vol. 25, no. 32, 2014.
- [12] G. V Seretis, G. Kouzilos, A. K. Polyzou, D. E. Manolakos, and C. G. Provatidis, "Effect of Graphene Nanoplatelets Fillers on Mechanical Properties and Microstructure of Cast Aluminum Matrix Composites," Nano Hybrids Compos., vol. 15, pp. 26–35, 2017.
- [13] K. Chu and C. Jia, "Enhanced strength in bulk graphene-copper composites," Phys. status solidi, vol. 211, no. 1, pp. 184–190, 2014.
- [14] K. G. Aktaş, "3D wave dispersion analysis of graphene platelet-reinforced ultra-stiff double functionally graded nanocomposite sandwich plates with metamaterial honeycomb core layer," Mech. Time-Dependent Mater., vol. 28, no. 3, pp. 1873–1908, 2024.
- [15] Z. Wu, A. E. Wilson-Heid, R. J. Griffiths, and E. S. Elton, "A review on experimentally observed mechanical and microstructural characteristics of interfaces in multi-material laser powder bed fusion," Front. Mech. Eng., vol. 9, no. July, pp. 1–20, 2023.
- [16] M. Estili and Y. Sakka, "Dispersion and reinforcing mechanism of carbon nanotubes in a ceramic material," Funtai Oyobi Fummatu Yakın/Journal Japan Soc. Powder Powder Metall., vol. 63, no. 11, pp. 955–964, 2016.
- [17] M. Nouraei, V. Zamani, and Ö. Civalek, "Vibration of smart sandwich plate with an auxetic core and dual-FG nanocomposite layers integrated with piezoceramic actuators," Compos. Struct., vol. 315, p. 117014, 2023.

- [18] H.-S. Shen, “Nonlinear bending of functionally graded carbon nanotube-reinforced composite plates in thermal environments,” *Compos. Struct.*, vol. 91, no. 1, pp. 9–19, 2009.
- [19] S. Kamarian, M. Bodaghi, R. B. Isfahani, and J. Song, “Thermal buckling analysis of sandwich plates with soft core and CNT-Reinforced composite face sheets,” *J. Sandw. Struct. & Mater.*, vol. 23, no. 8, pp. 3606–3644, 2021.
- [20] P. Chen et al., “Preliminary analysis of a fully ceramic microencapsulated fuel thermal-mechanical performance,” *Mathematics*, vol. 7, no. 5, p. 448, 2019, doi: 10.3390/math7050448.
- [21] H. Le Ferrand, “Modeling the effect of microstructure on elastic wave propagation in platelet-reinforced composites and ceramics,” *Compos. Struct.*, vol. 224, p. 111105, 2019.
- [22] W. Xiong, B. Blackman, J. P. Dear, and X. Wang, “The effect of composite orientation on the mechanical properties of hybrid joints strengthened by surfi-sculpt,” *Compos. Struct.*, vol. 134, pp. 587–592, 2015.
- [23] C. García-Hernández et al., “Trochoidal milling path with variable feed. Application to the machining of a ti-6al-4v part,” *Mathematics*, vol. 9, no. 21, p. 2701, 2021.
- [24] S. R. Bakshi, V. Musaramthota, D. Lahiri, V. Singh, S. Seal, and A. Agarwal, “Spark plasma sintered tantalum carbide: Effect of pressure and nano-boron carbide addition on microstructure and mechanical properties,” *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 528, no. 3, pp. 1287–1295, 2011.
- [25] O. A. Ogunmefun et al., “Densification, microstructure, and nanomechanical evaluation of pulsed electric sintered zirconia-silicon nitride reinforced Ti-6Al-4 V alloy,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 130, no. 7, pp. 3649–3660, 2024.
- [26] W. Zhao, J. Cui, and P. Rao, “Effect of molten zone ablated by femtosecond lasers on fracture toughness of Si₃N₄ measured by SEVNB method,” *J. Eur. Ceram. Soc.*, vol. 38, no. 4, pp. 2243–2246, 2018.
- [27] H. T. Thai and D. H. Choi, “A simple first-order shear deformation theory for the bending and free vibration analysis of functionally graded plates,” *Compos. Struct.*, vol. 101, pp. 332–340, 2013.
- [28] H.-Q. Tran, V.-T. Vu, and M.-T. Tran, “Free vibration analysis of piezoelectric functionally graded porous plates with graphene platelets reinforcement by pb-2 Ritz method,” *Compos. Struct.*, vol. 305, p. 116535, 2023.
- [29] M. Sobhy, M. A. Abazid, and F. H. H. Al Mukahal, “Electro-thermal buckling of FG graphene platelets-strengthened piezoelectric beams under humid conditions,” *Adv. Mech. Eng.*, vol. 14, no. 4, pp. 1–12, 2022.
- [30] M. Sobhy and F. Alsaleh, “Nonlinear bending of FG metal/graphene sandwich microplates with metal foam core resting on nonlinear elastic foundations via a new plate theory,” *Mech. Based Des. Struct. Mach.*, vol. 52, no. 7, pp. 3842–3869, 2024.
- [31] Y. S. Touloukian, *Thermophysical properties of high temperature solid materials*. New York: Macmillan, 1967.
- [32] Touloukian YS, (1966) *Thermophysical properties of high temperature solid materials*. Volume 4. Oxides and their solutions and mixtures. Part 1, vol 1. New York: Macmillan, 1966.
- [33] J. N. Reddy and C. D. Chin, “Thermomechanical analysis of functionally graded cylinders and plates,” *J. Therm. Stress.*, vol. 21, no. 6, pp. 593–626, 1998.
- [34] D. G. Zhang, “Thermal post-buckling and nonlinear vibration analysis of FGM beams based on physical neutral surface and high order shear deformation theory,” *Meccanica*, vol. 49, no. 2, pp. 283–293, 2014.
- [35] L.-C. Tang et al., “The effect of graphene dispersion on the mechanical properties of graphene/epoxy composites,” *Carbon N. Y.*, vol. 60, pp. 16–27, 2013.
- [36] F. Hua, W. Fu, Q. You, Q. Huang, F. Abad, and X. Zhou, “A refined spectral element model for wave propagation in multiscale hybrid epoxy/carbon fiber/graphene platelet composite shells,” *Aerosp. Sci. Technol.*, vol. 138, p. 108321, 2023.
- [37] Y. W. Zhang, G. L. She, and M. A. Eltaher, “Nonlinear transient response of graphene platelets reinforced metal foams annular plate considering rotating motion and initial geometric imperfection,” *Aerosp. Sci. Technol.*, vol. 142, no. PB, p. 108693, 2023.
- [38] M. Song, S. Kitipornchai, and J. Yang, “Free and forced vibrations of functionally graded polymer composite plates reinforced with graphene nanoplatelets,” *Compos. Struct.*, vol. 159, pp. 579–588, 2017.
- [39] S. Qaderi, F. Ebrahimi, and V. Mahesh, “Free Vibration Analysis of Graphene Platelets-Reinforced Composites Plates in Thermal Environment Based on Higher-Order Shear Deformation Plate Theory,” *Int. J. Aeronaut. Sp. Sci.*, vol. 20, no. 4, pp. 902–912, 2019.
- [40] M. A. Koç, İ. Esen, and M. Eroğlu, “Thermomechanical vibration response of nanoplates with magneto-electro-elastic face

layers and functionally graded porous core using nonlocal strain gradient elasticity,” *Mech. Adv. Mater. Struct.*, vol. 31, no. 18, pp. 4477–4509, 2024.

3D Printing Applications in the Biomedical Industry

Mustafa GÜNEŞ^{1*}  · Metin ZEYVELİ² 

¹OSTİM Technical University, Vocational School, Department of Electronics and Automation, Ankara, Turkey

²Karabük University, Faculty of Engineering, Department of Mechatronics Engineering, Karabük, Turkey

Article Info

Review article
Received: 16/12/2024
Revision: 30/01/2025
Accepted: 05/02/2025

Keywords

3D Printing
Biomedical Applications
Rapid Production
Bio Materials
Bio-Inks

Makale Bilgisi

Derleme makale
Başvuru: 16/12/2024
Düzeltilme: 30/01/2025
Kabul: 05/02/2025

Anahtar Kelimeler

3B Baskı
Biyomedikal Uygulamalar
Hızlı Üretim
Biyomalzemeler
Biyomürekkepler

Graphical/Tabular Abstract (Grafik/Tablolu Özet)

Table: Summary of 3D Printing Applications in the Biomedical Industry / **Tablo:** Biyomedikal Endüstride 3B Baskı Uygulamalarının Özeti.

Aspect (Kapsam)	Details (Detaylar)
Methods (Yöntemler)	SLA, SLS, FDM, DIW, SLM.
Materials (Malzemeler)	Polymers, Hydrogels, Metal Alloys, Bio-Inks. / Polimerler, Hidrojeller, Metal Alaşımalar, Biyomürekkepler.
Applications (Uygulamalar)	Prosthetics, Implants, Tissue Engineering, Drug Delivery, Surgery. / Protezler, İmplantlar, Doku Mühendisliği, İlaç Taşıma, Cerrahi.
Advantages (Avantajlar)	Customization, Fast Prototyping, Cost-Effective, Less Waste. / Kişiselleştirme, Hızlı Prototipleme, Maliyet Etkinliği, Daha Az Atık.
Challenges (Zorluklar)	Limited Materials, Biocompatibility, Regulations, High Cost. / Sınırlı Malzeme, Biyouyumluluk, Mevzuat, Yüksek Maliyet.
Future Prospects (Gelecek Öngörülere)	AI Integration, Advanced Biomaterials, Standardized Regulations, Enhanced. / Yapay Zeka Entegrasyonu, Gelişmiş Biyomalzemeler, Standartlaştırılmış Düzenlemeler.

Highlights (Önemli noktalar)

- 3D printing enables the production of personalized biomedical devices such as prosthetics, implants, and tissues. / 3B baskı, protezler, implantlar ve dokular gibi kişiselleştirilmiş biyomedikal cihazların üretimini sağlamaktadır.
- Key 3D printing methods are evaluated in terms of advantages and limitations. / Temel 3B baskı yöntemlerinin avantajları ve sınırlamaları açısından değerlendirilmiştir.
- Material selection, regulatory challenges, and advancements in AI and biomaterials will enhance 3D printing applications in healthcare. / Malzeme seçimi, düzenleyici engeller ve yapay zeka ile biyomalzeme alanındaki gelişmeler, 3B baskının sağlık sektöründeki uygulamalarını ileriye taşıyacaktır.

Aim (Amaç): This study aims to evaluate the role of 3D printing in biomedical applications, focusing on key printing methods, material selection, and regulatory challenges while highlighting future prospects for healthcare advancements. /Bu çalışma, 3B baskının biyomedikal uygulamalardaki rolünü değerlendirerek temel baskı yöntemlerine, malzeme seçimine ve düzenleyici engellere odaklanmakta ve sağlık sektöründeki gelecekteki gelişmelere ışık tutmayı amaçlamaktadır.

Originality (Özgünlük): This study provides a comprehensive evaluation of 3D printing technologies in biomedical applications by analyzing key printing methods, material selection, and regulatory challenges, offering a unique perspective on future advancements in the healthcare sector. / Bu çalışma, 3B baskı teknolojilerinin biyomedikal uygulamalardaki rolünü kapsamlı bir şekilde değerlendirerek temel baskı yöntemleri, malzeme seçimi ve düzenleyici engelleri analiz etmekte ve sağlık sektöründeki gelecekteki gelişmelere dair özgün bir bakış açısı sunmaktadır.

Results (Bulgular): The study highlights 3D printing's transformative role in biomedical applications by enabling personalized medical solutions, improving efficiency, and expanding material options. However, challenges in biocompatibility, regulations, and scalability must be addressed for broader clinical use. / Çalışma, 3B baskının biyomedikal uygulamalarda kişiselleştirilmiş tıbbi çözümler sunarak verimliliği artırdığını ve malzeme seçeneklerini genişlettiğini vurgulamaktadır. Ancak, biyouyumluluk, mevzuat ve ölçeklenebilirlik sorunlarının daha geniş klinik kullanım için çözülmesi gerekmektedir.

Conclusion (Sonuç): 3D printing is a breakthrough technology in biomedical applications, enabling personalized medicine, tissue engineering, and medical device production. However, challenges in material selection, regulations, and scalability persist. Addressing these issues through technological advancements and standardized regulations will enhance its impact in healthcare and enable broader clinical use. / 3B baskı, kişiselleştirilmiş tıp, doku mühendisliği ve tıbbi cihaz üretiminde çığır açan bir teknolojidir. Ancak, malzeme seçimi, mevzuat ve ölçeklenebilirlik sorunları devam etmektedir. Bu sorunların teknolojik ilerlemeler ve standartlaştırılmış düzenlemelerle ele alınması, 3B baskının sağlık sektöründeki etkisini artıracak ve daha geniş klinik kullanımı mümkün kılacaktır.



3D Printing Applications in the Biomedical Industry

Mustafa GÜNEŞ^{1*} · Metin ZEYVELİ²

¹OSTIM Technical University, Vocational School, Department of Electronics and Automation, Ankara, Turkey

²Karabük University, Faculty of Engineering, Department of Mechatronics Engineering, Karabük, Turkey

Article Info

Review article
Received: 16/12/2024
Revision: 30/01/2025
Accepted: 05/02/2025

Keywords

3D Printing
Biomedical Applications
Rapid Production
Bio Materials
Bio-Inks

Abstract

Technological developments have triggered a transformation in industry, giving rise to the concept of the Fourth Industrial Revolution (Industry 4.0). This transformation has brought concepts such as rapid production, innovation, sustainability, digitalisation, personalisation and smart manufacturing to the forefront of many sectors around the world. 3D printing technologies are now a staple in various industries, including biomedical, due to their unparalleled personalised design options, production flexibility and faster product commercialisation using a wide range of materials. This technology has clearly surpassed traditional methods in biomedical applications. It has made it possible to produce complex objects such as implants, prostheses, tissues and organs that are difficult or impossible to produce traditionally. In addition, it has become possible to produce precise microstructures in this field in a cost-effective and personalised manner. This study presents research into 3D printing technologies that are expected to be indispensable in the future for tissue regeneration, therapeutic applications, medical device manufacturing and surgical planning in both research and clinical settings. The focus is on materials that have been and are being developed for biomedical applications, highlighting 3D printing processes that address challenging and limiting conditions and the improvements needed to address these conditions.

Biyomedikal Endüstride 3 Boyutlu Baskı Uygulamaları

Makale Bilgisi

Derleme makale
Başvuru: 16/12/2024
Düzeltilme: 30/01/2025
Kabul: 05/02/2025

Anahtar Kelimeler

3B Baskı
Biyomedikal Uygulamalar
Hızlı Üretim
Biyomalzemeler
Biyomürekkepler

Öz

Teknolojik gelişmeler, sanayide dönüşümü tetikleyerek Dördüncü Sanayi Devrimi (Endüstri 4.0) kavramını ortaya çıkarmıştır. Bu dönüşüm, hızlı üretim, inovasyon, sürdürülebilirlik, dijitalleşme, kişiselleştirme ve akıllı üretim gibi kavramları birçok sektörde ön plana çıkarmıştır. 3B baskı teknolojileri, kişiye özel tasarım olanakları, üretim esnekliği ve geniş malzeme yelpazesine daha hızlı ürün ticarileştirme imkânı sunarak biyomedikal sektör de dahil olmak üzere çeşitli endüstrilerde vazgeçilmez hale gelmiştir. Bu teknoloji, biyomedikal uygulamalarda geleneksel yöntemleri geride bırakarak, implantlar, protezler, dokular ve organlar gibi karmaşık nesnelerin üretimini mümkün kılmıştır. Geleneksel yöntemlerle üretilmesi zor veya imkânsız olan bu yapılar, 3B baskı sayesinde daha hassas, maliyet-etkin ve kişiye özel olarak üretilebilmektedir. Ayrıca, bu teknoloji sayesinde biyomedikal alanda hassas mikro yapılar da ekonomik ve özelleştirilmiş bir şekilde üretilebilmektedir. Bu çalışma, doku rejenerasyonu, terapötik uygulamalar, tıbbi cihaz üretimi ve cerrahi planlama gibi alanlarda hem araştırma hem de klinik uygulamalarda gelecekte vazgeçilmez olması beklenen 3B baskı teknolojilerine yönelik araştırmaları sunmaktadır. Çalışmada, biyomedikal uygulamalar için geliştirilen ve geliştirilmekte olan malzemeler ele alınarak, 3B baskı süreçlerinin mevcut zorlukları nasıl ele aldığı ve bu zorlukların aşılması için gerekli iyileştirmeler vurgulanmaktadır.

1. INTRODUCTION (GİRİŞ)

3D printers, widely regarded as a leading technology in recent years, have had a significant impact on manufacturing processes by quickly converting digital designs created with computer-aided design (CAD) software into tangible products. This capability has been established as an essential

component of modern production [1]. Furthermore, as market-driven products prioritize design, prototyping, and manufacturing, industries have paid close attention to this trend. As a result, sectors have actively adopted and integrated this technology [2-3]. In addition to their manufacturing capabilities, 3D printing technologies offer substantial economic and environmental benefits.

Traditional production methods, which often result in significant material waste owing to subtractive processes, are contrasted with 3D printing, which employs additive techniques that utilize only the necessary material, thus significantly reducing waste.

In addition, many materials used in 3D printing, such as polylactic acid (PLA), are recyclable or biodegradable, aligning them with sustainable production goals. These attributes not only reduce production costs but also mitigate environmental impacts, making 3D printing an attractive choice for industries that prioritize sustainability. By promoting resource-efficient manufacturing, this technology facilitates the transition to a circular economy, while fostering innovation in material science. These features underscore the potential of 3D printing to simultaneously drive economic growth and environmental responsibility across a range of applications [4-5].

As manufacturing technologies continue to evolve, many share core principles with 3D printing. However, 3D printing is notable because of its extensive material compatibility, reduced waste generation, and cost-effectiveness. Fundamentally, 3D printing is a process that constructs three-dimensional objects by depositing materials layer-by-layer. Thermoplastic polymers, which are typically amorphous in nature, are commonly used for this purpose. These polymers have a specific melting point, softening as the temperature increases and viscosity decreases. When subjected to pressure during extrusion, they are deposited in layers and quickly solidify, retaining their properties. As the model or prototype walls are aligned side by side or as layers are stacked upon one another, strong adhesion and effective bonding are achieved (Figure 1.) [6-7].

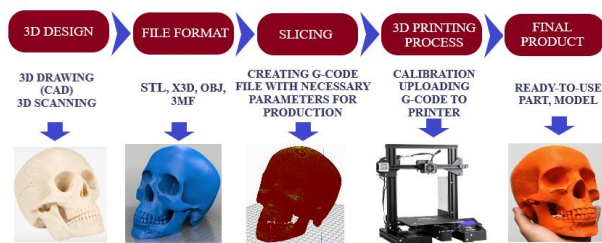


Figure 1. Schematic representation of the 3D printing process (3B baskı sürecinin şematik gösterimi)

This meticulous layering technique enables a high-resolution production and facilitates the creation of intricate geometries. Advancements in material science have continued to expand the functionality and mechanical performance of printed structures. Such progress in 3D printing has enhanced

manufacturing efficiency while significantly reducing material waste.

The continuous expansion of the material diversity in 3D printing technology has enabled a broad range of applications. Various materials, including starch, protein- and fiber-rich foods [8], reduced graphene oxide (GO) [9], graphene-based polybutylene terephthalate (PBT) [10], mixtures with iron oxide powders [11], plasticized starch [12], and mashed potatoes [13], among other solid, liquid, and gaseous substances, can be used in 3D printing. This variety of materials has amplified the importance of 3D printing, which has found applications in sectors such as textiles [14], aerospace [15], automotive [16], medicine [17-18], construction [19], and pharmaceuticals [20].

Owing to its wide applicability, 3D printing has significantly facilitated the production of artificial organs, implants, drugs, bones, and prosthetics, and has also become increasingly widespread in the biomedical field. Traditional manufacturing methods involve many restrictive and costly steps, such as molding for shaping and various machines (e.g., CNC and lathe) for extrusion processes, which are generally not suitable for the complex geometries required in biomedical applications [21]. By contrast, 3D printing offers a highly cost-effective solution for producing geometrically complex objects that are difficult to produce using traditional methods [22-23]. Consequently, this transformative technology is being increasingly adopted in the healthcare, medical, and biomedical sectors [24-27].

3D printers have gained importance, particularly in therapeutic applications [28], surgical planning [29], implant design [30], and tissue engineering. A unique and rapidly advancing application of 3D printing is bioprinting, which allows layer-by-layer deposition of living cells. Method has attracted considerable attention [31]. This method has enabled the production of in vitro models for drug testing and disease research, and the bioproduction of implantable tissues such as skin [32], cartilage [33] and bone [34]. In this study, 3D printing technologies commonly used in the biomedical field were investigated, and the biomaterials commonly used in these applications were examined to create a general perspective in this field. For this purpose, databases such as Elsevier, Springer, Wiley, Elsevier Specialized Journals, Materials Today, Taylor & Francis, SAGE, MDPI, Nature Publishing Group, ASME, and IEEE have been used, and studies on biomaterials and bioprinting applications have been conducted.

2. 3D PRINTING METHODS IN BIOMEDICAL APPLICATIONS (BİYOMEDİKAL UYGULAMALARDA 3B BASKI YÖNTEMLERİ)

Owing to technological advancements in the field of 3D printing, significant progress has been made in the biomedical sector, and 3D printing technology is now considered as an alternative to current clinical treatments. These advancements have made it possible to produce a wide range of products, from life-saving implants and soft tissues to hard prostheses, as well as artificial organs made using living human cells, all tailored to the individual. Furthermore, this technology not only addresses the shortage of artificial organs or tissues but also enables the design and production of complex and precise microstructures using bioinks, which are preferred in 3D printing for biomedical applications [35]. Additionally, the ability to customize each product to match the patient's unique biological needs further enhances the potential for personalized medicine. Commonly used printing methods include thermal and piezoelectric inkjet printing, extrusion, and laser methods (Figure 2).

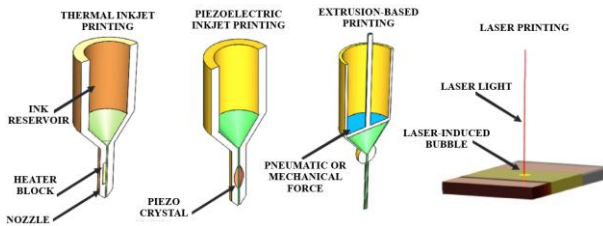


Figure 2. 3D printing technologies preferred in biomaterial production [39] (Biyomalzeme üretiminde tercih edilen 3B baskı teknolojileri)

The potential of using thermal and piezoelectric inkjet printing methods for rapid prototyping and personalized manufacturing provides a more attractive alternative to traditional manufacturing methods [36]. Owing to advantages such as high printing speed and excellent accuracy during the printing process, these methods have become a focal point in many studies. Inkjet printing allows for high-precision printing by adjusting the range of printing parameters required for the production process and controlling the size and spraying rate of the ink droplets used in the printing process. Although these methods hold promising potential for applications such as bone regeneration, wearable technology, and localized drug delivery for injuries, the use of hydrogel materials with inkjet printing technologies requires further technological advancements and material optimization [37-38].

Scientific studies in the biomedical field (Figure 3) have made significant advancements with 3D

printing technology playing a critical role. This technology not only provides personalized preoperative consultation for patients, but also offers various advantages in diagnostic processes during surgical resections. 3D printing enables surgeons to make more precise and informed decisions, particularly regarding visualization of complex anatomical structures and preoperative planning.

By developing appropriate extruder mechanisms, biological materials can be used in 3D printers, contributing to a wide range of applications in bioprinters. Bioprinting is achieved by layer-by-layer deposition of biological materials and live cells, allowing the production of 3D tissue structures such as skin, cartilage, tendons, cardiac muscle, and bone. For example, simpler structures such as the skin are easier to produce, whereas complex structures requiring features such as vascularization, such as cardiac muscle and bone tissue, require more advanced printing techniques and inks.

The process begins with careful selection of cells suitable for the target tissue structure [40]. The selected cells were then combined with an appropriate bioink to prepare the printing material. The biocompatibility and mechanical durability of bioinks directly impact the functionality of the final structure; therefore, the compatibility of the cell type and bioink is crucial. In the final step, the prepared material was printed with the required dimensions using a suitable printer to achieve specific biomechanical properties. After printing, the produced tissues are cultured and biologically mature to achieve full functionality [41].

Furthermore, the use of 3D-printed models extends beyond tissue engineering and offers significant improvements in prosthetic and surgical implant planning. For instance, highly personalized 3D models of patient-specific anatomical features can be created to optimize the fit of implants, thereby ensuring a higher success rate in surgery. Additionally, the ability to fabricate functional bioprinted tissues for testing and drug development accelerates preclinical trials, reducing reliance on animal models. Despite promising applications, challenges remain, including the complexity of printing vascular networks for large-tissue structures and ensuring the long-term functionality of printed tissues *in vivo*. However, ongoing research continues to address these hurdles, holding great potential for the future of regenerative medicine and personalized healthcare (Table 1) [42].

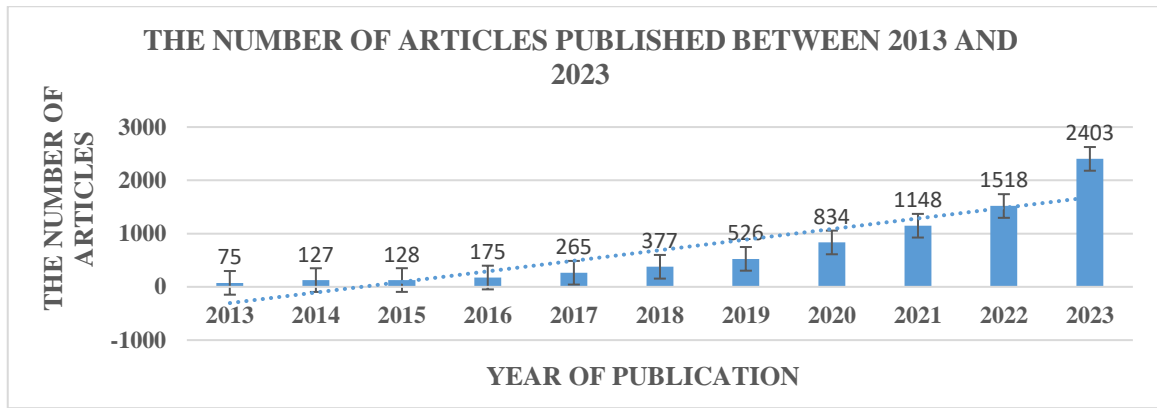


Figure 3. Statistical data on studies conducted in the biomedical field over the last eleven years based on 3D printing technology. The dataset was obtained from the number of articles found in Science Direct between the selected years using the search terms "3D printing" and "biomedical applications" (Şekil 3. Son on bir yılda 3B baskı teknolojisine dayalı olarak biyomedikal alanında gerçekleştirilen çalışmalara ait istatistiksel veriler. Veri seti, belirlenen yıllar arasında Science Direct'te "3D printing" ve "biomedical applications" arama terimleri kullanılarak bulunan makale sayılarından elde edilmiştir.)

Unlike many traditional 3D printing methods, the selection of 3D bioprinting materials in the biomedical field is a more complex process in terms of growth differentiation factors in cell types and the

sensitivity of living cell structures. The 3D bioprinting process (Figure 4) can be categorized into three main stages: preparation, printing, and post-processing.

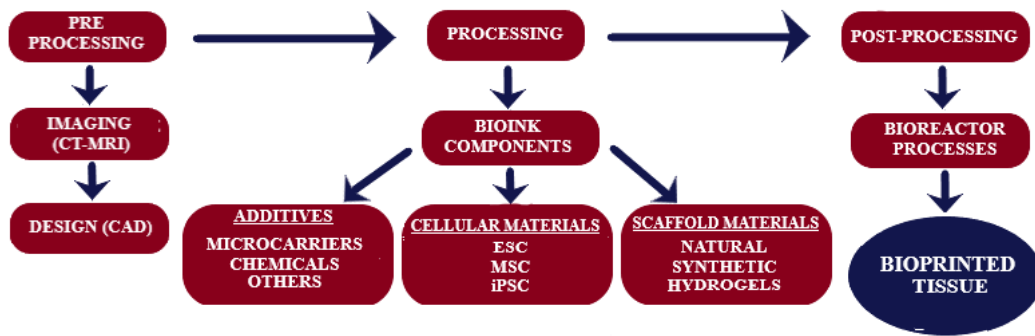


Figure 4. Schematic representation of bioprinting processes (CT: Computed Tomography, MRI: Magnetic Resonance Imaging, ESC: Embryonic Stem Cell, MSC: Mesenchymal Stem Cell, iPSC: Induced Pluripotent Stem Cell) (Biyobaskı süreçlerinin şematik gösterimi (CT: Bilgisayarlı Tomografi, MRI: Manyetik Rezonans Görüntüleme, ESC: Embriyonik Kök Hücre, MSC: Mezenkimal Kök Hücre, iPSC: İndüklenmiş Pluripotent Kök Hücre))

The preparation stage involves converting the images obtained from a bioimaging system (such as MRI) into a suitable format, which is then transformed into an STL file for printing. This step ensured that the digital model accurately represented the anatomy of the patient, allowing precise customization of the printed structure. The printing stage encompasses the actual printing process using bioprinters equipped with electronic components, such as ink reservoirs, video cameras, fiber optic light sources, temperature sensors, and piezoelectric humidifiers, with the print head tailored to the desired form.

The use of bioinks, which consist of living cells or biomaterials, is crucial to ensure that the printed structure closely mimics the properties of natural tissues. Additionally, the selection of bioinks plays a key role in determining the functionality and

biocompatibility of the final construct. Finally, the postprocessing stage includes the necessary procedures to convert the printed structure into an organ suitable for surgical implantation [43-44]. Table 1 highlights various printing methods utilized in biomedical applications, offering significant potential to revolutionize organ transplantation and regenerative medicine.

Table 1. Some printing methods used in biomedical applications (Biyomedikal uygulamalarda kullanılan bazı baskı yöntemleri)

Printing Method	Material	Print Sensitivity	Biomedical Applications
Directed Energy Deposition (DED)	Metal Wires, Nylon	0,1-5 mm	Limited use in medical applications but utilized in situations requiring high strength [45].
Spray Deposition	Metal Powder, Sand	0,05-4 mm	Used in the production of hard, mineralized tissues and iron-based implants [46].
Fused Deposition Modeling (FDM)	Thermoplastics, Hydrogels, Ceramics, Bio-Ink	0,1-0,2 mm	Used in surgical planning for creating hard and soft anatomical models (tissues, organs, etc.) [47].
Powder Bed Fusion Systems (DMLS, SLM, EBM)	Thermoplastics, Metal Powders, Ceramics	0,02-0,2 mm	Used in the production of temporary and fracture-resistant implants for head, neck, and facial regions (e.g., dental implants) [48].
Sheet Lamination	Paper, Ceramics, Metal	~0,5-1 mm	Used in the production of macroscopic anatomical models [49].
Spheroid Assembly	Bio-Ink, Organoids	0,1-0,2 mm	Used for free-form production of biologically active models (soft tissue, organs) [50].
Stereolithography (DLP, SLA)	Photopolymer, Bio-Resin	0,001-0,2 mm	Used for bio-printing scaffold structures for cell culture, tissue, and organ development. Applicable for both soft and hard tissues [51].

FDM: fused deposition Modelling; DMLS: direct metal laser sintering; SLM: selective laser melting; EBM, electron beam melting; DLP: digital light processing; SLA: stereolithography.

Computed tomography (CT) and magnetic resonance imaging (MRI) are among the most commonly used methods in presurgical planning. However, these methods often lead to oversight of critical information, preventing the achievement of more accurate pathological diagnoses and disregarding physiological and anatomical differences between patients. By utilizing innovative technologies, such as 3D printing technology, in presurgical planning, patient-specific organ models can be created, enabling the visualization of differences between patients. This approach enhances the success rate of surgeries and reduces complications such as blood loss and even patient mortality [52].

3. BIOPRINTING-COMPATIBLE 3D PRINTING MATERIALS (BİYOBASKI UYUMLU 3B BASKI MALZEMELERİ)

In bioprinting applications using 3D printer technology, there is a clear distinction between the

direct printing of a cell-seeded material, referred to as bio-ink (Figure 5), and the printing of a scaffold that can later be seeded with biomaterial ink [53]. When selecting the ink, both the final function of the part and the printing technique must be considered. Biomaterial inks are typically employed to create rigid structural scaffolds that provide permanent or slow-degrading structural stabilization. These inks often require processing under cytotoxic conditions such as extreme temperatures or solvent use. Additionally, they can be used with therapeutic molecules that can withstand these processing conditions. The choice of the ink directly affects the mechanical properties, degradation rate, and biocompatibility of the final product. Furthermore, the development of new bioinks that can better mimic the properties of human tissues is a key area of research. With advances in technology, these inks are expected to become more specialized for complex tissue regeneration applications.

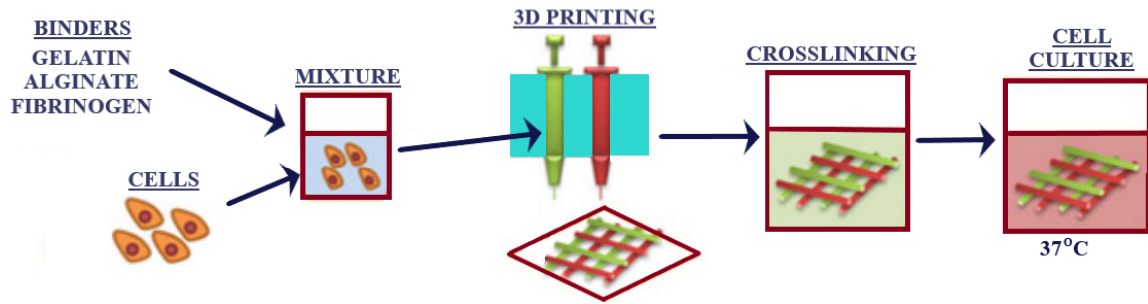


Figure 5. Schematic representation of the process for creating a 3D model using bio-inks (Biyomürekkepler kullanılarak 3B model oluşturma sürecinin şematik gösterimi)

Unlike biomaterials, bioinks are used to produce softer structural scaffolds that can be rapidly replaced by a new extracellular matrix, which is deposited by the embedded cell population [54]. In the production of bioinks, many bioinks have been developed from hydrogels, which are well-known materials with excellent biological compatibility and are suitable for 3D cell cultures (Table 2) [55].

Hydrogels are generally suitable for extrusion-based bioprinting. The best hydrogels for creating cell culture scaffolds typically have low viscosities before crosslinking, and are suitable for extrusion-based bioprinting [56]. Owing to these advantages, recent studies have focused on the development of new bioinks and techniques for cell-seeded biofabrication applications [57].

Table 2. Commonly used compatible materials in bio-inks and their corresponding cell and tissue types (Biyomürekkeplerde yaygın olarak kullanılan uyumlu malzemeler ve ilgili hücre ve doku türleri)

Bio-Printing Compatible Materials	Commonly Used Cells and Tissue Types
Gelatins	Used with Umbilical Vein Endothelial cells and Mesenchymal Stem Cells (bone, cartilage) [58].
Fibrinogen	Used with plant-derived medicinal product cells in skeletal muscle [59].
Collagen	Used with Hepatocytes (intestinal) and liver cells [60].
Agarose	Used with Chondrocyte cells that produce cartilage matrix and Mesenchymal Stem Cells [61].
Alginate	Used with Chondrocyte cells that produce cartilage matrix [62].
Gellan Gum	Used with Osteoblast cells that promote bone formation and Chondrocytes that produce cartilage matrix [63].
Hyaluronic Acid	Used with Fibroblast cells that are crucial for connective tissue structure and skin integrity [64].
Polyethylene Glycol	Used with Chondrocyte cells, Human Mesenchymal Stem Cells, and Fibroblast cells [65].
Tissue-Derived Extracellular Matrix	Used with Apical Papilla Stem Cells (dental bone, kidney) [66].

In addition to the materials listed in Table 2, thermoplastics that are commonly used in bioprinting applications are preferred in many 3D printing applications. Their primary advantages in biological printing are their processability and their ability to undergo multiple thermal cycles [67]. Thermoplastics such as Polycaprolactone (PCL), Polyvinyl Alcohol (PVA), and Polylactic Acid (PLA) are frequently used as support materials for hydrogels that require mechanical reinforcement and are directly used in implant applications [68].

