

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

PART C: TASARIM VE TEKNOLOJİ

Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology



ISSN: 2147-9526

Year: 2024, Volume: 12 Issue: 2

İmtiyaz Sahibi/ Owner	Prof. Dr. Musa YILDIZ – Gazi Üniversitesi
Yayın Yönetmeni / Publishing Manager	Prof. Dr. Uğur GÖKMEN – Gazi Üniversitesi
Yazışma Adresi / Correspondence Address	fbedergic@gazi.edu.tr
İnternet Adresi / Web Address	https://dergipark.org.tr/tr/pub/gujsc
Yayın Türü /Publication Type	Sürelili / Periodical Yılda dört sayı yayımlanır: Mart, Haziran, Eylül, Aralık Published four issues per year: March, June, September, December
Baş Editör / Editor-in-Chief	Prof. Dr. Adem ACIR – Gazi Üniversitesi
Baş Editör Yardımcısı / Deputy Editor-in-Chief	Doç. Dr. Ramazan ÇAKIROĞLU – Gazi Üniversitesi
Alan Editörleri / Area Editors	Prof. Dr. Murat Tolga ÖZKAN – Gazi Üniversitesi Prof. Dr. Mustafa AKTAŞ – Gazi Üniversitesi Prof. Dr. Mustafa Serdar GENÇ – Erciyes Üniversitesi Prof. Dr. Nihat ÖZTÜRK – Gazi Üniversitesi Prof. Dr. Sait Dünder SOFUOĞLU – Gazi Üniversitesi Prof. Dr. Sema BİLGE OCAK – Gazi Üniversitesi Doç. Dr. Gültekin UZUN – Gazi Üniversitesi Doç. Dr. İdris CANDAN – Kocaeli Üniversitesi Doç. Dr. Kubilay TAŞDELEN – Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Doç. Dr. Mehmet Erdi KORKMAZ – Karabük Üniversitesi Doç. Dr. Murat GÖK – Ondokuz Mayıs Üniversitesi Doç. Dr. Orhan KAPLAN – Gazi Üniversitesi Doç. Dr. Şenol ŞİRİN – Düzce Üniversitesi Dr. Öğr. Üyesi Berre KÜMÜK – İskenderun Teknik Üniversitesi Dr. Öğr. Üyesi Bilge İMER – Orta Doğu Teknik Üniversitesi Dr. Öğr. Üyesi Muhammed Ali KOŞAN – Kahramanmaraş İstiklal Üniversitesi Dr. Öğr. Üyesi Seyfettin VADİ – Gazi Üniversitesi

	Dr. Öğr. Üyesi Sinem UZUN – Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi Öğr. Gör. Dr. Onur ALTUNTAŞ – Gazi Üniversitesi
Sekretarya / Secretariat	Dr. Öğr. Üyesi Selçuk YAĞMUR– Gazi Üniversitesi
Mizanpaj Editörleri / Layout Editors	Oğuz Kaan ÇİNİCİ – Gazi Üniversitesi Yaren GÜVEN – Gazi Üniversitesi
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 yayınına öncelik tanır. Tasarım ve Teknoloji Dergisinde makaleler 2020 yılı sonuna kadar Türkçe yayınlamıştır. 2021 yılı başından itibaren ise dergimizin uluslararası tanınırlığını artırmak amacıyla Türkçe'nin yanı sıra İngilizce de makale kabul edilmeye başlanmıştır.

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

ABOUT

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

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

AMAÇ ve KAPSAM

Dergi ulusal ve uluslararası düzeyde ;

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

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

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

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

AIMS and SCOPE

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

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

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

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

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

İÇİNDEKİLER / CONTENTS

33. **Design and Analysis of a Topology-Optimized Quadcopter Drone Frame** (Araştırma Makalesi), Berke BAY, Meltem ERYILDIZ 427
34. **Electricity Theft Detection Using Rule-Based Machine Learning (rML) Approach** (Araştırma Makalesi), Sheyda BAHRAMI, Erol YUMUK, Alper KEREMİ, Beytullah TOPCU, Ahmetcan KAYA 438
35. **Enhanced Control of Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell Fed Basic Series Positive Super Voltage Lift Luo Converter Using Interval Type-2 Fuzzy Logic** (Araştırma Makalesi), Ahmet GANI, İlknur UÇAR 457
36. **DC-Link Dynamics Examination of the Parallel-Connected Three-Phase Inverters in Islanded and Grid-Connected Modes** (Araştırma Makalesi), Seyfullah DEDEOĞLU 468
37. **AlSi10Mg Alaşımının SLM Yöntemiyle Üretilmesinde Proses Parametrelerinin Yüzey Kalitesi Üzerindeki Etkisi** (Araştırma Makalesi), Arif Lütfi ÖZSOY, Emine ŞİRİN, Çağrı Vakkas YILDIRIM, Murat SARIKAYA 480
38. **Sanayide Enerji Verimliliğinde Son Gelişmeler: Türkiye Örneği** (Araştırma Makalesi), Cemre YILDIZ 494
39. **Eklemeli İmalat Teknolojilerinin Havacılık Sektöründe Enerji Verimliliğini Artırma ve Emisyon Azaltma Potansiyeli** (Araştırma Makalesi), Nedim SUNAY, Enis Turhan TURGUT 548
40. **Finite Element Analysis of the Influences of Feed Rate on Cutting Force and Chip Morphology in Orthogonal Turning of Ti6Al4V Alloy** (Araştırma Makalesi), Mehmet AYDIN 567
41. **Examination of Urban Transformation Implementation Legislation: Elazığ Example** (Araştırma Makalesi), Belkis ELYIGIT, Cevdet Emin EKINCI 577
42. **Theoretical Analysis of Wireless Communication Systems Assisted by RIS with Power Line Communication** (Araştırma Makalesi), Beren TİDİN, Mehmet BİLİM 586
43. **Utilization Of Magnesium Chloride (Mg-Cl) Cycle for Hydrogen Production of Sombbrero Fusion Reactor** (Araştırma Makalesi), Gamze ŞENER, Adem ACIR 596
44. **Polimer Matrisli Karbon Kompozit Malzemelerin SiC Takviye Oranlarının Mekanik ve Metalurjik Özelliklere Etkileri** (Araştırma Makalesi), Sidem KANER 605
45. **Türkiye’de Elektrik Üretim Santrallerinin İç İhtiyaç Tüketimlerinin Yenilenebilir Kaynaklardan Karşılanabilmesi ve Emisyona Sağlayabileceği Katkı** (Araştırma Makalesi), İlker İLASLANER, Halil İbrahim VARIYENLİ 615
46. **A Decision Support System for Detection of Trading Behavior in Energy Markets** (Araştırma Makalesi), Ezgi AVCI 625

İÇİNDEKİLER / CONTENTS

47. **A Comparative Study of Loan Approval Prediction Using Machine Learning Methods** (Araştırma Makalesi), Vahid SİNAP 644
48. **Derin Öğrenme Tabanlı Gerçek Zamanlı Vücut Hareketlerinden Duygu Analizi Modeli** (Araştırma Makalesi), Mustafa YAĞCI, Muhammed Erkam AYGÜL 664
49. **Öznelik Seçimi ile Desteklenen Makine Öğrenmesine Dayalı Göğüs Kanserinin Erken Tespiti ve Teşhisi** (Araştırma Makalesi), Cihan AKYEL, Bünyamin CİYLAN, Hüseyin POLAT 675
50. **Farklı YOLO Algoritmalarının Gerçek Zamanlı İHA Tespitine Etkileri ve Karşılaştırmalı Analizi** (Araştırma Makalesi), Hediye ORHAN, Ferda Nur ARICI 691
51. **Prediction of Mechanical Properties from Microstructure Images of AISI 1040 Steel Using Deep Learning** (Araştırma Makalesi), Rıdvan SERT, Ömer ŞAHİN, Volkan KILIÇLI, Fecir DURAN 707
52. **Efficiency Optimization of Multiple Coil Wireless Power Transfer System based on Adaptive Impedance Matching Network** (Araştırma Makalesi), Fatih ISSI 719
53. **Geliştirilmiş EfficientNet-B0 mimarisi ile Helikobakter Pilorinin Teşhisi** (Araştırma Makalesi), Demet ALICI KARACA, Bahriye AKAY, Derviş KARABOĞA, Alper BAŞTÜRK, Ö.Ufuk NALBANTOĞLU 729
54. **ROS-Based Path Planning for Autonomous Underwater Vehicles Using Deep Q-Networks Algorithm** (Araştırma Makalesi), Emre GÖZÜTOK, Fecir DURAN 743
55. **Current-mode Universal Filter using Fin type Field Effect Transistor (FinFET) - Based Multioutput Current Controlled Current Conveyor Transconductance Amplifiers** (Araştırma Makalesi), Hüseyin DEMİREL 753
56. **NiTi+Nd Tozlarının Mekanik Öğütme Sonrası Boro-Sinterleme Yöntemi İle Numune Üretimi ve Karakterizasyonu** (Araştırma Makalesi), Ceylan KARABUDAK, Nimet KARDEŞ SEVER, Sinan AKSÖZ 759
57. **Özgün Bir Kafes (Lattice) Yapı Tasarımının Auxetic Davranışının İncelenmesi** (Araştırma Makalesi), Nuriye Nur KAYA, İhsan TOKTAŞ 771
58. **P-Tipi Bi₂Te₃ Yarıiletkenlerin 291-373K Sıcaklık Aralığındaki Termoelektrik Karakterizasyonu** (Araştırma Makalesi), Raşit AHISKA, Günay ÖMER, Ayfer AYDOĞAN 782
59. **Teşhir Tipi Soğutucular İçin CO₂ Soğutkanlı Eko-Tasarım Dış Ünite Geliştirilmesi** (Araştırma Makalesi), Süleyman ERTEN, Melis ÖDER, Burak Can TEMÜR, Buğra KOÇ 792

İÇİNDEKİLER / CONTENTS

60. **Mathematical Modeling of Voc Gas Release Values in Wood Based Panels with Surface Treatment** (Araştırma Makalesi), Haldun Ender ERDEM, Hamza ÇINAR 806

Design and Analysis of a Topology-Optimized Quadcopter Drone Frame

Berke BAY¹ , Meltem ERYILDIZ^{1*} 

¹Istanbul Beykent University, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering and Architecture, Istanbul, Turkey

Article Info

Research article
Received: 19/06/2023
Revision: 05/10/2023
Accepted: 13/10/2023

Keywords

Drone
Drop test
Topology Optimization
FEA Analysis
Flow Simulation

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 19/06/2023
Düzeltilme: 05/10/2023
Kabul: 13/10/2023

Anahtar Kelimeler

Drone
Düşme testi
Topoloji Optimizasyonu
FEA analizi
Akış Simülasyonu

Graphical/Tabular Abstract (Grafik Özet)

Three different drone frames were designed. The best design was chosen based on stress, displacement, and flow analysis results. Topology optimization was applied to achieve a 30% weight reduction for this design. Analyses were conducted on this optimized design to verify the results. / Üç farklı drone gövdesi tasarlanmıştır. Gerilme, uzama ve akış analizleri sonucunda en iyi tasarım seçilmiştir. Bu tasarıma yüzde 30 ağırlık azaltma amacıyla topoloji optimizasyonu uygulanmıştır. Ve bu tasarıma da analizler yapılarak sonuçlar kontrol edilmiştir.

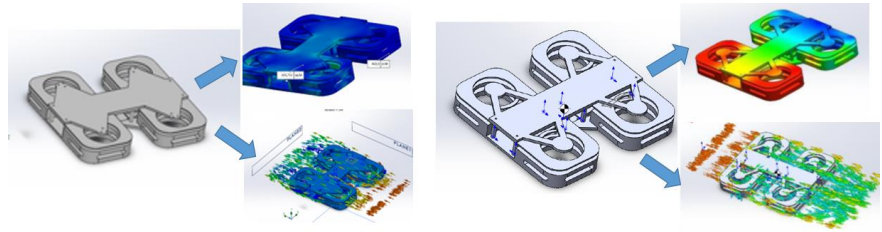


Figure A: After the design phase, analyses were conducted, topology optimization was applied, and then analyses were performed again. /**Şekil A:** Tasarım aşamasından sonra analizler gerçekleştirilip topoloji optimizasyonu uygulanmış, ardından analizler yeniden gerçekleştirilmiştir

Highlights (Önemli noktalar)

- Innovative drone design/ İnovatif drone tasarımı.
- Weight Reduction Through Topology Optimization/ Topoloji optimizasyonu ile ağırlık azaltma
- Enhancing drone frame design for Improved performance and reliability/ İyileştirilmiş performans ve güvenilirlik için drone gövde tasarımının geliştirilmesi

Aim (Amaç): The main aim of this study is to assess the potential of topology optimization in enhancing drone frame design, and to utilize finite element analysis (FEA) and topology optimization techniques to achieve an optimal design during the initial phase, ultimately leading to the construction of an ideal full-scale drone prototype. / Bu çalışmanın temel amacı, drone gövde tasarımını geliştirmede topoloji optimizasyonunun potansiyelini değerlendirmek ve başlangıç aşamasında en iyi tasarımı elde etmek için sonlu eleman analizi (FEA) ve topoloji optimizasyon tekniklerini kullanmak, sonuç olarak ideal bir tam ölçekli drone prototipi geliştirmektir.

Originality (Özgünlük): Addressing stress distribution, displacement, and aerodynamic performance to improve lightweight drone frame designs./ Birden fazla analizin kapsamlı bir şekilde entegre edilmesi, stres dağılımı, uzama ve aerodinamik performansı ele alarak sonuçta verimli ve güvenilir daha hafif drone teknolojisinin ilerlemesine katkıda bulunulması.

Results (Bulgular): Design 1 exhibited lower displacement values, suggesting better deformation resistance and outperformed in terms of flow velocity, indicating better propulsion and aerodynamic performance, particularly in Directions 1 and 2. Through topology optimization, a 30% weight reduction was achieved for Design 1, leading to improved agility, maneuverability, and energy efficiency./ Tasarım 1, daha iyi deformasyon direnci göstermiş ve akış hızı açısından özellikle Yön 1 ve 2'de daha iyi performans sergilemiştir. Tasarım 1 için topoloji optimizasyonu ile %30 ağırlık azaltması elde edilmiş, bu da daha iyi çeviklik, manevra kabiliyeti ve enerji verimliliği sağlamıştır.

Conclusion (Sonuç): This study's comprehensive analysis of drone frame designs highlights the potential for substantial improvements in structural integrity, aerodynamic performance, and weight reduction, paving the way for the development of more efficient and reliable drones in the future./ Bu çalışma, drone şasi tasarımlarının stres dağılımı, uzama, ağırlık azaltımı ve akış özelliklerinin dikkate alınmasının önemini vurgulayarak, drone çerçevelerinin tasarım ve optimizasyonu için değerli görüşler sunmaktadır.