In addition to thermoplastics, ceramics are preferred in biological printing for bone and dental applications owing to their osteoconductivity.

Ceramics are inherently brittle; therefore, they are often mixed with binders in polymer form for use in printing [69]. The ceramics most commonly used in bioprinting include Tricalcium Phosphate (TCP), hydroxyapatite (HAP), Biphasic Calcium Phosphate (BCP), Polymethyl Methacrylate (PMMA), and bioglass [70]. Moreover, metal implants traditionally manufactured by casting and forging methods using stainless steel, cobalt, chromium, molybdenum, and titanium alloys are widely used in orthopedic, dental, and craniofacial applications. Owing to advances in 3D printing technology, it has become possible to manufacture patient-specific implants, prostheses, and orthoses (Figure 6) using data from imaging systems, such as

3D scanning, in contrast to traditional manufacturing methods.

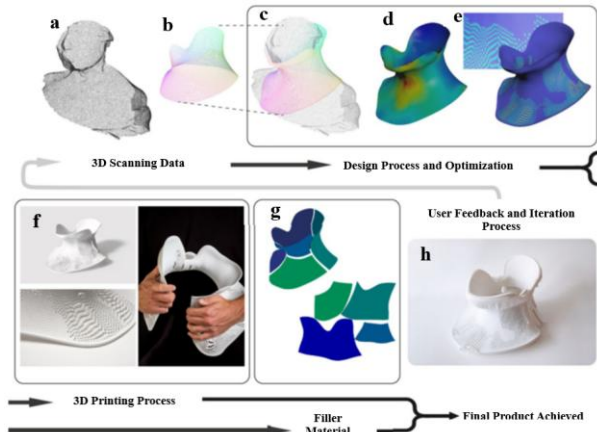


Figure 6. Manufacturing process of a custom-designed orthosis using 3D printing: a) 3D scanning, b) and c) designed orthosis, d) and e) design optimization, f) 3D-printed orthosis, g) orthosis infill trimming through variable surface cutting algorithm, h) final product obtained by assembling the printed components [71] (3B baskı kullanarak özel tasarım bir ortezin üretim süreci: a) 3B tarama, b) ve c) tasarlanan ortez, d) ve e) tasarım optimizasyonu, f) 3B baskılı ortez, g) değişken yüzey kesme algoritması ile ortez dolgusunun düzeltilmesi, h) baskılı bileşenlerin birleştirilmesiyle elde edilen nihai ürün)

4. CHALLENGES OF 3D PRINTING APPLICATIONS IN THE BIOMEDICAL INDUSTRY (BİYOMEDİKAL ENDÜSTRİDE 3B BASKI UYGULAMALARININ ZORLUKLARI)

3D printing technology has brought significant advantages to the biomedical field; however,

several limitations hinder its full potential and broad adoption. When these technologies first emerged, researchers envisioned them to be the driving force behind the new industrial revolution [72]. Although 3D printing has established a solid presence in areas such as research and product customization, its capability to replace traditional manufacturing methods in large-scale production has not yet been proven. This limitation arises primarily because of the low production volumes and extended time required for manufacturing products through 3D printing compared to conventional mass production methods.

Despite ongoing efforts to enhance the printing speed and efficiency, critical challenges, such as maintaining high precision and achieving acceptable surface quality, remain unresolved. Additionally, the limited selection of materials suitable for bioprinting and difficulties in ensuring the long-term structural stability of printed structures are major obstacles. Replicating the complex microenvironment of natural tissues, which is essential for functional and biocompatible biomedical applications, remains a major technical challenge. Furthermore, the high initial costs of 3D printing equipment and specialized materials continue to limit their accessibility and widespread use in clinical settings. Regulatory concerns and unanswered questions regarding the safety and long-term reliability of 3D-printed medical products further delay their integration into mainstream health care solutions.

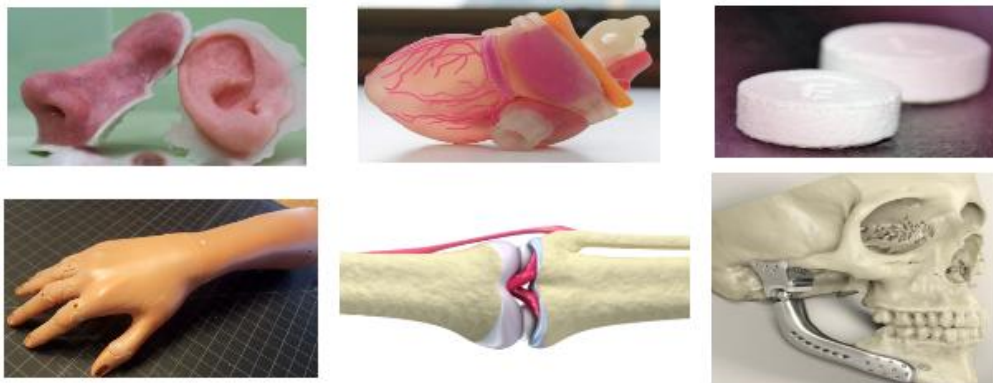


Figure 7. Visuals of some biomedical products developed using 3D printing methods (3B baskı yöntemleri kullanılarak geliştirilen bazı biyomedikal ürünlerin görselleri)

Initially, the range of printable materials and their applications in 3D printing were relatively narrow. However, continuous technological advancements have significantly expanded the variety of materials that can be used, thereby enabling the development of a growing number of innovative biomedical products (Figure 7). Despite this progress, the

absence of universal regulations or standardized guidelines for 3D-printed medical devices remains a significant limitation [73]. The diversity of 3D printing techniques and wide range of biomaterials make it increasingly challenging to establish standardized guidelines applicable to all processes and materials [74].

Another complication is the lack of global consistency in the regulatory frameworks governing 3D-printed biomedical devices. For instance, although the U.S. Food and Drug Administration (FDA) has introduced guidelines for 3D-printed medical devices, these guidelines are incomplete and fail to cover all material types or manufacturing methods. Similarly, the International Organization for Standardization (ISO) has issued general standards for additive manufacturing, such as ISO/ASTM 52900, which provides foundational guidelines, but lacks the level of detail required for biomedical applications. In the European Union, the Medical Device Regulation (MDR) addresses 3D-printed devices; however, inconsistencies in implementation among member states impede regulatory alignment [75]. These disparities in standards create challenges for the approval and development of 3D-printed biomedical products, increase production costs, and slow technological innovations.

However, the diversity of biomaterials significantly complicates the establishment of universal standards. Hydrogels, polymers, and metal alloys, each with their unique characteristics, require specialized testing protocols to meet clinical and regulatory standards. For instance, although polymers are commonly utilized for soft tissue engineering, metals are predominantly used for orthopedic implants, and both require distinct biocompatibility evaluations. This diversity hinders the development of a one-size-fits-all regulatory framework, delaying progress toward globally accepted guidelines [76].

To address these challenges, international collaboration is essential to harmonize regulatory processes. Establishing a global consortium involving organizations such as the FDA, ISO, and the European Commission could provide a unified framework for governing biomaterials, manufacturing processes, and clinical applications. Additionally, integrating innovative technologies, such as artificial intelligence-driven automated testing systems, can streamline regulatory approval processes, enhance product safety, and accelerate the adoption of 3D printing in the biomedical field [77]. Moreover, advancements in 3D printing have brought benefits such as improved material recyclability and waste reduction. However, these advantages remain underutilized in the absence of standardized regulations. Bridging these regulatory gaps would not only ensure sustainable and cost-effective production but also unlock the full transformative potential of 3D printing in biomedical applications [78-79].

5. CONCLUSIONS (SONUÇLAR)

This study investigates the use of 3D printing technology in biomedical systems. For this purpose, a general evaluation of 3D printers is used in biomedical systems and biomaterials used with these printers. Traditional manufacturing methods provide affordable costs, particularly for large-scale production. However, when new 3D printing techniques are considered, the costs are even more affordable because they do not require additional tools and offers the advantage of personalized production. Although the costs of printers and materials developed for the medical sector are high, three-dimensional (3D) printing techniques are developing rapidly. This is expected to reduce costs and enable large-scale production in the future. It is believed that this promising technology will also contribute to the production of various formulations owing to its many features, such as changing drug concentrations and producing personalized drugs.

The flexibility and easy usability of 3D printing technology have and surgical planning in both led to an increase in its use in hospitals, universities, schools, and even homes. This success will reach dimensions that will enable surgeries and medical treatments to be performed in the future, and will offer many opportunities for the health and medical sector. As it is known, 3D printing has managed to make revolutionary changes in the biomedical field for the production of implants, artificial and special tissues, organs and prostheses. Although this technology faces some limitations in the use of cell infiltration and vascularization in different fields, such as tissue engineering, owing to insufficient material or defective anatomy, it is promising in terms of overcoming these difficulties. As research in this field increases, the number of treatments that provide patients with a better lifestyle will increase. This technology will continue to be discovered in the near future and will have the potential to change the lives of many people by being launched on a larger scale, eventually overcoming other problems, such as cost and accuracy.

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)

Both authors have contributed equally to the manuscript.

Her iki yazar da makaleye eşit 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] Panda, S. K., Rath, K. C., Mishra, S., Khang, A. (2023). "Revolutionizing product development: The growing importance of 3D printing technology", *Materials Today: Proceedings*.
- [2] Ngo, T. D., Kashani, A., Imbalzano, G., Nguyen, K. T., Hui, D. (2018). "Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges" *Composites Part B: Engineering*, 143, 172-196.
- [3] Tamir, T. S., Xiong, G., Shen, Z., Leng, J., Fang, Q., Yang, Y., Wang, F. Y. (2023). "3D printing in materials manufacturing industry: A realm of Industry 4.0. Heliyon".
- [4] Shuaib, M., Haleem, A., Kumar, S., & Javaid, M. (2021). Impact of 3D Printing on the environment: A literature-based study. *Sustainable Operations and Computers*, 2, 57-63.
- [5] Hasan, M. R., Davies, I. J., Pramanik, A., John, M., & Biswas, W. K. (2024). Potential of Recycled PLA in 3D Printing: A Review. *Sustainable Manufacturing and Service Economics*, 100020.
- [6] Hajare, D. M., and Gajbhiye, T. S. (2022). "Additive manufacturing (3D printing): Recent progress on advancement of materials and challenges", *Materials Today: Proceedings*, 58, 736-743.
- [7] Elhadad, A. A., Rosa-Sainz, A., Canete, R., Peralta, E., Begines, B., Balbuena, M., Torres, Y. (2023). "Applications and multidisciplinary perspective on 3D printing techniques: Recent developments and future trends", *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 156, 100760.
- [8] Melocchi, A., Uboldi, M., Maroni, A., Foppoli, A., Palugan, L., Zema, L., Gazzaniga, A. (2020). "3D printing by fused deposition modeling of single-and multi-compartment hollow systems for oral delivery—A review", *International journal of pharmaceutics*, 579, 119155.
- [9] Lille, M., Nurmela, A., Nordlund, E., Metsä-Kortelainen, S., Sozer, N. (2018). "Applicability of protein and fiber-rich food materials in extrusion-based 3D printing", *Journal of Food Engineering*, 220, 20-27.
- [10] Trembecka-Wójciga, K., Jankowska, M., Tomal, W., Jarzębska, A., Maj, Ł., Czeppe, T., Ortyl, J. (2023). "Advanced 3D printing of graphene oxide nanocomposites: A new initiator system for improved dispersion and mechanical performance", *European Polymer Journal*, 198, 112403.
- [11] Zhang, J., Hirschberg, V., Rodrigue, D. (2022). "Mechanical fatigue of biodegradable polymers: A study on polylactic acid (PLA), polybutylene succinate (PBS) and polybutylene adipate terephthalate (PBAT)", *International Journal of Fatigue*, 159, 106798.
- [12] Ye, X., Gao, Q., He, E., Yang, C., Yang, P., Yan, T., Wu, H. (2023). "Graphene/carbonyl iron powder composite microspheres enhance electromagnetic absorption of 3D printing composites", *Journal of Alloys and Compounds*, 937, 168443.
- [13] Rong, L., Chen, X., Shen, M., Yang, J., Qi, X., Li, Y., Xie, J. (2023). "The application of 3D printing technology on starch-based product: A review", *Trends in Food Science and Technology*.
- [14] Liu, Z., Zhang, M., and Yang, C. H. (2018). "Dual extrusion 3D printing of mashed potatoes/strawberry juice gel", *Lwt*, 96, 589-596.
- [15] Schmidt, T. W., Scherf, M., Wittwer, D., Schumann, P., Guillén, E., Kastner, J. (2023). "HAPTIC digital 3D printing on textile surfaces for high-volume footwear manufacturing", *Materials Today: Proceedings*.
- [16] Sachdeva, A., Agrawal, R., Chaudhary, C., Siddhpuria, D., Kashyap, D., Timung, S. (2023). "Sustainability of 3D printing in industry 4.0: A brief review", *3D Printing Technology for Water Treatment Applications*, 229-251.
- [17] Alami, A. H., Olabi, A. G., Alashkar, A., Alasad, S., Aljaghoub, H., Rezk, H., Abdelkareem, M. A. (2023). "Additive manufacturing in the aerospace and automotive industries: Recent trends and role in achieving sustainable development goals", *Ain Shams Engineering Journal*, 14 (11), 102516.
- [18] BG, P. K., Mehrotra, S., Marques, S. M., Kumar, L., Verma, R. (2023). "3D printing in personalized medicines: A focus on applications

- of the technology”, *Materials Today Communications*, 105875.
- [19] Englezos, K., Wang, L., Tan, E. C., Kang, L. (2023). “3D printing for personalised medicines: implications for policy and practice”, *International Journal of Pharmaceutics*, 635, 122785.
- [20] Alabbasi, M., Agkathidis, A., Chen, H. (2023). “Robotic 3D printing of concrete building components for residential buildings in Saudi Arabia”, *Automation in Construction*, 148, 104751.
- [21] Lu, A., Williams III, R. O., Maniruzzaman, M. (2023). “3D printing of biologics—what has been accomplished to date?”, *Drug Discovery Today*, 103823.
- [22] Ahangar, P., Cooke, M. E., Weber, M. H., Rosenzweig, D. H. (2019). “Current biomedical applications of 3D printing and additive manufacturing”, *Applied sciences*, 9 (8), 1713.
- [23] Gao, G., Hubbell, K., Schilling, A. F., Dai, G., Cui, X. (2017). “Bioprinting cartilage tissue from mesenchymal stem cells and PEG hydrogel”, *3D Cell Culture: Methods and Protocols*, 391-398.
- [24] Prashar, G., Vasudev, H., Bhuddhi, D. (2023). “Additive manufacturing: expanding 3D printing horizon in industry 4.0”, *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, 17 (5), 2221-2235.
- [25] E., Eisenstein, N. M., Lawless, B. M., Jamshidi, P., Segarra, M. A., Addison, O., Cox, S. C. (2019). “The design of additively manufactured lattices to increase the functionality of medical implants”, *Materials Science and Engineering: C*, 94, 901-908.
- [26] Daly, A. (2023). “Medical 3D printing, intellectual property, and regulation”, In *3D Printing in Medicine* (pp. 385-398). Woodhead Publishing.
- [27] Aquino, R. P., Barile, S., Grasso, A., Saviano, M. (2018). “Envisioning smart and sustainable healthcare: 3D Printing technologies for personalized medication”, *Futures*, 103, 35-50.
- [28] Rischer, H., Szilvay, G. R., Oksman-Caldentey, K. M. (2020). “Cellular agriculture—industrial biotechnology for food and materials”, *Current opinion in biotechnology*, 61, 128-134.
- [29] Hinton, T. J., Jallerat, Q., Palchesko, R. N., Park, J. H., Grodzicki, M. S., Shue, H. J., Feinberg, A. W. (2015). “Three-dimensional printing of complex biological structures by freeform reversible embedding of suspended hydrogels”, *Science advances*, 1 (9), e1500758.
- [30] Cherkasskiy, L., Caffrey, J. P., Szewczyk, A. F., Cory, E., Bomar, J. D., Farnsworth, C. L., Upasani, V. V. (2017). “Patient-specific 3D models aid planning for triplane proximal femoral osteotomy in slipped capital femoral epiphysis”, *Journal of Children's Orthopaedics*, 11 (2), 147-153.
- [31] Wu, X. B., Wang, J. Q., Zhao, C. P., Sun, X., Shi, Y., Zhang, Z. A., Wang, M. Y. (2015). “Printed three-dimensional anatomic templates for virtual preoperative planning before reconstruction of old pelvic injuries: initial results”, *Chinese medical journal*, 128 (04), 477-482.
- [32] Dayyoub, E., Frant, M., Pinnapireddy, S. R., Liefeth, K., Bakowsky, U. (2017). “Antibacterial and anti-encrustation biodegradable polymer coating for urinary catheter”, *International journal of pharmaceutics*, 531 (1), 205-214.
- [33] Pere, C. P. P., Economidou, S. N., Lall, G., Ziraud, C., Boateng, J. S., Alexander, B. D., Douroumis, D. (2018). “3D printed microneedles for insulin skin delivery”, *International journal of pharmaceutics*, 544 (2), 425-432.
- [34] Martinez, P. R., Goyanes, A., Basit, A. W., Gaisford, S. (2018). “Influence of geometry on the drug release profiles of stereolithographic (SLA) 3D-printed tablets”, *AAPS PharmSciTech*, 19, 3355-3361.
- [35] Kazzazi, S. M., and Kranioti, E. F. (2018). “Applicability of 3D-dental reconstruction in cervical odontometrics”, *American journal of physical anthropology*, 165 (2), 370-377.
- [36] He, Y., Yang, F., Zhao, H., Gao, Q., Xia, B., Fu, J. (2016). “Research on the printability of hydrogels in 3D bioprinting”, *Scientific reports*, 6 (1), 29977.
- [37] Lee, D. K., Sin, K. S., Shin, C., Kim, J. H., Hwang, K. T., Kim, U. S., Han, K. S. (2023). “Fabrication of 3D structure with heterogeneous compositions using inkjet printing process”, *Materials Today Communications*, 35, 105753.
- [38] Duffy, G. L., Liang, H., Williams, R. L., Wellings, D. A., Black, K. (2021). “3D reactive inkjet printing of poly-L-lysine/gellan gum hydrogels for potential corneal constructs”, *Materials Science and Engineering, C*, 131, 112476.
- [39] Agarwal, T., Chiesa, I., Costantini, M., Lopamarda, A., Tirelli, M. C., Borra, O. P., Maiti, T. K. (2023). “Chitosan and its derivatives in 3D/4D (bio) printing for tissue engineering and drug delivery applications”,

- International Journal of Biological Macromolecules, 125669.
- [40] Munaz, A., Vadivelu, R. K., John, J. S., Barton, M., Kamble, H., Nguyen, N. T. (2016). Three-dimensional printing of biological matters. *Journal of Science: Advanced Materials and Devices*, 1 (1), 1-17.
- [41] Yang, Y., Du, T., Zhang, J., Kang, T., Luo, L., Tao, J., Gou, M. (2017). "A 3D-Engineered conformal implant releases DNA nanocomplexes for eradicating the postsurgery residual glioblastoma", *Advanced science*, 4 (8), 1600491.
- [42] Deshpande, V. A., Antanitta, S. V., Kore, A., Kandasubramanian, B. (2023). "Silk Based Bio-inks for Medical Applications", *European Polymer Journal*, 112255.
- [43] Nocheseda, C. J. C., Liza, F. P., Collera, A. K. M., Caldon, E. B., Advincola, R. C. (2021). "3D printing of metals using biodegradable cellulose hydrogel inks", *Additive Manufacturing*, 48, 102380.
- [44] Ma, Y., and Zhang, L. (2022). "Formulated food inks for extrusion-based 3D printing of personalized foods: a mini review", *Current Opinion in Food Science*, 44, 100803.
- [45] He, Y., Lockett, J., Begines, B., Dubern, J. F., Hook, A. L., Prina, E., Wildman, R. D. (2022). "Ink-jet 3D printing as a strategy for developing bespoke non-eluting biofilm resistant medical devices", *Biomaterials*, 281, 121350.
- [46] Meng, M., Wang, J., Huang, H., Liu, X., Zhang, J., Li, Z. (2023). "3D printing metal implants in orthopedic surgery: Methods, applications and future prospects", *Journal of Orthopaedic Translation*, 42, 94-112.
- [47] Colasante, C., Sanford, Z., Garfein, E., Tepper, O. (2016). "Current trends in 3D printing, bioprosthesis, and tissue engineering in plastic and reconstructive surgery", *Current Surgery Reports*, 4, 1-14.
- [48] Sadia, M., Sośnicka, A., Arafat, B., Isreb, A., Ahmed, W., Kellarakis, A., Alhnan, M. A. (2016). "Adaptation of pharmaceutical excipients to FDM 3D printing for the fabrication of patient-tailored immediate release tablets", *International journal of pharmaceuticals*, 513 (1-2), 659-668.
- [49] Awad, A., Fina, F., Goyanes, A., Gaisford, S., Basit, A. W. (2020). "3D printing: Principles and pharmaceutical applications of selective laser sintering", *International Journal of Pharmaceutics*, 586, 119594.
- [50] Olšovská, E., Mikušová, M. L., Tulinská, J., Rollerová, E., Vilamová, Z., Líšková, A., Lukán, N. (2024). "Immunotoxicity of stainless-steel nanoparticles obtained after 3D printing", *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 272, 116088.
- [51] Park, S., Shou, W., Makatura, L., Matusik, W., Fu, K. K. (2022). "3D printing of polymer composites: Materials, processes, and applications", *Matter*, 5 (1), 43-76.
- [52] Karakurt, I., Aydoğdu, A., Çıkrıkcı, S., Orozco, J., Lin, L. (2020). "Stereolithography (SLA) 3D printing of ascorbic acid loaded hydrogels: A controlled release study", *International Journal of Pharmaceutics*, 584, 119428.
- [53] Lancaster, M. A., and Knoblich, J. A. (2014). "Organogenesis in a dish: modeling development and disease using organoid Technologies", *Science*, 345 (6194), 1247125.
- [54] Ramos, T., and Moroni, L. (2020). "Tissue engineering and regenerative medicine 2019: the role of biofabrication—a year in review", *Tissue Engineering Part C: Methods*, 26 (2), 91-106.
- [55] Malda, J., Visser, J., Melchels, F. P., Jungst, T., Hennink, W. E., Dhert, W. J. Hutmacher, D. W. (2013). "25th anniversary article: engineering hydrogels for biofabrication", *Advanced materials*, 25 (36), 5011-5028.
- [56] Lee, J. H., and Kim, H. W. (2018). "Emerging properties of hydrogels in tissue engineering", *Journal of tissue engineering*, 9, 2041731418768285.
- [57] Jungst, T., Smolan, W., Schacht, K., Scheibel, T., Groll, J. (2016). "Strategies and molecular design criteria for 3D printable hydrogels", *Chemical reviews*, 116 (3), 1496-1539.
- [58] Cooke, M., Cox, S., Jones, S., Grover, L., Moxon, S., Snow, M., Smith, A. (2017). "Suspended manufacture of biological structures".
- [59] Hosseini, F., Chegeni, M. M., Bidaki, A., Zaer, M., Abolhassani, H., Seyedi, S. A., Yarak, M. T. (2023). "3D-printing-assisted synthesis of paclitaxel-loaded niosomes functionalized by cross-linked gelatin/alginate composite: Large-scale synthesis and in-vitro anti-cancer evaluation", *International Journal of Biological Macromolecules*, 242, 124697.
- [60] Lu, A., Williams III, R. O., Maniruzzaman, M. (2023). "3D printing of biologics—what has been accomplished to date?", *Drug Discovery Today*, 103823.
- [61] Klarmann, G. J., Piroli, M. E., Loverde, J. R., Nelson, A. F., Li, Z., Gilchrist, K. H., Ho, V. B. (2023). "3D printing a universal knee meniscus using a custom collagen ink", *Bioprinting*, 31, e00272.

- [62] Budharaju, H., Chandrababu, H., Zennifer, A., Chellappan, D., Sethuraman, S., Sundaramurthi, D. (2024). "Tuning thermoresponsive properties of carboxymethyl cellulose (CMC)-agarose composite bioinks to fabricate complex 3D constructs for regenerative medicine", *International Journal of Biological Macromolecules*, 260, 129443.
- [63] Falcone, G., Mazzei, P., Piccolo, A., Esposito, T., Mencherini, T., Aquino, R. P., Russo, P. (2022). "Advanced printable hydrogels from pre-crosslinked alginate as a new tool in semi solid extrusion 3D printing process", *Carbohydrate Polymers*, 276, 118746.
- [64] Chakraborty, J., Majumder, N., Sharma, A., Prasad, S., Ghosh, S. (2022). "3D bioprinted silk-reinforced Alginate-Gellan Gum constructs for cartilage regeneration", *Bioprinting*, 28, e00232.
- [65] Jang, E. J., Patel, R., Sankpal, N. V., Bouchard, L. S., Patel, M. (2023). "Alginate, hyaluronic acid, and chitosan-based 3D printing hydrogel for cartilage tissue regeneration", *European Polymer Journal*, 112651.
- [66] Ilhan, E., Cesur, S., Guler, E., Topal, F., Albayrak, D., Guncu, M. M., Gunduz, O. (2020). "Development of Satureja cuneifolia-loaded sodium alginate/polyethylene glycol scaffolds produced by 3D-printing technology as a diabetic wound dressing material", *International Journal of Biological Macromolecules*, 161, 1040-1054.
- [67] Wang, B., Barceló, X., Von Euw, S., Kelly, D. J. (2023). "3D printing of mechanically functional meniscal tissue equivalents using high concentration extracellular matrix inks", *Materials Today Bio*, 20, 100624.
- [68] Sikhosana, S. T., Gumede, T. P., Malebo, N. J., Ogundej, A. O. (2021). "Poly (Lactic acid) and its composites as functional materials for 3-d scaffolds in biomedical applications: A mini-review of recent trends", *EXPRESS Polymer Letters*, 15 (6), 568-580.
- [69] Elhattab, K., Bhaduri, S. B., Lawrence, J. G., Sikder, P. (2021). "Fused filament fabrication (three-dimensional printing) of amorphous magnesium phosphate/poly(lactic acid) macroporous biocomposite scaffolds", *ACS Applied Bio Materials*, 4 (4), 3276-3286.
- [70] Ben Ali, N., Hammami, D., Khelif, M., Bradai, C. (2022). "3D Printed Cellular Structures of PLA for Engineering Artificial Bone", In *Advances in Mechanical Engineering and Mechanics II: Selected Papers from the 5th Tunisian Congress on Mechanics*, CoTuMe 2021, March 22–24, 2021 (pp. 27-33). Springer International Publishing.
- [71] Radhakrishnan, S., Nagarajan, S., Bechelany, M., Kalkura, S. N. (2020). "Collagen based biomaterials for tissue engineering applications: A review", *Processes and phenomena on the boundary between biogenic and Abiogenic nature*, 3-22.
- [72] Hale, L., Linley, E., Kalaskar, D. M. (2020). A digital workflow for design and fabrication of bespoke orthoses using 3D scanning and 3D printing, a patient-based case study. *Scientific reports*, 10 (1), 7028.
- [73] [73] Dong, C., Petrovic, M., and Davies, I. J. (2024). "Applications of 3D Printing in Medicine: A Review", *Annals of 3D Printed Medicine*, 100149.
- [74] Suleman, A., Kondiah, P. P., Mabrouk, M., Choonara, Y. E. (2021). "The application of 3D-printing and nanotechnology for the targeted treatment of osteosarcoma", *Frontiers in Materials*, 8, 668834.
- [75] Armiento, A. R., Hatt, L. P., Sanchez Rosenberg, G., Thompson, K., Stoddart, M. J. (2020). "Functional biomaterials for bone regeneration: a lesson in complex biology", *Advanced Functional Materials*, 30 (44), 1909874.
- [76] Song, X., Shi, D., Li, W., Qin, H., Han, X. (2022). "Fabrication and properties of interweaved poly (ether ether ketone) composite scaffolds", *Scientific Reports*, 12 (1), 22193.
- [77] Priya, A. S., Premanand, R., Ragupathi, I., Bhaviripudi, V. R., Aepuru, R., Kannan, K., Shanmugaraj, K. (2024). "Comprehensive Review of Hydrogel Synthesis, Characterization, and Emerging Applications", *Journal of Composites Science*, 8 (11), 457.
- [78] Prasad, G., Arunav, H., Dwight, S., Ghosh, M. B., Jayadev, A., Nair, D. I. (2024). "Advancing Sustainable Practices in Additive Manufacturing: A Comprehensive Review on Material Waste Recyclability", *Sustainability*, 16 (23), 10246.
- [79] Cai, C., Zhang, P., Wang, Y., Tan, Y., Lei, I. M., Xu, B. B., Liu, J. (2024). "Sustainable three-dimensional printing of waste paper-based functional materials and constructs", *Advanced Composites and Hybrid Materials*, 7 (5), 156.

Enhancing Multi-Disease Prediction with Machine Learning: A Comparative Analysis and Hyperparameter Optimization Approach

Mariam KİLİ BECHİR¹ , Ferhat ATASOY^{2*} 

¹Karabuk University, The Institute of Graduate Programs, Department of Computer Engineering, Karabuk, Turkey

²Karabuk University, Faculty of Engineering, Department of Computer Engineering, Karabuk, Turkey

Article Info

Research article
Received: 26/05/2024
Revision: 05/02/2025
Accepted: 09/02/2025

Keywords

Machine Learning
Supervised Learning
Multi-Disease Prediction
Hyperparameter
Optimization
User-Friendly Application

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 26/05/2024
Düzeltilme: 05/02/2025
Kabul: 09/02/2025

Anahtar Kelimeler

Makine Öğrenmesi
Denetimli Öğrenme
Çoklu-hastalık Tahmini
Hiperparametre
Optimizasyonu
Kullanıcı-dostu Uygulama

Graphical/Tabular Abstract (Grafik Özet)

This study evaluates the performance of several supervised ML models with hyperparameter optimization for predicting multiple diseases such as diabetes, heart disease, Parkinson's disease, and breast cancer. The results show that the performance increase provided by pre-processing and HPO is unfortunately not directly applicable to all datasets. / Bu çalışma, diyabet, kalp hastalığı, Parkinson hastalığı ve meme kanseri gibi birden fazla hastalığı tahmin etmek için hiperparametre optimizasyonlu çeşitli denetimli ML modellerinin performansını değerlendirmektedir. Sonuçlar, ön işleme ve HPO tarafından sağlanan performans artışının ne yazık ki tüm veri kümelerine doğrudan uygulanamayacağını göstermektedir.

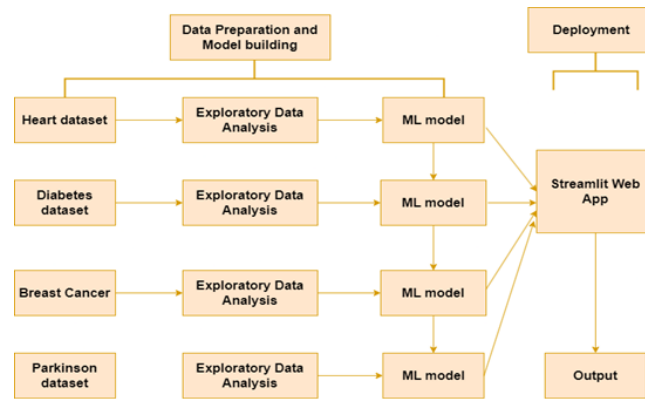


Figure A: Architecture design of the system / Şekil A: Sistemin mimari tasarımı

Highlights (Önemli noktalar)

- User-friendly web Application for multi-disease prediction / Çoklu hastalık tahmini için kullanıcı dostu web uygulaması
- Importance of HPO and preprocessing in machine learning / Makine öğrenmesinde HPO ve ön işlemenin önemi
- Exploratory data analysis / Keşifçi veri analizi

Aim (Amaç): The aim of this study is to investigate the use of ML methods in the diagnosis of diabetes, heart disease, breast cancer and Parkinson's disease and the effect of HPO on model performance. / Bu çalışmanın amacı diyabet, kalp hastalığı, meme kanseri ve Parkinson hastalığının teşhisinde MÖ yöntemlerinin kullanımı ve HPO'nun model performansına etkisinin araştırılmasıdır.

Originality (Özgünlük): In this study, the success of exploratory data analysis and preprocessing and hyperparameter optimization on different health data sets was evaluated. It was revealed that there is no successful method that can be applied to all data sets. / Bu çalışmada keşifçi veri analizi ve ön işleme ile hiperparametre optimizasyonunun farklı sağlık veri setlerindeki başarısı değerlendirilmiştir. Tüm veri setlerine uygulanabilir, başarılı bir yöntem olmadığı ortaya konulmuştur.

Results (Bulgular): Each dataset should be specifically processed with its data types, missing and outlier values and optimized to produce a robust model. / Her veri seti veri türleri, eksik ve aykırı değerleri ile özel olarak işlenmeli gümbüz model ortaya koymak için optimize edilmelidir.

Conclusion (Sonuç): Four different diseases were classified with six different ML methods, and the performances before and after HPO were compared and it was found that the optimized methods were more successful. / Dört farklı hastalık altı farklı ML yöntemiyle sınıflandırılmış, HPO öncesi ve sonrası performansları kıyaslanarak optimize yöntemlerin daha başarılı olduğu bulunmuştur.



Enhancing Multi-Disease Prediction with Machine Learning: A Comparative Analysis and Hyperparameter Optimization Approach

Mariam KİLİ BECHİR¹ , Ferhat ATASOY^{2*}

¹Karabuk University, The Institute of Graduate Programs, Department of Computer Engineering, Karabuk, Turkey

²Karabuk University, Faculty of Engineering, Department of Computer Engineering, Karabuk, Turkey

Article Info

Research article
Received: 26/05/2024
Revision: 05/02/2025
Accepted: 09/02/2025

Keywords

Machine Learning
Supervised Learning
Multi-Disease Prediction
Hyperparameter
Optimization
User-Friendly Application

Abstract

This study evaluates the performance of supervised machine learning (ML) models with hyperparameter optimization (HPO) for predicting multiple diseases, including diabetes, heart disease, Parkinson's disease, and breast cancer. Six algorithms—Logistic Regression (LR), Gradient Boosting (GB), k-Nearest Neighbors (K-NN), Extreme Gradient Boosting (XGB), Support Vector Machines (SVM), and Random Forests (RF) were trained and tested on specific disease datasets. Model performance was assessed using accuracy, precision, recall, and F1-score, with GridSearch-based HPO applied to enhance predictive accuracy. Significant improvements were observed across datasets. For heart disease, accuracy increased from 85.43% to 99.49% after HPO, with similar gains in other metrics. In diabetes prediction, KNN accuracy improved from 82.10% to 86.32%, while precision and F1-score also rose. Breast cancer models, except XGBoost, consistently achieved over 97.0% accuracy. For Parkinson's disease, SVM achieved 91.17% accuracy, a 4.83% improvement with HPO, with approximately 5% increases across all metrics. All results were validated using 5-fold cross-validation. A user-friendly web application was developed to allow users to select a disease, input relevant data, and receive predictions based on the chosen model. This study highlights the impact of pre-processing and HPO on model performance, addressing computational complexity, demonstrating generalizability in multi-disease prediction, and improving accessibility. However, the results also indicate that the performance gains from pre-processing and HPO are not uniformly applicable across all datasets, providing valuable insights for future research.