Design and Analysis of a Topology-Optimized Quadcopter Drone Frame

Berke BAY¹ , Meltem ERYILDIZ^{1*} ¹Istanbul Beykent University, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering and Architecture, Istanbul, Turkey

Article Info

Research article
Received: 19/06/2023
Revision: 05/10/2023
Accepted: 13/10/2023

Keywords

Drone
Drop test
Topology Optimization
FEA Analysis
Flow Simulation

Abstract

This study focuses on the analysis and optimization of a drone frame design to enhance its performance characteristics. The design underwent drop testing, stress analysis, displacement analysis, and flow simulation to evaluate its structural integrity, deformation resistance, and aerodynamic performance. Furthermore, topology optimization techniques were employed to achieve a 30% weight reduction while maintaining the structural integrity of the drone frame. The results of the drop test analysis revealed that Design 2 exhibited reduced stress levels, displaying a maximum stress reduction of 296% compared to Design 1, indicating improved load distribution and structural integrity. However, Design 1 demonstrated lower displacement values, with a maximum decrease of 46.48%, suggesting better resistance to deformation. The flow analysis indicated that Design 1 achieved lower flow velocities, with a maximum decrease of 6.21%, indicating superior propulsion and aerodynamic performance. Through topology optimization, the mass of the drone frame was successfully reduced by 30% without compromising structural integrity. The optimized design exhibited improved stress management, reduced displacement, and slightly higher flow velocities compared to the initial design. These improvements contribute to enhanced agility, maneuverability, and energy efficiency of the drone. The findings of this study highlight the importance of considering stress distribution, displacement, and aerodynamic performance in drone design and optimization. The results provide valuable insights for the development of efficient and reliable drones.

Topoloji Optimizasyonu ile Bir Dört Rotorlu Drone Gövde Tasarımı ve Analizi

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 19/06/2023
Düzeltilme: 05/10/2023
Kabul: 13/10/2023

Anahtar Kelimeler

Drone
Düşme testi
Topoloji Optimizasyonu
FEA analizi
Akış Simülasyonu

Öz

Bu çalışma, bir drone gövde tasarımının analizi ve optimizasyonuna odaklanarak performans karakteristiklerini artırmayı amaçlamaktadır. Geliştirilen tasarımlar, yapısal bütünlüğünü, deformasyon direncini ve aerodinamik performansını değerlendirmek için düşme testi, gerilim analizi, uzama analizi ve akış simülasyonlarına tabi tutulmuştur. Ayrıca, gövde tasarımının yapısal bütünlüğünü korurken %30 ağırlık azaltma hedefiyle topoloji optimizasyon teknikleri kullanılmıştır. Düşme testi analizi sonuçları, Tasarım 2'nin, Tasarım 1'e kıyasla gerilmelerde %296'lık bir azalma sergileyerek yük dağılımını ve yapısal bütünlüğü artırdığını göstermektedir. Ancak, Tasarım 1 %46.48 daha düşük uzama değerleri göstermiştir. Akış analizi, Tasarım 1'in daha düşük akış hızlarına ulaştığını, maksimum %6.21'lik azalma ile gelişmiş tahrik ve aerodinamik performans sergilediğini göstermektedir. Topoloji optimizasyonu sayesinde, drone gövde ağırlığı başarıyla %30 azaltılmış ve yapısal bütünlüğü korunmuştur. Optimizasyon sonucu tasarım, gerilme değerleri olarak daha gelişmiş, uzama değerleri azalmış ve başlangıçtaki tasarıma kıyasla biraz daha yüksek akış hızları sergilemektedir. Bu gelişmeler, dronun çevikliğini, manevra kabiliyetini ve enerji verimliliğini artırmaya katkı sağlamaktadır. Bu çalışmanın bulguları, drone tasarımı ve optimizasyonunda stres dağılımı, uzama ve aerodinamik performansın dikkate alınmasının önemini vurgulamaktadır. Sonuçlar, verimli ve güvenilir dronların geliştirilmesi için değerli bilgiler sunmaktadır.

1. INTRODUCTION (GİRİŞ)

Drones, also known as unmanned aerial vehicles (UAVs), have rapidly gained popularity in various fields, ranging from aerial photography and videography to surveillance, delivery services, and scientific research. Drones come in various shapes,

sizes, and configurations, catering to specific applications and requirements. One popular type is the quadcopter, which features four rotors arranged in a symmetric pattern, offering stability, maneuverability, and ease of control. Quadcopters are commonly used due to their versatility and

ability to hover, fly in tight spaces, and perform agile maneuvers. These versatile flying machines are revolutionizing industries by providing efficient and cost-effective solutions. As drone technology continues to evolve, there is a growing demand for lightweight and durable drone frames that can withstand rigorous flight conditions while maximizing performance and efficiency [1-3].

Topology optimization is a design approach that utilizes advanced algorithms to determine the optimal distribution of material within a given design space. By iteratively removing unnecessary material, topology optimization aims to enhance the structural efficiency and performance of a component while reducing its weight. This technique has gained significant importance in the design and manufacturing of drone frames [4]. The Importance of Topology Optimization for Drone Frames lies in its ability to maximize the strength-to-weight ratio, enhance structural integrity, and improve flight characteristics. By removing excess material from non-critical areas and redistributing it to areas experiencing high stress, topology optimization enables the creation of lightweight yet robust drone frames. This optimization process can significantly enhance the drone's flight performance, increase battery life, and improve payload capacity [5].

In literature, topology optimization has been used to design drone frames. In one study [6], researchers used topology optimization to design a 3D-printed quadcopter frame that was 20% lighter than a traditional frame. The optimized frame was also stronger than the traditional frame, and it had better flight performance. Nvss et al. [7] studied the design optimization and fabrication of a lightweight quadcopter frame using topology optimization, part consolidation, and additive manufacturing. The findings demonstrate that the re-engineered monocoque structure, manufactured through Fused Filament Fabrication (FFF), achieves weight reduction, improved structural integrity, and enhanced operational superiority and endurance compared to commercial UAV designs. Bright et. al [8] investigated the use of generative design tools to create a quadcopter frame, resulting in a frame with improved resistance to fracture, minimum displacement, and better performance compared to a traditionally designed DJI flame wheel F450 drone frame [4]. The literature demonstrates the successful application of topology optimization in designing drone frames, resulting in significant improvements. By utilizing topology optimization, researchers have created 3D-printed quadcopter frames that are lighter, stronger, and exhibit better

flight performance compared to traditional designs. While the existing literature demonstrates the successful application of topology optimization in designing drone frames, further research is needed to fully explore and validate the potential benefits.

Drone frame materials play a pivotal role in shaping the performance and durability of unmanned aerial vehicles. The selection of appropriate materials significantly influences factors such as weight, structural integrity, and maneuverability. Carbon fiber, renowned for its high strength-to-weight ratio, is a popular choice for constructing lightweight yet resilient frames. Aluminum alloys offer a balance between strength and cost-effectiveness, making them suitable for various drone applications. Additionally, innovative materials like graphene composites are emerging, promising even greater strength and conductivity. The evolution of drone frame materials reflects the ongoing pursuit of enhancing flight efficiency, endurance, and overall flight experience. ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene) is a notable contender in the realm of drone frame materials. Its blend of toughness, impact resistance, and ease of processing makes it a favored choice for constructing robust and durable drone frames. ABS frames offer good dimensional stability and can withstand diverse weather conditions, making them suitable for outdoor and versatile applications. With a balance between strength and affordability, ABS contributes to crafting cost-effective yet reliable drone structures that can withstand the demands of aerial operations. In this study, ABS was selected as the drone frame material due to its well-balanced combination of cost-effective durability, impact resistance, and practicality, rendering it an optimal choice for a wide range of applications that necessitate a reliable and affordable solution [9-10].

Amid the existing body of knowledge, a noteworthy advancement emerges as topology optimization proves to be a transformative force in drone frame design, culminating in lighter, stronger, and higher-performing 3D-printed quadcopter structures, although the need for additional research remains imperative to comprehensively unlock and substantiate its potential advantages. The primary objective of this article is to explore the design and analysis aspects of a topology-optimized quadcopter drone frame. We will discuss the design considerations and analysis methodologies. This paper focuses on utilizing finite element analysis (FEA) and topology optimization techniques in the initial design phase of a drone frame to achieve optimal shape and size. Through FEA using SOLIDWORKS, an optimal frame structure is

developed and chosen for the full-scale drone prototype. This paper's novelty lies in its comprehensive integration of multiple analyses, including topology optimization, to enhance drone frame designs, addressing stress distribution, displacement, and aerodynamic performance, ultimately contributing to the advancement of efficient and reliable drone technology.

2. MATERIALS AND METHODS (MATERİYAL VE METOD)

2.1. Drone Design (Drone Tasarımı)

In this study, three different quadcopter drone frame designs were developed using SolidWorks software. In Figure 1, drone designs and their dimensions are provided. The designs have a width of approximately 30 cm and a thickness of 3.20 cm. In the process of designing, a decision was made to opt for a more futuristic design for Design 1, deviating from the conventional 4-armed quadcopter design. This choice was made with the intention of creating a design that stands out and embodies a modern aesthetic.

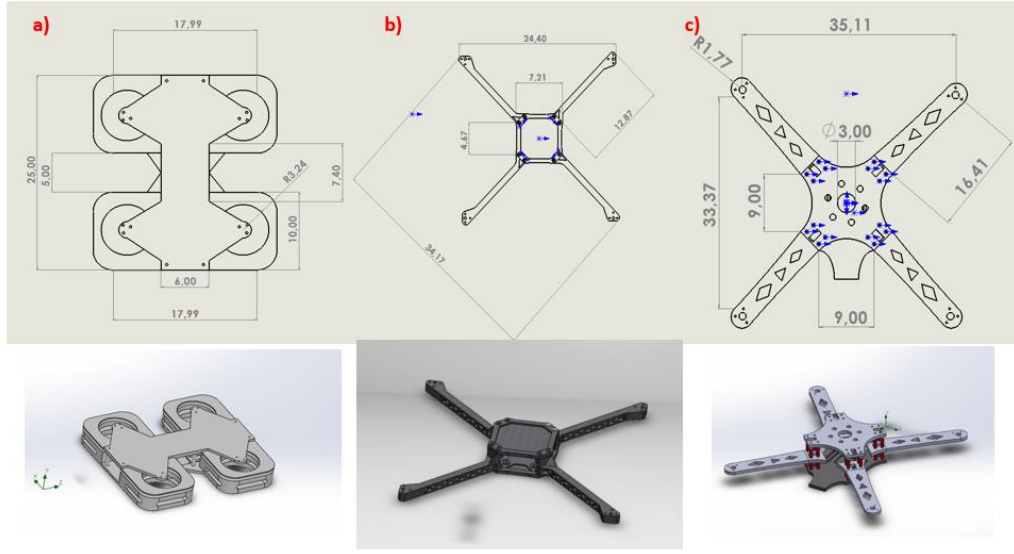


Figure 1. Drone Frame Designs a) Design 1, b) Design 2, c) Design 3 (Drone Gövde Tasarımları a) Tasarım 1, b) Tasarım 2, c) Tasarım 3)

2.2. Finite Element Analysis (Sonlu Elemanlar Analizi)

For the study, the Drop Test feature available in SolidWorks was utilized, focusing on three key

parameters: stress, strain, and displacement. The ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene) material was used in the analysis, the material properties used in the analysis are given in Table 1.

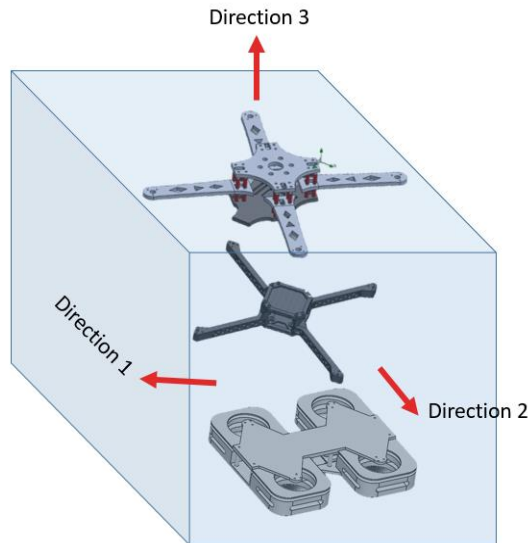


Figure 2. Drop test directions (Direction 1 – Z-axis, Direction 2 -- X-axis, and Direction 3 -- Y-axis)(Düşme testi yönleri (Yön 1 – Z-ekseni, Yön 2 -- X-ekseni, ve Yön 3 -- Y-ekseni))

Table 1. The properties of ABS for FEA analysis (FEA analizi için ABS'nin özellikleri)

Property	Value
Density	1.04 g/cm ³
Tensile Strength	40 MPa
Yield Strength	38 MPa
Young's Modulus	2.3 GPa
Elongation at Break	20%
Hardness (Rockwell)	R103
Flexural Strength	66 MPa
Izod Impact	250 J/m
Thermal Conductivity	0.25-0.35 W/(m·K)

The drop test analysis aimed to evaluate the structural integrity and behavior of the drone under impact conditions. The test simulated the drone experiencing an impact from a specified distance onto a solid surface. The distance between the drone and the impact surface was set at 25 cm. A speed of 10 m/s was applied for pitch movement and roll movement (Direction 1 and Direction 2). Additionally, a speed of 5 m/s was applied to represent the landing motion (Direction 3). The model was subjected to a gravity value of 9.81 m/s². Figure 2 illustrates the directions used in the drop test analysis. During the drop test analysis, various parameters were examined, including stress distribution, deformation, and displacement of the drone components. These simulations provided insights into the potential weaknesses or areas of concern in the drone design, allowing for improvements to be made to ensure its durability and robustness.

2.3. Flow Simulation of Drones (Dronların Akış Simülasyonu)

The drones underwent flow analysis utilizing the Flow Simulation feature in SolidWorks software. A flow velocity of 20 m/s was uniformly applied to all three drone motions as depicted in Figure 2. Additionally, gravity was included in the analysis with a value of 9.81 m/s².

These flow analyses provided valuable insights into the aerodynamic performance and behavior of the drones during various motions, aiding in optimizing their design and ensuring their efficient operation.

2.4. Topology Optimization (Topoloji Optimizasyonu)

After performing FEA (Finite Element Analysis) and flow analysis, the design underwent topology optimization using SolidWorks topology optimization to lighten the frame structure, to enhance the overall performance and structural integrity of the design. Topology optimization techniques were employed to determine the optimal distribution of material within the structure,

resulting in an improved strength-to-weight ratio. Additionally, extensive efforts were made to reduce the weight of the components without compromising the structural integrity, thus achieving a more lightweight and efficient design.

To comprehensively explore the design aspects, two weight reduction studies (a weight reduction target of 30% and 15%) were carried out, focusing on achieving significant reductions in weight while ensuring the necessary mechanical strength and structural integrity. In the simulation, specific points on the drone were fixed, and a force of 5 N was applied to the four arms in direction 3. Following the topology optimization process, drop tests and flow simulations were conducted to evaluate the performance of the optimized design under identical conditions as those prior to optimization.

3. RESULTS (BULGULAR)

3.1. Drop Test Analysis Results (Düşme Testi Analizi Sonuçları)

The drop test analysis results are presented in Table 2. In the drop test analysis, in terms of stress levels, Design 2 is considered better as it experienced lower stress compared to Design 1. Design 1 exhibited a von Mises stress of 31 MPa in direction 3, while Design 2 had a von Mises stress of 19 MPa (Table 2). Lower stress values indicate that the structure is better able to distribute and withstand the applied loads, suggesting improved structural integrity and a reduced risk of failure. Therefore, based on the von Mises stress results in Figure 3, Design 2 is considered the better design in this context. However, regarding displacement in Figure 4, Design 1 exhibited lower displacement values compared to the other designs in the drop-test analysis, which suggests that Design 1 has better performance in terms of displacement. Lower displacement values indicate that the structure experienced less deformation or movement under the applied loads, which can be advantageous in terms of maintaining the integrity and stability of

the design. The drop test analysis presented in Table 2 provides valuable insights into the structural performance of the drone frame designs under various loading conditions.

Table 2. Drop test analysis results (Düşme testi analizi sonuçları)

	Design 1			Design 2			Design 3		
	Dir.1	Dir.2	Dir.3	Dir.1	Dir.2	Dir.3	Dir.1	Dir.2	Dir.3
Stress (MPa)	107.27	100.09	31.15	27.04	80.19	19.84	25.13	26.84	24.31
Displacement (mm)	2.26	2.37	1.02	2.42	4.89	1.38	3.31	3.32	1.66

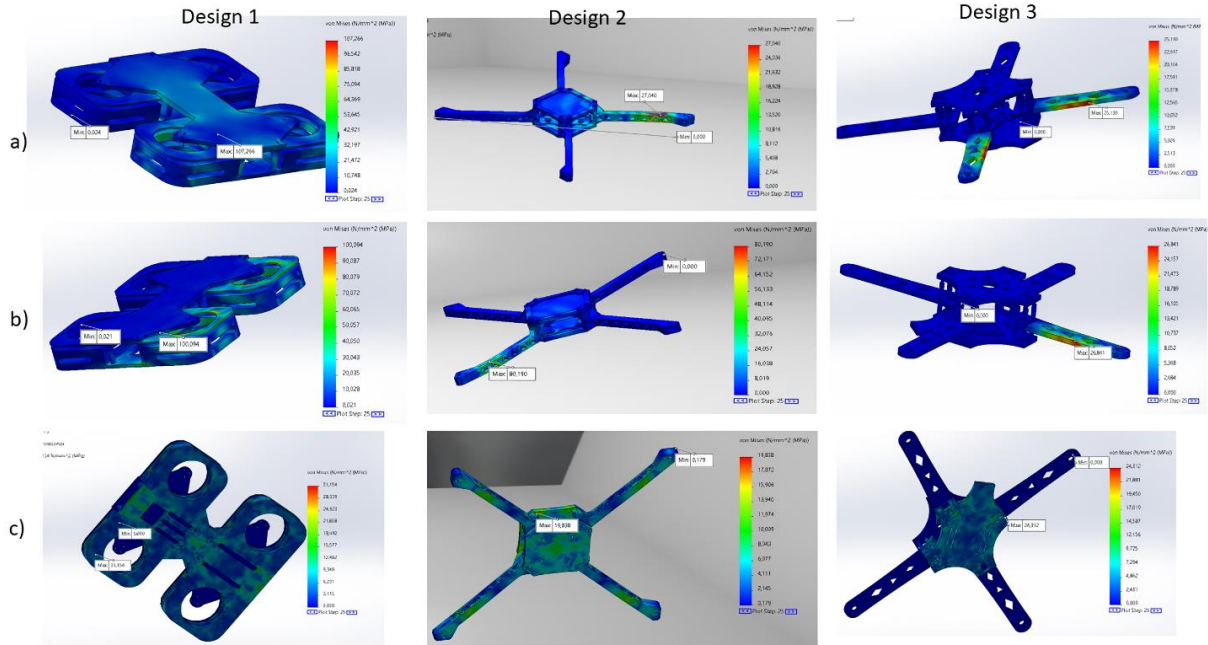


Figure 3. Von Mises stress analysis of Drone Frame Designs a) Direction 1, b) Direction 2, c) Direction 3 (Drone Gövde Tasarımlarının Von Mises Gerilme Analizi a) Yön 1, b) Yön 2, c) Yön 3)

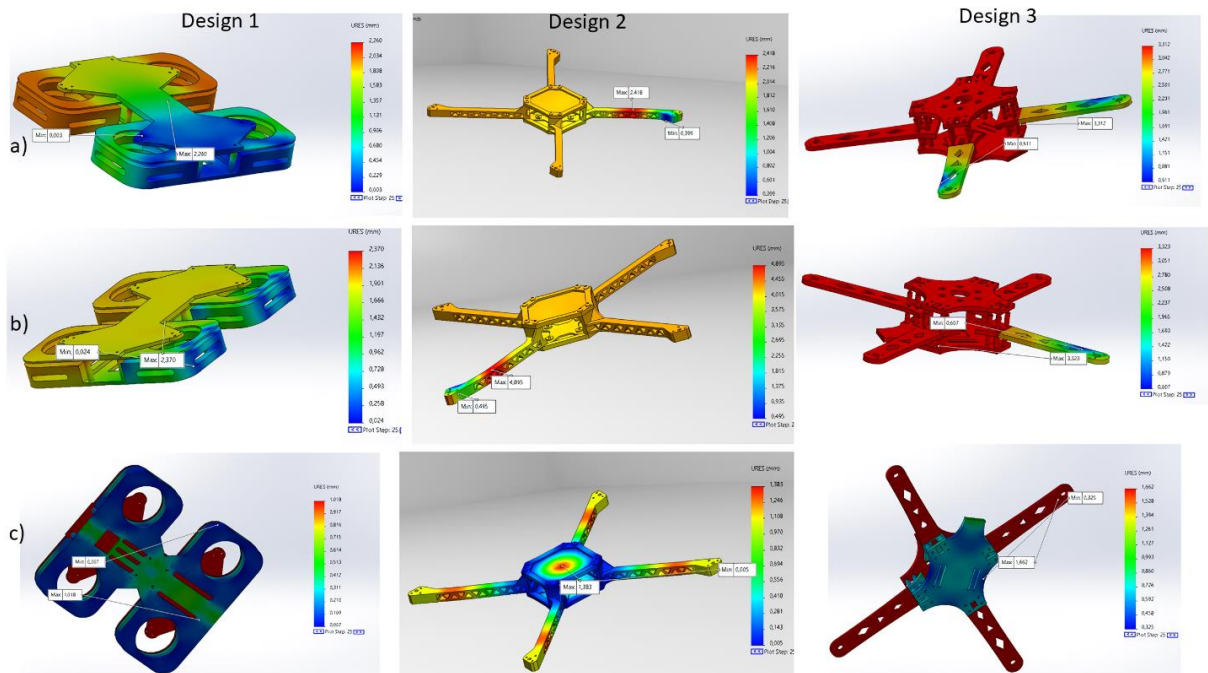


Figure 4. Displacement results of Drone Frame Designs a) Direction 1, b) Direction 2, c) Direction 3 (Drone Gövde Tasarımlarının Uzama Sonuçları a) Yön 1, b) Yön 2, c) Yön 3)

This discussion delves into the implications of the stress and displacement results, along with their implications for design optimization. In the context of stress levels, the data unequivocally highlights Design 2 as the superior performer when compared to Design 1. Design 2 exhibited a significantly lower von Mises stress of 19 MPa in contrast to Design 1's 31 MPa, representing a notable 38.7% reduction. These lower stress values signify that Design 2 is better equipped to distribute and endure the applied loads, indicating enhanced structural integrity. The reduced stress levels in Design 2 also suggest a diminished risk of structural failure, a crucial factor in designing robust and reliable drone frames [11]. The superiority of Design 2 in stress management aligns with the fundamental engineering principle that lower stress levels correlate with increased load-bearing capacity and reduced susceptibility to mechanical failure. This aspect is particularly vital in applications where drones may encounter varying stressors, such as sudden maneuvers or external disturbances [12]. Conversely, the analysis of displacement reveals an interesting dimension of performance. Design 1 exhibits a notable advantage by showcasing lower displacement values compared to the other designs during the drop-test analysis. Specifically, Design 1 demonstrated less deformation or movement,

recording the lowest displacement values across all directions. The lower displacement values in Design 1 are indicative of its ability to maintain the structural integrity and stability of the drone frame, even when subjected to external forces. Reduced displacement is advantageous in scenarios where precise positioning and stability are critical, such as aerial photography or surveying missions. It also implies that Design 1 may be less prone to vibrations and oscillations, contributing to smoother flight operations [13]. Design 2 excels in stress reduction, suggesting robustness and resilience in the face of challenging conditions. Conversely, Design 1's lower displacement values indicate superior stability and reduced deformation under load. The choice between Design 1 and Design 2 ultimately depends on the specific application and priorities. For missions that demand structural robustness and risk mitigation, Design 2 may be the preferred option. Conversely, applications requiring precise maneuverability and minimal deformation may benefit from Design 1.

3.2. Flow Analysis Results (Akış Analizi Sonuçları)

In Figure 5, the flow analysis of drone frames in terms of directions is presented.

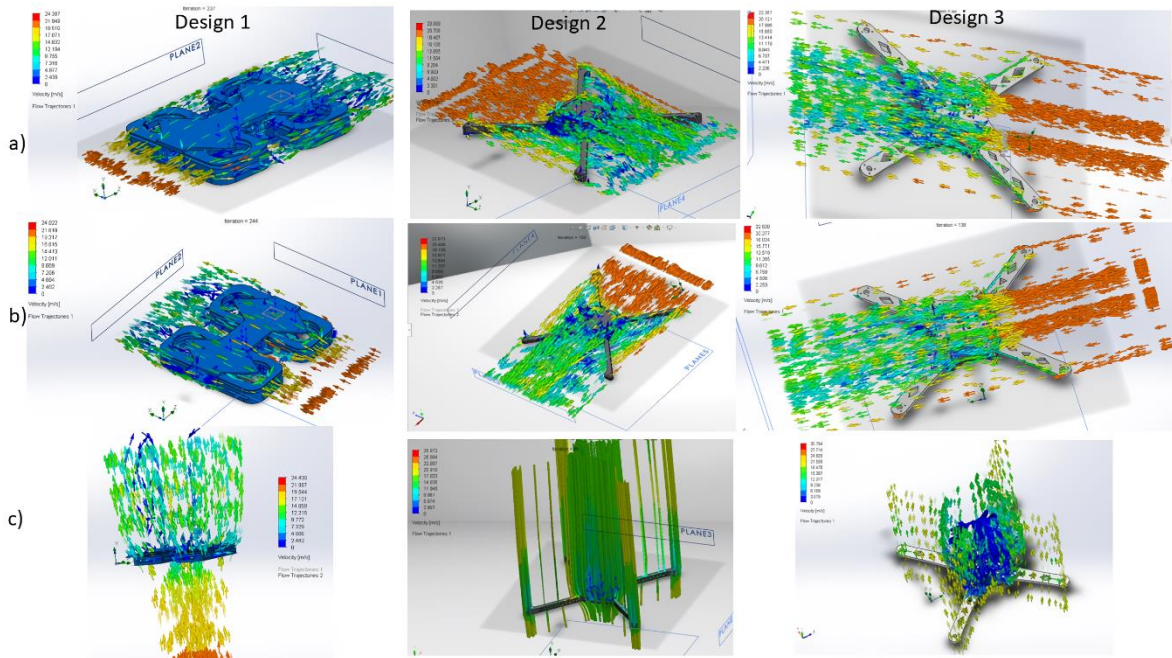


Figure 5. Flow analysis of Drone Frame Designs a) Direction 1, b) Direction 2, c) Direction 3 (Drone Gövde Tasarımlarının Akış Analizi a) Yön 1, b) Yön 2, c) Yön 3)

Table 3. Flow simulation results (Akış Simülasyonu Sonuçları)

	Direction 1	Direction 2	Direction 3
Design 1	24.387 m/s	24.022 m/s	24.43 m/s
Design 2	23.009 m/s	22.673 m/s	29.872 m/s
Design 3	22.357 m/s	22.530 m/s	30.794 m/s

According to the flow simulation results in Table 3, Design 2 achieved a velocity of 29.87 m/s, while Drone 3 attained a velocity of 30.79 m/s. Comparing the two velocities, Drone 3 performed better and achieved a higher velocity compared to Design 1. Design 1 demonstrated superior performance in both direction 1 and direction 2 compared to the other designs. A higher velocity indicates that Drone 1 exhibits better propulsion or aerodynamic characteristics, enabling it to achieve faster speeds during these motions. Therefore, based on the velocity results, Drone 1 is considered the better design in terms of achieving higher speeds in this particular scenario.

Drone 1 exhibited the higher velocity in a flow simulation, higher stress levels, and the lowest displacement in a stress analysis because of the aerodynamic design and structural rigidity. Design 2 and Design 3's aerodynamic design, such as the shape of its body and wings, resulted in lower velocity in the flow simulation. When it comes to direction 3, the shape of the body of design 1 created more drag or turbulence, limiting its speed compared to other designs [14]. The drone's structural design might prioritize rigidity and stiffness, which could lead to higher stress levels during testing. While higher stress levels may indicate the ability to withstand applied loads, it could also suggest that the drone is less flexible and more susceptible to structural damage [15-16]. Therefore, Design 1 has been selected for topology optimization and subsequent fabrication due to its favorable performance characteristics, including lower velocity in the flow simulation, higher stress levels, and lower displacement in the stress analysis.