Makine Öğrenmesiyle Çoklu Hastalık Tahmininin İyileştirilmesi: Karşılaştırmalı Analiz ve Hiperparametre Optimizasyon Yaklaşımı

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 26/05/2024
Düzeltilme: 05/02/2025
Kabul: 09/02/2025

Anahtar Kelimeler

Makine Öğrenmesi
Denetimli Öğrenme
Çoklu-hastalık Tahmini
Hiperparametre
Optimizasyonu
Kullanıcı-dostu Uygulama

Öz

Bu çalışma, diyabet, kalp hastalığı, Parkinson hastalığı ve meme kanseri dahil olmak üzere birden fazla hastalığı tahmin etmek için hiperparametre optimizasyonu (HPO) ile denetlenen makine öğrenimi (MÖ) modellerinin performansını değerlendirir. Altı algoritma - Lojistik Regresyon (LR), Gradient Boosting (GB), k-En Yakın Komşular (K-NN), Extreme Gradient Boosting (XGB), Support Vector Machines (SVM) ve Random Forests (RF) - belirli hastalık veri kümeleri üzerinde eğitildi ve test edildi. Model performansı, tahmin doğruluğunu artırmak için GridSearch tabanlı HPO uygulanarak doğruluk, kesinlik, geri çağırma ve F1 puanı kullanılarak değerlendirildi. Veri kümeleri arasında önemli iyileştirmeler gözlemlendi. Kalp hastalığı için doğruluk, HPO'dan sonra %85,43'ten %99,49'a yükselirken, diğer metriklerde de benzer kazanımlar elde edildi. Diyabet tahmininde, KNN doğruluğu %82,10'dan %86,32'ye yükselirken, kesinlik ve F1 puanı da arttı. XGBoost hariç meme kanseri modelleri sürekli olarak %97,0'in üzerinde doğruluk elde etti. Parkinson hastalığı için SVM, HPO ile %4,83'lük bir iyileştirme olan %91,17 doğruluk elde etti ve tüm metriklerde yaklaşık %5 artış oldu. Tüm sonuçlar 5 katlı çapraz doğrulama kullanılarak doğrulandı. Kullanıcıların bir hastalık seçmesine, ilgili verileri girmesine ve seçilen modele dayalı tahminler almasına olanak tanıyan kullanıcı dostu bir web uygulaması geliştirildi. Bu çalışma, ön işleme ve HPO'nun model performansı üzerindeki etkisini, hesaplama karmaşıklığını ele almayı, çoklu hastalık tahmininde genelleştirilebilirliği göstermeyi ve erişilebilirliği iyileştirmeyi vurgulamaktadır. Ancak sonuçlar ayrıca ön işleme ve HPO'dan elde edilen performans kazanımlarının tüm veri kümelerinde tekdüze olarak uygulanabilir olmadığını ve gelecekteki araştırmalar için değerli içgörüler sağladığını göstermektedir.

1. INTRODUCTION (GİRİŞ)

In a world where the diversity of complex diseases is increasing day by day, accurate diagnoses have underscored the need for advanced healthcare technologies. This is vital both for patients to access treatment quickly and for healthcare professionals to reduce their workload. In addition to these, the increasing risk of people making mistakes under work intensity and intense stress increases the importance of using Artificial Intelligence (AI) in health.

Medical data analysis is increasingly used in modern healthcare to improve diagnosis, treatment, and prognosis processes. ML, as a subfield of AI, has the potential to be an effective tool for various fields [1–4]. Unlike conventional methods, ML leverages patterns in data for early detection and risk prediction. Previous studies have shown the success of ML in diagnosing diseases such as Alzheimer's, diabetes, heart disease, Parkinson's, and various cancers [5–14]. ML algorithms offer powerful tools to extract meaningful information from such data. However, the performance of these algorithms is highly dependent on the correct tuning of hyperparameters [15]. Hyperparameter optimization is the process of finding the most appropriate values of the parameters determined by the user during the training process of the model and guiding the learning process of the model. This process is of critical importance especially in complex and sensitive datasets such as medical data [16,17].

The application of ML improves the diagnostic process by facilitating early detection, precise disease classification, and personalized treatment recommendations, thereby significantly improving patient care and prognosis. The difficulties inherent in medical data, such as high dimensionality, unbalanced class distributions, and missing data, make hyperparameter optimization even more complex [18]. Therefore, in addition to traditional optimization methods, it is recommended to use more advanced methods such as Bayesian optimization, grid search, and random search [19]. In addition, measures to improve model performance on medical data (e.g., data preprocessing, feature selection, and class balancing techniques for imbalanced data sets) need to be carefully examined [20]. Recent studies have emphasized ensemble models and HPO to achieve improved diagnostic accuracy and address overfitting concerns [21].

In this study, we investigate the diagnosis of diseases such as diabetes, heart disease, breast cancer and Parkinson's disease using ML methods and the effect of HPO on models' performances. The performance of six models for each disease on four different datasets is analyzed and presented. In addition, a synthesis of existing studies in the literature will be presented and suggestions for future research in this area will be made. While prior studies have focused on individual disease prediction, such as [22] achieving respectively 85.04% and 84.4% accuracy with LR and RF for heart disease, our work uniquely evaluates multiple diseases, including heart disease, diabetes, breast cancer, and Parkinson's, under a unified framework. Additionally, the integration of HPO across all models usually enhances their robustness compared to studies like [23], which primarily relied on default configurations.

With the web-based user-friendly application developed in the study, it has become possible to predict the probability of an individual developing a disease. This application has been developed to bridge the gap between technical innovation and practical usability, providing accessible predictions for clinical and general users.

2. RELATED WORKS (İLGİLİ ÇALIŞMALAR)

In our study, we considered literature in two dimensions: 1- The effect of machine learning methods and hyperparameter optimization, 2- Disease classification using machine learning methods.

2.1. Hyperparameter Optimization (Hiperparametre Optimizasyonu)

Hyperparameter optimization is an important process to increase the performance of a model. At the end of this process, the aim is to find the most appropriate values of the parameters of the algorithms used. Generally, each algorithm has its own parameters, and adjusting these parameters appropriately affects the results according to the performance metrics used to measure the generalization ability and success of the model [15,19,24–29].

In this study, Logistic Regression (LR), Random Forest (RF), Support Vector Machines (SVM), K-Nearest Neighbor (KNN), Extreme Gradient Boosting (XGBoost) and Gradient Boosting (GB) algorithms were used.

Although LR is generally considered as a simple model, adjusting the regularization term (C) prevents the model from overfitting or underfitting, contributing to the increase in generalization ability. In addition, the selection of different optimization algorithms called solvers is another parameter that affects the training time and accuracy [30–35].

In the random forest algorithm, adjusting hyperparameters such as the number of trees (n_estimators), maximum depth (max_depth) and minimum sample number (min_samples_split) can significantly increase performance. Generally, more trees provide increased performance, but it increases computational cost. While it becomes possible to solve more complex problems with maximum depth, it causes overfitting and the training process to take longer. The minimum sample number determines the number of samples required to split a node, and as this value increases, the generalization ability of the model can be increased. Model accuracy can be increased with the most appropriate choices. In addition, by preventing overfitting or underfitting situations, the generalization ability and stability of the model can be increased and provided. In addition, similar or better results can be obtained by reducing computational complexity. As a result of the research, the hyperparameter optimization process is seen as an important step in random forest applications [24,36–40].

In SVM, optimization of hyperparameters such as kernel function, C parameter and gamma parameter can increase the classification success of the model. Kernel function determines how the data will be separated. Linear, polynomial and Radial Basis Function (RBF) are commonly used. C parameter controls the error tolerance. While low values tolerate more errors, high values create more complex models with less errors. Gamma parameter determines how effective the data will be when RBF kernel is used. While low gamma values provide a wider domain, high values create a narrower domain. Research shows that correct adjustment of these parameters has a significant effect on the overall performance of the model. For example, the overall success of the model can be increased with appropriate C and gamma values. The selection of the kernel function and optimization of hyperparameters can directly affect the shape and location of the decision boundaries and therefore the classification performance. In addition, it is possible to improve the computational efficiency and the training process [41–43].

There are several critical hyperparameters of the KNN algorithm. The number of neighbors (k) can improve the accuracy of the model, especially depending on the size of the dataset. While low k values increase the sensitivity of the model to noise, high k values can increase the generalization ability of the model. The distance criterion used to determine the neighbors can affect the classification results. In addition, the weighting method is used to determine the effects of the neighbors. HPO provides accuracy, minimizing over- or underfitting, and computational efficiency as in other algorithms. The number of neighbors and the distance criterion are important in determining the decision boundaries, and their total effect can directly affect the classification performance [15,24,44–46].

XGBoost and GB algorithms are algorithms that use decision trees. XGBoost is an optimized and faster version of the traditional GB algorithm. Both add new trees that correct the weak points of the current model to reduce the error at each iteration. XGboost offers more advantages over GB with parallel processing, pruning mechanism used to prune excess trees, special target functions and a wide range of loss functions. The prominent hyperparameters to be optimized are the number of trees to be created (n_estimators), learning rate (eta), maximum depth (max_depth), sample rate (subsample). As the number of 'n_estimators' increases, the results generally improve, while the risk of overfitting also increases. 'eta' controls the contribution of each tree. Lower 'eta' values can help increase generalization ability by providing slower and better learning. 'subsample' determines the ratio of samples to be used for each tree. Lower values can reduce overfitting. HPO can provide performance increase as in other methods [19,27,37,47–50].

2.2. Disease Classification Using ML Methods

(MÖ Yöntemleri Kullanarak Hastalık Sınıflandırma)

Recent advances in machine learning (ML) have reshaped disease prediction, yet critical challenges in generalizability, interpretability, and clinical integration remain unresolved. Previous studies have highlighted the effectiveness of ML in disease prediction. For example, in study [21] various ML algorithms were used to train models for predicting 141 diseases across different medical specialties, including diabetes, bronchial asthma, and Covid-19. The research introduced a valuable dataset for healthcare-oriented ML research and demonstrated the potential of these algorithms for multi-disease prediction with high accuracies. By creating a

comprehensive dataset and applying diverse ML algorithms, including SVM, Naïve Bayes, and Random Forest, the study addressed the challenges of multi-disease prediction. The achieved accuracy of 99.33% suggests the potential of ML for this task. However, more investigation is necessary to ensure the generalizability and robustness of such models across different healthcare settings. While this study focuses on the use of large-scale symptom datasets, their reliance on association rules and homogeneous data sources raises concerns about robustness in real-world clinical settings, a limitation that our work addresses through rigorous hyperparameter optimization (HPO) and validation across heterogeneous datasets.

According to [51] an improved healthcare efficiency by predicting ICD codes for chronic diseases, achieving a prediction accuracy between 80-90% across 11 diseases, with even higher accuracy for cancer and stroke. This work demonstrated ML's potential to speed up diagnosis through automated code prediction. Similarly, [52] evaluated whether ML can increase the accuracy of cardiovascular risk estimation using regular clinical data from a prospective cohort of 378,256 patients registered dataset. Four ML algorithms (RF, LR, GBM, ANN) were compared to an existing algorithm based on American College of Cardiology guidelines. The findings showed that ML algorithms significantly improved cardiovascular risk estimation. In particular, the neural networks algorithm showed the best improvement in accuracy, with a 3.6% increase over traditional methods, demonstrating ML's ability to outperform existing risk assessment models. However, early ML studies focused narrowly on single diseases or homogeneous datasets, overlooking the need for generalizable frameworks applicable to diverse clinical contexts.

Other research focused on comparing specific ML models for chronic diseases. Study [53] compared LR with various ML models for predicting chronic diseases like diabetes, cardiovascular disease, hypertension, and chronic kidney disease. The results demonstrated that LR achieved competitive performance, particularly for diseases with well-established risk factors. In study [54], the researchers aimed to develop a framework that could accurately distinguish between Parkinson patients and healthy individuals at an early stage. They employed various ML algorithms to analyze data and identify patterns indicative of the disease. Preprocessing, standardization, and ensemble techniques were utilized to enhance model performance. The resulting DL models

demonstrated promising outcomes in discriminating Parkinson patients from healthy individuals, as evaluated using accuracy, precision, sensitivity, F1 score, specificity, and area under the ROC curve. It is emphasized that since the study used a limited dataset, the real performance of the DL method can be demonstrated with larger datasets.

Hyperparameter optimization (HPO) is another key process for improving ML model efficacy. In [55], the hyperparameters of the LR, KNN, SVM, RF, and Decision Tree (DT) classification models were tuned using the grid search method, resulting in an accuracy range of 81.97% to 90.16% for LR, KNN, DT, and SVM, and an accuracy range of 85.25% to 91.80% for RF. Similarly, in [23], the efficacy of heart disease prediction was evaluated using HPO techniques. The success rate, which typically ranges between 80 and 90% in the literature, was found to be 97.52% in the Cleveland dataset, particularly when the RF model was employed. This indicates a notable improvement in performance using HPO.

In addition, [56] proposed a study that concerns cardiac disease diagnosis. The study emphasizes the use of pre-processing and feature engineering techniques before employing the ML algorithms. These techniques aim to clean and refine the data by handling outliers, missing values, potentially irrelevant features and improve the performance of ML models.

In [57], authors proposed a DL model for multi-classification of infectious diseases utilizing unstructured electronic medical records to aid in clinical decision-making regarding infectious diseases. This research highlights the capability of deep learning to manage complex, unstructured data such as electronic medical records, enhancing the classification of diseases. The presented model achieved a significantly higher accuracy (99.44%) compared to traditional ML algorithms like XGBoost (96.19%), DT (90.13%), Bayesian methods (85.19%), and LR (91.26%). The model demonstrates the potential of DL in analyzing complex, unstructured data like EMRs, offering a more comprehensive approach to disease classification compared to traditional methods. However, existing HPO studies focus disproportionately on single-disease applications or computationally heavy DL models, neglecting lightweight, interpretable frameworks for multi-disease systems.

3. MATERIALS AND METHODS (MATERİYAL VE METOD)

3.1. Datasets (Veri Setleri)

To examine the effectiveness of ML with and without HPO in the healthcare field, we have applied different ML methodologies on 4 different medical datasets. These datasets are Diabetes dataset, heart dataset, Breast Cancer dataset and Parkinson dataset. These data are all available on Kaggle data collection platform and lastly accessed on September 6, 2024 for our study.

For the diabetes dataset (<https://www.kaggle.com/datasets/mathchi/diabetes-data-set>), specific criteria were applied during data selection. This subset focuses on female patients over 20 years old with a specific heritage. It contains 768 entries with eight characteristics, including blood pressure, glucose levels, and a target variable for prediction.

The heart disease dataset (<https://www.kaggle.com/datasets/johnsmith88/heart-disease-dataset>) combines data from multiple sources. This dataset consists of 303 records with 14 characteristics encompassing demographics, medical history, and test results. Additionally, a target variable indicates the presence or absence of heart disease.

The breast cancer dataset (<https://www.kaggle.com/datasets/yasserh/breast-cancer-dataset>) provides data from 1988 related to breast tissue samples. It includes 569 records, each representing a cell nucleus with 31 characteristics and a target variable indicating malignancy. These characteristics describe various properties extracted from digitized images.

The Parkinson's disease dataset (<https://www.kaggle.com/datasets/vikasukani/parkinsons-disease-data-set>) contributes significantly to developing ML models for automated disease detection through voice analysis. This dataset comprises information on 195 individuals, aiming to differentiate between those with Parkinson's disease and those who are healthy.

3.2. Exploratory Data Analysis and Variable Analysis (Keşifçi Veri Analizi ve Değişken Analizi)

The target distribution of the diabetes dataset in the first row of Table 1 shows that the person who are not diabetic are more than the person who have diabetes. Around 500 are non-diabetics and 268 people are affected by diabetes.

The target variable distribution in the second row of Table 1 indicates a slightly higher proportion of individuals classified as "affected" compared to those classified as "non-affected". The total number of people affected by heart disease is 526 and the total number of the persons not affected is 499.

The target variable distribution in the third row of Table 1 shows a significantly higher proportion of individuals classified as "affected" compared to those classified as "non-affected". The total number of people affected by heart disease is 147 and the total number of the persons not affected is 48.

Looking at the output of the target variable of the breast cancer dataset in the last row of Table 1, the total number of persons that are Benign (not affected) is 357 and the total number of those who are Malignant (affected by breast cancer) is 212.

Table 1. The target distribution of datasets (Veri setlerinin hedef dağılımları)

	Healthy Number of People	Diseased Number of People
Diabetes	500	268
Heart Disease	499	526
Parkinson	48	147
Breast Cancer	357	212

3.3. Outlier Removal and Standardization (Aykırı Değerlerin Giderilmesi ve Standardizasyon)

Although ML algorithms are powerful, some of their limitations cannot be ignored. Unfortunately, mechanisms that perform exploratory data analysis and train the most optimal model as a result have not yet been developed. The data preprocessing step involved identifying and removing outliers present

in each dataset. Outliers are significantly differing from most of the data. Their presence can negatively impact model training and lead to inaccurate predictions. We used Interquartile Range (IRQ) to detect and remove outliers from each dataset.

Then, all features were standardized with the Z-score method known as standardscaler in the Sklearn library. Since these were not always

sufficient, additional operations had to be performed on a dataset-specific basis.

The IQR (Interquartile Range) method is a widely used statistical technique for identifying outliers. This method is based on the distribution of the data set and uses the interquartile range to detect outliers. Here are the steps of the IQR method:

1. Sorting the Data:

The dataset is sorted from smallest to largest.

2. Calculating the Quartiles:

Q1 (First Quartile): Represents the lower 25% of the dataset.

Q3 (Third Quartile): Represents the upper 25% of the dataset.

Median (Q2): The median value of the data set.

3. IQR Calculation:

IQR is the difference between Q3 and Q1:

$$IQR = Q3 - Q1 \tag{1}$$

4. Determining Outlier Boundaries:

Lower Boundary:

$$\text{Lower Boundary} = Q1 - 1.5 \times IQR \tag{2}$$

Upper Boundary:

$$\text{Upper Boundary} = Q3 + 1.5 \times IQR \tag{3}$$

5. Detecting Outliers:

Values smaller than the lower boundary are considered lower outliers.

Values larger than the upper boundary are considered upper outliers.

The IQR method is a simple and fast method that is based on dataset distribution and objectively determines outliers. It is especially useful for detecting outliers in small and medium-sized datasets. Since it is designed according to the principle that the dataset should be close to a normal distribution, it does not always succeed in providing the same advantage [58].

Following outlier management, we standardized the remaining data. Standardization is a crucial step that scales the features within each dataset to a common range. This method standardizes the data so that the mean is 0 and the standard deviation is 1. This is especially important for improving the performance

of machine learning algorithms because it ensures that features at different scales are given equal weight. It speeds up the training process, especially for gradient descent-based algorithms (e.g., SVM, logistic regression, neural networks), and standardized data can be more easily interpreted in statistical analyses [59].

$$z = \frac{(x - \mu)}{\sigma} \tag{4}$$

Here: x : Original value, μ : Mean of the feature, σ : Standard deviation of the feature, z : Standardized value.

3.4. Data Splitting and Balancing (Veri Bölme ve Dengeleme)

k-fold cross-validation evaluates the performance of the model on the entire dataset, providing more reliable results compared to a single training-test split. Since the entire dataset is used for both training and testing, the risk of overfitting the model to the entire dataset is reduced and data waste is prevented. The k value was selected as 5 in the study [60].

SMOTE improves the performance of classification models by increasing the number of samples from the minority class. In addition, since no samples are removed from the dataset (undersampling is not performed), there is no loss of information. Since it creates synthetic samples instead of random oversampling, it reduces the risk of overfitting. Thus, it increases the number of samples from the minority class to solve the class imbalance problem and improves the generalization ability of the model [61].

3.5. Logistic Regression (Lojistik Regresyon)

LR is a supervised learning algorithm that estimates the likelihood of an event (classification) based on a set of input variables (data points). It excels at providing clear explanations for each variable's impact on the predicted classification outcome. This interpretability is valuable in healthcare settings, as it allows us to understand which factors are most influential in predicting each condition.

3.6. k-Nearest Neighbour (k-En Yakın Komşu)

This is a versatile technique used for exploring relationships within data. It operates on the principle of similarity, where a new data point is classified based on the majority class or average value of its closest neighbors. The key aspect of KNN is finding the optimal number of neighbors (k) that minimizes

errors. Selecting the appropriate k value is crucial, as a small k can be sensitive to noise, while a large k might result in an overly smooth decision boundary that misses local patterns.

3.7. Ensemble Techniques (Topluluk Teknikleri)

Ensemble techniques were used to potentially improve the accuracy and robustness of the classifications. Random Forest Classifier combines multiple decision trees, each trained on a random subset of the data, to arrive at a final classification through a majority vote. Extreme Gradient Boosting (XGBoost) creates and combines multiple decision trees, each focusing on correcting the errors of the previous trees, to achieve a more accurate final classification. Gradient Boosting builds an ensemble of decision trees sequentially, where each subsequent tree learns from the errors of the previous trees. This allows the final model to capture complex relationships within the data.

3.8. Support Vector Machine (Destek Vektör Makinesi)

This technique excels in data with a high number of variables. SVM seeks to identify the optimal dividing line that separates different classifications within the data. The positioning of this line prioritizes maximizing the separation between classes.

3.9. Hyperparameter Optimization (Hiperparametre Optimizasyonu)

HPO is a crucial step in ML that involves adjusting the model's internal configurations to optimize its performance. Different hyperparameter settings can significantly impact the model's ability to learn from the data and generalize to unseen data. We used Grid SearchCV which is a common technique that systematically evaluates a predefined set of hyperparameter values to identify the combination that yields the best performance on a validation set [59].

3.10. Model Evaluation (Model Değerlendirmesi)

When using k-fold cross-validation in the scikit-learn library, the performance metrics of the model are calculated for each fold and the final result is usually obtained by averaging these values.

K-Fold Cross-Validation Process:

1. The dataset is divided into k parts (folds).
2. In each iteration, 1 fold is used as the test set and the rest as the training set.
3. The model is trained and tested k times.

4. Metrics (accuracy, precision, recall, F1-score, etc.) are calculated for each fold.
5. The final performance is determined by averaging the results.

Since we used k-fold cross validation, in each iteration performance metrics are calculated k times and final values were calculated by averaging. In addition, we compared results without HPO and with HPO, whole process were operated twice.

The performance metrics of ML models have been calculated and evaluated in terms of accuracy, precision, recall and F1 score with the help of the confusion matrix. Accuracy is the ratio of correctly classified observations to the total number of observations. Precision is performed by taking the ratio of correctly classified positive samples to the total predicted positive samples. The recall is calculated by taking the ratio of truly classified positive samples to all samples in actual class. F1 score is performed by taking the weighted average of precision and recall. The mathematical expressions of accuracy, precision, recall, and F1 score are shown in the equations from 5 to 8 respectively.

$$Accuracy = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN} \quad (5)$$

$$Precision = \frac{TP}{TP + FP} \quad (6)$$

$$Recall = \frac{TP}{TP + FN} \quad (7)$$

$$F1 - score = 2 \frac{Recall \times Precision}{Recall + Precision} \quad (8)$$

Where, TP, FN, FP, and TN represented True Positive, False Negative, False Positive, and True Negative, respectively.

4. APPLICATION (UYGULAMA)

We used python with pandas to read and manage structured datasets for each disease. Visualization libraries like Matplotlib and Seaborn facilitated data exploration. Each dataset was analyzed independently to understand its characteristics. To address imbalanced datasets, we employed the SMOTE technique. SMOTE generates synthetic data points for the minority class, mitigating bias and improving model performance. A Technique like StandardScaler helped us to standardize the

data, ensuring a mean of 0 and a standard deviation of 1 for all features.

4.1. Data Preprocessing (Veri Önışleme)

We evaluated various ML techniques on the preprocessed data. These included LR, SVM, KNN, RF, XGBoost and GB. HPO was performed using Grid Search method to identify the best configuration for each model, significantly enhancing their performance. k-fold cross-validation strategy ensured good evaluation by providing more reliable performance results.

With the data preprocessing, performing some additional operations for each dataset made significant contributions to the model performance.

Since the values of 'trestbps', 'chol', 'thalach', 'slope', 'thal' used as features in the heart disease dataset are naturally not possible to be 0, the relevant records were cleaned from the dataset. Later, by applying other preprocessing methods, high classification success was achieved by preventing overfitting of the models both without HPO and with HPO.

In the diabetes dataset, it is not possible for the 'Glucose', 'BloodPressure', 'SkinThickness', 'Insulin', 'BMI' features to be 0. For this reason, the relevant records were cleaned before other data preprocessing steps. In the experiments conducted with different scenarios, it was observed that the

highest performance metrics were obtained in this way.

In the breast cancer dataset, the 'id' column, which has nothing to do with diagnosis, has been deleted. In addition, the features 'radius_mean', 'texture_mean', 'perimeter_mean', 'area_mean', 'concave_points_mean', 'radius_se', 'area_se', 'perimeter_worst', 'area_worst', which have high correlations with the target value and each other, have not been included in the training for the purpose of reducing dimensionality. In this way, it has been observed in experimental studies that the models are both faster and give optimum performance.

In the Parkinson's disease dataset, attributes were extracted from voice recordings taken from 31 volunteers. Therefore, outlier detection and removal were applied directly. No other process was done beforehand.

4.2. Model Deployment and Web Application Development (Model Kurulumu ve Web Uygulaması Geliştirme)

The web application was developed using Streamlit, a Python library for building web applications. This application integrates serialized models, enabling users to interact with the system. The architecture of the system is given in Figure 1 and sample interface is given in Figure 2.

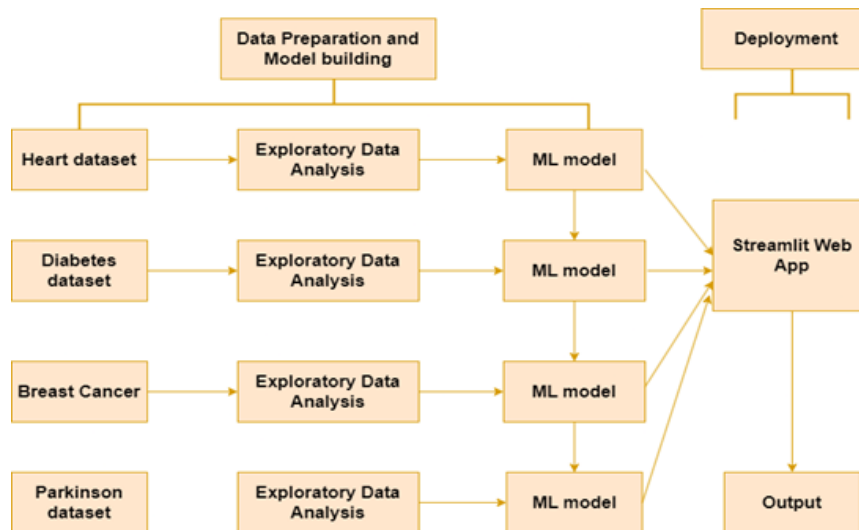


Figure 1. Architecture desing of multi-disease prediction system (Çoklu hastalık tahmin sistemi mimari tasarımı)

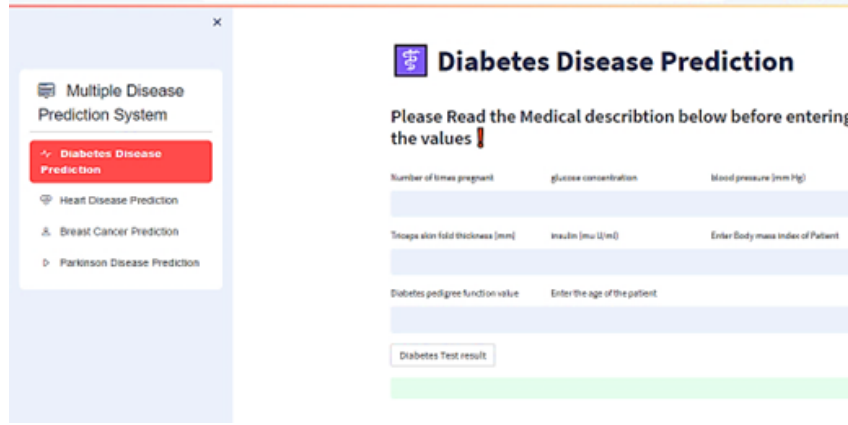


Figure 2. Multi-Disease prediction system user interface (Çoklu hastalık tahmin sistemi kullanıcı arayüzü)

The developed application was tested for usability with simulated clinical and general user inputs. The interface provides a streamlined workflow: disease selection, data input, and instant predictions. Feedback indicated ease of use and potential for integration into clinical workflows, particularly for early screening and risk assessment. Predictions generated by the application matched the model outputs, confirming its reliability. The intuitive interface allows non-technical users to navigate seamlessly, select diseases, input parameters, and interpret results effectively.

5. EXPERIMENTAL RESULTS (Deneysel Sonuçlar)

5.1. Heart Disease (Kalp Hastalığı)

We built and evaluated six ML models for heart disease prediction: LR, RF, SVM, KNN, XGBoost and GB. When we look at the results shown in Table 2, we see that HPO has a significant impact on the performance of the models except RF. KNN showed the most significant improvement (14%), suggesting its initial configuration was suboptimal. This highlights how tuning can help identify better configurations even for simpler models. The chosen hyperparameters (high C value, increased

iterations) indicate the model benefits from regularization and more training data. 5-fold cross-validation was used in all training. Cross-validation reduces the chance factor as it allows training and testing with different parts of the dataset. It shows that the model performs well on the entire dataset, not just on a specific subset of the data. However, the increase in KNN brings overfitting to mind. However, since the dataset is balanced before model training, the probability of overfitting decreases due to the difference between training and test scores being around 1%.

Although a small increase is observed in Logistic Regression, it can be expected that the accuracy limits will not change much due to the nature of this model. The best parameters include 'C': 0.1 and 'penalty': 'l1', which shows that the model gives better results with L1 (Lasso) regularization. A striking improvement is seen in KNN. When we look at the best parameters, the settings 'metric': 'manhattan', 'n_neighbors': 11 and 'weights': 'distance' attract attention. Optimizing these parameters seems to have provided the model with significantly better generalization.

Table 2. Comparison of accuracy results on heart disease with and without HPO. (HPO'lu ve HPO'suz kalp hastalıklarında doğruluk sonuçlarının karşılaştırılması.)

Model	Before HPO	After HPO	Best Parameters
LR	83.63%	84.91%	'C': 0.1, 'penalty': 'l1', 'solver': 'liblinear'
KNN	85.43%	99.49%	'metric': 'manhattan', 'n_neighbors': 11, 'weights': 'distance'
RF	99.23%	99.23%	'bootstrap': True, 'max_depth': 70, 'min_samples_leaf': 1, 'min_samples_split': 2, 'n_estimators': 200
SVM	92.07%	97.31%	'C': 10, 'kernel': 'rbf'
XG_Boost	99.11%	99.23%	'learning_rate': 0.2, 'max_depth': 7, 'n_estimators': 50
GB	97.44%	98.59%	'learning_rate': 0.2, 'max_depth': 5

Interestingly, the accuracy did not change after hyperparameter optimization in RF (99.23%). This shows that the model is already working very close to the optimal values and HPO does not provide any additional improvement. The best parameters determined are depth 70 and number of trees 200, which provides the model to learn strongly. There is a significant increase from 92.07% to 97.31% in SVM. Among the best parameters, 'C': 10 and 'kernel': 'rbf' were selected, meaning the model generalized better with a higher penalty parameter and RBF kernel. The accuracy was already high in the XGBoost and GB algorithms. In both algorithms, the model was optimized with 'learning_rate': 0.2 and 'max_depth' as 7 and 5, respectively.

5.2. Diabetes (Diyabet)

While all models achieved good accuracy after tuning, the results in Table 3 provide insights into model-specific behavior. The KNN model showed the most significant improvement, with test accuracy increasing from 82.1% to 86.3%, a gain of 4.2 percentage points. The Logistic Regression (LR) model saw a slight improvement, whereas the Random Forest (RF) model experienced a minor decline, with accuracy dropping from 83.7% to 83.5%. Surprisingly, the XGBoost model deteriorated, with test accuracy decreasing from 84.2% to 82.3%. The SVM model remained unchanged, and the Gradient Boosting (GB) model showed a slight decline in performance.

Table 3. Comparison of HPO results on diabetes. (HPO'lu ve HPO'suz diyabette doğruluk sonuçlarının karşılaştırılması.)

Model	Before HPO	After HPO	Best Parameters
LR	79.47%	80.26%	'C': 0.1, 'penalty': 'l2', 'solver': 'liblinear'
KNN	82.10%	86.32%	'metric': 'manhattan', 'n_neighbors': 2, 'weights': 'distance'
RF	83.68%	83.53%	'bootstrap': False, 'max_depth': 60, 'min_samples_leaf': 1, 'min_samples_split': 2, 'n_estimators': 200
SVM	83.16%	83.16%	'C': 1, 'kernel': 'rbf'
XGBoost	84.21%	82.26%	max_ 'learning_rate': 0.2, 'max_depth': 3, 'n_estimators': 100
GBM	85.26%	85.00%	'learning_rate': 0.1, 'max_depth': 3

Although the LR model improved, its performance gain was not as strong as in other models. The KNN model was successfully optimized, achieving better performance after HPO. However, the choice of a small value ($n_neighbors=2$) may increase the risk of overfitting, so it should be validated on larger datasets. XGBoost and RF unexpectedly performed worse after HPO. The learning rate was increased in XGBoost ($learning_rate=0.2$), yet its performance declined. Similarly, the RF model's performance slightly worsened, likely due to excessive model complexity for the dataset. The SVM model remained unchanged, suggesting that its parameters might have already been optimal.

5.3. Breast Cancer (Meme Kanseri)

HPO demonstrated the performance of six models for breast cancer classification (Table 4). HPO provided performance increase in all models except RF model. It is possible to obtain higher scores by expanding the parameter space of RF model.

However, since the same parameter pool was used for all models in the study, the result remained low. Although XGBoost and Gradient Boosting work with similar parameters, XGBoost gave slightly better results. As a result, the model that achieved the highest accuracy appears to be KNN with 98.42%.

The best parameters for KNN are seen to be "manhattan" distance metric, 6 neighbors and weighted calculation (distance weighting). The effect of HPO on KNN was quite positive (97.37% → 98.42%). For LR, especially the 'C' value of 10 and the selection of 'liblinear' solver may be effective. Using linear kernel and 'C' = 1 in SVM provided stable development. For XGBoost, 'learning_rate = 0.2', 'max_depth= 3' and 'n_estimators=200' trees provided better results. A slight decrease is seen in the RF model after HPO. This situation can be explained by the fact that too much depth ($max_depth = 60$) or other parameters used reduce the generalization ability of the model.

Table 4. Comparison of HPO results on diabetes. (HPO'lu ve HPO'suz meme kanseri doğruluk sonuçlarının karşılaştırılması.)

Model	Before HPO	After HPO	Best Parameters
LR	96.49%	97.54%	'C': 10, 'penalty': 'l2', 'solver': 'liblinear'
KNN	97.37%	98.42%	'metric': 'manhattan', 'n_neighbors': 6, 'weights': 'distance'
RF	97.72%	97.19%	'bootstrap': False, 'max_depth': 60, 'min_samples_leaf': 1, 'min_samples_split': 2, 'n_estimators': 100
SVM	97.37%	97.54%	'C': 1, 'kernel': 'linear'
XGBoost	96.67%	97.10%	'learning_rate': 0.2, 'max_depth': 3, 'n_estimators': 200
GB	96.84%	97.02%	'learning_rate': 0.2, 'max_depth': 3

A small improvement was seen in the GB model. Similar to the XGBoost model, 'max_depth = 3' and 'learning_rate = 0.2' were used, but XGBoost performed slightly better. This suggests that XGBoost may be a more powerful model compared to GB in terms of optimization.

5.4. Parkinson Disease (Parkinson Hastalığı)

HPO results for Parkinson's disease varied significantly between models (Table 5). The accuracy of SVM after HPO increased by 4.83%. C value (10) and RBF kernel may have created more complex distinction surfaces. The accuracy of KNN increased from 88.46% to 90.48% with Manhattan distance, 'n_neighbors= 2' and weighted distance method. The number of small neighbors may have adapted to the data more precisely.

LR was optimized with 'C = 0.1', 'penalty = l2' parameters and solver method 'lbfgs'. 'max_depth= 70', and 'n_estimators= 1000' are aggressive parameters for RF. Although more trees provide better generalization, it can increase the risk of overfitting. Typical powerful settings such as 'learning_rate = 0.1', 'max_depth = 5', 'n_estimators = 600' are used in the XGboost. There was no change in GB (87.03%); 'learning_rate = 0.1' and 'max_depth = 3' can already be optimal.

Since the whole process is performed with 5-fold cross validation, the results can be considered reliable. Models such as SVM and KNN seem to have a significant increase in test accuracy.

Table 5. Comparison of HPO results on Parkinson. (HPO'lu ve HPO'suz Parkinson doğruluk sonuçlarının karşılaştırılması.)