In the context of velocity, Design 1 emerges as a notable performer, particularly in directions 1 and 2. Design 1 achieved a velocity of 24.43 m/s in direction 3, while Designs 2 and 3 recorded slightly lower velocities of 23.009 m/s and 22.357 m/s, respectively. This demonstrates Design 1's superior propulsion and aerodynamic attributes in these directions. However, it is essential to acknowledge that in direction 3, Design 3 outperformed the other designs, attaining a remarkable velocity of 30.794 m/s, whereas Design 1 lagged behind with a velocity of 24.43 m/s. This divergence highlights the significance of considering the direction-specific performance of drone frames, as various flight scenarios may require distinct design optimizations [16]. The variations in velocity among the designs can be attributed to their differing aerodynamic features, including the shape of the body and wings. Design 1's reduced velocity in direction 3 can be attributed to the creation of

more drag or turbulence by the shape of its body, as observed. This indicates that the aerodynamic design of a drone has a substantial impact on its overall performance, especially in high-velocity scenarios. Notably, the relationship between velocity and other performance factors, such as stress levels and displacement, becomes apparent. Drone 1 exhibited higher velocity in the flow simulation but also showcased higher stress levels and the lowest displacement in the stress analysis. This correlation suggests that the aerodynamic advantages of Drone 1 may be associated with its structural rigidity [14-16]. It's important to recognize that a drone's structural design often involves a trade-off between rigidity and flexibility. While higher stress levels may indicate the capacity to withstand applied loads, they could also imply reduced flexibility and an increased susceptibility to structural damage, particularly under extreme conditions [17].

3.3. Topology Optimization Results (Topoloji Optimizasyon Sonuçları)

To accomplish the weight reduction goals, a combination of topology optimization was employed. The methodology involved rigorous design iterations and analyses to identify the optimal distribution of material within the drone structure. This process was carried out for a 30% weight reduction target using Solidworks Topology.

The initial mass of the design 1 drone frame was recorded as 708.604 grams. Following the application of topology optimization techniques, a significant weight reduction of 30% was achieved for design 1. The mass of the drone was effectively reduced to 545.08 grams. This weight reduction contributes to improved agility, maneuverability, and energy efficiency of the drone [18].

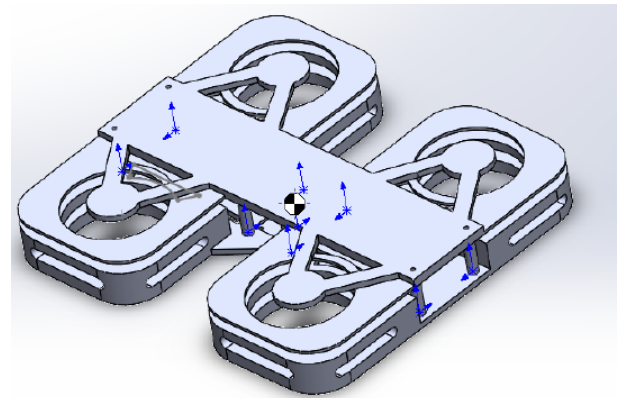


Figure 6. The Optimized Design with a 30% Weight Reduction (%30 Ağırlık Azaltma ile Optimize Edilmiş Tasarım)

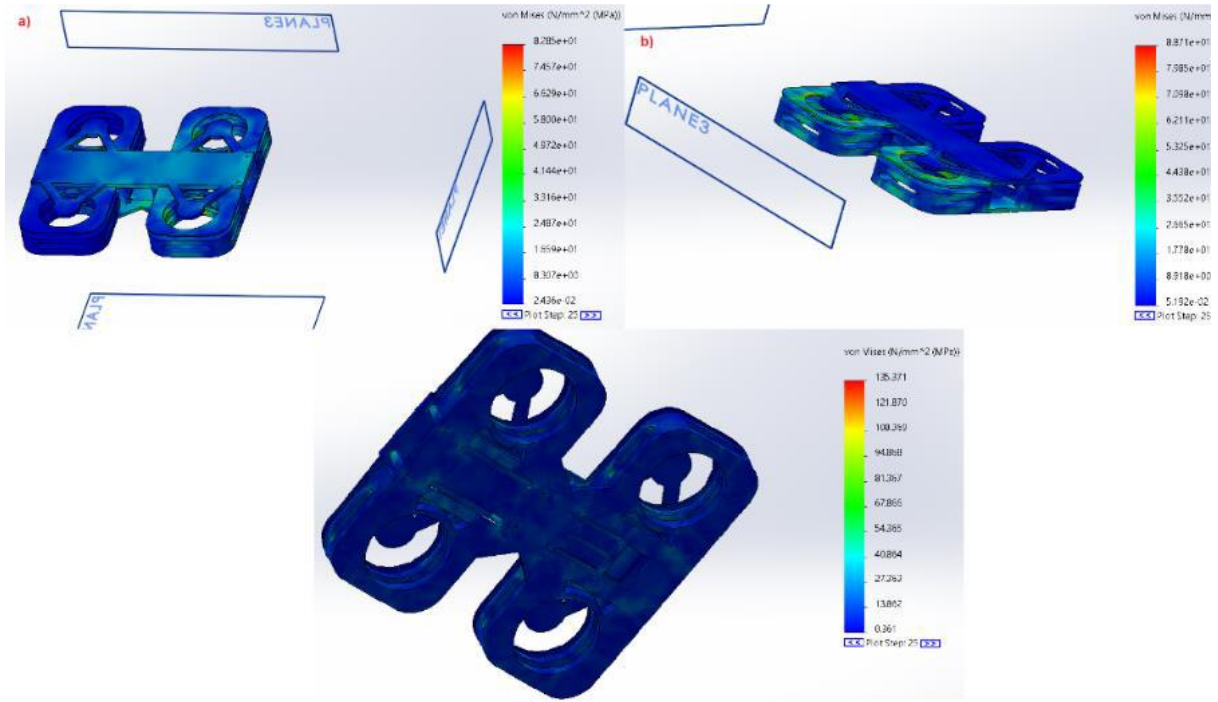


Figure 7. Von Mises stress analysis of the optimized drone frame design a) Direction 1, b) Direction 2, c) Direction 3 (Optimize Edilmiş Drone Gövde Tasarımının Von Mises Gerilme Analizi a) Yön 1, b) Yön 2, c) Yön 3)

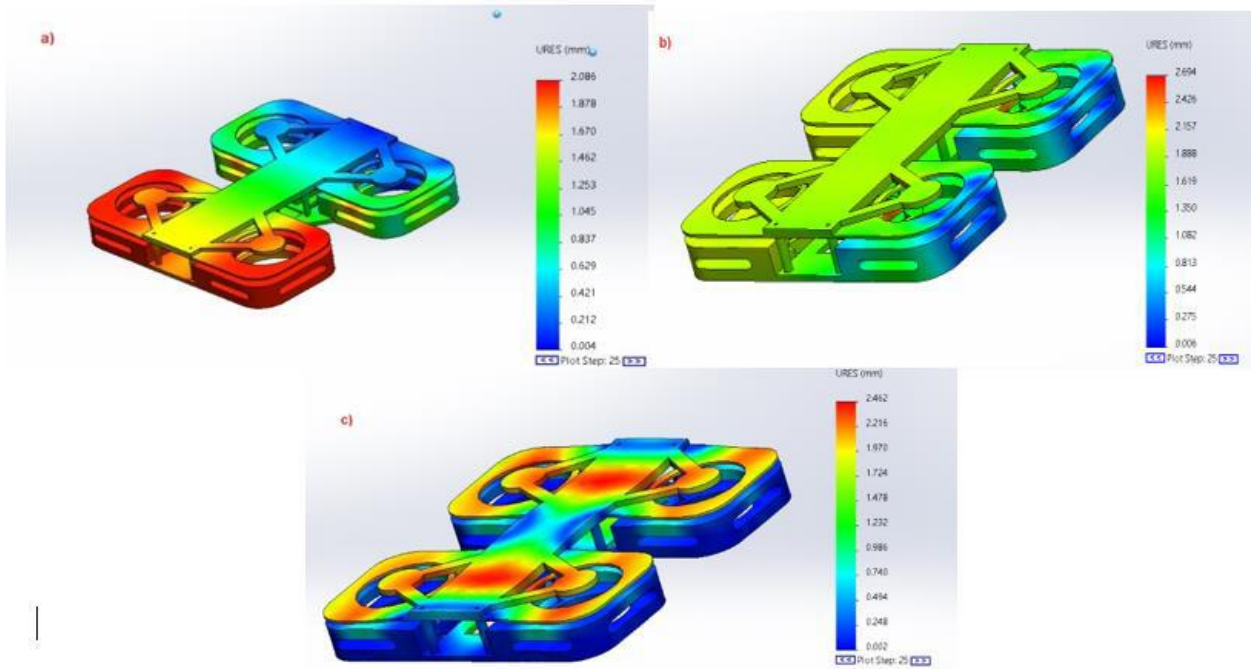


Figure 8. Displacement of the optimized drone frame design a) Direction 1, b) Direction 2, c) Direction 3 (Optimize Edilmiş Drone Şasi Tasarımının Yer Değiştirme a) Yön 1, b) Yön 2, c) Yön 3)

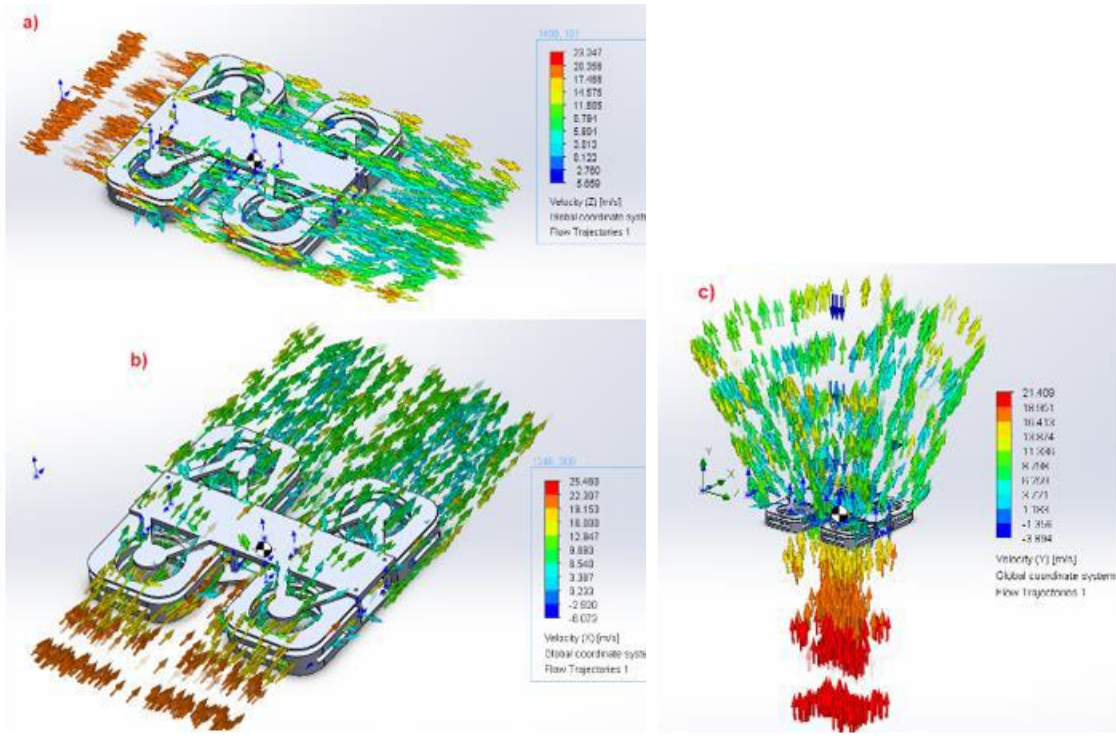


Figure 9. Flow simulation of the optimized drone frame design a) Direction 1, b) Direction 2, c) Direction 3 (Optimize Edilmiş Drone Gövde Tasarımının Akış Simülasyonu a) Yön 1, b) Yön 2, c) Yön 3)

Table 4. Comparison of the optimized design analysis results with the initial design (Optimize edilmiş tasarım analizi sonuçlarının, başlangıç tasarımı ile karşılaştırılması)

	Directions	Stress (MPa)	Displacement (mm)	Mass (g)	Flow velocity (m/s)
Initial Design Design 1	Direction 1	107.266	2.26	708.604	24.387
	Direction 2	100.094	2.37		24.022
	Direction 3	31.154	1.02		24.43
30% weight reduction	Direction 1	82.85	2.086	545.08	25.46
	Direction 2	88.71	2.694		23.247
	Direction 3	135.3	2.462		21.489

The optimized drone design was subjected to a drop test, following the same protocol as the initial designs. The drop test analysis results are presented in Figure 7 and Figure 8. Flow simulation results are presented in Figure 9.

In Table 4, a comparison is made between the analysis results of the optimized design and the initial design. In Direction 1, the initial design experienced a stress of 107.266 MPa, which was significantly reduced to 82.85 MPa in the optimized design with a 30% weight reduction. This represents a substantial improvement in stress management, indicating enhanced structural integrity and reliability. Similarly, in Direction 2, the stress was reduced from 100.094 MPa in the initial design to 88.71 MPa in the optimized design. This reduction suggests that the design modification effectively addressed stress concentration and improved the

overall stress distribution. However, in Direction 3, the stress increased from 31.154 MPa in the initial design to 135.3 MPa in the optimized design with a 30% weight reduction. The displacement results show the amount of deformation experienced by the drone frame. In Direction 1, the optimized design with a 30% weight reduction exhibited a displacement of 2.086 mm, slightly lower than the initial design's displacement of 2.26 mm. This indicates that the design modification effectively reduced the amount of deformation in this direction. Similarly, in Direction 2, the optimized design showed a displacement of 2.694 mm, slightly higher than the initial design's displacement of 2.37 mm. The flow velocity parameter indicates the speed of airflow around the drone during operation. The initial design had a flow velocity of 24.387 m/s, while the optimized design with a 30% weight reduction exhibited a slightly higher flow velocity

of 25.46 m/s. This increase in flow velocity suggests improved aerodynamic performance, potentially leading to better flight stability and control.

Overall, the analysis results indicate that the optimized design with a 30% weight reduction shows promising improvements in stress management, displacement reduction, and weight reduction. However, further refinement is required to address the increased stress observed in Direction 3. The increased flow velocity suggests enhanced aerodynamic performance, which is beneficial for the drone's operation [19-20]. These findings provide valuable insights for further design iterations and optimizations to enhance the drone's overall performance and reliability.

The results provide valuable insights for the development of efficient and reliable drones. Future research can focus on addressing the observed stress concentration and further enhancing the aerodynamic performance of the drone design. These advancements will drive the progress of drone technology for a wide range of applications.

4. CONCLUSIONS (SONUÇLAR)

In this study, we have analyzed various aspects of drone frame designs, including stress levels, displacement, flow analysis, and topology optimization, with a specific focus on improving performance and reliability. The key findings and quantitative results from this investigation are summarized below:

-Drop Test Analysis: In terms of stress levels, Design 2 outperformed Design 1 with a remarkable 46.8% reduction in von Mises stress. Design 1 exhibited a stress of 31.15 MPa in direction 3, while Design 2 demonstrated a significantly lower stress of 19.84 MPa. This reduction in stress values by nearly half indicates the substantial enhancement in structural integrity, reducing the risk of failure.

-Displacement Analysis: In the displacement analysis, Design 1 exhibited superior performance by achieving 31.9% lower displacement values compared to the other designs. Lower displacement values, such as 1.02 mm in direction 3, suggest that Design 1 is more resistant to deformation and movement under applied loads, contributing to the overall stability and integrity of the design.

-Flow Analysis: The flow simulation results indicated that Design 3 achieved the highest velocity at 30.794 m/s, while Design 2 reached 29.872 m/s. However, Design 1 exhibited superior performance in both direction 1 and direction 2 with

a velocity of 24.43 m/s and 24.022 m/s, respectively. These results signify that Design 1 excels in propulsion and aerodynamic characteristics, enabling it to achieve higher speeds.

-Topology Optimization: Through topology optimization techniques, a significant weight reduction of 23.1% was achieved for Design 1. The initial mass of 708.604 grams was effectively reduced to 545.08 grams, resulting in improved agility, maneuverability, and energy efficiency of the drone. In a comparison between the initial and optimized designs, it was observed that in Direction 1, the optimized design achieved a 22.4% reduction in stress, along with 7.8% less displacement. In Direction 2, stress was reduced by 11.1%, while displacement increased by 13.8%. Nevertheless, in Direction 3, the stress increased by 334.7%, highlighting the need for further refinement.

This study provides valuable insights for the design and optimization of drone frames, showcasing the importance of considering stress distribution, displacement, mass reduction, and flow characteristics. Future research can focus on refining the design to mitigate the observed stress concentration and further enhancing the aerodynamic performance of the drone. These findings contribute to the advancement of drone technology, enabling the development of more efficient and reliable drones for various applications.

ACKNOWLEDGMENT (TEŞEKKÜR)

This study was supported with the project number 1919B012214339 under the program of "TÜBİTAK 2209-A - Research Project Support Programme for Undergraduate Students".

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)

Berke BAY: He designed the drones and performed the analysis and helped the writing process.

Dronları tasarlamış, analizleri gerçekleştirmiş ve yazım sürecine yardımcı olmuştur.

Meltem ERYILDIZ: She provided consultancy, evaluated the results and performed the writing process.

Danışmanlık sağlamış, sonuçları değerlendirmiş ve yazma sürecini 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] Sundararaj, S., Dharsan, K., Ganeshraman, J., & Rajarajeswari, D. Structural and modal analysis of hybrid low altitude self-sustainable surveillance drone technology frame. *Materials Today: Proceedings*, 37 (2021) 409-418.
- [2] Mohsan S.A.H., Khan M.A., Noor F., Ullah I., & Alsharif M.H. Towards the unmanned aerial vehicles (UAVs): A comprehensive review. *Drones*, 6(6) (2022) 147-149.
- [3] Agarwal H., Singhal A., & Raj K.H. 3D Printed Quadcopter. In *Advances in Systems Engineering: Select Proceedings of NSC 2019*. Singapore: Springer, (2021) 491-499.
- [4] Zhu J.H., Zhang W.H., & Xia L. Topology optimization in aircraft and aerospace structures design. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 23 (2016) 595-622.
- [5] Bajirao M.S., Vijay K.P., Sudhir G.R., Pandurang Z.H., & Prasanna R. Design Optimization of Drone Frame. *International Journal of Mechanics and Design*, 8(1) (2022) 25-32.
- [6] Satam S., Topology Optimization of UAV Drone frame. <https://www.linkedin.com/pulse/topology-optimization-uav-drone-frame-sanay-satam/?trackingId=rwnSsEkvRq%2BvfnaCQM SFXw%3D%3D>
- [7] Nvss S., Esakki B., Yang L.J., Udayagiri C., & Vepa K.S. Design and development of unibody quadcopter structure using optimization and additive manufacturing techniques. *Designs*, 6(1) (2022) 8-12.
- [8] Bright J., Suryaprakash R., Akash S., & Giridharan A. Optimization of quadcopter frame using generative design and comparison with DJI F450 drone frame. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1012(1) (2021) 012019.
- [9] Dev, P. K., Balaji, C., & Gurusideswar, S. Material characterization of sugarcane bagasse/epoxy composites for drone frame material. *Materials Today: Proceedings*, 68 (2022) 2586-2590.
- [10] Anand, S., & Mishra, A. K. High-Performance Materials used for UAV Manufacturing: Classified Review. *International Journal of All Research Education and Scientific Methods*, 10(7) (2022) 2811-2819.
- [11] Shelare, S., Belkhode, P., Nikam, K. C., Yelamasetti, B., & Gajbhiye, T. A payload based detail study on design and simulation of hexacopter drone. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing*, 18 (2023) 1-18.
- [12] Husaini, H., Putra, D. I. O., Syahriza, S., & Akhyar, A. Stress and strain analysis of UAV hexacopter frame using finite element method. In *AIP Conference Proceedings*, 2613 (2023), 1-8.
- [13] Yap, Y. L., Toh, W., Giam, A., Yong, F. R., Chan, K. I., Tay, J. W. S., & Ng, T. Y. Topology optimization and 3D printing of micro-drone: Numerical design with experimental testing. *International Journal of Mechanical Sciences*, 237 (2023), 107771.
- [14] Parsons, J. S., Goodson, R.E., & Goldschmied, F.R. Shaping of axisymmetric bodies for minimum drag in incompressible flow. *Journal of Hydronautics*, 8(3) (1974) 100-107.
- [15] Bras M., Warwick S., & Suleman A. Aeroelastic evaluation of a flexible high aspect ratio wing UAV: Numerical simulation and experimental flight validation, *Aerospace Science and Technology*, 122 (2022) 107400.
- [16] Quintana, A., Graves, G., Hassanalian, M., & Abdelkefi, A. Aerodynamic analysis and structural integrity for optimal performance of sweeping and spanning morphing unmanned air vehicles. *Aerospace Science and Technology*, 110 (2021) 106458.
- [17] Bergonti, F., Nava, G., Wüest, V., Paolino, A., L'Erario, G., Pucci, D., & Floreano, D. Co-Design Optimisation of Morphing Topology and Control of Winged Drones. *arXiv preprint*, 2309 (2023) 1-7.
- [18] Ajanic, E., Feroskhan, M., Mintchev, S., Noca, F., & Floreano, D. Bioinspired wing and tail morphing extends drone flight capabilities. *Science Robotics*, 5(47) (2020) 1-12.
- [19] Zhu H., Nie H., Zhang L., Wei X., & Zhang M. Design and assessment of octocopter drones with improved aerodynamic efficiency and performance. *Aerospace Science and Technology*, 106 (2020) 106206.
- [20] Papadopoulos, C., Mitridis, D., & Yakinthos, K. Conceptual design of a novel unmanned ground effect vehicle (ugev) and flow control integration study. *Drones*, 6(1) (2022) 25-31.

Electricity Theft Detection Using Rule-Based Machine Learning (rML) Approach

Sheyda BAHRAMI¹  Erol YUMUK¹  Alper KEREM^{1,2*}  Beytullah TOPCU¹  Ahmetcan KAYA¹ 

¹ NAR System Technology Inc (NAR Sistem Teknoloji A.Ş.), Istanbul, Turkey

² Kahramanmaraş Sutcu Imam University, Faculty of Engineering and Architecture, Department of Electrical and Electronics Engineering, Kahramanmaraş, Turkey

Article Info

Research article
Received: 27/02/2024
Revision: 12/03/2024
Accepted: 18/03/2024

Keywords

Electricity Theft Detection
Non-Technical Losses
Advanced Metering
Infrastructure
Machine Learning

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 27/02/2024
Düzeltilme: 12/03/2024
Kabul: 18/03/2024

Anahtar Kelimeler

Kaçak Elektrik Tespiti
Teknik Olmayan Kayıplar
İleri Ölçüm Altyapı
Makine Öğrenimi

Graphical/Tabular Abstract (Grafik Özet)

In this study, various machine learning techniques combined with a new rule-based feature space were utilized to identify electricity theft. / Bu çalışmada, yeni bir kural tabanlı özellik uzayıyla birleştirilen çeşitli makine öğrenimi yöntemleri elektrik kaçağını belirlemek amacıyla kullanılmıştır.

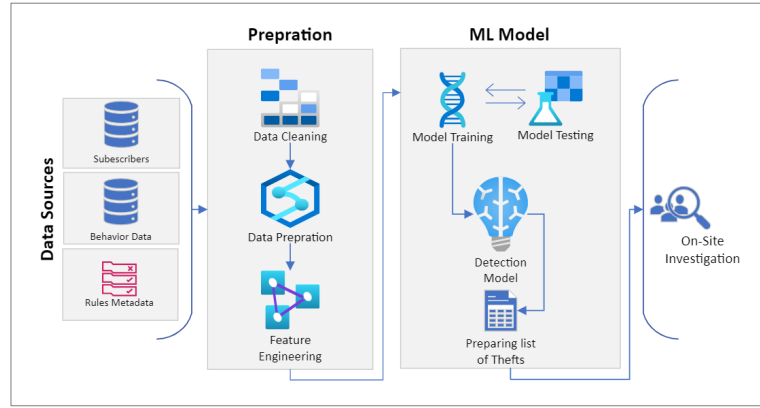


Figure A: The block diagram of proposed method / Şekil A: Önerilen yöntemin blok diyagramı

Highlights (Önemli noktalar)

- Development of a unique hybrid approach that integrates expert-derived rules with data-driven models. / Veri modelleri ile uzman kurallarının birleştirilmesinden oluşan özgün bir yaklaşım geliştirilmesi.
- Incorporation of nine specific expert-investigated rules into the models. / Modellere dokuz özel uzman kuralının eklenmesi.
- Implementation of on-site evaluations to validate the model's predictions. / Modellerin tahminlerini test etmek için saha incelemeleri yapılması.
- Comprehensive evaluation of load histories from both fraudulent and normal cases. / Kaçak ve normal vakalardan gelen yük geçmişlerinin kapsamlı değerlendirilmesi.
- Exploration and comparison of eight supervised machine learning models. / Sekiz denetimli makine öğrenimi modelinin incelenmesi ve karşılaştırılması.

Aim (Amaç): The aim of this article is to introduce a novel, rule-based combined machine learning technique for detecting electricity theft. / Bu makalenin amacı, elektrik kaçak tüketimini tespit etmek için yeni bir kural tabanlı makine öğrenimi tekniği tanıtmaktır.

Originality (Özgünlük): In this study, unlike traditional approaches that focus solely on consumption patterns, our methodology integrates unique, expert-derived insights, significantly advancing the effectiveness of fraud detection techniques. / Bu çalışma, geleneksel tüketim odaklı yaklaşımların aksine uzman içgörülerini entegre ederek kaçak tespitinde önemli bir yenilik sunmaktadır.

Results (Bulgular): Ensemble Methods, especially Random Forest, dominated in recall performance (0.93), while AdaBoost, LGBBoost and XGBoost also showed strong results. / Topluluk Yöntemleri, özellikle de Rastgele Orman, hatırlama performansında (0,93) üstünlük sağlarken AdaBoost, LGBBoost ve XGBoost da güçlü sonuçlar göstermiştir.

Conclusion (Sonuç): Random Forest stood out for its ability to handle diverse data types and minimize overfitting, accurately identifying 77% of theft instances in on-site inspections. / Rastgele Orman, farklı veri türleriyle başa çıkma ve aşırı uyumu en aza indirme becerisiyle öne çıkarak yerinde denetimlerde hırsızlık örneklerinin %77'sini doğru bir şekilde tespit etmiştir.



Electricity Theft Detection Using Rule-Based Machine Learning (rML) Approach

Sheyda BAHRAMI¹ Erol YUMUKI¹ Alper KEREM^{1,2*} Beytullah TOPCU¹ Ahmetcan KAYA¹ ¹ NAR System Technology Inc (NAR Sistem Teknoloji A.Ş.), Istanbul, Turkey² Kahramanmaraş Sutcu Imam University, Faculty of Engineering and Architecture, Department of Electrical and Electronics Engineering, Kahramanmaraş, Turkey

Article Info

Research article

Received: 27/02/2024

Revision: 12/03/2024

Accepted: 18/03/2024

Keywords

Electricity Theft Detection
Non-Technical Losses
Advanced Metering
Infrastructure
Machine Learning

Abstract

Since electricity theft affects non-technical losses (NTLs) in power distribution systems, power companies are genuinely quite concerned about it. Power companies can use the information gathered by Advanced Metering Infrastructure (AMI) to create data-driven, machine learning-based approaches for Electricity Theft Detection (ETD) in order to solve this problem. The majority of data-driven methods for detecting power theft do take usage trends into account while doing their analyses. Even though consumption-based models have been applied extensively to the detection of power theft, it can be difficult to reliably identify theft instances based only on patterns of usage. In this paper, a novel rule-based combined machine learning (rML) technique is developed for power theft detection to address the drawbacks of systems that rely just on consumption patterns. This approach makes use of the load profiles of energy users to establish rules, identify the rule or rules that apply to certain situations, and classify the cases as either legitimate or fraudulent. The UEDAS smart business power consumption dataset's real-world data is used to assess the performance of the suggested technique. Our technique is an innovation in theft detection that combines years of intensive theft tracking with the use of rule-based systems as feature spaces for traditional machine learning models. With an astounding 93% recall rate for the rule-based feature space combination of the random forest classifier, this novel approach has produced outstanding results. The acquired results show a noteworthy accomplishment in the field of fraud detection, successfully detecting fraudulent consumers 77% of the time during on-site examination.