Model	Accuracy Before HPO	Accuracy After HPO (%)	Best Parameters
LR	81.54%	82.92%	'C': 0.1, 'penalty': 'l2', 'solver': 'lbfgs'
KNN	88.46%	90.48%	'metric': 'manhattan', 'n_neighbors': 2, 'weights': 'distance'
RF	86.96%	87.68%	'bootstrap': True, 'max_depth': 70, 'min_samples_leaf': 1, 'min_samples_split': 2, 'n_estimators': 1000
SVM	86.34%	91.17%	'C': 10, 'kernel': 'rbf'
XGBoost	85.63%	86.32%	'learning_rate': 0.1, 'max_depth': 5, 'n_estimators': 600
GB	87.03%	87.03%	'learning_rate': 0.1, 'max_depth': 3

6. RESULTS AND DISCUSSIONS (BULGULAR VE TARTIŞMA)

This study evaluated how hyperparameter optimization affects the performance of different machine learning algorithms for the classification of heart disease, diabetes, breast cancer and

Parkinson's disease. The models used were LR, KNN, RF, SVM, XGBoost and Gradient Boosting algorithms. Models were trained using 5-fold cross-validation (k-fold cross-validation) and hyperparameter optimization (HPO) was performed with GridSearch method.

Table 6. Comparison of performance impact of HPO on all datasets. (HPO'nun tüm veri setlerindeki performans karşılaştırması.)

	Model	Accuracy		Precision		Recall		F1-Score	
		Before HPO	After HPO	Before HPO	After HPO	Before HPO	After HPO	Before HPO	After HPO
Heart Disease	LR	83.63	84.91	83.73	85.11	83.63	84.91	83.62	84.89
	KNN	85.43	99.49	85.81	99.50	85.43	99.49	85.38	99.49
	RF	99.23	99.23	99.25	99.24	99.23	99.23	99.23	99.23
	SVM	92.07	97.32	92.21	97.39	92.07	97.32	92.07	97.32
	XGBoost	99.11	99.23	99.11	99.24	99.11	99.23	99.11	99.23
	GB	97.44	98.59	97.48	98.61	97.44	98.59	97.44	98.59
Diabetes	LR	79.47	80.26	80.16	80.82	79.47	80.26	79.35	80.16
	KNN	82.11	86.32	82.70	87.76	82.11	86.32	82.02	86.16
	RF	83.68	85.53	84.36	86.19	83.68	85.53	83.60	85.47
	SVM	83.16	83.16	83.47	83.47	83.16	83.16	83.11	83.11
	XGBoost	84.21	85.26	84.67	85.73	84.21	85.26	84.15	85.21
	GB	85.26	85.00	85.82	85.56	85.26	85.00	85.21	84.94
Breast Cancer	LR	97.54	97.37	98.57	98.22	96.49	96.49	97.51	97.35
	KNN	96.32	97.02	97.19	95.92	95.44	98.25	96.26	97.05
	RF	97.54	97.02	97.91	97.25	97.19	96.84	97.54	97.02
	SVM	96.67	1.83	2.83	3.83	4.83	5.83	6.83	7.83
	XGBoost	96.84	96.84	96.53	96.86	97.19	96.84	96.85	96.84
	GB	96.84	97.02	97.20	97.57	96.49	96.49	96.82	97.00
Parkinson	LR	81.54	82.92	82.27	83.67	81.54	82.92	81.41	82.80
	KNN	88.46	90.48	88.63	90.70	88.46	90.48	88.44	90.47
	RF	86.97	87.68	87.26	87.76	86.97	87.68	86.94	87.68
	SVM	86.34	91.17	86.64	91.29	86.34	91.17	86.31	91.17
	XGBoost	85.63	86.32	86.45	86.94	85.63	86.32	85.47	86.17
	GB	87.03	87.03	87.57	87.57	87.03	87.03	86.95	86.95

The findings of this study have revealed the effectiveness of disease classification models. However, the generalizability of the study can be increased by using larger and more balanced data sets. In the future, model performance can be further improved by applying different feature selection methods. In addition, deep learning approaches can be effective in classifying complex and observational data, especially Parkinson's. General models can be developed for different diseases using transfer learning methods. Finally, before moving on to clinical applications, the modeled systems should be tested with real hospital data and their real-time performance should be analyzed.

ACKNOWLEDGMENTS (TEŞEKKÜR)

This study is supported by Karabük University Scientific Research Projects Coordinatorship with project number KBÜBAP-24-YL-065.

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)

Mariam KİLİ BECHİR: She conducted the experiments and contributed the writing process.

Deneyleri yaptı ve yazım sürecine katkıda bulundu.

Ferhat ATASOY: He analyzed the results and performed the writing process.

Deney sonuçlarını analiz etti 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] N. AYDIN ATASOY and F. ÇAKMAK, “Web Tabanlı Sürücü Davranışları Analiz Uygulaması,” *Gazi Journal of Engineering Sciences*, vol. 7, no. 3, pp. 264–276, Dec. 2021, doi: 10.30855/gmbd.2021.03.09.
- [2] E. DİKBIYIK, Ö. DEMİR, and B. DOĞAN, “Derin Öğrenme Yöntemleri İle Konuşmadan Duygu Tanıma Üzerine Bir Literatür Araştırması,” *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, vol. 10, no. 4, pp. 765–791, Dec. 2022, doi: 10.29109/gujsc.1111884.
- [3] Ö. TONKAL and H. POLAT, “Traffic Classification and Comparative Analysis with Machine Learning Algorithms in Software Defined Networks,” *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, vol. 9, no. 1, pp. 71–83, Mar. 2021, doi: 10.29109/gujsc.869418.
- [4] M. B. ER, “Akciğer Seslerinin Derin Öğrenme İle Sınıflandırılması,” *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, vol. 8, no. 4, pp. 830–844, Dec. 2020, doi: 10.29109/gujsc.758325.
- [5] R. Alanazi, “Identification and Prediction of Chronic Diseases Using Machine Learning Approach,” *J Healthc Eng*, vol. 2022, 2022, doi: 10.1155/2022/2826127.
- [6] I. D. Mienye, Y. Sun, and Z. Wang, “An improved ensemble learning approach for the prediction of heart disease risk,” *Inform Med Unlocked*, vol. 20, Jan. 2020, doi: 10.1016/j.imu.2020.100402.
- [7] S. Dhabarde, R. Mahajan, S. Mishra, S. Chaudhari, S. Manelu, and N. S. Shelke, “DISEASE PREDICTION USING MACHINE LEARNING ALGORITHMS”, [Online]. Available: www.irjmets.com
- [8] S. Vilas and A. M. S. Scholar, “Diseases Prediction Model using Machine Learning Technique”, doi: 10.32628/IJSRST.
- [9] A. Mujumdar and V. Vaidehi, “Diabetes Prediction using Machine Learning Algorithms,” in *Procedia Computer Science*, Elsevier B.V., 2019, pp. 292–299. doi: 10.1016/j.procs.2020.01.047.
- [10] T. H. H. Aldhyani, A. S. Alshebami, and M. Y. Alzahrani, “Soft Clustering for Enhancing the Diagnosis of Chronic Diseases over Machine Learning Algorithms,” *J Healthc Eng*, vol. 2020, 2020, doi: 10.1155/2020/4984967.
- [11] S. F. Weng, J. Repts, J. Kai, J. M. Garibaldi, and N. Qureshi, “Can Machine-learning improve cardiovascular risk prediction using routine clinical data?,” *PLoS One*, vol. 12, no. 4, Apr. 2017, doi: 10.1371/JOURNAL.PONE.0174944.
- [12] S. Nusinovici et al., “Logistic regression was as good as machine learning for predicting major chronic diseases,” *J Clin Epidemiol*, vol. 122, pp. 56–69, Jun. 2020, doi: 10.1016/J.JCLINEPI.2020.03.002.
- [13] J. Al Nahian, A. K. M. Masum, S. Abujar, and M. J. Mia, “Common human diseases prediction using machine learning based on survey data,” *Bulletin of Electrical Engineering and Informatics*, vol. 11, no. 6, pp. 3498–3508, Dec. 2022, doi: 10.11591/eei.v11i6.3405.
- [14] N. Aydin Atasoy and A. Faris Abdulla Al Rahhawi, “Examining the classification performance of pre-trained capsule networks on imbalanced bone marrow cell dataset,” *International Journal of Imaging Systems and Technology*, vol. 34, no. 3, May 2024, doi: 10.1002/ima.23067.
- [15] J. Bergstra, J. B. Ca, and Y. B. Ca, “Random Search for Hyper-Parameter Optimization Yoshua Bengio,” 2012. [Online]. Available: <http://scikit-learn.sourceforge.net>.
- [16] M. Claesens and B. De Moor, “Hyperparameter Search in Machine Learning,” Feb. 2015, [Online]. Available: <http://arxiv.org/abs/1502.02127>
- [17] Y. A. Ali, E. M. Awwad, M. Al-Razgan, and A. Maarouf, “Hyperparameter Search for Machine Learning Algorithms for Optimizing the Computational Complexity,” *Processes*, vol. 11, no. 2, Feb. 2023, doi: 10.3390/pr11020349.
- [18] A. E. W. Johnson et al., “MIMIC-III, a freely accessible critical care database,” *Sci Data*, vol. 3, May 2016, doi: 10.1038/sdata.2016.35.
- [19] J. Snoek, H. Larochelle, and R. P. Adams, “Practical Bayesian Optimization of Machine Learning Algorithms.”
- [20] N. V Chawla, K. W. Bowyer, L. O. Hall, and W. P. Kegelmeyer, “SMOTE: Synthetic Minority Over-sampling Technique,” 2002.
- [21] M. ÇOLAK, T. TÜMER SİVRİ, N. PERVAN AKMAN, A. BERKOL, and Y.

- EKİCİ, “Disease prognosis using machine learning algorithms based on new clinical dataset,” Communications Faculty of Sciences University of Ankara Series A2-A3 Physical Sciences and Engineering, vol. 65, no. 1, pp. 52–68, Jun. 2023, doi: 10.33769/aupse.1215962.
- [22] F. A. Latifah, I. Slamet, and Sugiyanto, “Comparison of heart disease classification with logistic regression algorithm and random forest algorithm,” AIP Conf Proc, vol. 2296, Nov. 2020, doi: 10.1063/5.0030579.
- [23] R. Valarmathi and T. Sheela, “Heart disease prediction using hyper parameter optimization (HPO) tuning,” Biomed Signal Process Control, vol. 70, p. 103033, Sep. 2021, doi: 10.1016/J.BSPC.2021.103033.
- [24] M. Feurer and F. Hutter, “Hyperparameter Optimization,” in Automated Machine Learning, 2019, pp. 3–33. doi: 10.1007/978-3-030-05318-5_1.
- [25] B. Bischl, J. Richter, J. Bossek, D. Horn, J. Thomas, and M. Lang, “mlrMBO: A Modular Framework for Model-Based Optimization of Expensive Black-Box Functions,” Mar. 2017, [Online]. Available: <http://arxiv.org/abs/1703.03373>
- [26] G. Luo, “A review of automatic selection methods for machine learning algorithms and hyper-parameter values,” Network Modeling Analysis in Health Informatics and Bioinformatics, vol. 5, no. 1, Dec. 2016, doi: 10.1007/s13721-016-0125-6.
- [27] P. Probst and B. Bischl, “Tunability: Importance of Hyperparameters of Machine Learning Algorithms,” 2019. [Online]. Available: <http://jmlr.org/papers/v20/18-444.html>.
- [28] L. Yang and A. Shami, “On hyperparameter optimization of machine learning algorithms: Theory and practice,” Neurocomputing, vol. 415, pp. 295–316, Nov. 2020, doi: 10.1016/j.neucom.2020.07.061.
- [29] D. J. Hand, “Measuring classifier performance: A coherent alternative to the area under the ROC curve,” Mach Learn, vol. 77, no. 1, pp. 103–123, Oct. 2009, doi: 10.1007/s10994-009-5119-5.
- [30] T. Hastie, R. Tibshirani, and J. Friedman, “Springer Series in Statistics The Elements of Statistical Learning Data Mining, Inference, and Prediction.”
- [31] A. Y. Ng, “Feature selection, L 1 vs. L 2 regularization, and rotational invariance,” in Twenty-first international conference on Machine learning - ICML '04, New York, New York, USA: ACM Press, 2004, p. 78. doi: 10.1145/1015330.1015435.
- [32] H. Zou and T. Hastie, “Regularization and variable selection via the elastic net,” J R Stat Soc Series B Stat Methodol, vol. 67, no. 2, pp. 301–320, 2005, doi: 10.1111/j.1467-9868.2005.00503.x.
- [33] F. Pedregosa FABIANPEDREGOSA et al., “Scikit-learn: Machine Learning in Python Gaël Varoquaux Bertrand Thirion Vincent Dubourg Alexandre Passos PEDREGOSA, VAROQUAUX, GRAMFORT ET AL. Matthieu Perrot,” 2011. [Online]. Available: <http://scikit-learn.sourceforge.net>.
- [34] G. C. Cawley and N. L. C. Talbot, “On Over-fitting in Model Selection and Subsequent Selection Bias in Performance Evaluation,” 2010.
- [35] I. Goodfellow, Y. Bengio, and A. Courville, Deep Learning. MIT Press, 2016.
- [36] L. Breiman, “Random Forests,” in Machine Learning, vol. 45, 2001, pp. 5–32. doi: 10.1023/A:1010933404324.
- [37] P. Probst, M. N. Wright, and A. L. Boulesteix, “Hyperparameters and tuning strategies for random forest,” in Wiley Interdisciplinary Reviews: Data Mining and Knowledge Discovery, vol. 9, no. 3, Wiley-Blackwell, 2019. doi: 10.1002/widm.1301.
- [38] T. M. Oshiro, P. S. Perez, and J. A. Baranauskas, “How Many Trees in a Random Forest?,” 2012, pp. 154–168. doi: 10.1007/978-3-642-31537-4_13.
- [39] G. Biau and E. Scornet, “A random forest guided tour,” Test, vol. 25, no. 2, pp. 197–227, Jun. 2016, doi: 10.1007/s11749-016-0481-7.
- [40] G. Louppe, “Understanding Random Forests: From Theory to Practice,” Jul. 2014, [Online]. Available: <http://arxiv.org/abs/1407.7502>
- [41] C. Cortes, V. Vapnik, and L. Saitta, “Support-Vector Networks Editor,” Kluwer Academic Publishers, 1995.
- [42] B. Schölkopf and A. J. Smola, “Kernel Methods,” in Learning with Kernels: Support Vector Machines, Regularization, Optimization, and Beyond, 2001, pp. 405–406.
- [43] C.-C. Chang and C.-J. Lin, “LIBSVM: A Library for Support Vector Machines,” 2001. [Online]. Available: www.csie.ntu.edu.tw/
- [44] M. M. Deza and E. Deza, Encyclopedia of distances. Springer Berlin Heidelberg, 2009. doi: 10.1007/978-3-642-00234-2.
- [45] S. A. Dudani, “The Distance-Weighted k-Nearest-Neighbor Rule,” IEEE Trans Syst Man Cybern, vol. SMC-6, no. 4, pp. 325–327, 1976, doi: 10.1109/TSMC.1976.5408784.

- [46] R. J. Samworth, "Optimal weighted nearest neighbour classifiers," *Ann Stat*, vol. 40, no. 5, pp. 2733–2763, Oct. 2012, doi: 10.1214/12-AOS1049.
- [47] J. H. Friedman, "Stochastic gradient boosting," 2002. [Online]. Available: www.elsevier.com/locate/csda
- [48] T. Chen and C. Guestrin, "XGBoost: A scalable tree boosting system," in *Proceedings of the ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*, Association for Computing Machinery, Aug. 2016, pp. 785–794. doi: 10.1145/2939672.2939785.
- [49] T. Chen and T. He, "xgboost: eXtreme Gradient Boosting," in *R Package*, 2024.
- [50] A. Natekin and A. Knoll, "Gradient boosting machines, a tutorial," *Front Neurobot*, vol. 7, no. DEC, 2013, doi: 10.3389/fnbot.2013.00021.
- [51] P. N. Astya, Galgotias University. School of Computing Science and Engineering, Institute of Electrical and Electronics Engineers. Uttar Pradesh Section, Institute of Electrical and Electronics Engineers. Uttar Pradesh Section. SP/C Joint Chapter, and Institute of Electrical and Electronics Engineers, Proceeding, International Conference on Computing, Communication and Automation (ICCCA 2016): 29-30 April, 2016.
- [52] S. F. Weng, J. Reys, J. Kai, J. M. Garibaldi, and N. Qureshi, "Can Machine-learning improve cardiovascular risk prediction using routine clinical data?," *PLoS One*, vol. 12, no. 4, Apr. 2017, doi: 10.1371/JOURNAL.PONE.0174944.
- [53] S. Nusinovici et al., "Logistic regression was as good as machine learning for predicting major chronic diseases," *J Clin Epidemiol*, vol. 122, pp. 56–69, Jun. 2020, doi: 10.1016/J.JCLINEPI.2020.03.002.
- [54] W. Wang, J. Lee, F. Harrou, and Y. Sun, "Early Detection of Parkinson's Disease Using Deep Learning and Machine Learning," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 147635–147646, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3016062.
- [55] E. Kabir Hashi and M. Shahid Uz Zaman, "Developing a Hyperparameter Tuning Based Machine Learning Approach of Heart Disease Prediction," *Journal of Applied Science & Process Engineering*, vol. 7, no. 2, 2020.
- [56] D. Hamid, S. S. Ullah, J. Iqbal, S. Hussain, C. A. U. Hassan, and F. Umar, "A Machine Learning in Binary and Multiclassification Results on Imbalanced Heart Disease Data Stream," *J Sens*, vol. 2022, 2022, doi: 10.1155/2022/8400622.
- [57] M. Wang, Z. Wei, M. Jia, L. Chen, and H. Ji, "Deep learning model for multi-classification of infectious diseases from unstructured electronic medical records," *BMC Med Inform Decis Mak*, vol. 22, no. 1, Dec. 2022, doi: 10.1186/s12911-022-01776-y.
- [58] C. Leys, C. Ley, O. Klein, P. Bernard, and L. Licata, "Detecting outliers: Do not use standard deviation around the mean, use absolute deviation around the median," *J Exp Soc Psychol*, vol. 49, no. 4, pp. 764–766, Jul. 2013, doi: 10.1016/j.jesp.2013.03.013.
- [59] A. Geron, *Hands-On Machine Learning with Scikit-Learn, Keras, and TensorFlow: Concepts, Tools, and Techniques to Build Intelligent Systems*, 2nd ed. O'Reilly Media, Inc., 2019.
- [60] P. Refaeilzadeh, L. Tang, and H. Liu, "Cross-Validation," *Encyclopedia of Database Systems*, pp. 532–538, 2009, doi: 10.1007/978-0-387-39940-9_565.
- [61] "View of SMOTE: Synthetic Minority Over-sampling Technique." Accessed: Feb. 05, 2025. [Online]. Available: <https://www.jair.org/index.php/jair/article/view/10302/24590>

Measuring The Effect Of The Use Of Electronic Information System In The Service Industry On The Service Quality with Benchmarking Approach and Its Application In A Resting Facility

Olca Özge ERSÖZ^{1*} , Adnan AKTEPE² , Süleyman ERSÖZ² , Ahmet Kürşad TÜRKER² 

¹ Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu, Ankara, Türkiye

² Kırıkkale Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Kırıkkale, Türkiye

Article Info

Research article
Received: 24/10/2022
Revision: 27/11/2022
Accepted: 29/11/2022

Keywords

Service Quality,
Benchmarking,
Electronic Information
System

Makale Bilgisi

Araştırma Makalesi
Başvuru: 24/10/2022
Düzeltilme: 27/11/2022
Kabul: 29/11/2022

Anahtar Kelimeler

Hizmet Kalitesi,
Benchmarking,
Elektronik Bilgi Sistemi

Graphical/Tabular Abstract (Grafik Özet)

A graph summarization of the methodology of measuring the effect of the electronic information system on the service quality in a resting facility using the benchmarking method is presented in Figure A. / Bir dinlenme tesisinde elektronik bilgi sisteminin hizmet kalitesi üzerindeki etkisini benchmarking yöntemini kullanarak ölçme metodolojisinin grafik özeti Şekil A'da sunulmaktadır.

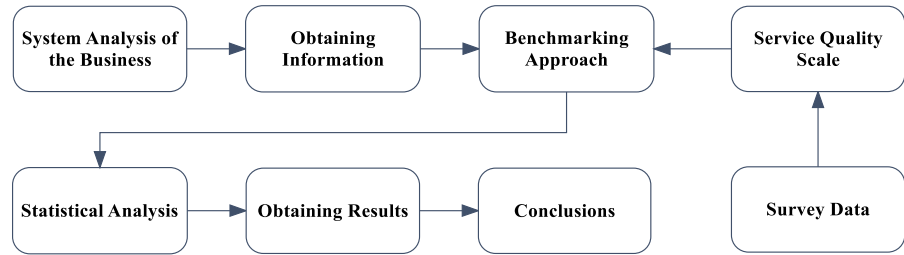


Figure A. The methodology of the study / Şekil A. Çalışmanın metodolojisi

Highlights/(Önemli noktalar)

- ❖ Service Quality measurement in a Resting Facility. / Dinlenme Tesisinde Hizmet Kalitesi ölçümü.
- ❖ Adaptation of information system technology to service quality. / Bilgi sistemi teknolojisinin hizmet kalitesine uyarlanması.
- ❖ Service quality measurement with benchmarking approach. / Benchmarking yaklaşımı ile hizmet kalitesi ölçümü.

Aim (Amaç): The aim is to determine how much the new system reflects or contributes to service quality in the resting facility. / Amaç, yeni sistemin dinlenme tesisindeki hizmet kalitesine ne kadar yansıdığını veya katkı sağladığını tespit etmektir.

Originality (Özgünlük): A service quality measurement model using the benchmarking approach was designed for a resting facility. Company started to receive customers' demands with an electronic information system-based tablet system. / Bir dinlenme tesisi için benchmarking yaklaşımını kullanan bir hizmet kalitesi ölçüm modeli tasarlanmıştır. Şirket, müşterilerin taleplerini elektronik bilgi sistemi tabanlı tablet sistemi ile almaktadır.

Results (Bulgular): Service quality change rate was calculated over 3 different dimensions and the average rate of change for all dimensions was determined as 21.83%. / Hizmet kalitesi değişim oranı 3 farklı boyut üzerinden hesaplanmış ve tüm boyutların ortalama değişim oranı % 21,83 olarak tespit edilmiştir.

Conclusion (Sonuç): The result obtained shows the level of service quality change in customer perception between the classical ticket system and the digital system over the dimensions determined in restaurants, which are a service business. / Elde edilen sonuç, bir hizmet işletmesi olan restoranlarda belirlenen boyutlar üzerinden klasik bilet sistemi ile dijital sistem arasında müşteri algısındaki hizmet kalitesi değişiminin düzeyini göstermektedir.



Hizmet Sektöründe Elektronik Bilgi Sistemi Kullanımının Hizmet Kalitesine Etkisinin Benchmarking Yaklaşımı ile Ölçülmesi ve Bir Dinlenme Tesisinde Uygulaması

Olca Özge ERSÖZ^{1*} , Adnan AKTEPE² , Süleyman ERSÖZ² , Ahmet Kürşad TÜRKER² 

¹ Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu, Ankara, Türkiye

² Kırıkkale Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Kırıkkale, Türkiye

Makale Bilgisi

Araştırma Makalesi
Başvuru: 24/10/2022
Düzeltilme: 27/11/2022
Kabul: 29/11/2022

Anahtar Kelimeler

Hizmet Kalitesi,
Benchmarking,
Elektronik Bilgi Sistemi

Öz

Bilgi sistemi teknolojilerindeki hızlı gelişmeler hizmet işletmelerini de etkilemekte olup her geçen gün yeni rekabet stratejileri ortaya konulmaktadır. Rekabet üstünlüğü sağlamada hizmet kalitesi en önemli parametrelerden birisidir. Hizmet kalitesinin ölçülmesi hizmetlerin özgün karakteristikleri nedeniyle somut ürünlerin (mal) kalitesini ölçmekten daha zor olmaktadır. Hizmet kalitesinin ölçümüne yönelik literatürde pek çok model yer almasına rağmen, hizmet sunumunun klasik ve dijital bir uygulama ile kıyaslamasını içeren çalışmalar çok yaygın değildir. Bu çalışma ile hizmet kalitesindeki değişimin kıyaslama (benchmarking) yaklaşımı ile ölçülmesi amaçlanmaktadır. Bu amaçla tasarlanan model, müşterilerin taleplerini elektronik bilgi sistemi tabanlı tablet sistemi ile almaya başlayan bir hizmet işletmesinin, bu yeni durumun hizmet kalitesine ne kadar yansıdığını öğrenmek istemesi ile ortaya çıkmıştır. İşletmede gerçekleştirilen sistem analizi ile sağlanan verilere dayalı olarak, uygulama bir dinlenme tesisinde gerçekleştirilmiştir. Tesis adisyon sisteminden dijital sisteme yeni geçmiş olup yeni sistemin hizmet kalitesine yansımaları ölçülmeye yönelik bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Hizmet kalitesi değişim oranı 3 farklı boyut üzerinden hesaplanmış ve tüm boyutların ortalama değişim oranı % 21,83 olarak tespit edilmiştir. Elde edilen sonuç bir hizmet işletmesi olan restoranlarda belirlenen boyutlar üzerinden klasik adisyon sistemi ve dijital sistem arasındaki müşteri algısında oluşan hizmet kalitesi değişim düzeyini göstermektedir. Bu çalışmada geliştirilen metod mevcut hizmet kalitesinin değişim düzeyini belirlemek için farklı hizmet işletmelerinde kullanılabilir.

Measuring The Effect Of The Use Of Electronic Information System In The Service Industry On The Service Quality with Benchmarking Approach and Its Application In A Resting Facility

Article Info

Research article
Received: 24/10/2022
Revision: 27/11/2022
Accepted: 29/11/2022

Keywords

Service Quality,
Benchmarking,
Electronic Information
System

Abstract

Rapid developments in information system technologies also affect service businesses, and new competitive strategies are being introduced every day. Service quality is one of the most important parameters in providing a competitive advantage. Measuring service quality is more complicated than measuring the quality of tangible products (goods) due to the unique characteristics of services. Although there are many models in the literature for the measurement of service quality, studies that compare service delivery with a classical and digital application are not very common. With this study, it is aimed to measure the change in service quality with the benchmarking approach. The model designed for this purpose emerged when a service company, which started to receive customers' demands with an electronic information system-based tablet system, wanted to learn how much this new situation reflected on the service quality. Based on the data provided by the system analysis carried out in the enterprise, the application was carried out in a recreational facility. The facility has just switched from the billing system to the digital system, and a study was conducted to measure the reflection of the new system on the service quality. Service quality change rate was calculated over 3 different dimensions and the average rate of change for all dimensions was determined as 21.83%. The result obtained shows the level of service quality change in customer perception between the classical ticket system and the digital system over the dimensions determined in restaurants, which are a service business. The method developed in this study can be used in different service businesses to determine the level of change in current service quality.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

İşletmeler insan ihtiyaçlarını karşılamak üzere mal ve/veya hizmet üretmektedirler. Mal üreten işletmelerin somut çıktıları olması sebebiyle müşterinin tatmini sağlaması noktasında sahip olduğu standartlar ve ölçülebilir değerler mevcuttur. Öte yandan, hizmet çıktılarında benzer standartlar bulunmadığından, müşteri memnuniyeti ölçümü zorlu bir iştir [1]. Hizmet kalitesinin ölçülmesini zorlaştıran çeşitli nedenler vardır; i. Hizmet sistemleri; hizmetin üretilmesi sırasında üretici ve tüketiciyi süreç içinde bir araya getirir, ii. Hizmetler stoklanamaz; önce pazarlanır sonra üretilir, iii. hizmet soyuttur, çıktılar aynı standartlar altında elde edilemez. Hizmet kalitesini sağlamak için algı ve beklenti olmak üzere iki temel kriter vardır. Algı ve beklenti kavramları öznel olması sebebi ile müşteri memnuniyetini sağlamada bir sorundur [2]. Hizmet kalitesini belirlemedeki bir diğer zorluk, sistem sunumundaki belirsizliktir. Üretim ve pazarlamayı yapan kişiler aynı olduğu için çıktılar kontrol edilemez. Genellikle dağıtım sistemi, üretici ve satıcının aynı olduğu bir oluşumdur [3][4]. Hizmet kalitesinin ölçülmesi, hizmet kalitesinin iyileştirilmesi ve geliştirilmesinin ilk aşamasını oluşturmaktadır. Hizmet sistemlerinde kalite kontrol, fiziksel çevre, yeterli malzeme, ekipman ve diğer somut ve soyut özelliklerle ilgilidir [5]. Teknoloji, hizmet sektöründe kolaylık, hız, düşük maliyet, konfor, özellikle müşteri memnuniyeti sağlamaktadır. Hizmet kalitesinin artırılması da büyük ölçüde dijital dünyaya ayak uydurmakla mümkündür. Bu nedenle hizmet kalitesi ve hizmet performansı işletmeler tarafından sürekli ve düzenli olarak ölçülmeli ve değerlendirilmelidir [6]. Hizmet kalitesinin ölçülmesinde kıyaslama tekniği literatürdeki birçok teknikten biridir [7]. Bununla birlikte, literatürde kıyaslama ile çözülen nicel uygulamaların nadir olduğu görülmektedir.

Bu çalışma, bir ay öncesine kadar siparişlerin garsonlar tarafından adisyon sistemi ile alınıp mutfak ve kasaya iletildiği, şu anda ise dijitalleşmeye ayak uydurarak siparişlerin tablet bilgisayar ile alınıp mutfak ve kasaya eşzamanlı iletildiği bir dinlenme tesisinde gerçekleştirilmiştir. Amaç yeni sistemin hizmet kalitesine ne kadar yansıdığı veya katkı verdiğinin tespit edilmesidir. Bu amaca hizmet etmek üzere yeniliğin kıyaslanabileceği noktalar tespit edilerek bir benchmarking modeli kurulmuş olup bunu sorgulamak ve veri toplamak için de bir anket ölçeği geliştirilmiştir. Sonraki adımlarda, elde edilen veriler istatistiksel analizlerle test edilmiştir. Test sürecinin ardından, tasarlanan benchmarking

modeli ile sonuçlar elde edilmiş ve elde edilen sonuçlar yorumlanmıştır.

2. BİLİMSEL YAZIN TARAMASI (SCIENTIFIC LITERATURE REVIEW)

Kalite, bir ihtiyaca cevap verebilecek bir ürün elde etmekle birlikte bir yaşam biçimidir. Kalite aynı zamanda işletmelerde kurumsallaşmayı destekleyen ve sosyal sorumluluk bilincine katkı sağlayan bir kavramdır [8]. Hizmetlerin niteliklerini deneyime göre sıralamak ve düzenlemek zordur. Hizmetler, hizmeti sunan personelin yetkinliği ve bilgisi ile yakından ilgilidir ve hizmetin sunulduğu bireyler arasındaki farklılıklar standart bir hizmet sunmayı zorlaştırmaktadır [9]. Hizmet kalitesini iyi bir düzeyde sağlamada önemli olan kalitenin üretici veya satıcı tarafından değil, tüketici tarafından belirlenmesi veya tanımlanmasıdır. Tasarımcının sunduğu çok şık bir elbise ya da çok özenle tasarlanmış bir saç modeli hizmeti alan kişi tarafından beğenilmedikçe hizmet kalitesi yeterli olmayacaktır. Önemli olan tüketicinin memnuniyeti ve hizmet hakkında ne düşündüğüdür [10]. Hizmet kalitesi ölçümü, müşteri beklentileri ile gerçek hizmet performansı karşılaştırılarak elde edilir [11][12]. Müşteri beklentileri; müşterilerin mal veya hizmet deneyimlerini, diğer müşterilerden gelen izlenimleri, mal veya hizmetlerle ilgili reklamları veya kampanyaları şekillendirir. Algılanan kalite, mal veya hizmet satın aldıktan sonra müşteri memnuniyeti ve sadakat düzeyinin sorgulanma derecesidir [13].

Hizmetler, müşteri beklentilerini karşılamak için soyut, heterojen, aynı anda üretilen ve tüketilen ürünlerdir. Hizmeti, psikolojik fayda oluşturan zaman, mekân, şekil, mülkiyet faydası ve ekonomik faaliyetler olarak da tanımlamak mümkündür. [14]. Hizmet kalitesi, hizmet işletmelerinde müşteri ile kuruluş arasında yaşanan ve karşılaşma veya canlı performans anında ortaya çıkan bir değerdir. Hizmetin sunumunda bu değer artırılması, esas olarak müşteri ile hizmet sağlayıcı arasındaki iletişime bağlıdır [15][16]. Çalışma bir hizmet işletmesinde klasik ve dijital bir uygulamaların hizmet kalitesine etkisinin Benchmarking yöntemi ile kıyaslanmasını hedeflemektedir. Bu nedenle çalışma kapsamında hizmet kalitesi ölçüm modelleri detaylı olarak incelenmiştir.

Kalite genellikle iki farklı şekilde ifade edilmektedir. Birincisi standartların yerine getirilmesine karşılık gelen kalitedir. İkincisi ise müşteri beklentilerinin karşılanmasını ifade eden algılanan kalitedir. Algılanan kalite etkililik ve verimliliğin sağlanmasında müşterinin satın almaya

yönelik değerlendirmelerinin iyileşmesi ve satın alma istekliliğinin artmasında stratejik bir faktördür. [1][17]. Parasuruman vd. [3] tarafından geliştirilen modelde, "Hizmet Kalitesi = Algılanan Kalite – Beklenen Kalite" olarak yapılandırılmış ve hizmet sunumundan sonraki kalite algısından hizmet verilmeden önceki beklentiler çıkarılarak elde edilmiştir. Bu bağlamda zamanla algı ve beklenen değerlerde meydana gelen değişimler hizmet kalitesinin değerini de değiştirecektir [3]. Bu modele SERVQUAL adı verilir. Literatürde hizmet kalitesi ölçümü için SERVQUAL modelinin kullanıldığı birçok çalışma bulunmaktadır. Başka bir hizmet kalitesi yaklaşımı olan SERVPERF, hizmet kalitesinin ölçülmesinde tüketici algısı ve beklentisi arasındaki farklılıkları kullanmak yerine performansa dayalı bir ölçüm benimsenmiştir [19][20]. Cronin ve Taylor'a [18] göre hizmet kalitesi, müşterinin hizmet sunumunun "anların gerçeği" içinde değerlendirdiği bir algıdır. Ancak tüketici memnuniyeti, süreci kapsayan ve doğal bir deneyim oluşturan genel bir kavramdır [20]. SERVPERF modelinde başarı, tüketicinin algısına dayalıdır [21]. Grönroos modelinde ise hizmet kalitesinin teknik, işlevsel ve imaj boyutları olmak üzere üç biçimde değerlendirilmesi önerilmektedir [6]. Teknik kalite, hizmet sunumu sürecinde işletme ile tüketici arasındaki etkileşimler sonucunda tüketici tarafından alınan değerler olarak tanımlanmaktadır [15]. Fonksiyonel kalite, müşterinin aldığı hizmetle değil, sunum sürecinin performansı ve başarısı ile ilgilenir [22]. Diğer bir deyişle, teknik kalite, tüketicinin hizmet olarak aldığı şeydir. İşlevsel kalite, sürecin nasıl algılandığının ölçüsüdür. İşlevsel kalite, teknik kalite kadar nesnel olarak değerlendirilemez [6]. Hizmet kalitesini ölçmek için kullanılan çeşitli teknikler vardır. Bu modeller şu şekildedir [16]:

- SERVQUAL Hizmet Kalitesi Ölçüm Modeli [3][23],
- SERVPERF Hizmet Performansı Ölçüm Modeli [8],
- HEDQUAL Modeli [24],
- ES-Qual Modeli [4],
- Grönroos Hizmet Kalitesi Ölçüm Modeli [6],
- Kıyaslama Yöntemi,
- Kritik Olaylar Yöntemi,
- Servis Barometresi,
- İstatistiksel Yöntemler,
- Grup Mülakat Yöntemi,
- Toplam Kalite İndeksi Yöntemi.

3. YÖNTEM (METHOD)

Kıyaslama, müşteri memnuniyetini sağlamak ve iş performansını geliştirmek için bilinenleri kullanır. Öğrenme ve gelişmenin sürekli süreçler olduğunu kabul etmek ve sektör ayrımı yapmadan işletmeleri diğer işletmelerle karşılaştırmak süreçlerin ve/veya çıktıların en iyi uygulamalarını kullanmaktır. Kıyaslama uygulamalarının işletmelerin koşullarına, amaçlarına ve kültürüne uyarlanması esastır. Bu karşılaştırma sayesinde sürekli iyileştirme sağlanmakta, süreçler, ürün kalitesi ve performans iyileştirilmekte ve çalışanlar motive edilmektedir [25]. Kıyaslama uygulamasına başlamadan önce uygulanacak kıyaslama türüne karar vermek gerekir. Odaklanılan noktaya göre kıyaslama; ürün odaklı, süreç odaklı ve stratejik olarak üç grup altında incelenebilir [26]. Seçilen ortağa göre kıyaslama ise içsel, rekabetçi ve işlevsel olmak üzere üç grupta ele alınabilir [14]. Çalışmada içsel ve süreç odaklı kıyaslama türleri kullanılmıştır.