Kural Tabanlı Makine Öğrenimi (rML) Yaklaşımı Kullanılarak Kaçak Elektrik Tespiti

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi

Başvuru: 27/02/2024

Düzeltilme: 12/03/2024

Kabul: 18/03/2024

Anahtar Kelimeler

Kaçak Elektrik Tespiti
Teknik Olmayan Kayıplar
İleri Ölçüm Altyapı
Makine Öğrenimi

Öz

Elektrik kaçağının güç dağıtım sistemlerinde teknik olmayan kayıplar (NTL'ler) üzerindeki etkisi göz önüne alındığında, enerji şirketleri bu soruna büyük bir önem atfetmektedir. Enerji şirketleri, bu problemi çözmek amacıyla, Kaçak Elektrik Tespiti (ETD) için İleri Ölçüm Altyapısı (AMI) tarafından toplanan verileri kullanarak veriye dayalı, makine öğrenimine dayanan yöntemler geliştirebilir. Elektrik kaçağını tespit etmeye yönelik mevcut veriye dayalı metodolojiler, analizlerini gerçekleştirirken genellikle kullanım trendlerini hesaba katmaktadır. Tüketim bazlı modellerin elektrik kaçağının tespitinde yaygın olarak uygulanmış olmasına rağmen, yalnızca kullanım desenlerine dayanarak kaçak vakalarını güvenilir bir şekilde tanımlamak zorluklar içerebilir. Bu çalışmada, tüketim desenlerine dayalı sistemlerin kısıtlılıklarını ele almak üzere, enerji kullanıcılarının yük profillerini kullanarak kurallar oluşturmak, belirli durumlar için uygulanabilir kural veya kuralları belirlemek ve vakaları normal veya kaçak olarak sınıflandırmak üzere kural tabanlı birleşik bir makine öğrenimi (rML) tekniği geliştirilmiştir. UEDAŞ akıllı iş gücü tüketim veri setinin gerçek dünya verileri, önerilen yöntemin performansının değerlendirilmesinde kullanılmıştır. Bu yöntem, geleneksel makine öğrenimi modelleri için özellik uzayları olarak kural tabanlı sistemlerin kullanılmasında yıllar süren yoğun hırsızlık takibinin entegrasyonunu temsil eden kaçak tespitinde bir yeniliktir. Kural tabanlı özellik uzayının rastgele orman sınıflandırıcısı ile kombinasyonu için %93 gibi dikkat çekici duyarlılık oranı ile bu yeni yaklaşım, saha incelemeleri sırasında kaçak faaliyetlerini %77 oranında başarıyla tespit ederek olağanüstü sonuçlar üretmiştir.

1. INTRODUCTION (GİRİŞ)

Machine learning offers promising solutions for anti-electricity stealing by analyzing users' electricity consumption behavior. However, in the real world, due to different patterns of electricity consumption and imbalanced numbers of fraudulent activities, these solutions may fail to generalize effectively. Electricity theft is a significant problem that affects the normal operation of power grids and causes economic losses for power enterprises. In developing countries, the electricity theft rate can be as high as 30%, resulting in substantial financial impacts on power suppliers [1]. According to recent research, the global annual loss due to electricity theft amounts to an astonishing \$96 billion [2]. To combat this issue, efficient anti-electricity theft measures must be implemented to ensure a reasonable power supply and rational use of electricity, thereby reducing economic losses as much as possible [1]. Electricity theft detection methods can be broadly categorized into three categories: manually-driven, physically-driven, and data-driven. The manually-driven method relies on technicians manually checking electricity meters one by one, which is time-consuming and labor-intensive. The physically-driven method analyzes physical rules or sensor data in the grid to detect power theft, but it can be costly and requires specific sensors and topology information. The implementation of advanced metering infrastructure (AMI) in smart grids has led to an increase in the use of data-driven methods, which are now more prevalent. AMI enables the collection of large amounts of electrical consumption data at high frequencies, making it useful for electricity theft detection. Data-driven analysis algorithms can detect anomalies in the data and play a crucial role in identifying theft at a lower cost [2]. These methods can be categorized into unsupervised learning, semi-supervised learning, and supervised learning, depending on the level of prior knowledge required. Unsupervised learning does not require labeled data, semi-supervised learning uses a small amount of labeled data, and supervised learning relies on a significant amount of labeled data for detection [3]. Several research papers discuss methods and approaches for detecting electricity

theft using machine learning and data analysis techniques. These studies focus on analyzing users' electricity consumption behavior and identifying anomalies that may indicate fraudulent activities. By detecting abnormal consumption patterns, it is possible to identify potential instances of theft and improve the efficiency of anti-stealing efforts. Deep learning approaches, such as convolutional neural networks (CNNs), recurrent neural networks (RNNs), and generative adversarial networks (GANs), have also shown promise in detecting abnormal electricity consumption patterns and identifying theft [4]. Supervised learning methods in electricity theft detection such as Support Vector Machines (SVM), decision trees, and ensemble learning methods like XG-Boost, have been employed in this context with differing levels of success [2]. These methods utilize Artificial Intelligence (AI) techniques to analyze energy consumption data and identify anomalies that may indicate theft or other irregularities. By leveraging large amounts of data from sub-meters and smart sensors, it becomes possible to detect anomalous power consumption and understand the causes of each anomaly [5]. The choice of detection method depends on factors such as the availability of labeled data, data quality, complexity of the power grid environment, and desired detection accuracy. Researchers continue to explore and develop more sophisticated and efficient methods for electricity theft detection to overcome the limitations of existing approaches [2]. Feature engineering and structured query language (SQL) analytic functions have also been proposed as solutions for detecting electricity frauds using machine learning. These approaches aim to engineer relevant features from the data and utilize SQL analytic functions to detect fraudsters. By improving the correlation between data features and the target variable, these methods enhance the model's ability to identify fraudulent activities [6]. Table 1 presents the data-driven work conducted on the detection of electricity theft. Although machine learning approaches hold promise for electricity theft detection, the effectiveness of these methods may vary depending on the specific patterns of electricity consumption and the distribution of fraudulent activities in different regions and contexts.

Table 1. Literature on electricity theft detection (ETD) studies (Elektrik hırsızlığı tespiti (ETD) çalışmaları üzerine literatür)

Consumer type	Definition	Models	Recall	F1-Score	Precision	Reference
None-public	high-contracted power consumers in Endesa Company, Spain, analyzing their two-year consumption data when the consumption exceeds 1000 kW.	Bayesian networks, decision trees and Pearson correlation	0.38	-	-	[7]
Feeder Data	The data, spanning from February 1st, 2017 to April 30th, 2019, encompass parameters of power equipment, load, electricity sales, and records of electricity ammeter openings at the Tianjin Electric Power Company in China	Support vector machines	-	-	-	[8]
Industrial and commercial	Dataset spans 22 months, covering the period from May 2014 to February 2016 by the Company of Electric Energy of Honduras	Support vector machines	0.33	0.18	0.13	[9]
None-public	consumption data from Ireland, solar generation data from the U.S. and Australia, and wind generation data from France	PCA, kullback-Leibler divergence, density-based clustering	0.87	-	-	[10]
Residence	Using the demand data from more than 4000 households over an 18-months period	Finite mixture model clustering, GBM	-	-	-	[11]
None-public	Data are performed using State Grid Corporation of China (SGCC) dataset	K-means, local outlier factor	-	-	-	[12]
Residence	The dataset encompasses a variety of measurements from multiple sensors, capturing energy usage, occupancy, and ambient conditions within a household. The data were collected over a six-month period, spanning from July 5th to December 5th, 2015	K-Means clustering	-	-	-	[13]
Residence	The Dutch Residential Energy Dataset (DRED), specifically its public residential dataset, is utilized in this study. This dataset encompasses a variety of measurements from multiple sensors, capturing energy usage, occupancy, and ambient	Fuzzy C-means clustering	0.17	-	0.83	[14]

	conditions within a household. The data were collected over a six-month period, spanning from July 5th to December 5th, 2015					
Residence	Data of approximately 5000 Irish households monitored for one and a half years	ANNs and Fuzzy set theory (ANFIS classification method)	0.99	0.99	0.99	[15]
Industrial and commercial	Two private datasets from a Brazilian electric utility, represented by eight features (Demand Billed, Demand Contracted, Maximum Demand, Reactive Energy, Power Transformer, Power Factor, Installed Power, Load Factor)	Probabilistic OPF	-	-	-	[16,17,18,19]
Industrial and commercial	Two private datasets from a Brazilian electric utility, represented by eight features (Demand Billed, Demand Contracted, Maximum Demand, Reactive Energy, Power Transformer, Power Factor, Installed Power, Load Factor)	Genetic algorithms, harmony search, OPF, particle swarm optimization	-	-	-	[20]
IEEE 34-bus test case	Electricity consumption dataset	Random matrix theory	0.91	-	-	[21]
None-public	Electricity consumption dataset	Rule engine, SVM	-	-	-	[22]
Farmers and commercial	Smart meter data collected from 171 consumers at a 15-minute resolution in Nana Kajaliyala village, Gujarat, India.	Hierarchical clustering and decision tree	-	-	-	[23]
Residence	Master meter and smart meter dataset (114 single family apartment during one year) in Western Massachusetts	Correlation analysis, Pearson correlation	-	0.8	-	[24]
Residence	In the simulations, the load profiles are derived from actual residential active power consumption data. This data is recorded at a granularity of one minute, representing the average power usage within each minute.	-	-	-	-	[25]

Hard-ware	Numerical experiments on the Irish smart meter dataset are conducted to show the good performance of the combined method	Correlation analysis				[26]
None-public	Electricity consumption data was built at University of Michigan	Covariance matrix	-	-	-	[27]
Residence	The historical electricity consumption sequence of users and the relevant information of similar users are obtained from electricity consumption database	DBSCAN	-	-	-	[28]
None-public	Real data of 12752 consumers is used from the power utilities in Pakistan on monthly basis	Multivariate Gaussian Distribution	0.75	-	-	[29]
Residence, Commercial	Theft dataset is injected to the consumption patterns	Entropy analysis	-	-	-	[30,31]
Residence	Real-time electricity theft detection using simulated resident energy consumption data	Special ETPS unit	-	-	-	[32]
Residence	Real-time electricity theft detection using energy consumption data of 5 residents	Prediction-based regression, prediction-based neural network, clustered-based, and projection-based methods	-	-	-	[33]
Residence	Dataset from a US electric utility, represented by five features (Load rate, minimum load coefficient, load rate during peak load period, load rate during stable load period, load rate during valley load period)	Local matrix construction	-	-	-	[34]
Residence	Massive SM data includes voltage, current, active power	Deep learning-based Semi-Supervised Auto-Encoder	0.80	0.86	0.94	[35]
None-public	Real-world-data-based case studies are presented, which have shown that adding unlabeled samples into training set has greatly improved the performance	Utilizing unlabeled data to detect electricity fraud in AMI: A semi-supervised deep learning approach	-	-	-	[36]
None-public	simulations are performed using State Grid	Self-Attention Generative Adversarial Network	0.99	0.9	0.95	[37]

	Corporation of China (SGCC) dataset	(SAGAN) is used in combination with Convolutional Neural Network (CNN)				
IEEE 123-bus case	The functions of a cyber-attack are implemented on a benign dataset spanning one year to generate a malicious dataset.	CNN, GRU-RNN	0.993	0.995	0.997	[38]
Residence	Electricity consumption patterns of 90 low-voltage distribution customers over a three-month period from January 1st to March 31st, 2013, using a 30-minute resolution on the Low Carbon London smart meter trials dataset	K-means and DWT	-	-	-	[39]
None-public	Imbalanced realistic dataset that presents a daily electricity consumption provided by State Grid Corporation of China	CNN	-	-	-	[40]
Residence, Commercial	Smart meter data set provided by the Greek DSO, HEDNO and a publicly available smart meter data set. Frauds are simulated and the Twitter breakout detection library is used for extracting features	Rule systems, multi-variate Gaussian distribution (MGD), local outlier factor (LOF), k-means, fuzzy c-means, DBSCAN and SOM	0.76	0.755	-	[41]
None-public	State Grid Corporation of China (SGCC) dataset	VGG neural network, XGBoost	0.97	0.937	0.93	[42]

Achieving generalization across diverse scenarios remains a challenge. Further research and development are necessary to improve the robustness and accuracy of these models in real-world applications. In this paper, we propose a method that surpasses AI methods solely reliant on consumption patterns. Our approach aims to identify fraudulent consumers by leveraging rules developed in collaboration with experts. These rules are extracted from the load profiles of fraudulent consumers. It is worth emphasizing that our method incorporates consumption-based rules, which constitute just one part of the 14 rules under consideration. Our approach in detecting electricity theft represents a significant advancement over many existing studies, which often emphasize data-driven methodologies based on analyzing consumption patterns. A notable limitation in these studies, is their reliance on datasets that simulate electricity theft scenarios rather than reflecting actual incidents. These simulated datasets may not

accurately capture the real-world nuances of electricity theft. Moreover, a critical aspect often overlooked in data-driven methodologies is the lack of on-site investigation. By relying solely on theoretical or simulated data, these models miss the opportunity to incorporate crucial empirical insights that can only be derived from physical verification and real-world observations. This gap results in a significant disconnect between the model outputs and the actual on-ground scenarios of electricity theft, limiting the practical applicability and effectiveness of these models in real-life situations. In contrast, our model distinguishes itself by integrating 9 specific rules, thoroughly investigated by experts, as key features. This inclusion of expert insights allows for a more nuanced and informed analysis of consumption data, directly targeting the complexities of real-world theft patterns. Moreover, our model extends beyond mere data analytics. Following the predictive analysis, we conduct on-site evaluations to verify the model's results. This

dual approach of integrating expert-derived rules and conducting physical verifications on-site ensures a comprehensive and accurate detection of electricity theft. To effectively determine the rules that fraudulent consumers adhere to, we evaluate the load histories of fraudulent and normal cases. Subsequently, these rules are treated as feature spaces, enabling us to classify consumers as either theft or benign. The trained model is then deployed for real-world electricity theft detection. Throughout this study, we explore 8 supervised models to identify the most optimal one. Among these models, the random forest algorithm exhibits the highest performance, delivering accurate results.

The key contributions of this study are as follows:

- Development of a unique hybrid approach that integrates expert-derived rules with data-driven models for electricity theft detection.
- Incorporation of nine specific expert-investigated rules into the model, enhancing its accuracy and applicability to real-world scenarios.
- Implementation of on-site evaluations to validate the model's predictions, bridging the gap between theoretical analysis and practical fieldwork.
- Comprehensive evaluation of load histories from both fraudulent and normal cases, providing a more nuanced understanding of electricity theft patterns.
- Exploration and comparison of eight supervised machine learning models to determine the most effective algorithm for this application.
- Demonstration of the superiority of the random forest algorithm in our context, backed by empirical evidence from real-world data.

The rest of the articles are as follows. Section 2 describes the models. The method and analysis of experiment results is shown in Section 3. Finally, results and concluding remarks are presented in Section 4 and Section 5, respectively.

2. AI MODELS IN NON-TECHNICAL LOSS DETECTION (TEKNİK OLMAYAN KAYIP TESPİTİNDE YAPAY ZEKA MODELLERİ)

We examined a range of machine learning algorithms for NTL (Non-Technical Loss)

detection, including Light-GBM, XG-Boost, Random Forest, Support Vector Machine (SVM), AdaBoost, K-Nearest Neighbors, Decision Trees and Multi-Layer Perceptron. Our goal was to identify the most effective classifiers for NTL detection.