Benchmarking metodu ile hizmet kalitesindeki değişimi ölçerken, iki farklı durumun nitel ve nicel kriterlerini karşılaştırmak için yukarıda tanımlanan kıyaslama türlerinden bir veya birden fazlasının seçilmesi gerekmektedir. Eski bir hizmetin yeni sunulan bir hizmetle karşılaştırılması veya eski bir sürecin yeni bir süreçle karşılaştırılması veya yılın ilk üç ayının yılın ikinci üç ayı ile karşılaştırılması, değişimin ölçülmesine örnek olarak verilebilir. Bu kapsamda kıyaslama türlerine göre kombinasyonlar artırılabilir ve bazı örnek kombinasyonlar aşağıda verilmiştir:

- Ürünler veya süreçler için farklılaştırılmış durumların önceki durumlarla karşılaştırılması,
- Farklı işletmelerin hizmetlerinin karşılaştırmaları,
- Aynı işletmede hizmetlerin eski ve yeni dönemdeki durumları,
- Aynı işletmenin farklı hizmet tesislerinin olduğu durumlar.

Bu çalışmada kullanılan kıyaslama modeli, organizasyon içindeki operasyonlar ve süreçler arasında karşılaştırmalar yapan dâhili süreç odaklı bir kıyaslamayı içermektedir. İşletmenin iç süreçleri karşılaştırılarak hangi süreçlerin hizmet kalitesine daha fazla katkı sağladığı belirlenmiştir.

Tasarlanan Benchmarking modeli, farklı durumlar için müşteri algılarını belirlemeyi amaçlamaktadır. Bu amaçla yaş, cinsiyet, eğitim, meslek, hizmet alma sıklığı gibi demografik bilgileri içeren bir anket geliştirilmiştir. İki farklı durumda müşteri

algılarını belirlemek için kullanılan ankette üç farklı boyutta tanımlanmış 14 soru bulunmaktadır.

Bu çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur. Geliştirilen anket için Kırıkkale Üniversitesi Sosyal ve Beşeri Bilimler Araştırmaları Etik Kurulundan onay alınmıştır.

Katılımcılardan farklı durumlar için 1 ile 5 arasında puan vermeleri istenmiştir. Anketlerin uygulamasını takiben anket sonuçlarının istatistiksel analizleri yapılarak uygunluk testleri ve çapraz karşılaştırmaları yapılmıştır. İstatistiksel analizleri takiben değişimin anlamlılığını değerlendirmek üzere değişim puanları hesaplanmıştır. Çalışmada boyut bazlı değişim puanı ve tüm soruların değişiminin toplandığı toplam değişim oranı elde edilmiştir. Toplam Değişim Oranı (TDO) hesaplamak için geliştirilen hesaplama sistemi Eşitlik (1)-(4) ile aşağıda ifade edilmektedir.

$$D_{ij} = \sum_{i=1}^n (S_{ij} - SS_{ij}) / n \quad (1)$$

$$DO_j = \sum_{i=1}^3 \sum_{i=1}^{m_j} D_{ij} / m_j \quad (2)$$

$$DOR_j = DO_j / 4 \quad (3)$$

$$ODO = \sum_{j=1}^3 (DOR_j) / 3 \quad (4)$$

S_{ij}: j. boyutta ilk duruma yönelik i. soru cevabı

SS_{ij}: j. boyutta ikinci duruma yönelik i'inci soru cevabı

D_{ij}: j. boyutta i. soru için değişim büyüklüğü (İlk durum ile ikinci durumun farkı)

DO_j: Değişimin j. boyut için ortalaması

DOR_j: Boyut değişim oranı (%) (Formülde kullanılan 4 değeri maksimum değişim değeridir. Anket soruları ölçeği 1-5 arasında olduğu için maksimum değişim değeri aradaki fark olarak ifade edilmektedir).

ODO: Ortalama Değişim Oranı (%)

n: Anket sayısı

m_j: j. boyuttaki soru sayısı

Değişim sonucun pozitif çıkması anketlerde sorulan ilk durumun lehinde hizmet kalitesini olumlu etkilediği, değişim sonucunun negatif çıkması ise ikinci durumun lehinde değişimin hizmet kalitesine olumlu etkilediğinin göstergesidir. Mukayesenin olası alternatifleri Tablo 1'de gösterildiği gibidir.

Tablo 1. Mukayesenin Olası Alternatifleri (Possible Alternatives to Comparison)

İlk Durum > İkinci durum	Değişim puanı pozitif	İlk Durum olumlu, İkinci durum olumsuz
İlk Durum < İkinci durum	Değişim puanı Negatif	İlk Durum olumsuz, İkinci durum olumlu

Boyutlardaki değişim oranları ve toplam değişim oranı Eşitlik (5)-(8) ile gösterilmektedir.

$$DO_1 = (D_{11} + D_{12} + D_{13} + D_{14}) / 4 \quad (5)$$

$$DO_2 = (D_{21} + D_{22} + D_{23} + D_{24} + D_{25}) / 5 \quad (6)$$

$$DO_3 = (D_{31} + D_{32} + D_{33} + D_{34} + D_{35}) / 5 \quad (7)$$

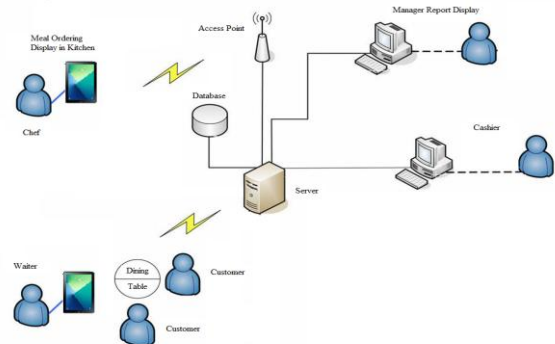
$$\text{Ort. Değişim Oranı} = (DO_1 + DO_2 + DO_3) / 3 \quad (8)$$

Değişim oranları Tablo 2'de gösterilmiştir.

Tablo 2. Kıyaslamada Hizmet Kalitesi Değişim Ölçeği (Service Quality Scale in Benchmarking)

İlk ve Son Durum Karşılaştırması	
%0-%15	Normal Değişim
%15-%30	Orta Derecede Değişim
%30-%50	Yüksek Derecede Değişim
%50-%100	Çok Yüksek Derecede Değişim

Şekil 1, e-restoran sisteminin mimari çerçevesine genel bir bakışı göstermektedir. Garson, yemek masasında müşteriye sipariş vermek için tablet bilgisayarı kullanır. Şefler, mutfakta yemek siparişi ekranında gösterilen mesajdan yemeği hazırlar. Ayrıca restoran yöneticisi, mevcut envanter, satış kayıtları, personel bilgileri vb. istatistiklerini görüntülemek için sistemi kullanabilir. Son olarak da yemek bittikten sonra kasiyer faturaları keser [27].

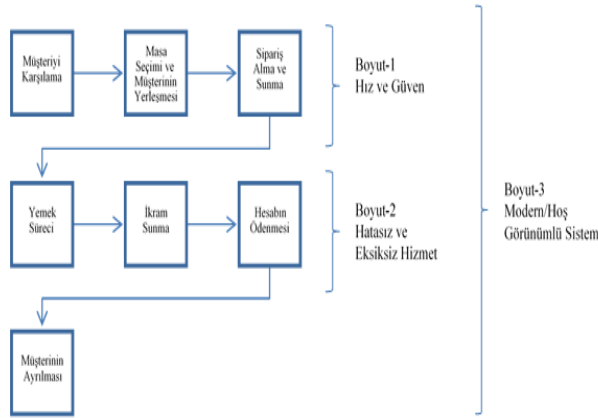


Şekil 1. E-Restoran Sisteminin Çerçevesi (Framework of the E-Restaurant System)

E-restoran sisteminde yazılım yapısı iki birimden oluşmaktadır. Bunlardan biri, tablet bilgisayar ile kablosuz yemek siparişi alt sisteminden oluşan yemek masası servis ünitesidir. Diğeri ise sunucu üzerine kurulmuş olan ve mutfaktaki yemek siparişi görüntüleme alt sistemi tarafından da erişilebilen arka uç veri tabanıdır [28].

4. BULGULAR (RESULTS)

Müşteri algılarını ölçmeye yönelik olarak geliştirilen ankette 3 boyutta 14 soru yer almaktadır. Ölçek skalası 1-5 arasında olup 1 en olumsuz, 5 en olumluyu ifade etmektedir. Süreç odaklı boyutların oluşturulması Şekil 2'de gösterilmektedir.



Şekil 2. Boyutların Süreç Odaklı Tanımı-Ön Oda Süreçleri (Process Oriented Definition of Dimensions-Anterior Room Processes)

Modelde kullanılan boyutlara ilişkin sorular Tablo 3'te gösterildiği gibidir.

Dinlenme tesisinde tasarlanan bu yapıda, 2 farklı durumun hizmet kalitesine yansımalarının ölçümü yapılmıştır. Farklı durumlardan ilki müşterilerin taleplerinin adisyon fişi ile alınmasıdır. İkinci durum ise müşteri taleplerinin tablet bilgisayar sistemi ile alınmasıdır. Diğer bir ifadeyle dijital ortam olarak ifade ettiğimiz bu yapıda siparişler tabletlere alınmakta olup anlık olarak siparişler mutfakta ve kasada görüntülenebilmektedir.

Tablo 3. Benchmarking Modeline Ait Boyutlar ve Sorular (Dimensions and Questions of the Benchmarking Model)

Boyut 1: Hız ve Güven	
1)	.... tesisinde kullanılan sistemi ile siparişlerin alınması kendimi iyi hissetmeme neden olur.
2)	....tesisinde kullanılan ... sistemi sayesinde kasaya gittiğimde siparişlerin listesini fiyatlarını fiş üzerinde görmek kendimi iyi hissetmeme neden olur.
3)	....tesisinde kullanılan ... sistemi sayesinde tüm süreçlerin işleyişi daha hızlıdır.
4)	....tesisinde kullanılan ... sistemi ile siparişlerin doğru gelmesi bende güven uyandırır.
Boyut 2: Hatasız/Eksiksiz Hizmet	
5)	...tesisinde kullanılan ...sistemi sayesinde doğru hizmet ilk seferde verilir.
6)	...tesisinde kullanılan ...sistemi sayesinde çalışanlar müşterilerine siparişin geliş süresi hakkında bilgi verebilir.
7)	...tesisinde kullanılan ...sistemimde siparişler hatasız ve eksiksiz bir şekilde gelir.
8)	...tesisinde kullanılan ...sistemi sayesinde yemekten sonraki tatlı ve içecek ikramları hatasız şekilde sunulabilir.
9)	...tesisinde kullanılan ...sistemi sayesinde müşterilerin özel siparişleri temin edilebilecektir.
Boyut 3: Modern/Hoş Görünümlü Sistem	
10)	...tesisinde kullanılan ...sistemi modern ve teknolojik görünüyor.
11)	...tesisinde kullanılan ...sistemi sayesinde müşteriler ile daha etkili iletişim sağlanır.
12)	...tesisinde kullanılan ...sistemiyle çalışanlar yemek seçenekleri hakkında daha net bilgiler verebilir.
13)	...tesisinde kullanılan ...sistemi sayesinde, çalışanlar müşterilere daha çok yönelebilmektedir.
14)	...tesisinde çalışanlar ... sisteminden memnun oldukları için müşterilere daha gönüllü hizmet vermektedirler.

4.1. İstatistiksel Analizler (Statistical Analysis)

Hizmet kalitesi ölçümü için dinlenme tesisinde gerçekleştirilen anketten elde edilen veriler üzerinde istatistiksel analizler yapılmıştır. Çalışmalar %95 güven düzeyi ve %80 gözlem oranı ile gerçekleştirilmiş olup, örneklem büyüklüğü n=243 olarak hesaplanmıştır. Her iki durumda (öncesi ve sonrası) 243 müşteriye anket uygulanmış ve anket sonuçlarına ait istatistiksel analizler IBM SPSS v21.0 paket programı yardımı ile değerlendirilmiştir. Çalışma için gerçekleştirilen anket verileri incelendiğinde ankete katılan insanların yaşı genellikle "26-40 yaş aralığı" olduğu Tablo 4'de görülmektedir.

Tablo 4. Ankete Katılan Kişilerin Yaş Bilgileri (Ages of Survey Participants)

Yaş Aralığı	Sıklık	Yüzde	Kümülatif Yüzde
10-25	34	14,0	14,0
26-40	124	51,0	65,0
41-55	55	22,6	87,7
56-70	30	12,3	100,0

Katılımcıların çoğunluğunu erkekler ve meslekleri işçi olan müşteriler oluşturmaktadır (Tablo 5 ve Tablo 6).

Tablo 5. Ankete Katılan Kişilerin Cinsiyet Dağılımı (Gender Distribution of Survey Participants)

Cinsiyet	Sıklık	Yüzde	Kümülatif Yüzde
Erkek	198	81,5	81,5
Kadın	40	16,5	98,0
Belirtilmemiş	5	2,0	100,0

Tablo 6. Ankete Katılan Kişilerin Meslek Bilgileri (Professions of Survey Participants)

Meslek	Sıklık	Yüzde	Kümülatif Yüzde
Memur	50	20,6	20,6
İşçi	128	52,7	73,3
Emekli	20	8,2	81,5
Serbest Çalışan	45	18,5	100,0

Ankete katılan kişilerin eğitim bilgilerini içeren veriler Tablo 7'de yer almakta olup, en büyük yüzdeyi lise mezunlarının oluşturduğu görülmektedir.

Tablo 7. Ankete Katılan Kişilerin Eğitim Bilgileri (Educational Information of Survey Participants)

Eğitim Durumu	Sıklık	Yüzde	Kümülatif Yüzde
İlkokul	83	34,2	34,2
Lise	115	47,3	81,5
Üniversite	45	18,5	100,0

Ek olarak katılımcıların tesisi ziyaret sıklıkları ise Tablo 8'de incelenmiş olup, en yoğun verinin %57,2 ile haftada bir olarak olduğu belirlenmiştir.

Tablo 8. Ankete Katılan Kişilerin Tesise Uğrama Sıklığı Bilgileri (Frequency of Survey Participants Visiting the Facility)

Uğrama Sıklığı	Sıklık	Yüzde	Kümülatif Yüzde
Haftada Bir	139	57,2	57,2
Ayda Bir	79	32,5	89,7
Üç Ayda Bir	25	10,3	100,0

Kaiser-Meyer-Olkin (KMO) ve Bartlett küresellik (sphericity) testi ile verilerin faktör analizi için uygunluğu incelenmiş ve sonuçlar Tablo 9'da verilmiştir. Verilere ait KMO testi sonucu %70,9 dur ve %50'den büyük olduğu için veri setimizin faktör analizi için uygun olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca Bartlett's Test of Sphericity test sonuçlarının anlamlı olduğu (sig.<0,05) görülmüştür.

Tablo 9. KMO and Bartlett Testi Sonuçları (KMO and Bartlett Test Results)

Kaiser-Meyer-Olkin Measure of Sampling Adequacy	0,709
Bartlett's Test of Sphericity	
Approx. Chi-Square	3441,392
Df	91
Sig.	0

Yapılan çalışma kapsamında faktörler ile demografik bilgiler arasında anlamlı bir ilişki olup olmadığı çapraz tablo analizleri ile incelenmiş olup, detaylı sonuçlar Tablo 10'da gösterildiği gibidir.

Tablodaki veriler incelendiğinde uğrama sıklığı haftada 1 olan kişilerin %70'e yakını işletmeye 4 ve üzerinde not verdiği görülmektedir. Bu durum işletmenin hız ve güven boyutuna bağlı olarak yüksek puan aldığını göstermektedir. Uğrama sıklığı ayda 1 olan kişiler için sonuçlar incelendiğinde genel olarak puanlamada bir yığılma olmadığı ve homojen dağılmış olduğu söylenebilir. 3 ayda bir kez gelenlerin %60'a yakını ise 4,75 ve üzeri puan vermiş olduğu görülmekte ve bu durum sık gelenlerin hassas puanlama yaptığını seyrek gelenlerde ise bir puanda yığılma olduğunu göstermektedir.

Tablo 11'de meslek ile modern/hoş görünüm boyutu çapraz olarak analiz edilmiştir. Tablodaki veriler incelendiğinde memur ve işçilerin puanlamalarının birbirlerine yakın olduğu görülmektedir. Ancak emeklilerde ve serbest meslek sahibi kişilerde

puanlama biraz farklılaşmış ve emeklilerin neredeyse yarısı 4 puanın üzerinde, diğer yarısı 4 puanın altında olarak değerlendirmiştir. Serbest meslek sahipleri ise genel olarak modern ve hoş görünüm boyutunu 4 puan ve üzerinde değerlendirmiştir.

Tablo 10. Uğrama Sıklığı ile Hız ve Güven Boyutu Arasında Çapraz Tablo Analizi (Cross Table Analysis Between Frequency of Visiting and Speed and Trust Dimensions)

		Boyut 1: Hız ve Güven Boyutu							Toplam
		3,00	3,25	3,75	4,00	4,25	4,75	5,00	
Haftada Bir	Toplam	1	10	25	34	28	18	23	139
	% Uğrama Sıklığı	0,7%	7,2%	18,0%	24,5%	20,1%	12,9%	16,5%	100,0%
	%Boyut-1	20,0%	50,0%	64,1%	69,4%	58,3%	45,0%	54,8%	57,2%
	%Toplam	0,4%	4,1%	10,3%	14,0%	11,5%	7,4%	9,5%	57,2%
Aydabir	Toplam	4	10	13	13	13	11	15	79
	% Uğrama Sıklığı	5,1%	12,7%	16,5%	16,5%	16,5%	13,9%	19,0%	100,0%
	%Boyut-1	80,0%	50,0%	33,3%	26,5%	27,1%	27,5%	35,7%	32,5%
	%Toplam	1,6%	4,1%	5,3%	5,3%	5,3%	4,5%	6,2%	32,5%
Üç Ayda Bir	Toplam	0	0	1	2	7	11	4	25
	% Uğrama Sıklığı	0,0%	0,0%	4,0%	8,0%	28,0%	44,0%	16,0%	100,0%
	%Boyut-1	0,0%	0,0%	2,6%	4,1%	14,6%	27,5%	9,5%	10,3%
	%Toplam	0,0%	0,0%	0,4%	0,8%	2,9%	4,5%	1,6%	10,3%
Toplam	Toplam	5	20	39	49	48	40	42	243
	% Uğrama Sıklığı	2,1%	8,2%	16,0%	20,2%	19,8%	16,5%	17,3%	100,0%
	%Boyut-1	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%
	%Toplam	2,1%	8,2%	16,0%	20,2%	19,8%	16,5%	17,3%	100,0%

Eğitim bilgisi, hız ve güven boyutu çapraz analiz ile incelenmiş Tablo 12'de verilmiştir. Tablo incelendiğinde ilkökul mezunlarının, lise ve üniversite mezunlarına kıyasla daha yüksek puan verdiği görülmektedir.

Tablo 11. Meslek ile Modern ve Hoş Görünüm Boyutu Arasında Çapraz Tablo Analizi (Cross Table Analysis Between Profession and Modern and Pleasant Appearance Dimension)

		Boyut 3: Modern ve Hoş Görünüm Boyutu										Toplam
		3,20	3,40	3,60	3,80	4,00	4,20	4,40	4,60	4,80	5,00	
Meslek	Toplam	3	4	1	13	6	13	1	0	7	2	50
	% Meslek	6,0%	8,0%	2,0%	26,0%	12,0%	26,0%	2,0%	0,0%	14,0%	4,0%	100,0%
	%Boyut-3	60,0%	26,7%	6,7%	24,1%	25,0%	32,5%	3,6%	0,0%	35,0%	14,3%	20,6%
	%Toplam	1,2%	1,6%	0,4%	5,3%	2,5%	5,3%	0,4%	0,0%	2,9%	0,8%	20,6%
İşçi	Toplam	1	8	11	30	10	16	19	18	6	9	128
	% Meslek	0,8%	6,3%	8,6%	23,4%	7,8%	12,5%	14,8%	14,1%	4,7%	7,0%	100,0%
	%Boyut-3	20,0%	53,3%	73,3%	55,6%	41,7%	40,0%	67,9%	64,3%	30,0%	64,3%	52,7%
	%Toplam	0,4%	3,3%	4,5%	12,3%	4,1%	6,6%	7,8%	7,4%	2,5%	3,7%	52,7%
Emekli	Toplam	1	2	2	7	0	2	3	2	0	1	20
	% Meslek	5,0%	10,0%	10,0%	35,0%	0,0%	10,0%	15,0%	10,0%	0,0%	5,0%	100,0%
	%Boyut-3	20,0%	13,3%	13,3%	13,0%	0,0%	5,0%	10,7%	7,1%	0,0%	7,1%	8,2%
	%Toplam	0,4%	0,8%	0,8%	2,9%	0,0%	0,8%	1,2%	0,8%	0,0%	0,4%	8,2%
Serbest Çalışan	Toplam	0	1	1	4	8	9	5	8	7	2	45
	% Meslek	0,0%	2,2%	2,2%	8,9%	17,8%	20,0%	11,1%	17,8%	15,6%	4,4%	100,0%
	%Boyut-3	0,0%	6,7%	6,7%	7,4%	33,3%	22,5%	17,9%	28,6%	35,0%	14,3%	18,5%
	%Toplam	0,0%	0,4%	0,4%	1,6%	3,3%	3,7%	2,1%	3,3%	2,9%	8,0%	18,5%
Toplam	Toplam	5	15	15	54	24	40	28	28	20	14	243
	% Eğitim	2,1%	6,2%	6,2%	22,2%	9,9%	16,5%	11,5%	11,5%	8,2%	5,8%	100,0%
	%Boyut-3	10,0%	10,0%	10,0%	10,0%	10,0%	10,0%	10,0%	10,0%	10,0%	10,0%	100,0%
	%Toplam	2,1%	6,2%	6,2%	22,2%	9,9%	16,5%	11,5%	11,5%	8,2%	5,8%	100,0%

Tablo 12. Eğitim ile Hız ve Güven Boyutu Arasında Çapraz Tablo Analizi (Cross Table Analysis Between Education and Speed and Confidence Dimensions)

		Boyut-1: Hız ve Güven Boyutu							Toplam
		3,00	3,25	3,75	4,00	4,25	4,75	5,00	
İlkokul	Toplam	0	9	14	16	11	15	18	83
	% Eğitim	0,0 %	10,8 %	16,9 %	19,3 %	13,3 %	18,1 %	21,7 %	100,0 %
	% Boyut-1	0,0 %	45,0 %	35,9 %	32,7 %	22,9 %	37,5 %	42,9 %	34,2 %
	% Toplam	0,0 %	3,7 %	5,8 %	6,6 %	4,5 %	6,2 %	7,4 %	34,2 %
Lise	Toplam	4	5	22	26	26	20	12	115
	% Eğitim	3,5 %	4,3 %	19,1 %	22,6 %	22,6 %	17,4 %	10,4 %	100,0 %
	% Boyut-1	80,0 %	25,0 %	56,4 %	53,1 %	54,2 %	50,0 %	28,6 %	47,3 %
	% Toplam	1,6 %	2,1 %	9,1 %	10,7 %	10,7 %	8,2 %	4,9 %	47,3 %
Üniversite	Toplam	1	6	3	7	11	5	12	45
	% Eğitim	2,2 %	13,3 %	6,7 %	15,6 %	24,4 %	11,1 %	26,7 %	100,0 %
	% Boyut-1	20,0 %	30,0 %	7,7 %	14,3 %	22,9 %	12,5 %	28,6 %	18,5 %
	% Toplam	0,4 %	2,5 %	1,2 %	2,9 %	4,5 %	2,1 %	4,9 %	18,5 %
Toplam	Toplam	5	20	39	49	48	40	42	243
	% Eğitim	2,1 %	8,2 %	16,0 %	20,2 %	19,8 %	16,5 %	17,3 %	100,0 %
	% Boyut-1	100,0 %	100,0 %	100,0 %	100,0 %	100,0 %	100,0 %	100,0 %	100,0 %
	% Toplam	2,1 %	8,2 %	16,0 %	20,2 %	19,8 %	16,5 %	17,3 %	100,0 %

4.2. Değişim Sonuçları (Change Results)

Bu çalışmada iki farklı durum karşılaştırılmaktadır. Birinci durum dinlenme tesisinde adisyon ile sipariş alınması, ikinci durum ise tablet bilgisayar sisteminin devreye alınması olarak tanımlanmaktadır. Tablo 13'te her iki durum için değişimin yüzdeleri hesaplanmıştır. Değişim dereceleri Tablo 2'de yer alan veriler kullanılarak belirlenmiştir.

Tablo 13. Boyutlar Açısından Değişim Değerleri (Change Values in Terms of Dimensions)

Boyutlar	Adisyon Sistemi	Tablet PC Sistemi	Değişim	Boyut Değişim Oranı (DOR)	Değişim Derecesi
Boyut 1: Hız ve Güven	2,91	4,22	1,31	% 32,75	Yüksek
Boyut 2: Hatasız/Eksiksiz Hizmet	2,69	2,86	0,17	% 4,25	Normal
Boyut 3: Modern/Hoş Görünüm	3,00	4,14	1,14	% 28,50	Orta

Boyut 1: Hız ve Güven	2,91	4,22	1,31	% 32,75	Yüksek
Boyut 2: Hatasız/Eksiksiz Hizmet	2,69	2,86	0,17	% 4,25	Normal
Boyut 3: Modern/Hoş Görünüm	3,00	4,14	1,14	% 28,50	Orta

Eşitlik (5) kullanılarak hesaplanan ortalama değişim oranı (ODO) da % 21,83 olarak gerçekleşmiştir.

$$ODO = (0,3275+0,0425+0,285)/3 = 0,2183$$

5. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Hizmet işletmelerinin sürdürülebilirliğinin sağlanmasında hizmet kalitesinin ölçülmesi ve kontrol altında tutulması ile geri dönüşlerin alınması çok önemlidir. Bu nedenle hizmet kalitesinde benchmarking yöntemi ile kalitedeki değişimin ölçülmesi önem arz etmektedir. Çalışmada geliştirilen hizmet kalitesi değişim ölçümü modelinde hız ve güven, hatasız/eksiksiz hizmet ve modern/hoş görünüm boyutları yer almaktadır. Tüm boyutların ortalama değişim oranı % 21,83 olmuştur.

% 21,83 ortalama değişim oranı hizmet sunumunda adisyon sistemi ve tablet bilgisayar kullanımı arasında önemli bir fark olduğunu göstermektedir. En büyük fark (yüksek derecede değişim) birinci boyutta gerçekleşmiştir. Tablet bilgisayar kullanımının siparişlerin alınmasında hizmet sunumunda hızın artması etken olmuştur. Diğer bir etken ise hizmet sisteminde müşterinin gördüğü kısım olarak tarif edebileceğimiz ön odadan, müşterilerin göremediği fakat çekirdek hizmetin oluşturulduğu arka odaya bilgilerin doğru bir şekilde aktarılmasıdır. İkinci sırada önemli bir fark (orta derecede değişim) modern/hoş görünüm boyutunda gerçekleşmiştir. Teknoloji kullanımı müşterilerin hizmet kalitesi algısını olumlu etkilemiştir. Üçüncü olarak hatasız/eksiksiz hizmet sunumu boyutundaki artış farkı (normal değişim) tablet bilgisayar sistemi ile sipariş bilgilerin aktarımında eksik bilgilerin azalmasından kaynaklanmaktadır.

Hizmet kalitesinin kıyaslama (benchmarking) yaklaşımı ile değerlendirilmesi eski ve yeni durumun karşılaştırılması ve aradaki farkların boyutlar bazında incelenmesi işletmeler için önem arz eden sonuçların elde edilmesine olanak sağlamaktadır. Çalışmada geliştirilen yaklaşım ilerdeki çalışmalarda farklı hizmet sektörlerinde de kullanılabilir.

ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazarı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemler için Kırıkkale Üniversitesi Sosyal ve Beşeri Bilimler Araştırmaları Etik Kurulu'ndan etik onay almış olduklarını beyan ederler.

The authors of this article declares that they have received ethical approval from Kırıkkale University Social and Human Sciences Research Ethics Committee for the materials and methods used in their study.

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

Olca Özge Ersöz: Modele ait boyutları belirlemiş, alternatif hizmet kalitesi süreçlerini incelemiş ve uygulamanın gerçekleştirilmesi süreçlerini gerçekleştirmiştir.

She determined the dimensions of the model, examined alternative service quality processes and carried out the implementation processes.

Adnan Aktepe: Hizmet kalitesi ölçüm modellerinin tartışılmasını ve çalışmada kullanılan modelin tasarımını gerçekleştirmiştir.

He discussed the service quality measurement models and designed the model used in the study.

Süleyman Ersöz: Hizmet kalitesi ölçüm modellerinin tartışılmasını ve çalışmada kullanılan modelin tasarımını gerçekleştirmiştir.

He discussed the service quality measurement models and designed the model used in the study.

Ahmet Kürşad Türker: Temel hipotezlerin kurulması, istatistiksel veri analizlerinin yapılması ve kontrolünü gerçekleştirmiştir.

He carried out establishment of basic hypotheses, statistical data analysis and control.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

There is no conflict of interest in this study.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

[1] Fan, L. H., Gao, L., Liu, X., Zhao, S. H., Mu, H. T., Li, Z., Shi, L., Wang, L. L., Jia, X. L., Ha. Fleischman, G. M., Johnson, E. N., Walker, K. B. (2017), An Exploratory Investigation of Management Accounting Service Quality

Dimensions Using Servqual and Servperf, Advances in Management Accounting, 91-125.

[2] Hokey, M., Hyesung, M. (2011), Benchmarking the Service Quality of Fast-Food Restaurant Franchises in The USA: A Longitudinal Study, Benchmarking: An International Journal, 18 (2), 282-300.

[3] Parasuraman, A., Berry, L. Leonard, Zeithaml A., Valarie (1991), Refinement And Reassessment Of The Servqual Scale”, Journal of Retailing, 67 (4).

[4] Parasuraman, A., Zeithaml, V. A., Malhotra, A. (2005), ES-QUAL a multiple-item scale for assessing electronic service quality, Journal of Service Research, 7, 213-233.

[5] Ünüvar, S., Kaya, M. (2016). Measuring Service Quality by Servperf Method: A Research on Hospitality Enterprises, International Journal of Quality Innovation, Australian Academy of Accounting And Finance Review, 2 (4), 354-364.

[6] Grönroos C. (1984), A Service Quality Model and its Marketing Implications, European Journal of Marketing, 18 (4).

[7] Hakyon, L., Chulhyun, K. (2014), Benchmarking Of Service Quality With Data Envelopment Analysis, Expert Systems with Applications, 41 (8), 3761-3768.

[8] Cronin, J.J., Taylor, S.A. (1994), SERVPERF Versus SERVQUAL: Reconciling Performance-Based and Perceptions-Minus-Expectations Measurement of Service Quality, Journal of Marketing, 58, 125-131.

[9] Ji, X. (2018), Servqual- Model- Based Fuzzy Evaluation of Express Service Quality, International Journal of Transportation Engineering And Technology, 4 (1), 20-23.

[10] Quang N., Tahir N., Dan K., Guru P. (2018), Understanding customer satisfaction in the UK quick service restaurant industry: The influence of the tangible attributes of perceived service quality, British Food Journal, 120 (6), 1207-1222.

[11] Lee, D., Kim, K. K. (2017), Assessing Healthcare Service Quality: A Comparative Study Of Patient Treatment Types, International Journal of Quality Innovation, 3(1), 1-15.

[12] Uluskan M., Çendik İ.H. (2020), Eğitim Sektöründe Faktör Analizi Tabanlı Hizmet Kalitesi Ölçümü ve Kalite Fonksiyon Yayılımı Uygulaması, Endüstri Mühendisliği Dergisi, 31 (2), 122-147.

[13] Terblanche, N. S. Taljaard, A. (2018), The Perceived Value and Perceived Benefits Experienced by Customers Using Travel

- Agents, South African Journal of Business Management, 49 (1), 1-13.
- [14] Topaloğlu C., Kaya U., Benchmarking (Kıyaslama): Turizm İşletmeleri Açısından Kuramsal Bir Değerlendirme, (2008), Ekonomik ve Sosyal Araştırmalar Dergisi, 4 (1).
- [15] Miciak A., Desmarais M. (2001), Benchmarking Service Quality Performance at Business-To-Business and Business-To-Consumer Call Centers, Journal of Business and Industrial Marketing, 16 (5), 340-353.
- [16] Ersöz, S., Aktepe, A. (2020), Hizmet/Service Sistemleri (2. Baskı), Seçkin Yayıncılık, Ankara.
- [17] Saini, S., Singh, R. (2018), Service Quality Assessment of Utility Company in Haryana Using Servqual Model, Asian Journal of Management, 9 (1), 702-708.
- [18] Cronin, J.J., Taylor, S.A. (1992), Measuring service quality: A reexamination and extension, Journal of Marketing, 56, 55-68.
- [19] Giannakis, D., Jamas, T., & Pollitt, M. (2005), Benchmarking And Incentive Regulation Of Quality Of Service: An Application To The Uk Electricity Distribution Networks, Energy Policy, 33 (17), 2256-2271.
- [20] Marković, S., Raspor, S., Šegarić, K. (2010), Does Restaurant Performance Meet Customers' Expectations An Assessment of Restaurant Service Quality Using a Modified Dineserv Approach, Tourism and Hospitality Management, 16 (2), 181-195.
- [21] Folz, D. H. (2004), Service Quality and Benchmarking The Performance Of Municipal Services, University Of Tennessee Public Administration Review, 64, 2, 132-255.
- [22] Kang G., James J. (2004), Services Quality Dimensions: Grönroos's Service Quality Model, Managing Service Quality, 14 (4).
- [23] Parasuraman, A., Zeithaml, V.A., Berry, L.L. (1988), SERVQUAL: a multiple-item scale for measuring customer perceptions of Service Quality, Journal of Retailing, 64, 1.
- [24] İçli, G. E., Anil N. K. (2014), The HEDQUAL Scale: A New Measurement Scale of Service Quality for MBA Programs in Higher Education, South African Journal of Business Management, 45 (3), 31-43.
- [25] Yasin, M. M., Zimmerer, T. W. (1995), The Role of Benchmarking in Achieving Continuous Service Quality, International Journal of Contemporary Hospitality Management, 7 (4), 27-32.
- [26] Park, H., Geum, Y., Park, Y. (2015), A Dual Quality Function Deployment Approach for Benchmarking Service Quality. Total Quality Management & Business Excellence, 26 (5-6), 569-582.
- [27] Tan, T. H., Chang, C. S. (2010), Development And Evaluation Of An RFID-Based E-Restaurant System For Customer-Centric Service, Expert Systems with Applications, 37, 6482-6492.
- [28] Patel, K. J., Patel, U., Obersnel, A. (2007), PDA-Based Wireless Food Ordering System for Hospitality Industry—A Case Study of Box Hill Institute, 2007 Wireless Telecommunications Symposium, Print ISSN: 1934-5070, IEEE, CA, USA.

İki Farklı Düzeyde Isıl İşlem Uygulanmış Ahşap Özelliklerinin Karşılaştırmalı Deneysel Olarak İncelenmesi

Kevser KÖKTÜRK^{1*}  Mustafa ALTUNOK¹ 

¹Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Ağaç İşleri Endüstri Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye

Article Info

Araştırma makalesi
Başvuru: 04/12/2024
Düzeltilme: 07/02/2025
Kabul: 18/02/2025

Keywords

Wood preservation
techniques
Isıl işlem
Higroskopisi
Physical properties

Makale Bilgisi

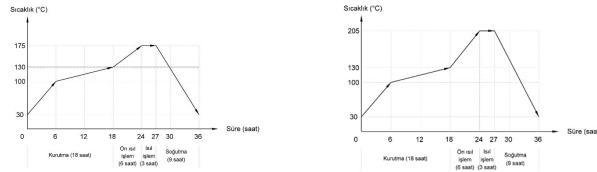
Research article
Received: 04/12/2024
Revision: 07/02/2025
Accepted: 18/02/2025

Anahtar Kelimeler

Ahşap koruma teknikleri
Isıl işlem
Higroskopisi
Fiziksel özellikler

Grafik Özet (Graphical/Tabular Abstract)

Bu çalışmada, iki farklı düzeyde ısıl işlem uygulanmış ahşap fiziksel özelliklerinin deneysel karşılaştırılmasına çalışılmıştır. / In this study, an experimental comparison of the physical properties of wood subjected to two different levels of heat treatment was attempted.