2.1 ENSEMBLE METHODS (TOPLULUK YÖNTEMLERİ)

Ensemble methods in machine learning involve combining predictions from multiple base models to enhance overall performance. There are two main categories of ensemble methods:

- a. **Averaging-Based Ensembles:** These methods aggregate results from individual models by averaging their predictions, resulting in superior performance compared to single models. Random forest [43] is an example of this category, which combines predictions from randomized decision trees.
- b. **Boosting-Based Ensembles:** These techniques combine weak learners to create a robust ensemble, reducing prediction bias. Examples include AdaBoost [44], Light-GBM [45], and XG-Boost. AdaBoost assigns greater weights to incorrectly predicted instances, guiding the model towards better performance. Light-GBM uses a depth-first approach for quicker training but may overfit on smaller datasets. XG-Boost [45] requires preprocessing for categorical features and handles missing data.

Ensemble methods improve predictive performance by combining outputs from multiple models. Each method has its strengths and considerations, making them suitable for different machine learning use cases.

2.2 SUPPORT VECTOR MACHINE (DESTEK VEKTÖR MAKİNESİ)

Support Vector Machines (SVM) [46] are a versatile class of machine learning techniques used for tasks such as outlier detection, regression, and classification. They are widely adopted in data mining due to their strong predictive capabilities and reliability in supervised learning. In our data classification, we used the Linear Support Vector Classifier (Linear SVC).

2.3 DECISION TREES (KARAR AĞAÇLARI)

Decision Trees are a fundamental machine learning technique used for both classification and

regression tasks. They work by creating a tree-like structure where each node represents a decision based on specific features of the data. Decision Trees are easy to understand and interpret, require minimal data preprocessing (no need for data normalization), and can handle both numerical and categorical data. They can create overly complex trees prone to overfitting. Ensuring optimal tree structure can be computationally intensive, and they may not perform well on very small datasets [23].

2.4 NEURAL NETWORK MODEL (SİNİR AĞI MODELİ)

A multi-layer perceptron (MLP) is a type of artificial neural network designed for various machine learning tasks, particularly in deep learning. It consists of multiple interconnected layers of artificial neurons, each layer playing a unique role in information processing. Typically, an MLP includes an input layer, one or more hidden layers, and an output layer. The input layer receives the initial data, which is then passed through the hidden layers. Neurons in these hidden layers apply mathematical transformations to the input data, learning and extracting complex patterns and features. The final output layer produces the network's prediction or classification. MLPs are known for their ability to model complex relationships in data and are used in tasks such as image recognition, natural language processing, and predictive modeling. They are a fundamental component of deep learning, contributing to the success of modern artificial intelligence applications [47].

3. METHODOLOGY (METODOLOJİ)

3.1. FEATURE EXTRACTION (ÖZELLİK ÇIKARIMI)

To effectively combat electricity theft, it is necessary to extract comprehensive features from abnormal electricity consumption phenomena and quantifiable characteristics caused by various electricity theft behaviors.

Our team of experts has conducted a comprehensive and methodical examination of electricity theft patterns. Through this diligent analysis, we have formulated the following 14 rules to accurately assess the characteristics of a user's electricity consumption:

1. Meter tampering warning: Someone might have physically tampered with the smart meter to

modify its internal components, leading to inaccurate readings. In these cases, the warning of the body lid being opened is checked. For suspicion of fraud, it should be evaluated along with sudden decrease in consumption.

2. Virtual meter Control: The accuracy of the measurements made by the meter is regularly verified. Every 15 minutes, the product of the current, voltage, and power factor (cosine of the angle between current and voltage) is calculated and compared with the instantaneous value measured by the meter. Due to the nature of the meter, which provides instantaneous readings, and the control being performed every 15 minutes, there may be deviations with a tolerance of 10%. These deviations are considered acceptable and are not flagged as out of control. The active and reactive power progress, calculated based on the current, voltage, and power factor, is continuously monitored. If the calculated value exceeds the measurement value by 10%, it is flagged for further investigation. This step is taken to ensure that any significant discrepancies are promptly identified and addressed.
3. Daily average voltage V: In the context of normal users, the voltage typically exhibits minimal fluctuations, indicating a relatively stable power consumption pattern. However, if there are noticeable abnormalities or deviations from the expected voltage levels, it could be an indication of irregular power consumption behavior by the user. These fluctuations may arise from various factors, such as faulty electrical equipment, overloading of circuits, or improper power usage. As such, monitoring the daily average voltage becomes crucial in identifying potential issues and ensuring the efficient and reliable operation of the electrical system.
4. Excessive number of frozen electricity amounts: If one of the voltage phases is continuously removed, the number of interruptions will increase. Increasing the number of interruptions will give a clue that one of the voltage phases has been removed repeatedly. The case of more than 500 interruptions in a month is checked. If the number of interruptions exceeds 500 times in a month, it should be considered as a suspicious

indicator of potential electricity theft. Frequent and excessive interruptions in the power supply, especially in such high numbers, could signal irregularities in electricity consumption.

5. **General Current Control:** In a typical electrical system, the metering current exhibits irregular fluctuations depending on the user's load access. However, under normal operating conditions, the phase line current and neutral line current for a user should be nearly equal. This means that the total current flowing through the user's electrical circuit should be balanced, with minimal deviation between the current in the phase line and the neutral line. By closely monitoring and comparing the phase line and neutral line currents, it becomes possible to detect any discrepancies or imbalances in the system. Significant differences between these currents may indicate electrical faults, leakage, or other issues that warrant attention.
6. **Installed Power-Demand Control:** In a well-functioning electrical system, the installed power should not surpass the demand (maximum consumption during a month). Any instance where the demand exceeds the installed power requires immediate attention. Specifically, the system continuously monitors the power demand, and in cases where it exceeds the installed capacity or reaches more than 20% beyond the contracted limit for the day, specific measures are taken to rectify the situation
7. **Demand Correlation Evaluation:** The demand correlation analysis is performed by comparing data from corresponding months over a span of two years. In this study, the Grey Correlation Grade (GCG) [48] method is employed to calculate the correlation coefficient. This approach helps us identify and assess the level of correlation between the demand patterns of different subscribers during similar months over the two-year period. If the resulting correlation coefficient is found to be below 0.6, the subscribers data is classified as a potential candidate for the illegal suspect list. Given two data series X_0 and X_i , the GCG can be calculated;

$$X_0^*(k) = \frac{X_0(k) - \min(X_0(k))}{\max(X_0(k)) - \min(X_0(k))} \text{ for } k=1,2, \dots, n \quad (1)$$

$$X_i^*(k) = \frac{X_i(k) - \min(X_i(k))}{\max(X_i(k)) - \min(X_i(k))} \text{ for } k=1,2, \dots, n \quad (2)$$

where $\min(X_0(k))$ and $\min(X_i(k))$ represent the minimum values in X_0 and X_i , and $\max(X_0(k))$ and $\max(X_i(k))$ represent the maximum values in X_0 and X_i , respectively.

$$\zeta(k) = \frac{\xi \max(\Delta) + \min(\Delta)}{\Delta_{oi}(k) + \xi \max(\Delta)} \text{ for } k=1,2, \dots, n \quad (3)$$

where ξ is the distinguishing coefficient, set to 0.5 as per reference [8], $\Delta = |X_0^*(k) - X_i^*(k)|$, and $\Delta_{oi}(k) = |X_0(k) - X_i(k)|$.

$$\text{GCG} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \zeta(k) \quad (4)$$

8. **Demand Consumption Control (Shift Control):** If the operating hours calculated based on demand and consumption data result in 3 hours for a facility that normally consumes 50,000 kWh by operating 8 hours a day, the reason for this decrease in scale should be investigated. The working hours of the sectors are determined by experts.
9. **Current-demand Control:** It is not possible that a meter records current without demand. During the first reading of the month, there might be instances where a "current available, no demand" alarm is received due to the fact that demand data has not been formed yet. In cases where there is a current of 0.1 A or more in any phase, the meter will be checked to ensure that demand recording is functioning correctly.
10. **Consumption Correlation in Two Years:** Comparing consumption over two years helps see if a customer's consumption patterns changed or not. This correlation is quantified as a number between -1 and 1, where -1 indicates a perfect negative correlation, 0 indicates no correlation, and 1 indicates a perfect positive correlation.
11. **Eight Month Consumption Correlation:** For each consumer, the correlation between the last eight months of electricity consumption across two consecutive years has been calculated. The values of this correlation are expressed on a scale similar to the one outlined in item 10, where the strength of the relationship between the consumption patterns is quantified numerically.
12. **Daily Average Consumption:** The average consumption of consumers during peak hours is calculated and then compared with their

installed power capacity. If this average consumption falls below 33% of the installed power, the consumer is flagged as potentially suspicious.

13. Three Month Consumption Correlation: As described in item 10, this involves a calculation of the correlation of electricity consumption. However, instead of spanning eight months, this assessment focuses on a three-month period.
14. Daily Average Demand: The daily average demand for electricity is calculated for two consecutive years and compared. If the value from the most recent year is at least 33% lower than that of the previous year, this may indicate that the consumer's usage is malignant.

3.2 ELECTRICITY THEFT DETECTION BASED ON EXTRACTED FEATURES

(ÇIKARILAN ÖZELLİKLERE DAYALI ELEKTRİK HIRSIZLIĞI TESPİTİ)

With the guidance and expertise of industry specialists 14 rules were instantiated within a Java-based analytical framework. Over an observation period, we deployed these rules against our dataset

to scrutinize the inter-correlations present among them. Notably, a subset of these rules exhibited a high degree of correlation, prompting an analysis-driven decision to excise the redundant rules from our framework. Consequently, we distilled our feature space down to 9 core rules. Despite the high correlation observed among certain rules, expert consultation reinforced the decision to preserve them. This strategic choice was underpinned by the nuanced domain knowledge of our experts, ensuring that the integrity and depth of our analytical capabilities remain robust. Subsequent to the refinement of our feature space, the 9 retained rules were employed as inputs for our classification model. This approach was predicated on the hypothesis that a more streamlined and pertinent set of features would enhance the model's predictive performance. By leveraging a targeted feature set, informed by empirical evidence and domain expertise, we aimed to strike a balance between model complexity and classification accuracy. The results of this methodology are anticipated to validate the efficacy of our feature selection process in the realm of data-driven predictive modeling. Figure 1 illustrates the flowchart, and Figure 2 presents the block diagram of our method, respectively.

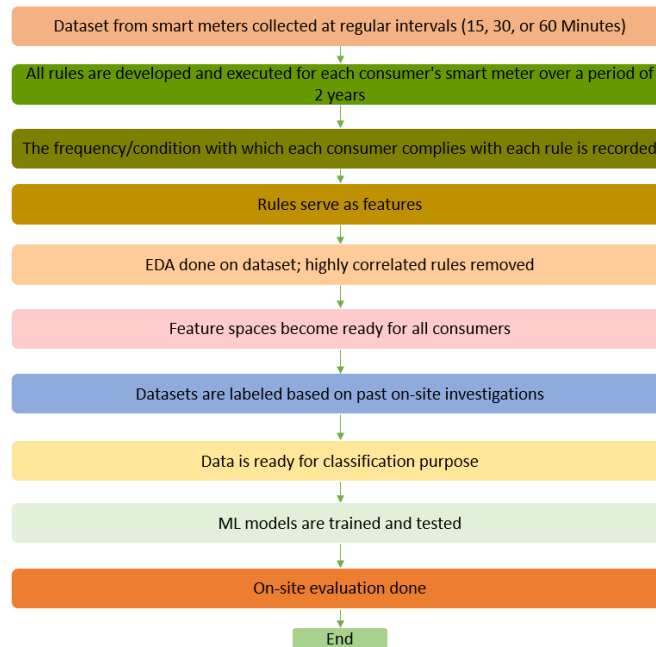


Figure 1. Flowchart of research methodology (Araştırma metodolojisinin akış şeması)

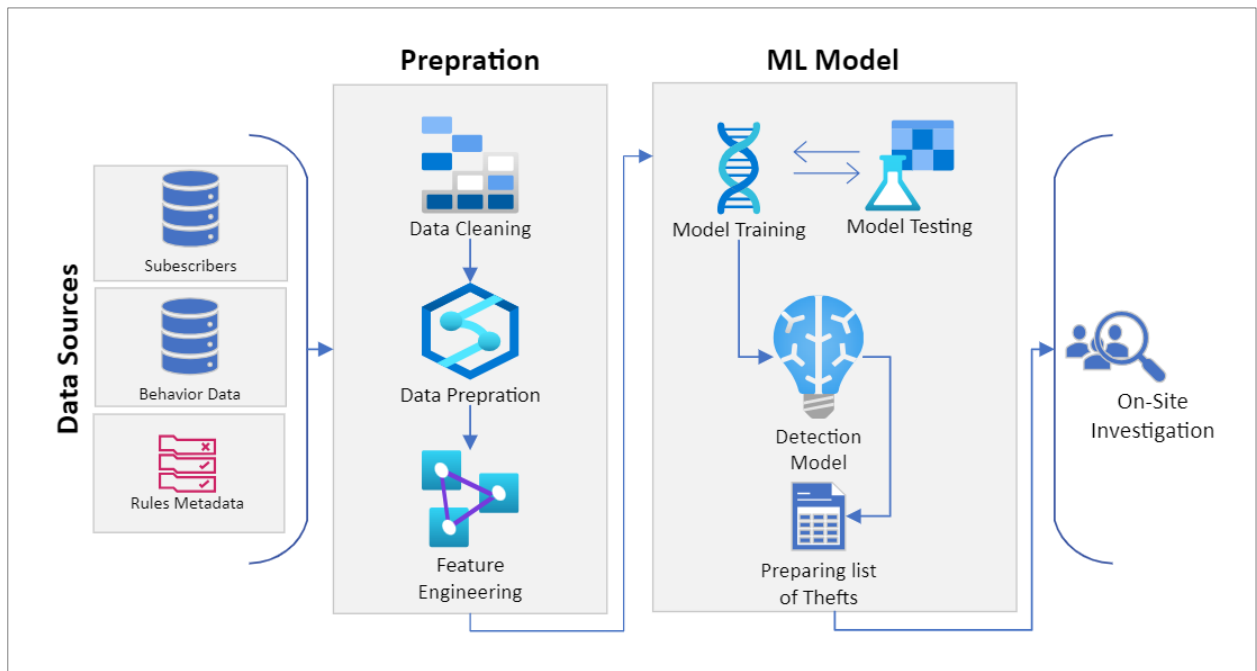


Figure 2. The block diagram of proposed method (Önerilen yöntemin blok diyagramı)

3.2.1 FEATURE EXPLANATION (ÖZELLİK AÇIKLAMASI)

The detailed explanation of the nine features extracted from section 3.1 is informed by expert experience, revealing their lack of intercorrelation. This insight leads to the creation of distinct feature spaces for individual consumers. Utilizing their historical data and conducting on-site inspections, consumers are then categorized as either fraudulent or normal.