Şekil A: 175°C ve 205°C ısıl işlem süreç grafiği / Figure A: 175°C and 205°C heat treatment process chart

Önemli noktalar (Highlights)

- İki farklı ahşap türüne aynı ısıl işlem kabinde ve iki farklı sıcaklıktaki işlem sürecinde ısıl işlem uygulanması./ Heat treatment of draft parts from two different wood species in the same heat treatment cabinet and in two different temperature treatment processes.
- Isıl işlem görmüş örnekler için fiziksel özellik değişimlerinin belirlenmesi./ Determination of physical property changes of heat treated samples.
- Ahşap malzemenin higroskopikliğinin ısıl işlem ile azaltılması./ Reducing the hygroscopicity of wood material by heat treatment

Amaç (Aim): Bu çalışmada, her iki düzeydeki sıcaklık derecesinde ve ısıl işlem uygulamasında; 175 °C lik süreçte Sarıçam ve sedir'in kimyasal yapısında normal ısıl değişim oluşurken, meşe ve Anadolu kestanesi'nde ısıl işlem etkisi meydana gelip gelmediğine, 205 °C lik süreçte ise meşe ve Anaolu kestanesi'nin kimyasal yapısında normal ısıl değişim oluşurken, daha yüksek sıcaklıkta ısıl işleme maruz kalmış Sarıçam ve sedirde nasıl bir değişimin meydana geldiğinin belirlenmesi amaçlanmıştır. / In this study, it was aimed to determine whether the heat treatment effect occurred in oak and Anatolian chestnut while the normal heat change occurred in the chemical structure of Scotch pine and cedar at 175 °C process at both temperature levels and heat treatment applications, and to determine what kind of a change occurred in Scotch pine and cedar exposed to heat treatment at higher temperatures while the normal heat change occurred in the chemical structure of oak and Anatolian chestnut at 205 °C process.

Özgünlük (Originality): Isıl işlem uygulaması ile ahşabın higroskopisini azaltılarak nem alış-veriş kabiliyetinin sönümlenmesi, boyutsal kararlılığın sağlanması, fiziksel özellik değişimlerinin azaltılması. / Reducing the hygroscopicity of wood with heat treatment application, dampening the moisture exchange ability, ensuring dimensional stability, reducing physical property changes

Bulgular (Results): Bu çalışmada, 175 °C sıcaklıktaki ve 205°C sıcaklıktaki aynı kabinde ısıl işlem görmüş iğne yapraklı ve yayvan yapraklı ahşap örneklerin deneylerinden elde edilen fiziksel özellik verilerinin değişim oranlarının birbirleri ile çok yakın olduğu belirlenmiştir. / In this study, it was determined that the change rates of physical property data obtained from the experiments of coniferous and broadleaf wood samples heat-treated in the same cabin at 175 °C and 205 °C were very close to each other.

Sonuç (Conclusion): Hem 175°C ve hem de 205°C aynı kabinde ısıl işlem gören iğne yapraklı ve yayvan yapraklı ahşap örneklerinin fiziksel özellik değişimlerinin birbirlerine yakın olduğu, her iki ahşap türü ısıl işleminin biraz daha yükseltilmiş kabin sıcaklığında (190°C) yapılabileceği ve böylece, hem iki ahşap türünde birbirine çok daha yakın ısıl işlem etkisi elde edilebileceği hem de önemli miktarda enerji tasarrufu sağlanabileceği mümkün olduğu sonucuna varılmıştır. / It was concluded that the physical property changes of the coniferous and broadleaf wood samples heat-treated in the same cabin at both 175°C and 205°C were close to each other, and that the heat treatment of both types of wood could be done at a slightly higher cabin temperature (190°C) and thus, much closer heat treatment effects could be achieved in both types of wood and a significant amount of energy could be saved.



İki Farklı Düzeyde Isıl İşlem Uygulanmış Ahşap Özelliklerinin Karşılaştırmalı Deneysel Olarak İncelenmesi

Kevser KÖKTÜRK^{1*} Mustafa ALTUNOK¹

¹Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Ağaç İşleri Endüstri Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye

Makale Bilgisi

Research article
Received: 04/12/2024
Revision: 07/02/2025
Accepted: 18/02/2025

Anahtar Kelimeler

Ahşap koruma teknikleri
Isıl işlem
Higroskopik
Fiziksel özellikler

Öz

Bu çalışmada, sapsız meşe (*Quercus petraea* L.), Anadolu kestanesi (*Castanea sativa*), toros sediri (*Cedrus libani*), sarıçam (*Pinus silvestris*), odunlarından elde edilen taslak parçalara 175°C ve 205°C ısıtım işlemi yapılmış ve bunlardan geliştirilen deney örneklerine TS ISO 13061, TS ISO 13061-1, TS EN 4084 standartlarına göre fiziksel özelliklerden yoğunluk, rutubet, su emme, ağırlık kaybı ve boyutsal kararlılık değişimleri belirlenmiştir. Sonuç olarak; aynı kabinde hem 175°C sıcaklıktaki hem de 205°C sıcaklıktaki ısıtım işlemi görmüş iğne yapraklı ve yayvan yapraklı ahşap örneklerin ahşap örneklerin deneylerinden elde edilen fiziksel özellik verilerinden yoğunluk, rutubet, su emme oranı, ağırlık kaybı, boyutsal kararlılık değişimlerinin birbirleri ile çok yakın olduğu, her iki ahşap türüne iki sıcaklığın ortalaması sıcaklıkta bir kabinde birlikte ısıtım işlemi uygulanabileceği böylece, hem iki ahşap türünde birbirine çok daha yakın ısıtım etkisi elde edilebileceği hem de önemli miktarda enerji tasarrufu sağlanabileceği belirlenmiştir.

Comparative Experimental Investigation of The Properties of Wood with Heat Treatment at Two Different Levels

Article Info

Araştırma makalesi
Başvuru: 04/12/2024
Düzeltilme: 07/02/2025
Kabul: 18/02/2025

Keywords

Wood preservation techniques
Heat treatment
Hygroscopy
Physical properties

Abstract

In this study, draft pieces obtained from sessile oak (*Quercus petraea* L.), Anatolian chestnut (*Castanea sativa*), Taurus cedar (*Cedrus libani*), Scots pine (*Pinus silvestris*) wood were heat treated at 175°C and 205°C, and the test samples developed from these were subjected to TS ISO 13061, TS ISO 13061-1, TS EN 4084. According to the standards, physical properties such as density, moisture, water absorption, weight loss and dimensional stability changes were determined. In conclusion; According to the physical property data obtained from the experiments of wood samples of coniferous and broad-leaved wood samples heat-treated at both 175°C and 205°C in the same cabin, density, moisture, water absorption rate, weight loss and dimensional stability changes are very close to each other, both wood types can be heat treated together in a cabin at the average temperature of the two temperatures, thus, a much closer heat treatment effect can be achieved in both wood types and a significant amount of heat treatment can be achieved. It has been determined that energy savings can be achieved.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Birçok akademik çalışmada farklı odun türlerine ait malzemenin ısıtım işlemi ile mekanik ve fiziksel özelliklerine etkisi, ısıtım işlemi görmüş ağaç malzemenin teknolojik özelliklerine mukavemet, yüzey işlemleri biyolojik zararlılara karşı dayanımı araştırılmıştır. Bu araştırmalarda ısıtım işlemi görmüş odunun kimyasal ve fiziksel özellikleri kalıcı bir

şekilde değiştiği bildirilmektedir. Odunun fiziksel, kimyasal, mekanik ve biyolojik özelliklerdeki değişimi hemiselülozun termik degradasyonundan dolayı meydana gelir. Nenden dolayı oluşan şişme ve daralma düşer, biyolojik direnç artar, renk koyulaşır ve odundan birçok ekstraktif madde uzaklaşmış olur. Konuyla ilgili literatürde yayvan yapraklı ahşabın 200 ila 250 derece arasında ve iğne yapraklı ahşabın 170 ila 190 derece arasındaki

sıcaklıklarda ısı işlem uygulandığı görülmektedir. Bu çalışmada, her iki ahşap sınıfından (iğne yapraklı ve yayvan yapraklı) kaba ölçülerdeki taslak parçalara bir kabin içerisinde 175°C lik sıcaklıkta ve 205°C lik sıcaklıkta ısı işlem uygulanmıştır. Kaba ölçülü taslak parçalar arasına çıtalar konarak fırın içerisine istif edilmiş ve sıcaklığın etkisinin tüm yüzeylere eşit miktarda dağılması sağlanmıştır. Her iki sıcaklık derecesinde ve 3 saatlik uzun süreli ısı işlem uygulamasında; 175°C lik süreçte Sarıçam ve sedirin kimyasal yapısında normal ısı değişim oluşurken, meşe ve kestanede ısı işlem etkisi meydana gelip gelmediğine, 205°C lik süreçte ise meşe ve kestanenin kimyasal yapısında normal ısı değişim oluşurken, daha yüksek sıcaklıkta ısı işleme maruz kalmış Sarıçam ve sedirde fazladan nasıl bir değişimin meydana geldiğinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Ağaç malzemeye sıcaklık ve kızgın buhar altında uygulanan ısı işlem sonucunda malzemenin içerisinde yeni kimyasal bileşikler oluşmaktadır. Bu işlem sonucunda fiziksel ve kimyasal yapıda meydana gelen değişimler ile bazı özelliklerine olumlu bazılarına da olumsuz olarak yansımaktadır. Isıl işlemde uygulanan sıcaklık derecesi ve ahşabın sıcaklığa maruz kalma süresinden dolayı odun ana bileşenleri lignin, selüloz ve hemiselülozun yapısının bozulup, odunun polimer yapısının değişmesiyle her üç tür ahşapta mekanik özelliklerde azalmalar olduğu tespit edilmiştir [1]. Üç ahşap türünden (Sarıçam, meşe, kestane) örnekler dört farklı şartta (150 °C 5s, 170°C /4s, 190 °C /3s, 210°C /2s) ısı işlem uygulandığı ve bu örneklerin üç farklı iklim şartında (20°C /%65, 40°C /%35, 10°C /%50) münavebeli olarak bekletilip test ve ölçümlerin uygulandığı bu çalışma sonuçlarına göre; her üç ahşap türünde de yoğunluk, ısı iletkenlik katsayısı ve ısı geçirgenlik (yalıtkanlık) bakımından en düşük değerlerin 40°C /%35 iklim şartında elde edildiği görülmektedir. Bu iklim şartında bekletme ahşabı iyice kuruttuğu için öz yükünün hafiflediği ve birçok olumsuzluğa sebep olan rutubetin azaldığı, ahşabın rutubete dayalı ısı iletkenliğinin zayıfladığı tespit edilmiştir. Eğilme direnci ve elastiklik modülü değerlerinin en yüksek değerlerin 40°C /%35 iklim şartında elde edildiği görülmektedir. Bu iklim şartında bekletme ahşabı iyice kuruttuğu için birçok olumsuzluğa sebep olan rutubetin azaldığı, ahşabın rutubete dayalı mekanik özellik zayıflamasının ortadan kalktığı ya da direnç değerlerinin iyice yükseldiği bu iklim şartının sağladığı avantajlardan dolayı ahşap kullanımlarında her zaman öncelikli olarak önerilebilir [2]. Isıl işlem görmüş ahşap daha estetik görünüme ve çevre dostu yenilenebilir malzemeye sahiptir. Isıl işlem görmüş ahşap malzemenin olumsuz özelliklerinden biri de mekanik dayanımının düşük olmasıdır. Literatürde ahşap

malzemenin ısı işlem öncesi bazı kimyasallarla emprenye edilmesinin ısı bozunumunu azalttığı bildirilmiştir [5]. Isıl işlemin alternatif bir odun koruma ve bir odun modifikasyon yöntemi olarak ele alınması gerektiği bildirilmiştir. Dış ortama yâda çürümeye karşı daha iyi bir koruma arzu edildiğinde ısı işlem sıcaklığı 200°C üzerinde, iç mekânlarda kullanımlar için ise 200°C altındaki sıcaklıklarda uygulanması önerilmiştir [3]. Isıl işlem sonrasında kayın ve meşe odunlarının fiziksel, mekanik, morfolojik ve termal özelliklerinden elde edilen sonuçlara göre, yoğunluk, su alma değerlerinin ısı işlemle birlikte düştüğü saptanmıştır. Bu sonuçlara dayanarak ısı işlem uygulanmış ağaç malzemenin daha az su absorbe ettiği bildirilmiştir [4]. Isıyla muameleyle tahrip edici mikroorganizmalara karşı odunun biyolojik olarak dayanımının arttığı gözlenmiştir. Bunun üç temeli bulunmaktadır. Kavak, ladin ve köknar odunun yapısında doğal olarak bulunan suyun buharlaşması, mevcut hidroksil gruplarının azalması ve bu grupların çürüklüğe daha dirençli olan gruplarla yer değiştirmesinden dolayı olduğu belirlenmiştir [6]. Ahşabın doğal bir malzeme olduğu ve binlerce yıldır yapı malzemesi olarak kullanılmakta olduğu bildirilmiştir. Sürdürülebilirlik açısından bakıldığında düşük karbon ayak izi sayesinde ahşap, beton ve çelik yapılardan daha çok tercih edilmesi önerilmiştir. Bu çalışmada ayrıca, beton ve çelik yerine ahşap seçilmesi halinde karbon ayak izinin önemli ölçüde azalacağı, 1 m³ ahşabın yaklaşık 1 ton CO₂ içerdiği, beton ve çelik yerine ahşap kullanılarak CO₂ ayak izinin daha iyileştirilebileceği bildirilmiştir [7].

Isıl işlem sıcaklığının artışına göre ağırlık kaybı, yoğunluk kaybı, rutubet miktarının arttığı ve su emme kabiliyetinin azaldığı bildirilmektedir [8].

2. MATERYAL ve METOD (MATERIALS AND METHODS)

2.1. Deneysel Ekipman (Experimental Equipment)

Bu çalışmada ağaçları endüstrisinde yaygın olarak kullanılan ve yerli üretim olan birinci sınıf Sapsız meşe (*Quercus petraea*), Anadolu kestanesi (*Castanea sativa*), Toros Sediri (*Cedrus libani*), Sarıçam (*Pinus silvestris*) keresteleri rasgele yöntemle Ankara Keresteciler Sitesinden temin edilmiştir. Piyasadan rasgele yöntemle temin edilen taslak ölçülerdeki dört ayrı türden ahşap latalara aynı süreçte olmak üzere 175°C ve 205°C ısı işlem uygulanmış ve bu malzemenin standartların öngördüğü ölçülerde test ve ölçüm örnekleri Tablo 1'de verilen ölçü ve sayıda kesilerek hazırlanmıştır.



Resim 1. Isıl işlem fırınında istifleme (Stacking in heat treatment furnace)

2.2. Isıl İşlem Yöntemi (Heat-treatment method)

Birinci aşamada; her dört ahşap türünden Tablo 1'deki örneklere yetecek kadar taslak parçalar ısıtma fırınına aralarına çita konarak yerleştirilmiş ve 175 °C sıcaklıkta ısıtma işlemi uygulanmıştır. İkinci aşamada; her dört ahşap türünden Tablo 1'deki

örneklere yetecek kadar taslak parçalar ısıtma fırınına aralarına çita konarak yerleştirilmiş ve 205 °C sıcaklıkta ısıtma işlemi uygulanmıştır. Bu çalışmada irdelenen dört ahşap türünün Tablo 2'de verilen fiziksel özellikleri karşılığında yer alan standartlara göre belirlenmiştir.

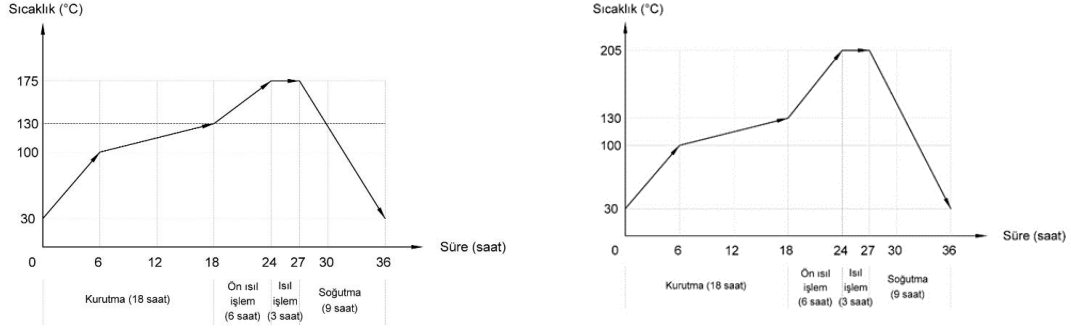
Tablo 1. Isıl işlem uygulanacak ahşap malzeme deney deseni (Experimental pattern of wood material to be heat treated)

Ahşap örneklerin özellik, ölçü ve sayıları				Örneklere uygulanan işlem		
Ahşap türü	Test / ölçüm	Boyutlar (mm)	Toplam örnek	Kontrol	175°C	205°C
Sedir Sarıçam Meşe Anadolu Kestanesi	Yoğunluk	20x20x30	15	5	5	5
	Rutubet	20x20x30	15	5	5	5
	Su emme	20x20x30	15	5	5	5
	Boyutsal kararlılık	20x20x30	15	5	5	5
	Ağırlık kaybı	20x20x30	15	5	5	5
	Toplam			75	25	25	25

Not: Yukarıda verilen örnek sayısı sadece bir ahşap türü için geçerli olup, 4 ahşap türü için aynı sayıda örnek hazırlanmıştır (Toplam 75 x 4 = 300 adet).

Tablo 2. Dört ahşap türünde irdelenen bazı fiziksel özellikler (Some physical properties examined in four wood species)

Fiziksel Özellikler	
Yoğunluk	TS ISO 13061
Rutubet Tayini	TS ISO 13061-1
Su emme	TS EN 4084
Boyutsal kararlılık	TS EN 4084
Ağırlık kaybı	



Şekil 1. 175°C ısıtma işlem süreci grafiği ve 205°C ısıtma işlem süreci grafiği (175°C heat treatment process chart and 205°C heat treatment process chart)

Her iki adımdaki ısıtma işlemi Şekil 1’ de görülen süreçte gerçekleştirilmiştir. Isıtma işlem süreci ; ahşabın kurutulması, ısıtma işlemi uygulama, ve soğutma basamaklarından oluşmaktadır.

Ahşabın kurutulması; 130°C ye kadar ısıyı yavaş yavaş artırarak uzun süre ahşap malzeme kurutulmuştur. Isıtma işlemi uygulama ; önce artan bir sıcaklıkta ön ısıtma işlemi ve daha sonra sabit sıcaklıkta 175°C ve 205°C ısıtma işlemi uygulanır. Bu süreçte fırın içerisine dakikada 15 saniye su püskürtülerek ahşabın alev alması önlenmiş ve iç gerilme azaltılmıştır. Soğutma; fırın sıcaklığı 30 °C ye ininceye kadar yine su püskürtülerek soğutulmuştur. Toplamda her bir fırın ısıtma işlemi süresi 36 saatte gerçekleşmiştir.

2.3. İstatistiksel Analiz (Statistical Analysis)

Farklı sıcaklıklarda ve iğne yapraklı ahşap türü ile yayvan yapraklı ahşap türlerinin aynı kabin ortamında ısıtma işlemi uygulamanın ahşap

malzemelerde bazı fiziksel ve mekanik özellikler üzerindeki etkisini tespit etmek amacıyla MSTAT - C programında $p \leq 0,05$ önem düzeyinde çoklu varyans analizi yapılmıştır. Ağaç türü ve işlem çeşidinin test edilmiş özellikler üzerindeki etkisi anlamlı bulunduğu homojenlik gruplarını belirlemek için Duncan testi uygulanmıştır.

3. RESULTS (BULGULAR)

Dört ahşap türüne birisi kontrol ve ikisi ısıtma işlemi olmak üzere üç işlem uygulanması sonunda elde edilen bazı fiziksel özellik sonuçları aşağıda verilmiştir.

3.1. Yoğunluk değişimi (Change of specific gravity) Dört ahşap türünden örneklerin kontrol ve iki ısıtma işleminden sonraki yoğunluk değerlerine ilişkin ortalamalar, ahşap ve ısıtma işlemi ikili etkileşimine ait ortalamalar ve bu ortalamalara ait homojenlik grupları Tablo 3’ te verilmiştir.

Tablo 3. Ahşap türü ve işlem bakımından yoğunluk (g/cm³) karşılaştırmaları ve homojenlik grupları (Density (g/cm³) comparisons and homogeneity groups by wood type and process)

Ahşap Türü	Ortalama	HG.
Meşe	0,761	A
Sarıçam	0,595	B
Anadolu Kestanesi	0,506	C
Sedir	0,481	D
İşlem	Ortalama	HG.
Kontrol	0,643	A
175 °C	0,591	B
205 °C	0,516	C
Not: Aynı HG içinde olmayan ortalamalar anlamlı derecede farklıdır		

Ahşap x işlem	Ortalama	HG.
Meşe kontrol	0,872	A
Meşe 175°C	0,704	B
Meşe 205°C	0,678	C
Sarıçam Kontrol	0,576	C
Sarıçam 175°C	0,569	C
Sarıçam 205°C	0,564	CD
Sedir Kontrol	0,564	CD
Anadolu Kestanesi Kontrol	0,542	DE
Anadolu Kestanesi 175°C	0,466	E
Anadolu Kestanesi 205°C	0,460	F
Sedir 175°C	0,446	F
Sedir 205°C	0,434	F

Tablo 4. Yoğunluğa ilişkin varyans analizi (Analysis of variance on density)

Kaynaklar	SD	Kareler toplamı	% Katkı	Ortalama kareler	F-Değeri	Olasılık
Ahşap Türü	3	0,72108	71,91%	0,240362	544,22	0,000
İşlem	2	0,16276	16,23%	0,081380	184,26	0,000
Ahşap x İşlem	6	0,09772	9,75%	0,016287	36,88	0,000
Hata	48	0,02120	2,11%	0,000442		
Toplam	59	1,00276	100,00%			

Bu ahşap türleri, ısıtma işlem ve bunların ikili etkileşimine ait varyans analizi Tablo 4' te verilmiştir. Tablo 3'te ahşap türü bakımından; en yüksek yoğunluk meşede ve daha sonra sırasıyla Sarıçam, Anadolu kestanesi, sedirde, işlem bakımından; en yüksek kontrol, daha sonra sırasıyla 175°C ve 205°C'lik ısıtma işlemli örneklerde bulunmuştur. Aynı zamanda bu iki faktörün ikili etkileşiminde; en yüksek yoğunluk meşe-kontrol örneklerinde, daha sonra meşe-175°C ısıtma işlemli örneklerde bulunmuştur. Kontrol örneklerindeki yoğunluklara göre her bir ahşap türünün yoğunluğu ısıtma işlem görmüş örneklerde azaldığı ve ısıtma işlem sıcaklığı arttıkça yoğunluğun daha da azaldığı tespit edilmiştir. Bunun nedeni, ısıtma işlem ile ahşap dokuda yer alan hemiselülozların ve ekstraktif maddelerin buharlaşmasından kaynaklandığı söylenebilir.

Tablo 4'teki varyans analizinde ise, ahşap türü, işlem çeşidi ve bunların ikili etkileşimlerinin anlamlı olduğu görülmüştür. Yoğunluk değişimine en yüksek katkı %71,91 oranda ahşap, daha sonra %16,23 oranla işlem ve %9,75 oranla ikili etkileşimin katkıda bulunduğu tespit edilmiştir.

3.2. Rutubet değişimi (Change of moisture)

Dört ahşap türünden örneklerin kontrol ve iki ısıtma işleminden sonraki rutubet değerlerine ilişkin sonuçların ortalamaları, ahşap ve ısıtma işlem ikili

etkileşimine ait ortalamalar ve bu ortalamalara ait homojenlik grupları Tablo 5' te verilmiştir. Tablo 5'te ahşap türü bakımından; en yüksek rutubet meşede ve daha sonra sırasıyla Sarıçam, Anadolu kestanesi ve sedirde, işlem bakımından; en yüksek kontrol, daha sonra sırasıyla 175°C ve 205°C'lik ısıtma işlemde bulunmuştur. Aynı zamanda bu iki faktörün ikili etkileşiminde; en yüksek yoğunluk sırasıyla sedir-kontrol, meşe-kontrol, Anadolu kestanesi-kontrol ve Sarıçam-kontrol örneklerinde bulunmuştur. Daha sonra Sarıçam-175°C ısıtma işlemli örneklerde bulunmuştur. Kontrol örneklerindeki rutubete göre her bir ahşap türünün rutubeti ısıtma işlem görmüş örneklerde azaldığı ve ısıtma işlem sıcaklığı arttıkça rutubetin daha da azaldığı tespit edilmiştir. Bunun nedeni, ısıtma işlemin ahşabın higroskopik özelliğini azaltmasından kaynaklandığı söylenebilir. Bu ahşap türleri, ısıtma işlem ve bunların ikili etkileşimine ait rutubet miktarı varyans analizi Tablo 6' da verilmiştir. Tablo 6'daki varyans analizinde ise, ahşap türü, işlem çeşidi ve bunların ikili etkileşimlerinin anlamlı olduğu görülmüştür. [8] nolu literatür çalışması sonuçları ile örtüşmektedir. Rutubet değişimine (azalmasına) en büyük katkı %89,72 oranla ısıtma işlem, daha sonra %3,87oranla ahşap-işlem ikili etkileşimi ve %1,03 oranla ahşabın katkıda bulunduğu tespit edilmiştir.

Tablo 5. Ahşap türü ve işlem bakımından rutubet (%) karşılaştırmaları ve homojenlik grupları ((Moisture (%) comparisons and homogeneity groups in terms of wood type and treatment)

Ahşap Türü	Ortalama	HG.	Ahşap x işlem	Ortalama	HG.
Meşe	8,724	A	Sedir Kontrol	14,370	A
Sarıçam	8,140	AB	Meşe Kontrol	13,744	A
Anadolu Kestanesi	7,824	AB	Anadolu Kestanesi Kontrol	13,210	A
Sedir	7,662	B	Sarıçam Kontrol	12,138	A
			Sarıçam 175°C	7,780	B
İşlem	Ortalama	HG.	Sarıçam 205°C	6,256	BC
Kontrol	13,365	A	Meşe 175°C	5,724	BCD
175 °C	6,175	B	Sedir 175°C	5,608	BCD
205 °C	4,723	C	Anadolu Kestanesi 175°C	5,590	BCD
			Sedir 205°C	4,444	CD
Not: Aynı HG içinde olmayan ortalamalar anlamlı derecede farklıdır			Anadolu Kestanesi 205°C	4,188	CD
			Meşe 205°C	4,006	D

Tablo 6. Rutubete ilişkin varyans analizi (Variance analysis related to humidity)

Kaynaklar	SD	Kareler toplamı	% Katkı	Ortalama kareler	F-Değeri	Olasılık
Ahşap Türü	3	9,881	1,03%	3,294	3,08	0,036
İşlem	2	856,564	89,72%	428,282	400,63	0,000
Ahşap x İşlem	6	36,905	3,87%	6,151	5,75	0,000
Hata	48	51,313	5,38%	1,069		
Toplam	59	954,662	100,00%			

3.3.Su emme değişimi (Change of water absorption)

Dört ahşap türünden örneklerin kontrol ve iki ısı işleminden sonraki su emme değerlerine ilişkin

sonuçların ortalamaları, ahşap ve ısı işlem ikili etkileşimine ait ortalamalar ve bu ortalamalara ait homojenlik grupları Tablo 7' de verilmiştir.

Tablo 7. Ahşap türü ve işlem bakımından su emme miktarları karşılaştırmaları ve homojenlik grupları (Comparisons of water absorption amounts and homogeneity groups according to wood type and process)

Ahşap Türü	Ortalama	HG.
Sarıçam	3,598	A
Meşe	3,381	A
AnadoluKestanesi	2,713	B
Sedir	2,578	B
İşlem	Ortalama	HG.
Kontrol	4,170	A
175°C	3,169	B
205°C	1,863	C
Not: Aynı HG içinde olmayan ortalamalar anlamlı derecede farklıdır		

Ahşap x işlem	Ortalama	HG.
Meşe Kontrol	5,040	A
Sarıçam Kontrol	4,798	AB
Meşe 175°C	3,858	ABC
Sarıçam 175°C	3,474	BC
Anadolu Kestanesi Kontrol	3,432	BC
Sedir Kontrol	3,412	BC
Anadolu Kestanesi 175°C	2,852	CD
Sarıçam 205°C	2,524	CDE
Sedir 175°C	2,494	CDE
Anadolu Kestanesi 205°C	1,856	DE
Sedir 205°C	1,828	DE
Meşe 205°C	1,246	E

Tablo 8. Su emme miktarlarına ilişkin varyans analizi (Variance analysis of water absorption amounts)

Kaynaklar	S D	Kareler toplamı	% Katkı	Ortalama kareler	F-Değeri	Olasılık
Ahşap Türü	3	11,185	11,70%	3,7284	8,51	0,000
İşlem	2	53,533	55,98%	26,7663	61,12	0,000
Ahşap x İşlem	6	9,881	10,33%	1,6468	3,76	0,004
Hata	48	21,021	21,98%	0,4379		
Toplam	59	95,620	100,00%			

Tablo 7’de ahşap türü bakımından; en yüksek su emme miktarındaki değişimi (azalma) Sarıçam ve meşede, daha sonra Anadolu kestanesi ve sedirde, işlem bakımından; en yüksek kontrol, daha sonra sırasıyla 175°C ve 205°C’lik ısıtma işlemde bulunmuştur. Anadolu kestanesi ve sedirde değişim oranının az olmasının nedeni ısıtma işleminin bu ahşap türlerinde higroskopikliği azaltma etkisinin düşük olmasından kaynaklandığı söylenebilir. Aynı zamanda bu iki faktörün ikili etkileşiminde en yüksek su emme miktarı meşe-kontrol daha sonra Sarıçam-kontrol örneklerinde bulunmuştur. Isıtma işlemli örneklerden en yüksek meşe-175C bulunmuştur. Kontrol örneklerindeki su emme miktarına göre her bir ahşap türünün su emme özelliği ısıtma işlem görmüş örneklerde azaldığı ve ısıtma işlem sıcaklığı arttıkça su emme özelliğinin daha da azaldığı tespit edilmiştir.

Bunun nedeni, ısıtma işleminin ahşabın higroskopik özelliğini azaltmasından ısıtma işlem görmüş

örneklerin ısıtma işleminden sonra doğal hallerindeki kadar rutubet absorbe edememesinden kaynaklandığı söylenebilir.

Tablo 8’deki varyans analizinde ise, ahşap türü, işlem çeşidi ve bunların ikili etkileşimlerinin anlamlı olduğu görülmüştür.

Su emme değişimine (azalmasına) en büyük katkı %55,98 oranla ısıtma işlem, daha sonra %11,70 oranla ahşap ve %10,33 oranla ahşap-işlem ikili etkileşimi katkıda bulunduğu tespit edilmiştir.

3.4. Ağırlık değişimi (Weight change)

Dört ahşap türünden örneklerin kontrol ve iki ısıtma işleminden sonraki ağırlık değişimine ilişkin sonuçların ortalamaları, ahşap ve ısıtma işlem ikili etkileşimine ait ortalamalar ve bu ortalamalara ait homojenlik grupları Tablo 9’ da verilmiştir.

Tablo 9. Ahşap türü ve işlem bakımından ağırlık değişimi (g) değerleri karşılaştırmaları ve homojenlik grupları (Comparisons of weight change (g) values and homogeneity groups in terms of wood type and process)

Ahşap Türü	Ortalama	HG.
Meşe	9,112	A
Sarıçam	6,634	B
Sedir	6,095	C
Anadolu Kestanesi	5,698	D
İşlem	Ortalama	HG.
Kontrol	7,512	A
175°C	7,003	B
205°C	6,139	C
Not: Aynı HG içinde olmayan ortalamalar anlamlı derecede farklıdır		

Ahşap x işlem	Ortalama	HG.
Meşe Kontrol	5,040	A
Sarıçam Kontrol	4,798	AB
Meşe 175°C	3,858	ABC
Sarıçam 175°C	3,474	BC
Anadolu Kestanesi Kontrol	3,432	BC
Sedir Kontrol	3,412	BC
Anadolu Kestanesi 175°C	2,852	CD
Sarıçam 205°C	2,524	CDE
Sedir 175°C	2,494	CDE
Anadolu Kestanesi 205°C	1,856	DE
Sedir 205°C	1,828	DE
Meşe 205°C	1,246	E

Tablo 10. Ağırlık değişimi değerlerine ilişkin varyans analizi (Variance analysis of weight change values)

Kaynaklar	S D	Kareler toplamı	% Katkı	Ortalama kareler	F-Değeri	Olasılık
Ahşap Türü	3	105,854	79,69%	35,2847	379,99	0,000
İşlem	2	19,268	14,51%	9,6341	103,75	0,000
Ahşap x İşlem	6	3,257	2,45%	0,5428	5,85	0,000
Hata	48	4,457	3,36%	0,0929		
Toplam	59	132,836	100,00%			

Bu ahşap türleri, ısıtıl işlem ve bunların ikili etkileşimine ait ağırlık değişimi varyans analizi Tablo 10' da verilmiştir. Tablo 9'da ahşap türü bakımından; en yüksek ağırlık değişim miktarı meşede, daha sonra sırasıyla Sarıçam, sedir ve Anadolu kestanesi'nde, işlem bakımından; en yüksek kontrol örneklerinde, daha sonra sırasıyla 175°C ve 205°C'lik ısıtıl işlemde bulunmuştur. Aynı zamanda bu iki faktörün ikili etkileşiminde en yüksek ağırlık değişim miktarı meşe-kontrolde daha sonra Sarıçam-kontrol örneklerinde bulunmuştur. Isıl işlemler örneklerden en yüksek meşe-175°C örneklerinde bulunmuştur. Kontrol örneklerindeki ağırlık değişim miktarına göre her bir ahşap türünün ağırlık değişiminin ısıtıl işlem görmüş örneklerde azaldığı ve ısıtıl işlem sıcaklığı arttıkça ağırlık değişim miktarının daha da azaldığı tespit edilmiştir. Bunun nedeninin, ısıtıl işlem ile ahşap dokuda yer alan hemiselülozların ve ekstraktif

maddelerin buharlaşması ile yoğunluk azalmasından kaynaklandığı söylenebilir.

Tablo 10'daki ağırlık değişimi varyans analizinde ise, ahşap türü, işlem çeşidi faktörlerinin ve bunların ikili etkileşimlerinin anlamlı olduğu görülmüştür.

Ağırlık değişimine (kaybına) en büyük katkı %79,69 oranla ahşap, daha sonra %14,51 oranla işlem ve %2,45 oranla ahşap-işlem ikili etkileşimi katkıda bulunduğu tespit edilmiştir.

3.5. Boyutsal değişim - kararlılık (Dimensional change – stability)

Dört ahşap türünden örneklerin kontrol ve iki ısıtıl işlemden sonraki boyutsal değişimlerine ilişkin sonuçların ortalamaları, ahşap ve ısıtıl işlem ikili etkileşimine ait ortalamalar ve bu ortalamalara ait homojenlik grupları Tablo 11' de verilmiştir.

Tablo 11. Ahşap türü ve işlem bakımından boyutsal değişim (%) değerleri karşılaştırmaları ve homojenlik grupları (Dimensional change (%) values comparisons and homogeneity groups in terms of wood type and process)

Ahşap Türü	Ortalama	HG.	Ahşap x işlem	Ortalama	HG.
Meşe	5,197	A	Sedir Kontrol	7,766	A
Sarıçam	4,268	B	Meşe Kontrol	7,706	A
Sedir	4,168	B	Meşe 175°C	5,836	B
Anadolu Kestanesi	2,819	C	Sarıçam Kontrol	4,834	BC
			Sarıçam 175°C	4,306	BCD
İşlem	Ortalama	HG.	Sarıçam 205°C	3,664	CDE
Kontrol	5,979	A	Anadolu Kestanesi Kontrol	3,610	CDEF
175 °C	3,876	B	Anadolu Kestanesi 175°C	2,920	DEF
205 °C	2,485	C	Sedir 175°C	2,442	EF
			Sedir 205°C	2,298	EF
Not: Aynı HG içinde olmayan ortalamalar anlamlı derecede farklıdır			Meşe 205°C	2,050	EF
			Anadolu Kestanesi 205°C	2,011	EF

Tablo 12. Boyutsal değişime (kararlılık) ilişkin varyans analizi (Analysis of variance for dimensional change (stability))

Kaynaklar	S D	Kareler toplamı	% Katkı	Ortalama kareler	F- Değeri	Olasılık
Ahşap Türü	3	43,15	16,32%	14,3824	22,61	0,000
İşlem	2	123,77	46,81%	61,8851	97,31	0,000
Ahşap x İşlem	6	66,95	25,32%	11,1591	17,55	0,000
Hata	48	30,53	11,55%	0,6360		
Toplam	59	264,40	100,00%			

Tablo 11’de ahşap türü bakımından; en yüksek boyut değişimi miktarı meşede, daha sonra sırasıyla Sarıçam, sedir ve Anadolu kestanesi’nde, işlem bakımından; en yüksek kontrol örneklerinde, daha sonra sırasıyla 175°C ve 205°C’lik ısı işlemde bulunmuştur. Aynı zamanda bu iki faktörün ikili etkileşiminde en yüksek boyut değişimi miktarı sedir-kontrol ve meşe-kontrol örneklerinde bulunmuştur. Isıl işlemlenmiş örneklerden en yüksek meşe-175°C bulunmuştur. Kontrol örneklerindeki boyut değişimi miktarına göre her bir ahşap türünün boyut değişimi ısı işlem görmüş örneklerde azaldığı ve ısı işlem sıcaklığı arttıkça boyut değişimi miktarının daha da azaldığı tespit edilmiştir.

Bunun nedeni, ısı işlemin ahşabın higroskopik özelliğini azaltmasından ısı işlem görmüş örneklerin ısı işlemden sonra doğal hallerindeki kadar rutubet absorbe edememesinden kaynaklandığı söylenebilir.

Tablo 12’deki boyut değişim varyans analizinde ise, ahşap türü, işlem çeşidi faktörlerinin ve bunların ikili etkileşimlerinin anlamlı olduğu görülmüştür.

Boyutsal değişime (kararlılığa) en büyük katkı %46,81 oranla ısı işlem, daha sonra %25,32 oranla ahşap-işlem ikili etkileşimi ve %16,32 oranla ahşabın katkıda bulunduğu tespit edilmiştir.

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Her iki ısı işlem düzeyindeki sıcaklık derecesinde (175°C - 205°C) ve 3 saatlik uzun süreli ısı işlem uygulamasından sonraki örneklerin fiziksel özelliklerindeki değişimler incelendiğinde;

Tablo 13’te tüm fiziksel özellik değerlerinin kendi kontrol örneklerin değerlerine göre azalarak değiştiği görülmektedir.

Yoğunluk değişimi , rutubet değişimi, su emme değişimi , ağırlık değişimi, boyutsal değişim (kararlılık) aşağıdaki şekildedir.

Tablo 13. Ahşap türlerinde ısıtma işlemine göre fiziksel özellik değişimleri (Physical property changes in wood species according to heat treatment)

Fiziksel Özellikler	Ahşap	Kontrol	175 °C	Değişim - % (175°C /Kontrol)	205 °C	Değişim - % (205°C /Kontrol)
Yoğunluk	Sedir	0,564	0,446	-20,9	0,434	-23,1
	Sarıçam	0,576	0,569	-1,2	0,564	-2,1
	Meşe	0,872	0,704	-19,2	0,678	-22,2
	Anadolu kestanesi	0,542	0,466	-14,1	0,460	-15,1
Rutubet	Sedir	14,370	5,608	-60,9	4,444	-69,1
	Sarıçam	12,138	7,780	-35,9	6,256	-48,4
	Meşe	13,744	5,724	-58,3	4,006	-70,8
	Anadolu kestanesi	13,210	5,590	-57,6	4,188	-68,2
Su emme	Sedir	3,412	2,494	-26,9	1,828	-46,4
	Sarıçam	4,798	3,474	-27,5	2,524	-47,3
	Meşe	5,040	3,858	-23,4	1,246	-67,7
	Anadolu kestanesi	3,432	2,852	-16,8	1,856	-45,9
Ağırlık kaybı	Sedir	3,412	2,494	-26,9	1,828	-46,4
	Sarıçam	4,798	3,474	-27,5	2,524	-47,3
	Meşe	5,040	3,858	-23,4	1,246	-75,2
	Anadolu kestanesi	3,432	2,852	-16,8	1,856	-45,9
Boyutsal kararlılık	Sedir	7,766	2,442	-68,5	2,298	-70,4
	Sarıçam	4,834	4,306	-10,9	3,664	-24,2
	Meşe	7,706	5,836	-24,2	2,050	-73,3
	Anadolu kestanesi	3,610	2,920	-19,1	2,011	-44,29

Rutubet değişimi (Change of moisture): 175°C'lik ısıtma işlem sürecinde iğne yapraklılardan Sarıçam ve sedirin rutubet değişim ortalaması %48,4 iken, yayvan yapraklılardan meşe ve Anadolu kestanesi'nin rutubet değişim ortalaması %57,9 olarak (yaklaşık %10 fazlası) gerçekleşmiştir. 205 °C lik ısıtma işlem sürecinde bu rutubet değişimi Sarıçam ve sedirde ortalama %58,7 olurken meşe ve Anadolu kestanesi'nde %59,5 olarak gerçekleşmiştir. Her iki ahşap türündeki rutubet ortalama değişimi 175°C'lik ve 205°C'lik süreçte birbirlerine yakın ve ısıtma işlem sıcaklığı artışına bağlı olarak rutubet değişimi %7-8 oranında daha da azalmıştır. Bir başka ifade ile; ısıtma işlem ahşabın daha düşük düzeyde rutubet dengesi kurmasına neden olmuştur. Bu durumda ısıtma işlem görmüş ahşabın mevcut hidroksil gruplarının azaldığı ve buna bağlı olarak daha az su absorbe ettiği

söylenbilir. Bu sonuç [4], [6] ve [8] nolu literatür çalışmalarının sonuçları ile örtüşmektedir.

Su emme değişimi (Change of water absorption): 175°C'lik ısıtma işlem sürecinde iğne yapraklılardan Sarıçam ve sedirin su emme kabiliyeti değişim ortalaması %27,2 iken, yayvan yapraklılardan meşe ve Anadolu kestanesi'nin su emme kabiliyeti değişim ortalaması %20,1 olarak (yaklaşık %7 daha az) gerçekleşmiştir. Meşe ve Anadolu kestanesi'nde su emme kabiliyeti değişiminin düşük çıkmasının nedeni ısıtma işlem sıcaklığının düşük olmasından ve meşe ve Anadolu kestanesi'ne ısıtma işlem etkisinin düşük kalmasından kaynaklandığı söylenbilir. 205°C' lik ısıtma işlem sürecinde bu su emme kabiliyeti değişimi Sarıçam ve sedirde ortalama %46,8 olurken, meşe ve Anadolu kestanesi'nde %56,8 olarak (yaklaşık %10 fazlası) gerçekleşmiştir. Her iki ahşap türündeki su emme

kabiliyeti ortalama değişimi 175°C'lik ve 205°C'lik süreçte birbirlerine yakın ve ısı işlem sıcaklığı artışına bağlı olarak %8-10 oranında daha da azalmıştır. Bu durumda, ısı işlem görmüş ahşabın mevcut hidroksil gruplarının azaldığı ve buna bağlı olarak daha az su absorbe ettiği, buna bağlı olarak da su emme kabiliyetinin azaldığı söylenebilir. Bu sonuç [4], [6] ve [8] nolu çalışmaların sonuçları ile örtüşmektedir.

Ağırlık değişimi (Weight change): 175°C lik ısı işlem sürecinde iğne yapraklılardan Sarıçam ve sedirin ağırlık değişimi ortalaması %27,2 iken, yayvan yapraklılardan meşe ve Anadolu kestanesi'nin ağırlık değişim ortalaması %20,1 olarak (yaklaşık %7 daha az) gerçekleşmiştir. Meşe ve Anadolu kestanesi'nde ağırlık kaybının düşük çıkmasının nedeni ısı işlem sıcaklığının düşük olmasından ve meşe ve Anadolu kestanesi'ne ısı işlem etkisinin düşük kalmasından kaynaklandığı söylenebilir. 205°C lik ısı işlem sürecinde bu ağırlık değişimi Sarıçam ve sedirde ortalama %46,8 olurken, meşe ve Anadolu kestanesi'nde %60,5 olarak gerçekleşmiştir. Her iki ahşap türündeki ağırlık kaybı ortalama değişimi 175°C'lik süreçte ve 205°C'lik süreçte birbirlerine yakın ve ısı işlem sıcaklığı artışına bağlı olarak ağırlık değişimi %10-14 oranında daha da artmıştır. Bir başka ifade ile; kontrol örneklerinin ağırlığına göre ısı işlem görmüş örneklerin ağırlığı daha da azalmış, ısı işlem sıcaklığına bağlı olarak işlem görmüş örneklerin ağırlık farkları da ortaya çıkmıştır. Bu durumda, ısı işlem görmüş ahşabın mevcut hemiselülozlarının ve ekstraktif maddelerinin ısı işlemde buharlaşarak madde kaybına uğradığı (azaldığı) ve buna bağlı olarak yoğunluğun ve ağırlığın azaldığından kaynaklandığı söylenebilir. Bu sonuç [2],[4] ve [8] nolu çalışmaların sonuçları ile örtüşmektedir.

Boyutsal değişim - kararlılık (Dimensional change – stability): 175°C'lik ısı işlem sürecinde iğne yapraklılardan Sarıçam ve sedirin boyutsal değişim ortalaması %39,7 iken, yayvan yapraklılardan meşe ve Anadolu kestanesi'nin boyutsal değişim ortalaması %21,6 olarak (yaklaşık %18 daha az) gerçekleşmiştir. Meşe ve Anadolu kestanesi'nde boyutsal değişimin düşük çıkmasının nedeni ısı işlem sıcaklığının düşük olmasından ve meşe ve Anadolu kestanesi'ne ısı işlem etkisinin düşük kalmasından kaynaklandığı söylenebilir. 205°C' lik ısı işlem sürecinde bu boyutsal değişim Sarıçam ve sedirde ortalama %47,3 olurken, meşe ve Anadolu kestanesi'nde %58,7 olarak gerçekleşmiştir. Her iki ahşap türündeki boyutsal değişim ortalaması

175°C'lik ve 205°C'lik süreçte birbirlerine yakın ve ısı işlem sıcaklığı artışına bağlı olarak boyutsal değişim %10 civarında daha da azalmış ve kararlılık artmıştır. Bu durumda, ısı işlem görmüş ahşabın mevcut hidroksil gruplarının azalacağı ve buna bağlı olarak daha az su absorbe edeceği ve boyutsal değişimin daha azalacağı söylenebilir. Bu sonuç [4],[6] ve [8] nolu çalışmaların sonuçları ile örtüşmektedir.

Sonuç olarak, iki farklı sıcaklık derecesinde (175°C -205°C) ayrı ayrı, aynı fırın kabinde ısı işlem görmüş iğne yapraklı ve yayvan yapraklı ahşap türlerinin fiziksel özellik deneysel sonuçlarının birbirleri ile karşılaştırmalarında kontrol örnekleri değerlerine göre azalarak değişim oranlarının birbirlerinden çok fazla olmadığı tespit edilmiştir. Isı işlem ile ilgili literatür incelendiğinde; iğne yapraklı ahşap türü için fırın sıcaklığının 170°C-190°C arasında, yayvan yapraklı ahşap türü için 200°C-220°C derecenin ideal olduğu bildirilmektedir. Bu çalışmadan elde edilen deneysel sonuçlar; hem 175°C ve hem de 205°C aynı kabinde ısı işlem göre iğne yapraklı ve yayvan yapraklı ahşap örneklerinin fiziksel özellik değişimlerinin birbirlerine yakın olduğu, her iki ahşap türü ısı işleminin biraz daha yükseltilmiş kabin sıcaklığında (190°C) yapılabileceği ve böylece, hem iki ahşap türünde birbirine çok daha yakın ısı işlem etkisi elde edilebileceği hem de önemli miktarda enerji tasarrufu sağlanabileceği mümkün olabilecektir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

Bu araştırma Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından FYL-2024-9547 nolu proje kapsamında desteklenmiştir. / This research was supported by Gazi University Scientific Research Projects Unit under project number FYL-2024-9547.

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 or legal-specific permission.

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

Kevser KÖKTÜRK: Deneylei yapmış, sonuçlarını analiz etmiş ve makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

She conducted the experiments, analyzed the results, and completed the writing process of the article.

Mustafa ALTUNOK: Deneylein yapımına, sonuçların analizine ve makalenin yazımına katkıda bulunmuştur

He contributed to the conduct of experiments, analysis of results, and 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 (REFERENSES)

- [1] Altunok M., Güneş M. (2022) . Ön Isıl İşlem Uygulanmış Ahşap Kirişlerin Farklı İklim Şartlarındaki Mekanik Davranışlarının İncelenmesi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, GU J Sci, Part C, 10(2): 300-313).
- [2] Altunok M. ,Bülbül R., Güneş M. (2023). Farklı Isıl İşlem ve Klimatik Uygulamanın Yapısal Ahşabın Fiziksel ve Mekanik Özellikleri Üzerine Etkilerinin Deneysel İncelenmesi ,Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi11(1):263-272.
- [3] Aydemir D., Gündüz G.(2009). Ahşabın Fiziksel, Kimyasal, Mekanik Ve Biyolojik Özellikleri Üzerine Isıyla Muamelenin Etkisi,

Bartın Orman Fakültesi Dergisi Cilt:11,Sayı:15,71-81.

- [4] Bürüç D., Aydemir G., Bakır K. (2019). Doğu Kayını ve Saplı Meşe Odunlarının Bazı Özellikleri Üzerine Isıl İşlemin Etkisi, Bartın Üniversitesi, Orman Fakültesi Dergisi ,21(3): 713-721.
- [5] Doruk Ş., Altunok M., Perçin O. (2010), Emprenye ve Isıl İşlemin Ahşap Malzemenin Bazı Fiziksel ve Mekanik Özelliklerine Etkileri , Politeknik Dergisi, 2023; 26(4).
- [6] Fengel D and Wegener G.(1989) , Wood : Chemistry, Ultrastructure Reactions Walter De Germany.
- [7] Flanagan, (2017) , Kompozit Ahşap Kuleler, 80 Katlı Ahşap Gökdelen Projesi. Ahşap Yapılarda Koruma ve Onarım Sempozyumu 5 (s. 179-192). İstanbul.
- [8] Perçin O.,Uzun O., Saçlı C. (2016), Isıl İşlem Görmüş Meşe Odununun (Quercus Petraea L.) Bazı Fiziksel Özelliklerinin ve Yüzey Pürüzlülüğünün Belirlenmesi,IFC İnternational Furniture Congress.
- [9] TS ISO 13061 - TS ISO 13061- : Odunun fiziksel ve mekanik özellikleri – Kusursuz küçük ahşap numunelerin deney yöntemleri - Bölüm 1: Fiziksel ve mekanik deneyler için nem muhtevasının belirlenmesi / Physical and mechanical properties of wood - Test methods for small clear wood specimens - Part 1: Determination of moisture content for physical and mechanical tests, Türk standartları Enstitüsü, 2.12.2021, ANKARA.
- [10] TS EN 4084: Wood- Determination of Radial and Tngential Swelling, 20 December 1983, Türk Standartları. ANKARA.

Voltage Level Managements of Multilevel Inverter Based on Renewable Energy Sources and Environment Conditions

Ahmed Yaseen Hamad ^{1*}  Ersagun Kürşat Yaylacı ¹  Rakan Khalil Antar ² 

¹ Karabuk University, Electrical and Electronics Engineering Department, Karabuk, Turkey

² Northern Technical University, Technical Engineering College Mosul, Mosul Iraq

Article Info

Research article
Received: 23/06/2024
Revision: 02/08/2024
Accepted: 10/10/2024

Keywords

Standalone, PV, wind turbine, hybrid renewable energy, multilevel inverter

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 23/06/2024
Düzeltilme: 02/08/2024
Kabul: 10/10/2024

Anahtar Kelimeler

Bağımsız, PV, rüzgar türbini, hibrit yenilenebilir enerji, çok seviyeli invertör

Graphical/Tabular Abstract (Grafik Özet)

This study presents a hybrid multilevel inverter (MLI) design that minimizes switching devices while utilizing multiple renewable energy sources, achieving flexible output levels. The system demonstrates effective performance, with total harmonic distortion (THD) ranging from 3.1% to 1.04%, in compliance with IEEE Standard 519-2022. /Bu çalışma, birden fazla yenilenebilir enerji kaynağını kullanarak anahtarlama elemanlarını en aza indiren bir hibrit çok seviyeli inverter (MLI) tasarımını sunmaktadır ve esnek çıkış seviyeleri sağlamaktadır. Sistem, IEEE Standardı 519-2022 ile uyumlu olarak toplam harmonik distorsiyon (THD) değerinin %3.1'den %1.04'e kadar değiştiğini göstermektedir.

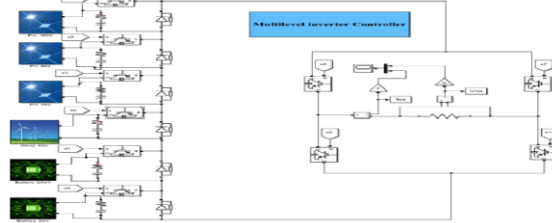


Figure A. The proposed MLI (Önerilen MLI)

Highlights (Önemli noktalar)

- Innovative Design / Yenilikçi Tasarım.
- Utilization of Renewable Energy Sources / Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Kullanımı.
- Flexibility in Output Levels / Çıkış Seviyelerinde Esneklik.
- Performance Improvement / Performans İyileştirmesi.

Aim (Amaç): A hybrid multilevel inverter design that uses fewer switching elements and multiple renewable energy sources to produce high-quality AC output while optimizing performance by reducing total harmonic distortion (THD). / Daha az anahtarlama elemanı ve birden fazla yenilenebilir enerji kaynağı kullanarak yüksek kaliteli AC çıkışı üreten bir hibrit çok seviyeli inverter tasarımı, toplam harmonik distorsiyonu (THD) azaltarak performansı optimize etmektedir.

Originality (Özgünlük): This study presents a novel hybrid multilevel inverter (MLI) design that minimizes the number of switching devices while utilizing a modulation technique for various renewable energy sources. This innovative approach enhances flexibility in generating different output levels and effectively addresses harmonic distortion, ensuring high-quality voltage and current waveforms. / Bu çalışma, çeşitli yenilenebilir enerji kaynakları için modülasyon tekniği kullanarak anahtarlama elemanlarının sayısını en aza indiren yenilikçi bir hibrit çok seviyeli inverter (MLI) tasarımını sunmaktadır. Bu yenilikçi yaklaşım, farklı çıkış seviyeleri üretme esnekliğini artırırken harmonik bozulmayı etkili bir şekilde ele almakta ve yüksek kaliteli gerilim ve akım dalga formlarını sağlamaktadır.

Results (Bulgular): the system achieves a (THD) of 1.04% with a 37-level output when all sources are operational. and 1.19% with 33-level output and 0.99% at 35-level output. Finally the output voltage remains at 31 levels, demonstrating effective voltage and THD management. / Sistem, tüm kaynaklar çalışırken 37 seviye çıkışta %1.04 toplam harmonik distorsiyon (THD) elde etmektedir. 33 seviye çıkışta %1.19 ve 35 seviye çıkışta %0.99 THD ile çalışmaktadır. Son olarak, çıkış gerilimi 31 seviyede kalmakta ve bu da gerilim ile THD yönetiminin etkinliğini göstermektedir.

Conclusion (Sonuç): These findings confirm the system's ability to maintain low THD across various operational scenarios. / Bu bulgular, sistemin farklı çalışma senaryolarında düşük toplam harmonik distorsiyon (THD) değerini koruma yeteneğini doğrulamaktadır.



Voltage Level Managements of Multilevel Inverter Based on Renewable Energy Sources and Environment Conditions

Ahmed Yaseen Hamad^{1*} Ersagun Kürşat Yaylacı¹ Rakan Khalil Antar²

¹ Karabuk University, Electrical and Electronics Engineering Department, Karabuk, Turkey

² Northern Technical University, Technical Engineering College Mosul, Mosul Iraq

Article Info

Research article
Received: 23/06/2024
Revision: 02/08/2024
Accepted: 10/10/2024

Keywords

Standalone, PV, wind turbine, hybrid renewable energy, multilevel inverter

Abstract

Due to its advantages in applications requiring high voltage, high power, and low harmonics, multilevel inverter (MLI) technology has attracted a lot of attention. Using multilevel inverter technology, one can expect to obtain output voltage and current waveforms of the highest quality. However, as the number of levels increases, so does the numbers of the switching devices and energy sources. This issue can be solved by creating the MLI using hybrid technology. This paper is devoted to designing a hybrid multilevel inverter with fewer switching elements and a modulation technique for multiple energy sources. In multilevel inverters, the most essential requirements are the evolution of the hybrid MLI model and a decrease of harmonic components in the output of the inverter voltage/current. This study proposes a system composed of four distinct renewable energy sources besides a backup battery. Three solar PV panel systems with voltages of (8:4:2)E are recommended, along with a wind turbine of 2E, a battery source of 1E, and a battery source of 1E. The sum of all DC sources was (8:4:2:2:1:1)E to generate a 37-level voltage on the output if all renewable energies are available. The system can also work to generate 35-level (without using batteries). Also, it can generate 33-level (without wind), 9-level (without PV systems), and 3-level (just using one of the battery systems). So, the system is flexible to generate different output levels according to what renewable energy sources are available. The system was created using the MATLAB software. The results proved that the designed hybrid multilevel has good THD responses for each level which ranges from 3.1% to 1.04% from level 3 to 37 of MLI regarding the IEEE Standard of 519-2022.

Yenilenebilir Enerji Kaynaklarına ve Ortam Koşullarına Göre Çok Seviyeli İnvvertörün Gerilim Seviyesi Yönetimleri

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 23/06/2024
Düzeltilme: 02/08/2024
Kabul: 10/10/2024

Anahtar Kelimeler

Bağımsız, PV, rüzgar türbini, hibrit yenilenebilir enerji, çok seviyeli invvertör

Öz

Yüksek gerilim, yüksek güç ve düşük harmonik gerektiren uygulamalardaki avantajları nedeniyle çok seviyeli invvertör (MLI) teknolojisi büyük ilgi görmüştür. Çok seviyeli invvertör teknolojisini kullanarak, en yüksek kalitede çıkış voltajı ve akım dalga formlarının elde edilmesi beklenebilir. Ancak seviye sayısı arttıkça anahtarlama cihazlarının ve enerji kaynaklarının sayısı da artar. Bu sorun, hibrit teknoloji kullanılarak MLI oluşturularak çözülebilir. Bu makale, daha az anahtarlama elemanına ve çoklu enerji kaynakları için bir modülasyon tekniğine sahip hibrit çok seviyeli bir invvertörün tasarlanmasına ayrılmıştır. Çok seviyeli invvertörlerde en temel gereksinimler, hibrit MLI modelinin geliştirilmesi ve invvertör voltajı/akımının çıkışındaki harmonik bileşenlerin azaltılmasıdır. Bu çalışma, yedek bataryanın yanı sıra dört farklı yenilenebilir enerji kaynağından oluşan bir sistem önermektedir. Gerilimleri (8:4:2)E olan üç güneş PV paneli sisteminin yanı sıra 2E'lik bir rüzgar türbini, 1E'lik bir akü kaynağı ve 1E'lik bir akü kaynağı önerilir. Tüm yenilenebilir enerjilerin mevcut olması durumunda çıkışta 37 seviyeli bir voltaj oluşturmak için tüm DC kaynaklarının toplamı (8:4:2:2:1:1)E idi. Sistem ayrıca 35 seviyeli (pil kullanmadan) üretim yapabilecek şekilde de çalışabilmektedir. Ayrıca 33 seviyeli (rüzgarsız), 9 seviyeli (PV sistemli) ve 3 seviyeli (sadece akü sistemlerinden birini kullanarak) üretim yapabilmektedir. Dolayısıyla sistem, mevcut yenilenebilir enerji kaynaklarına göre farklı çıktı seviyeleri üretebilecek kadar esnek. Sistem MATLAB yazılımı kullanılarak oluşturulmuştur. Sonuçlar, tasarlanan hibrit çoklu seviyenin, 519-2022 IEEE Standardına göre MLI'nın 3. seviyesinden 37. seviyesine kadar %3,1 ila %1,04 arasında değişen her seviye için iyi THD yanıtlarına sahip olduğunu kanıtladı.

1. INTRODUCTION (GİRİŞ)

A multilevel inverter (MLI) is a power electronic device used to convert DC sources into AC type with multiple voltage levels. Unlike conventional two-level inverters, which can only generate two voltage levels (positive and negative), multilevel inverters can generate multiple different voltage levels, resulting in a smoother waveform, more sinusoidal AC waveform. This characteristic makes them attractive for high-power applications, especially in renewable energy systems, motor drives, and high-voltage transmission systems [1]. The basic principle of a multilevel inverter is to synthesize the required AC voltage waveform through the cascaded combination of multiple DC voltage sources. The number of voltage levels can affect the output waveform quality and other performance parameters such as switching losses and efficiency.

MLI technologies can be implemented to enhance power quality, increase stability, improve output voltage and current waveforms, decrease electromagnetic interference (EMI), decrease the altered size, and decrease the total harmonic distortion (THD). Reducing THD value is the primary advantage of MLIs over conventional inverters.

2. LITERATURE REVIEW (LITERATÜR TARAMASI)

Multilevel inverters are ideally suited for standalone applications requiring a few kilowatts or less [2]. The primary challenge that may confront renewable energy source (RES) is the production of electrical energy from unregulated DC or AC power sources, which must be converted into regulated DC or AC power [3]. There are numerous forms of RES, including solar energy, wind energy, geothermal energy, and others. The most prevalent RES applications are solar and wind energies [4]. RESs have increased in recent years due to their durability, eco-friendliness, and independence, which make them a viable replacement for conventional generation units. The primary issues with fossil fuels are that they require routine maintenance, are non-renewable, and contribute to global warming and ecological imbalance. These factors increase interest in the construction and advancement of RES-based electricity generation. Increasing burdens necessitate an increase in RES, which will become a viable option for system-supporting electrical technology applications [5]. Modified MLIs are viable alternatives for systems

using solar PV and/or other renewable energy systems.

In 2018 [6], compared to fossil fuel units, renewable energy sources are suggested to dominate the scene of local power generation due to the highly efficient and minimal operating costs for independent networks. In 2021 [7], the characteristics of MLIs were summarized to highlight the significance of grid-tied PV systems, and novel converters were applied to enhance energy conversion in existing energy systems. In 2020 [8], the primary advantages of MLIs, which are focused on THD, EMI, and dV/dt switch stress were discussed. Utilizing MLI will decrease the number of power electronics components while simultaneously enhancing power quality and decreasing total cost. In 2019 [9], MATLAB Simulink was used to model an MLI fed by renewable energy sources (wind and solar energy) in a stand-alone system with varying wind speeds and solar irradiances. In 2018 [10], a study introduced a fresh perspective by investigating a novel 31-level asymmetric multilevel inverter using multi-carrier pulse width modulation (PWM). This approach, along with the utilization of an alternative phase opposition disposition PWM technique to achieve 3.75% THD and compliance with IEEE Standard 519, presents a unique contribution.

In 2020 [11], research utilizes a reference sinusoidal signal and a triangle carrier signal for pulse width modulation in multilevel inverters. The research investigates the effects of carrier signal level shifting on a hybrid PV-based multilevel inverter, emphasizing the utilization of harmonics to enhance voltage quality and minimize losses. In 2019 [12], a concept for a hybrid electric boat power system has been introduced. This system incorporates diverse renewable energy sources including wind turbines, solar PV panels, and polymer electrolyte membrane fuel cells. The hybrid power system efficiently drives the boat's electric motor. Energy distribution between these sources is controlled using circuit breakers, depending on wind speed conditions. The proposed three-component system was simulated using SIMULINK. Simulation results demonstrate the electric boat's continuous operation even in varying weather conditions such as solar irradiance and wind speed fluctuations. In 2021 [13], this research highlights the advantages of multilevel inverters: high output voltage with low distortion. It presents a 15-level inverter design using modified sinusoidal pulse width modulation for reduced

harmonic distortion and variable output voltage. Simulation shows that non-zero-level (NZL) inverters achieve lower distortion compared to zero-level (ZL). Results confirm the effectiveness of the power circuit and modified absolute sinusoidal PWM controller in achieving the desired voltage with reduced THD.

In this study, single-phase cascade MLIs are designed and implemented for stand-alone RES (PV, wind turbine, batteries). By defining E as 20 Volts, the configuration of the power supplies is (1:1:2:2:4:8)E to generate a different 37 voltage level. Compared to conventional types, the designed system reduces switching losses, THD, price, and size, and improves output waveforms. A test bench including six feed sources was built in MATLAB/Simulink, as shown in Fig. 1, and the performance of the suggested MLIs was examined in terms of the power quality in detail. The results proved that the designed hybrid multilevel has good THD responses for each level of MLI regarding the IEEE Standard of 519-2022.

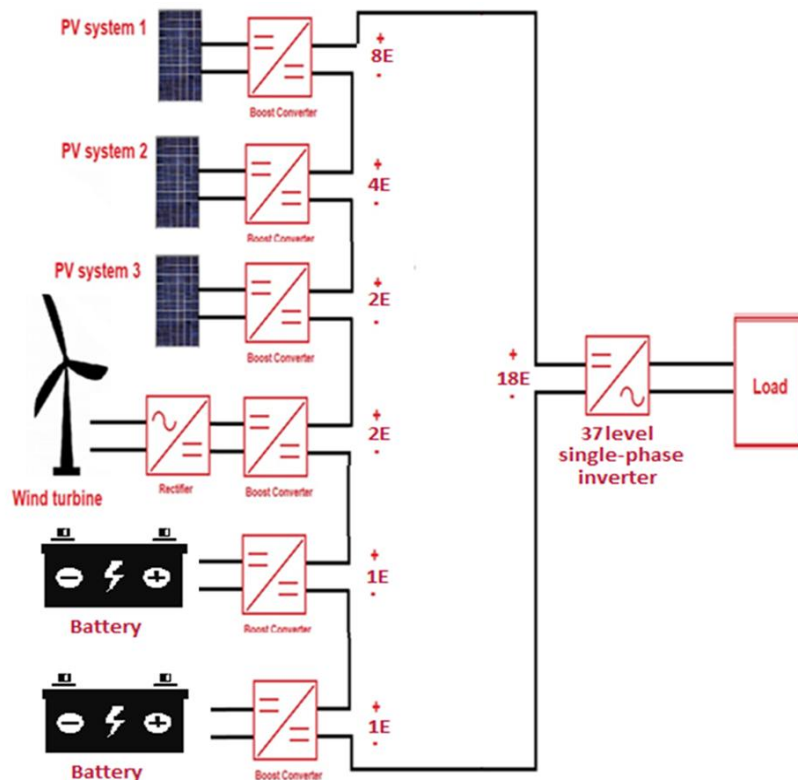
3. ARCHITECTURE OF THE SUGGESTED SYSTEM (ÖNERİLEN SİSTEMİN MIMARISI)

Different structures of asymmetrical multilevel inverters with fewer power electronics switches using a modified absolute sinusoidal PWM method have been done [14–15]. The total system in Fig. 1a

consists of four separate RESs as one wind turbine energy system based on a PMSG type to produce 2E, and three photovoltaic systems with voltages of (2:4:8)E. Also, two battery systems each one producing 1E as a backup circuit for an emergency are used. The symbol (E) is the output voltage level of the boost circuit. The DC sources are set together in the form (8:4:2:2:1:1)E to get an output voltage of 37 levels (+18E to -18E). If the proposed circuit works with three PV systems and two batteries, the structure will be (8, 4, 2, 1, 1)E to produce an output voltage of 33-level. If one battery isn't working, the suggested circuit will work with three PV systems, a wind turbine, and a battery (8, 4, 2, 2, 1)E to produce 35-level. If both wind turbines and one battery are out of work, the system will produce 31-level. The system also can produce 9-level without PV systems and 5-level without battery systems.

3.1. DC-DC Boost Converter (Dc-Dc Yükseltici Dönüştürücü)

A step-up (boost) converter is one of the most used converters to increase and regulate the DC output voltage of the PV solar system, wind turbine system, and battery backup system, to meet the desired DC bus voltage. The circuit diagram of the boost converter is shown in Fig. 2.



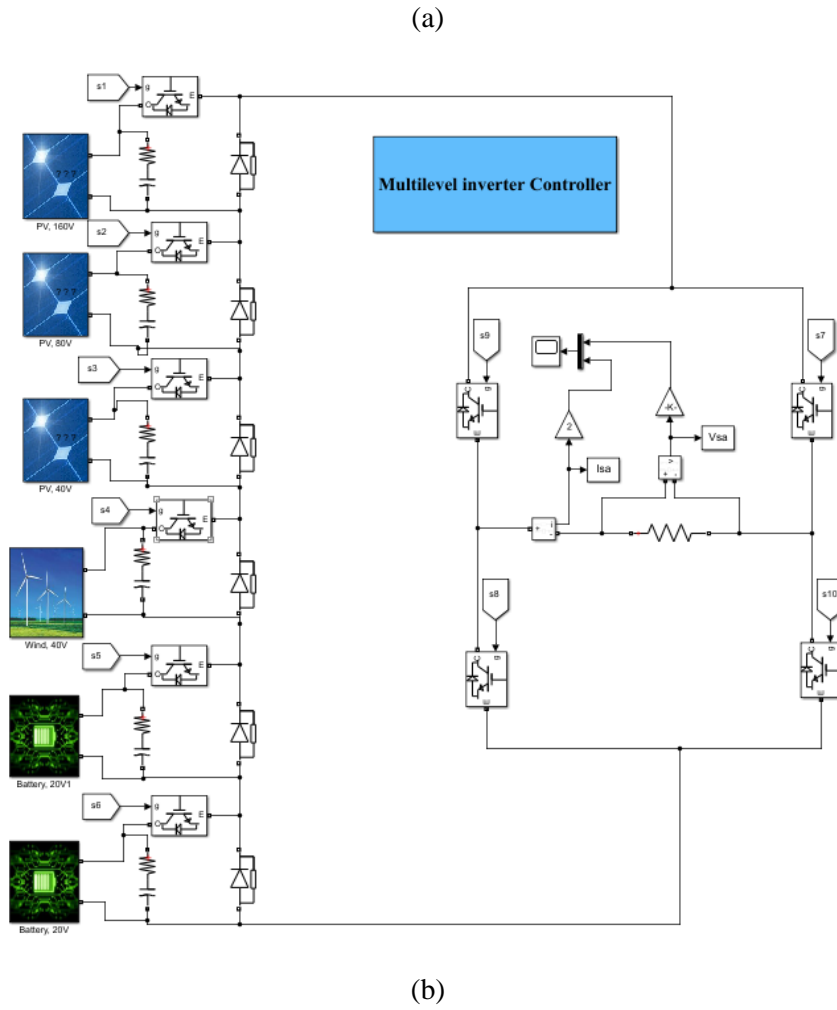


Figure 1. The proposed MLI with different RESs; (a) structure, and (b) model circuits.
(Şekil 1. Farklı RES'lerle önerilen MLI; (a) yapı ve (b) model devreleri)

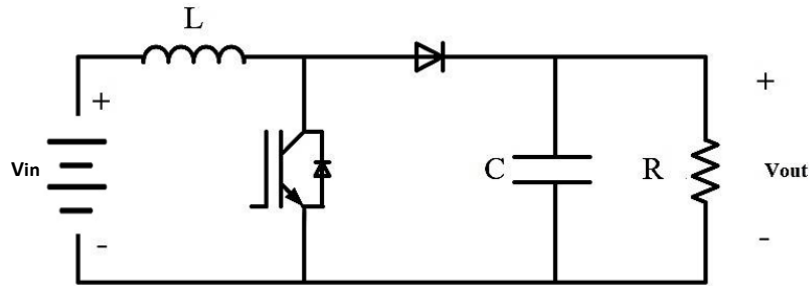


Figure 2. Circuit diagram of DC-DC step-up converter
(Şekil 2. DC-DC yükseltici dönüştürücünün devre şeması)

The boost converter's duty cycle (D) is determined as [16]:

$$D = 1 - \frac{V_{in}}{V_{out}}$$

where V_{in} and V_{out} are the input and output voltages of the converter. The boost converter's inductor and output capacitor values can be calculated as [16]:

$$(1) \quad L_{min} = \frac{D(1-D)^2 R}{2f} \quad (2)$$

$$C = \frac{D}{R \left(\frac{\Delta V_o}{V_o}\right) f}$$

where $\left(\frac{\Delta V_o}{V_o}\right)$ outputs voltage ripple is 1%, “R” is output resistance, and “f” is the frequency.

3.2. PV Solar Power System (Pv Güneş Enerjisi Sistemi)

(3) By utilizing the PV effect, the PV system transforms sunlight into a DC power source. Several solar cells can be coupled in parallel and/or series as a module to generate adequate voltage and power [8]. To satisfy the intended DC transit voltage. Figure 3 depicts the PV cell's circuit diagram. Figure 4 depicts the (V-I) and (P-V) characteristics curves of the suggested PV systems.

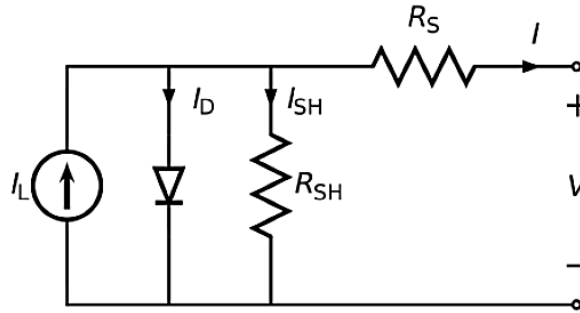
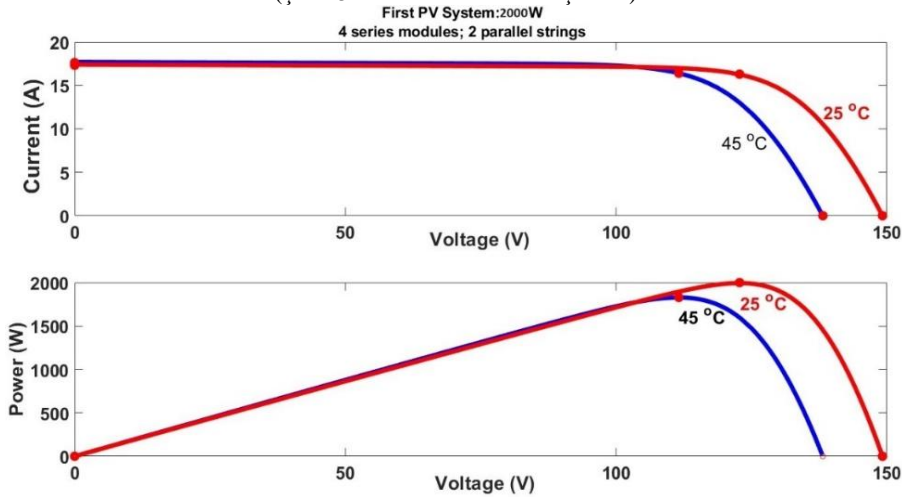
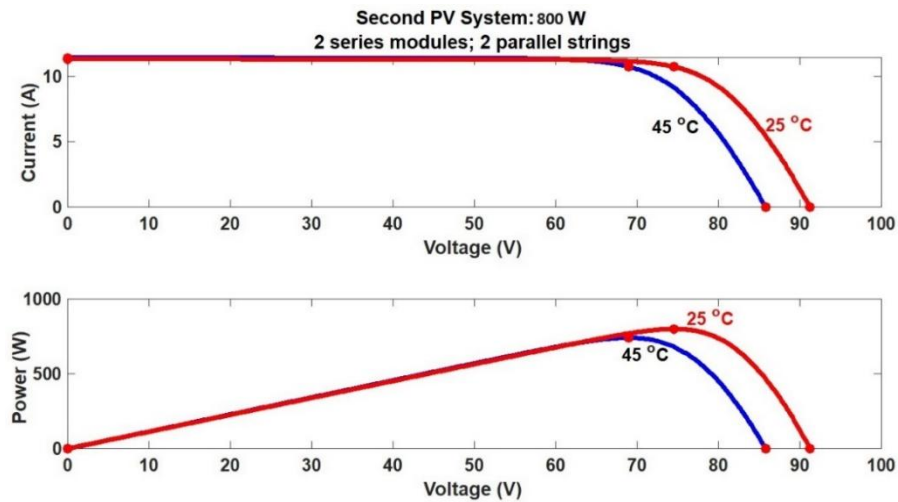


Figure 3. Circuit diagram of PV-cell
(Şekil 3. PV hücresinin devre şeması)



(a)



(b)

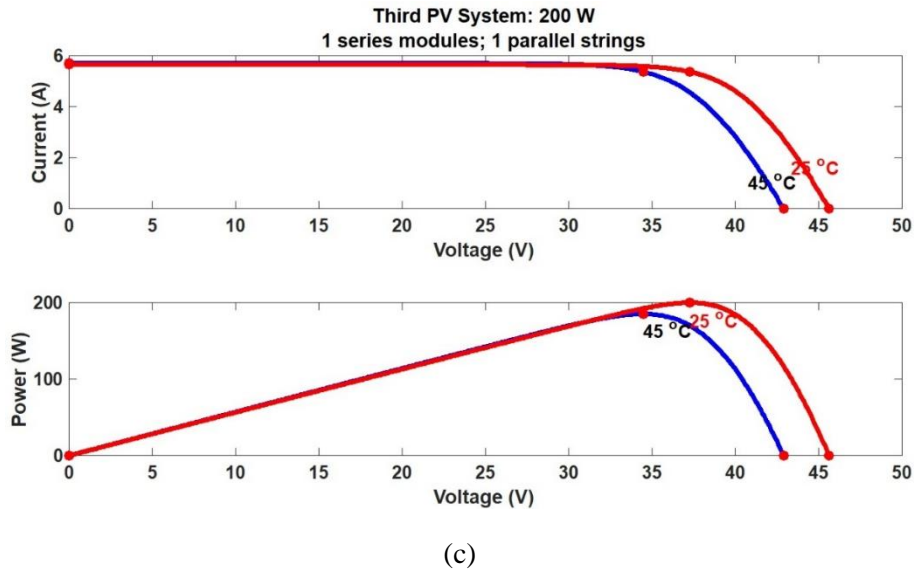


Figure 4. The (V-I) and (P-V) characteristics of (a) PV system 1 (b) PV system 2 (c) PV system 3
(Şekil 4. (V-I) ve (P-V) karakteristikleri (a) PV sistemi 1 (b) PV sistemi 2 (c) PV sistemi 3)

3.3. Wind Turbine (Rüzgar Türbini)

Wind turbines transfer wind energy to mechanical energy, and their kinetic energy can be estimated to calculate the required amount of power. PMSGs can serve as efficient and dependable generators in the wind energy sector [17]. A diode rectifier is

used to convert the generated AC power into DC power. To boost the output DC voltage, another DC-DC converter circuit is required [18]. Figure 5 depicts a wind energy conversion system based on PMSG implemented in the MATLAB/Simulink environment.

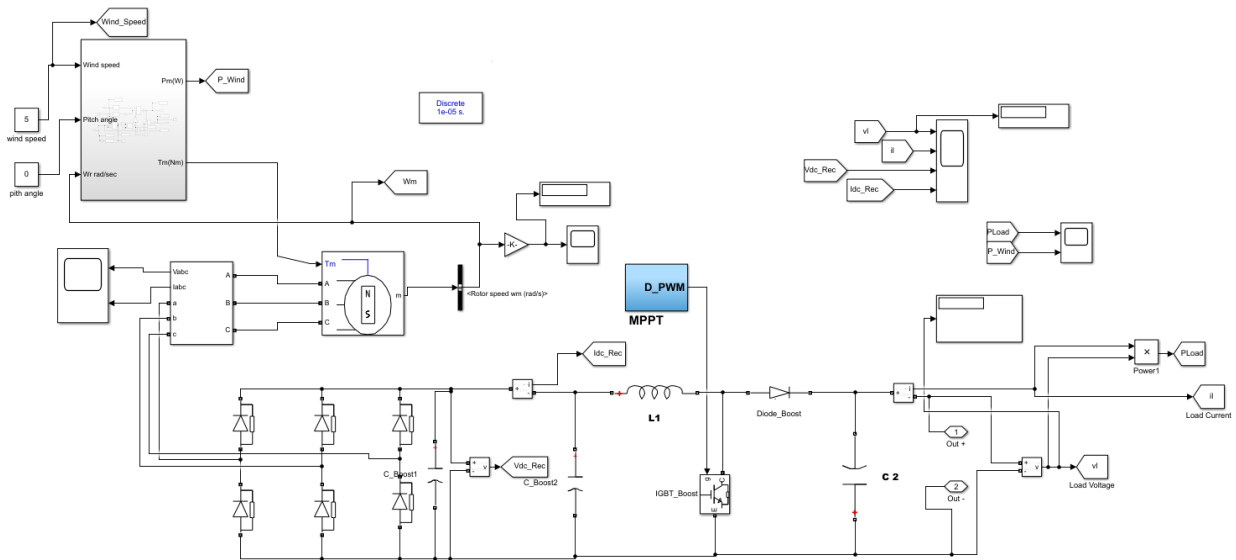


Figure 5. Wind Energy Conversion System based on PMSG
(Şekil 5. PMSG tabanlı Rüzgar Enerjisi Dönüşüm Sistemi)

3.4. Battery (Pil)

The battery is one of the sources that feed the multilevel inverter circuit with a voltage of ± 20 V.

This means it supports the multilevel inverter in two levels, and Fig. 6 shows the battery circuit.

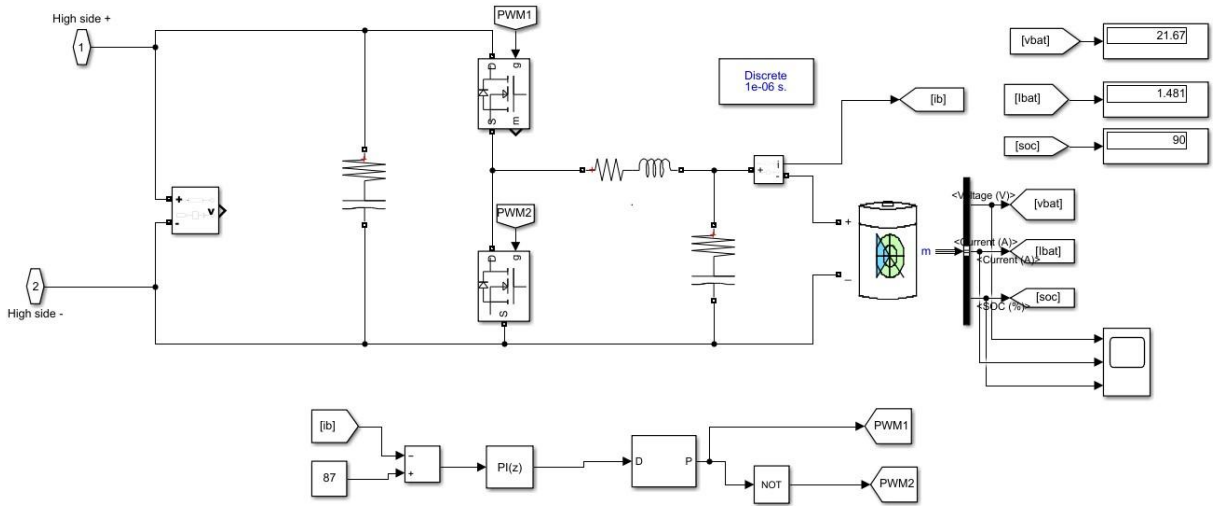


Figure 6. Battery circuit
(Şekil 6. Pil devresi)

3.5. Multilevel Inverter (Çok Seviyeli Evirici)

Inverters are power electronic systems used to convert DC power to AC power. Multiple-switch MLIs are increasingly used in high-power switching applications, such as those found in industrial sectors, electric cars, and train traction motors [19]. MLIs have multiple benefits over conventional types, including reduced THD, EMI, and dV/dt switch stress. In this study, the MLI is created based on four RESs with unequal DC voltage values. The control circuit is made using

the multicarrier sinusoidal PWM method. This study adopts the topology of a 37-level inverter by cascading six cells, as depicted in Fig. 1. The respective feed DC voltages from the six H-bridge parts (H1, H2, H3, H4, H5, and H6) are (8:4:2:2:1:1)E. The output voltage is equal to the algebraic sum of each cell's output voltage, which is equal to $\pm 18E$. The switching pattern of the recommended MLI is depicted in Table (1).

Table 1. Inverter output voltages and switching status

(Tablo 1. İnvörtör çıkış voltajları ve anahtarlama durumu)

Voltage Level	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10
18E	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0
17E	1	1	1	1	1	0	1	1	0	0
16E	1	1	1	1	0	0	1	1	0	0
15E	1	1	1	0	0	1	1	1	0	0
14E	1	1	1	0	0	0	1	1	0	0
13E	1	1	0	0	0	1	1	1	0	0
12E	1	1	0	0	0	0	1	1	0	0
11E	1	0	1	0	0	1	1	1	0	0
10E	1	0	0	1	0	0	1	1	0	0
9E	1	0	0	0	0	1	1	1	0	0
8E	0	1	1	1	0	0	1	1	0	0
7E	0	1	1	0	1	0	1	1	0	0
6E	0	1	1	0	0	0	1	1	0	0
5E	0	0	1	1	1	0	1	1	0	0
4E	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0

3E	0	0	0	1	1	0	1	1	0	0
2E	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0
1E	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0
0E	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-1E	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1
-2E	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1
-3E	0	0	0	1	1	0	0	0	1	1
-4E	0	0	1	1	0	0	0	0	1	1
-5E	0	0	1	1	1	0	0	0	1	1
-6E	0	1	1	0	0	0	0	0	1	1
-7E	0	1	1	0	1	0	0	0	1	1
-8E	0	1	1	1	0	0	0	0	1	1
-9E	1	0	0	0	0	1	0	0	1	1
-10E	1	0	0	1	0	0	0	0	1	1
-11E	1	0	1	0	0	1	0	0	1	1
-12E	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1
-13E	1	1	0	0	0	1	0	0	1	1
-14E	1	1	1	0	0	0	0	0	1	1
-15E	1	1	1	0	0	1	0	0	1	1
-16E	1	1	1	1	0	0	0	0	1	1
-17E	1	1	1	1	1	0	0	0	1	1
-18E	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1

4. SIMULATION RESULTS (SİMÜLASYON SONUÇLARI)

The system consists of a wind turbine with an output DC voltage of 40V (wind turbine boost output), two battery systems each one 20V DC, and three PV systems with DC voltages output of 160V, 80V, and 40V, respectively, as given in Fig.

1b. The output power of the first PV system before the boost converter, which is the input of the boost circuit, connecting (4*2) panels in series and parallel is 2 kW (16.3A*122.8V). The output power of the second PV system, (2*2) panels in series and parallel, is 0.8 kW (10.74A*74.52V). In addition, the output power of the third PV system, (1*1) panels in series and parallel, is 0.2 kW (5.37A*37.26V). Figure 7 shows the voltage values for the three PV systems and the boost inverter output voltage values

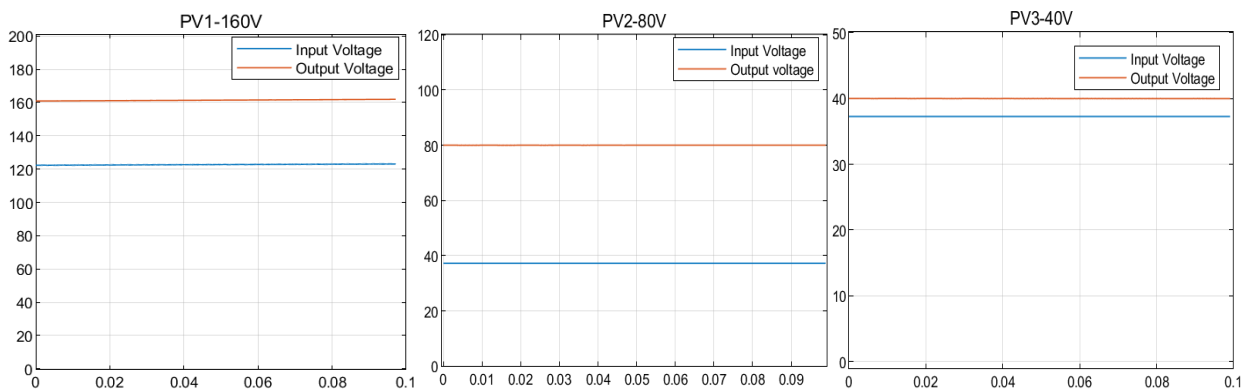


Figure 7. The input and output voltage of PV converter (a) PV system1 (b) PV system2, and (c) PV system3

(Şekil 7. PV dönüştürücüsünün giriş ve çıkış voltajı (a) PV sistemi1 (b) PV sistemi2 ve (c) PV sistemi3)

The PV boost converters circuit with 1% ripple output voltage uses Eqs. (2) and (3) to calculate the input inductors and output capacitors. The DC-DC boost converter circuit of the wind turbine

illustrated in Fig. 5 is intended to convert 20 Volts DC to 40 Volts DC (2E). Figure 8 depicts the output and input voltage of the converter of wind turbine system.

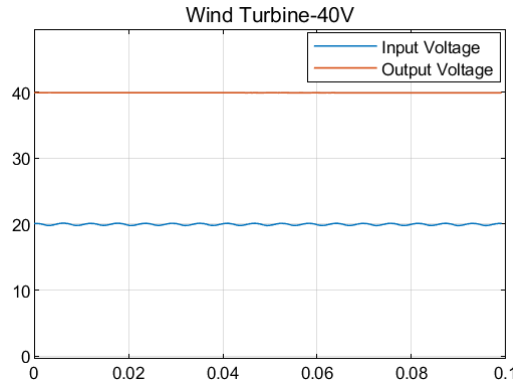


Figure 8. The output and input voltage of the converter of wind turbine system

(Şekil 8. Rüzgar türbini sisteminin dönüştürücüsünün çıkış ve giriş voltajı)

Each of the circuit including the three PV model, Wind turbine and two battery power sources were all tested individually to ensure that they meet the design requirements. Figure 9 shows the 37-level voltage with the FFT analyzer with existing all renewable sources. From the FFT analysis we can see the obtained THD to be 1.04% for both voltage and current, and RMS voltage and current of approximately 270V and 2.7A respectively. The THD is same for both current and voltage because

of the type of load, if the load was change to an inductive load, the THD will be different. If the wind turbine stops working or there is no wind, the system driver is made to turn off the wind turbine system, so that the output voltage is 33-level, (8:4:2:1:1) E, as shown in Fig. 10. When the wind is disconnected, the RMS Voltage and currents are approximately 240V and 2.4A respectively with the THD been 1.19%.

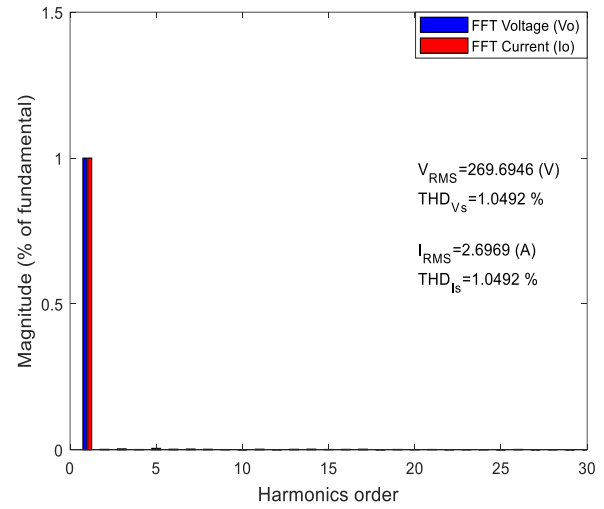
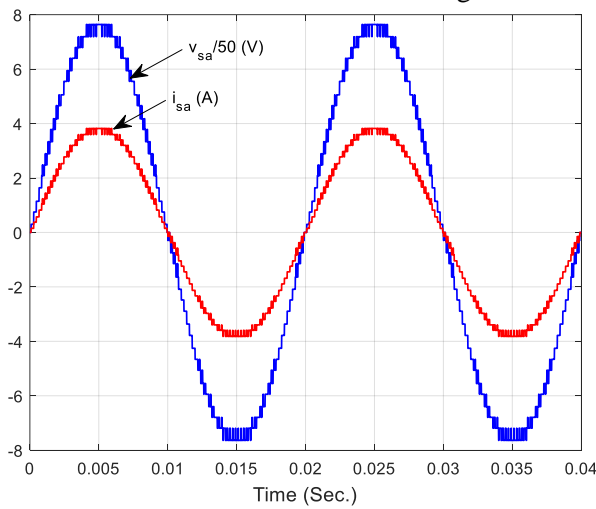


Figure 9. (a) 37-level output voltage with its (b) spectrum analyzer

(Şekil 9. (a) 37 seviyeli çıkış voltajı ve (b) spektrum analizörü)

If one battery doesn't work, the system processor is set up to turn off that battery, so that the output voltage is 35-level, (8:4:2:2:1) E, as shown in Fig. 11. In the 35-level, the obtained THD is 0.99%, and the RMS voltage and current are approximately 255V and 2.55A respectively. While the wind turbine and one battery system are not working, the power system is projected to produce an output voltage of 31-level, (8:4:2:1) E, as shown in Fig. 12.

The THD values of the output voltage at different voltage levels with different renewable energy sources is illustrated in Fig. 13. The THD result obtained from each level shows how the changing in Level affects the THD. The higher the voltage level, the lower the THD. The result obtained are similar to the result obtained in [15], which shows a reduction in THD values. These results prove the effectiveness of the suggested circuit with

suggested controller by managing the renewable sources.

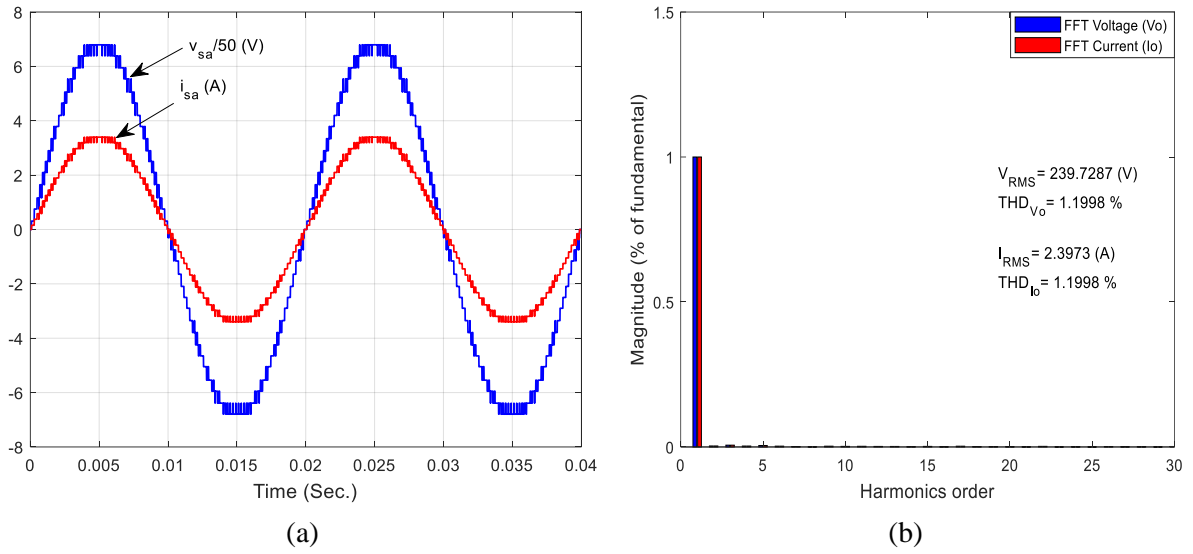


Figure 10. (a) 33-level output voltage with its (b) spectrum analyzer

(Şekil 10. (a) 33 seviyeli çıkış voltajı ve (b) spektrum analizörü)

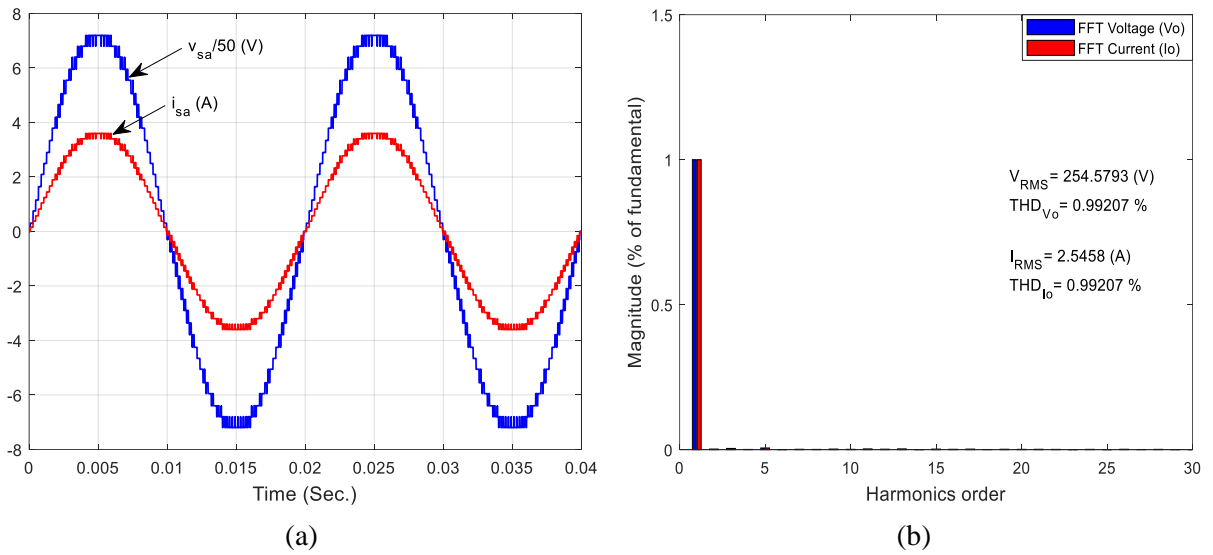


Figure 11. (a) 35-level output voltage with its (b) spectrum analyzer

(Şekil 11. (a) 35 seviyeli çıkış voltajı ve (b) spektrum analizörü)

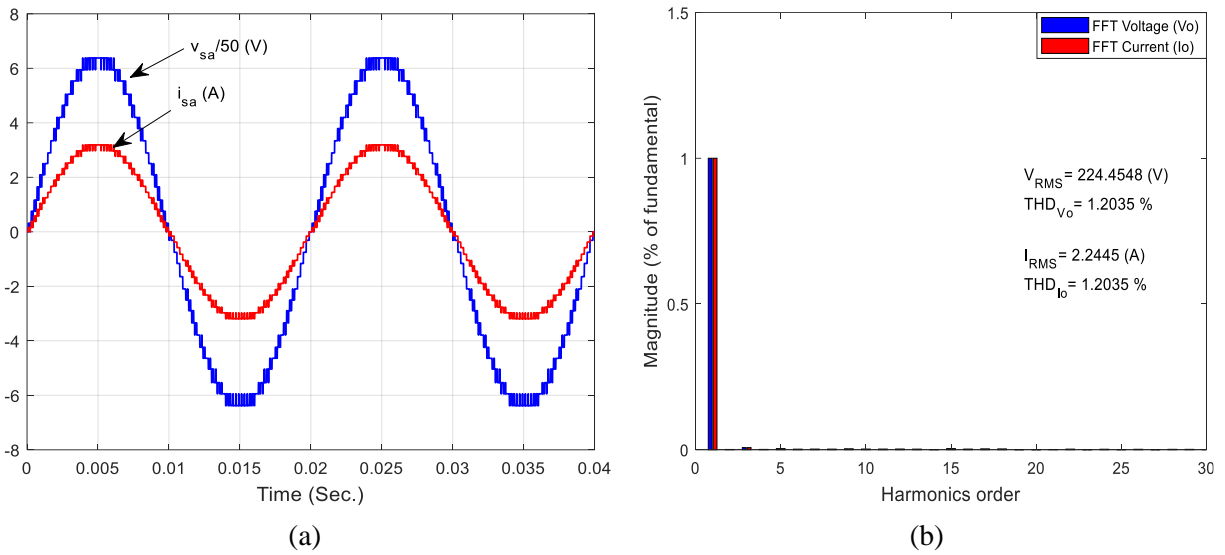


Figure 12. (a) 31-level output voltage with its (b) spectrum analyzer

(Şekil 12. (a) 31 seviyeli çıkış voltajı ve (b) spektrum analizörü)

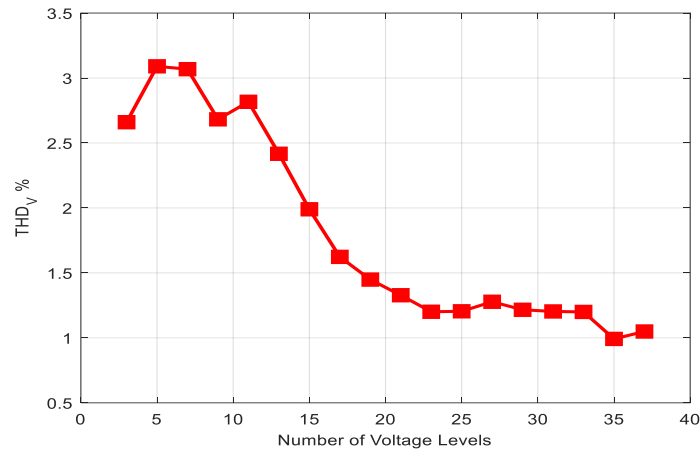


Figure 13. The THD values with different output levels for the suggested circuit

(Şekil 13. Önerilen devre için farklı çıkış seviyeleriyle THD değerleri)

5. CONCLUSIONS (SONUÇLAR)

In this study, a single-phase power system with 37-level output voltage is built and modeled from RESs of PVs, wind turbines, and two battery systems. The suggested circuit has three PV systems, one wind turbine system, and two battery backup systems. The structure of these sources is (8:4:2:2:1:1)E. The control circuit is made using the multicarrier sinusoidal PWM technique. The system is designed to produce 33-levels without wind turbine, 31-level without wind and battery systems, 35-level (without battery), 35-level (without one of battery systems), 11-level (without PV systems), 5-level without wind and PV systems, and 3-level just using one battery system. Therefore, the system is capable of generating different output levels based on the available renewable energy sources. The system is tested with a 37-level state in the output voltage waveform. The results are proved that the system

has good THD responses according to IEEE 519-2022 standard [20]. The result obtained indicates a low THD value in the range of 3.2% to 1.04% as the voltage level increases. The system worked well, which shows how well the power and control circuits that were built and suggested worked. The model can be improved by connecting it to the grid in situations where more power is required. In this mode, an islanding control will be used to ensure that the system remains stable when there is a grid disconnection. One limitation of this research is that it does not consider the PV system during shedding when there is limited sunshine. This can greatly affect the obtained result.

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)

Ahmed Yaseen Hamad, Ersagun Kürşat Yaylaci and Rakan Khalil Antar: they 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] R. K. Antar, "Multilevel Inverter with Unequal and Selected DC Voltage Sources Using Modified Absolute Sinusoidal PWM Technique," *1st International Scientific Conference of Engineering Sciences - 3rd Scientific Conference of Engineering Science (ISCES)*, IEEE, pp. 62-67, January 2018.
- [2] R. Al Badwawi, M. Abusara, and T. Mallick, "A Review of Hybrid Solar PV and Wind Energy System," *Smart Science*, vol. 3, no. 3, pp. 127-138, 2015.
- [3] M. Sami and M. A. Mallick, "Cascaded H-Bridge 11-level Multilevel Inverter," *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, 2021.
- [4] A. Bughneda, M. Salem, A. Richelli, D. Ishak, and S. Alatai, "Review of Multilevel Inverters for PV Energy System Applications," *Energies*, MDPI, 2021.
- [5] D. Ganesh and G. Chandra Sekhar, "Simulation of Three Phase Nine-level Inverter for Interfacing with Solar PV system," *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, 2017.
- [6] A. N. and A. K. I., "Multi-input Inverter for Hybrid Wind-Photovoltaic Standalone System," *Proceedings of the Second International Conference on Computing Methodologies and Communication (ICCMC 2018)*.
- [7] J. Sathik, S. H. E. Abdel Aleem, R. Shalchi Alishah, D. Almakhlis, and K. Bertilsson, "A Multilevel Inverter Topology Using Diode Half-Bridge Circuit with Reduced Power Component," *Energies*, MDPI, 2021.
- [8] R. S. Jadhav and S. B. Patil, "Design and Implementation of PV-Wind Battery Hybrid System for off-grid and on-grid," *Proceedings of the Fourth International Conference on Inventive Systems and Control (ICISC 2020)*.
- [9] M. Sandhu and T. Thakur, "Reduction of Harmonics In a Hybrid PV/Wind Microgrid Using a Modified Multilevel Inverter," *IEEE Electrical Power Energy Conference (EPEC)*, 2019.
- [10] S. K. Gupta, K. Rathore, & P. Bansal, (2018). "Design and Analysis of a New 31-Level Asymmetrical Multilevel Inverter Topology with Different PWM Techniques." Presented at the *2018 3rd International Innovative Applications of Computational Intelligence on Power, Energy and Controls with their Impact on Humanity (CIPECH)*. IEEE.
- [11] Y. Kumar, M. Goyal, & R. Mishra, (2020). "Modified PV based hybrid multilevel inverters using multicarrier PWM strategy." Presented at the *2020 4th international conference on electronics, communication and aerospace technology (ICECA)*. IEEE.
- [12] W. Obaid, A. K. Hamid, & C. Ghenai, (2019). "Wind-Fuel-Cell-Solar Hybrid Electric Boat Power Design with MPPT System." Presented at the *2019 8th International Conference on Modeling Simulation and Applied Optimization (ICMSAO)*. IEEE.
- [13] A. A. Saleh, R. K. Antar, & H. Al-Badrani, (2021). "Design of New Structure of Multilevel Inverter Based on Modified Absolute Sinusoidal PWM Technique." *International Journal of Power Electronics and Drive System (IJPEDS)*, 12(4), 2314-2321. DOI: 10.11591/ijpeds.v12.i4.pp2314-2321.
- [14] R. K. Antar, E. H. Sadiq, & A. A. Saleh, (2020). "Asymmetrical Multilevel Inverter with Modified Absolute Sinusoidal PWM Technique for Sensorless Control of Induction Motor." Presented at the *1st International Multi-Disciplinary Conference Theme: Sustainable Development and Smart Planning, IMDC-SDSP2020*. Cyperspace, EAI. DOI: 10.4108/eai.28-6-2020.2297934
- [15] R. K. Antar, T. A. Hussien, & A. A. Hamdon, (2022). "Design and Implementation of Reduced Number of Switches for New Multilevel Inverter Topology without Zero-Level State." *International Journal of Power*

Electronics and Drive System, 13(1), 401-410.

DOI: 10.11591/ijpeds.v13.i1.

- [16] D. W. Hart, (2014). *Power Electronics Handbook*. Pearson Education, Inc, McGraw Hill.
- [17] V. Yaramasu, et al. (2017). "PMSG-based wind energy conversion systems: survey on power converters and controls." *IET Electric Power Applications*, 11(6), 956-968.
- [18] C. H. Tran, F. Nollet, N. Essounbouli, & A. Hamzaoui, (2018). "Maximum power point tracking techniques for wind energy systems using three levels boost converter." Presented at the *7th International Conference on Clean and Green Energy-ICCGE 2018*.
- [19] S. Rathore, M. K. Kirar, & S. K. Bhardwaj, (2015). "SIMULATION OF CASCADED H-BRIDGE MULTILEVEL INVERTER USING PD, POD, APOD TECHNIQUES." *Electrical & Computer Engineering: An International Journal (ECIJ)*, 4(3), September 2015.
- [20] IEEE Standard for Harmonic Control in Electric Power Systems (2022). IEEE Std 519-2022 (Revision of IEEE Std 519-2014), pp. 8-05, 2022.