3.2.2 DATA PREPARATION (VERİ HAZIRLAMA)

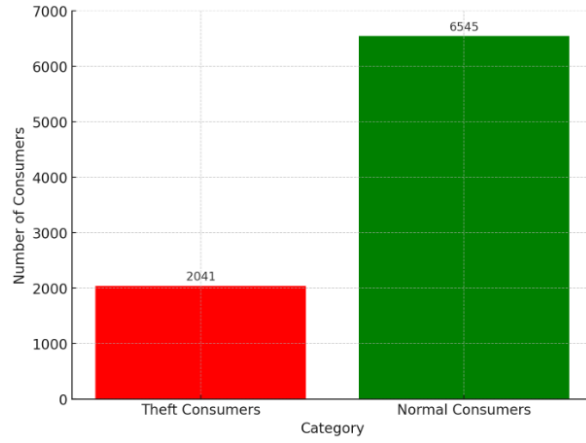
This study uses electricity consumption data of UEDAS (Uludağ Elektrik Dağıtım A.Ş.) in Turkey. The data set consists of business consumers of electricity (8,586), differentiating them into two distinct categories: 2,041 theft consumers and 6,545 normal consumers. Figure 3 shows the number of consumers and the load profile collection

research. This methodology guarantees an exhaustive assessment of all pertinent and interconnected characteristics, thus augmenting the resilience and dependability of the complete study. Subsequent to rigorous expert scrutiny, a selection of features exhibiting high intercorrelations were

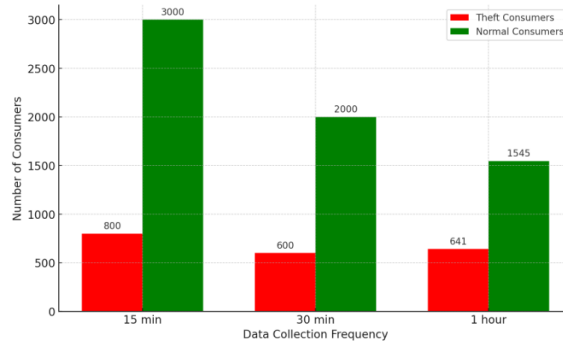
frequencies. To prepare a dataset as input for machine learning models, we examined the behavior of each consumer and applied the 14 rules to each consumer individually. Subsequently, we constructed feature spaces for all consumers based on the results of these rule evaluations.

A correlation analysis was performed to look at the correlations between the 14 features once the feature spaces were developed. Cases where the correlation coefficients were higher than the cutoff of 0.5 were found by this study. Considering the importance of these high correlation values, professional advice was sought to decide on the best course of action. Experts agreed that these relationships could not be ignored because of their possible importance and influence. It was therefore suggested that all characteristics showing a correlation coefficient more than 0.5 be kept for additional examination and thought out in the

judiciously excised from the dataset. Consequently, a refined subset of nine features was retained, deemed most pertinent for serving as inputs to the machine learning model. Figure 4 presents a heatmap illustrating the correlations among the various features.



(a)



(b)

Figure 3. Distribution of electricity consumers (a) electricity consumer categories (b) electricity consumer categories and data collection frequencies (Elektrik tüketicilerinin dağılımı (a) elektrik tüketicisi kategorileri (b) elektrik tüketicisi kategorileri ve veri toplama sıklıkları)

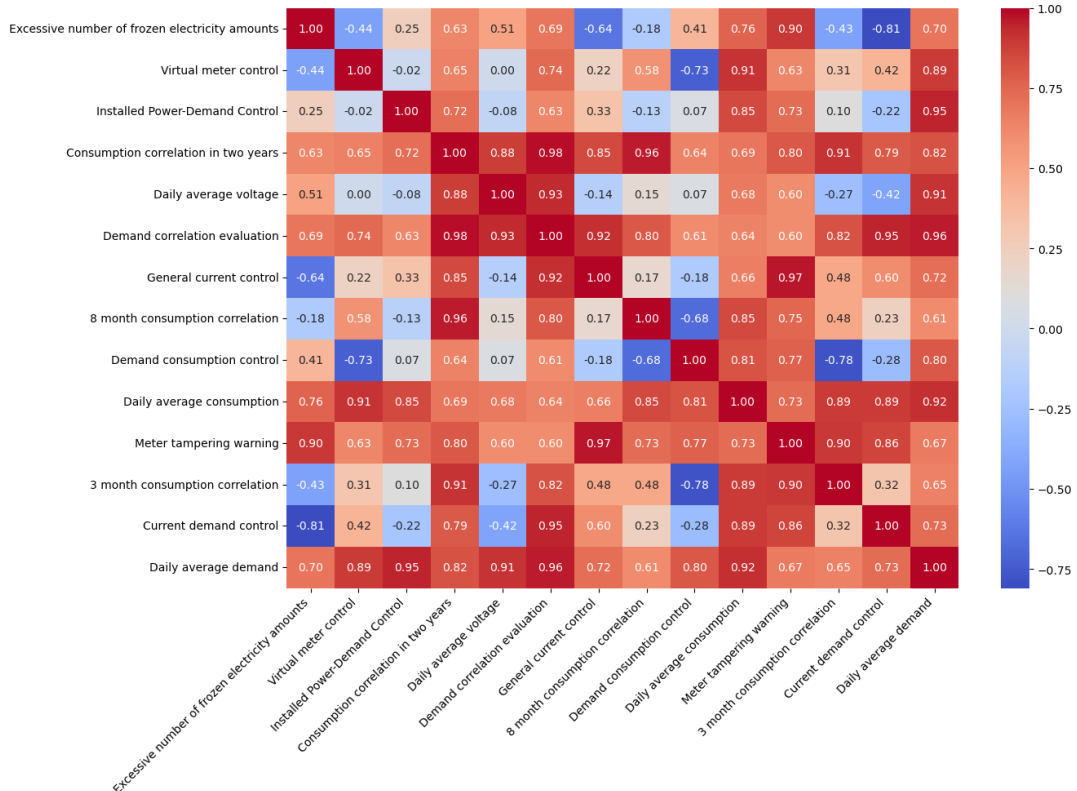


Figure 4. Heatmap of correlations among features (Özellikler arasındaki korelasyonların ısı haritası)

Features are categorized as either categorical or numerical. Categorical features are represented as binary values, 0 or 1, to indicate specific conditions or states. Numerical features, on the other hand, are scaled using a standard scaler, adjusting their values

to fall within a range of 0 to 1. This standardization ensures consistency and comparability across different scales and measurements. Table 2 shows the extracted data after removing the unwanted features.

Table 2. Extracted features (Çıkarılan özellikler)

Feature	Data Type	Description
1.Meter Tampering Warning	Categorical	Assign a value of 1 if a meter tamper alarm is received and consumption has decreased, otherwise assign 0
2.Virtual Meter Control	Categorical	Assign a value of 1 if the virtual meter control is correct, otherwise assign 0
3.Daily Average Voltage	Numerical	Record and count the number of times the voltage surpasses a predetermined threshold set by experts.
4.Excessive Number of Frozen Electricity Amounts	Numerical	Record the number of times freezing conditions are observed
5.General Current Control	Numerical	Count and record the number of times imbalances are detected.
6.Installed Power-Demand Control	Numerical	Record the number of times the installed power capacity surpasses the demand
7.Demand Correlation Evaluation	Numerical	Record values that fall within a range of 0 to 1
8.Demand Consumption Control	Numerical	Calculate and record the total work hours for each sector
9.Current-Demand Control	Numerical	Check for the existence of demand in any phase and record the number of times demand is lacking

This structured approach to feature selection and preprocessing facilitates a more accurate and efficient analysis, enabling better insights and decision-making based on the data.

In other words, we analyzed the behavior of each consumer using the nine rules and used the outcomes of these rule-based evaluations to create

feature sets or feature spaces for every consumer. These features can then be used as input data for machine learning models. Experts assisted in labeling the data to transform it into a classification problem. Table 3 presents the descriptive statistical metrics for the aforementioned nine features, offering a comprehensive overview of their distributional characteristics.

Table 3. Descriptive statistical values for the gained data (Elde edilen veriler için tanımlayıcı istatistiksel değerler)

Parameters	Mean	Median	Mode	Minimum	Maximum	Std. Deviation	Skewness	Kurtosis
1	0.001	0	0	0	2	0.03	33.19	1227.98
2	0.07	0	0	0	3	0.26	3.35	12.67
3	230.86	231	230	0	447	10.95	-12.99	266.04
4	0.06	0	0	0	9	0.39	9.67	125.80
5	0.40	0	0	0	29	2.4	6.98	55.25
6	0.48	0	0	0	10	0.3	10.02	152.06
7	8.1	4.1	0	0	804.1	11.24	2.91	17.45
8	0.059	0	0	0	3	0.23	3.91	17.51
9	0.005	0	0	0	11	0.19	35.89	1402.02

3.2.3 EVALUATION METRICS

(DEĞERLENDİRME ÖLÇÜTLERİ)

Electricity theft detection presents a challenge within the domain of imbalanced datasets. In this scenario, the dataset heavily leans towards one specific outcome of the target variable, leaving the other outcome(s) underrepresented. It's worth noting that our primary focus is on the less common outcome. Consequently, the choice of an appropriate evaluation metric becomes crucial.

The majority of consumers are not involved in theft (True Negatives), while a small number are potential thieves (True Positives). Opting for accuracy as the evaluation metric would be ill-advised since the results would be skewed towards the more prevalent class, which is True Negatives. Instead, what we need is a metric that provides a comprehensive understanding of both the actual number of thieves (recall) and the actual number of predicted thieves (precision), considering both aspects together. To address this need, we utilize the F-measure, which combines precision and recall into a single metric. In our research, we employ recall, precision, and the F-measure as our performance evaluation metrics. Equations 5-7 within our work precisely define these terms.

$$Recall = \frac{TP}{TP + FN} \quad (5)$$

$$Precision = \frac{TP}{TP + FP} \quad (6)$$

$$F1 - score = \frac{2 \times (Precision \times Recall)}{Precision + Recall} \quad (7)$$

4. RESULTS AND DISCUSSIONS (BULGULAR VE TARTIŞMALAR)

In this segment, we establish the credibility of our research by conducting rigorous evaluations within the Python 3.10 environment. Our experimentation took place on a Windows Server running a 64-bit operating system, powered by robust hardware featuring an Intel processor clocking in at 2.8 GHz and an ample 32 GB of RAM. The foundation of our analysis relies on the utilization of nine carefully selected features that serve as the basis for assessing the performance of various machine learning classifiers, yielding valuable insights into their effectiveness. Our evaluation process encompasses the computation of essential performance metrics, including precision, recall, and F-measure. These metrics provide a comprehensive perspective on the classifiers capabilities and their ability to distinguish between different classes. For clarity and reference, we present metrics summarizing the outcomes of all classifiers in Table 4 and Figure 5. This matrix encapsulates vital information regarding the models prediction accuracy and misclassification tendencies, contributing to a comprehensive assessment of their overall performance.

Table 4. Recall, F1-Score and Precision of all classifiers (Tüm sınıflandırıcıların Recall, F1-Score ve Precision değerleri)

Classifier Type	Classifiers	Recall	F1-Score	Precision
Ensemble Methods	RandomForest	0.93	0.65	0.50
	AdaBoost	0.87	0.65	0.52
	LGBost	0.85	0.67	0.55
	XGBost	0.74	0.56	0.45
Support Vector Machine	LinearSVC	0.89	0.59	0.44
Decision Tree	DecisionTreeClassifier	0.90	0.61	0.46
Nearest Neighbors	KNeighboursClassifier	0.81	0.67	0.56
Neural Network	MLPClassifier	0.84	0.62	0.50

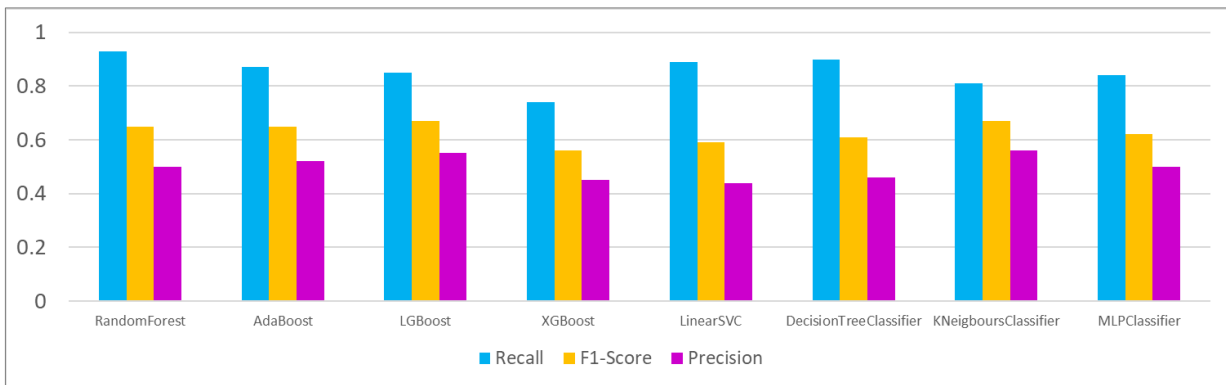


Figure 5. Recall, F1-Score and Precision of all classifiers (Tüm sınıflandırıcıların Recall, F1-Score ve Precision değerleri)

In the quest for the optimal classifier, we have conducted a comprehensive analysis of various machine learning models, each with its own unique strengths and weaknesses. Table 4 summarizes the key performance metrics, including recall, F1-score, and precision, for each classifier type:

Ensemble Methods have shown promising results, with Random Forest leading the pack in terms of recall (0.93). However, it is worth noting that AdaBoost, LGBost, and XGBoost also exhibit respectable performance metrics, making them valuable contenders in our classification task. Support Vector Machine (LinearSVC) demonstrates a commendable recall of 0.89, although it falls short in terms of F1-score and precision, indicating potential room for improvement. Decision Tree classifiers, represented by Decision Tree Classifier, provide a reliable balance between recall (0.90) and F1-score (0.61), making them a competitive choice in our analysis. When it comes to Nearest Neighbor using K-Neighbours Classifier, we see a good recall (0.81) and a high F1-score (0.67), suggesting a strong ability to correctly identify positive cases in our dataset. Finally, the Neural Network model, implemented as MLP Classifier, presents a recall of 0.84, with a reasonable F1-score and precision, making it a versatile choice for our classification problem.

Ultimately, the choice of classifier should depend on the specific requirements and constraints of the task at hand. Ensemble methods like Random Forest and AdaBoost might be preferred for maximizing recall, while Decision Tree and Nearest Neighbors offer a balanced trade-off between recall and F1-score. The Support Vector Machine and Neural Network classifiers also provide competitive options for different use cases. To make a final decision, further experimentation and consideration

of the specific goals and data characteristics are necessary.

In addition to our comprehensive analysis of machine learning classifiers, our research introduces three novel aspects:

- **Expert-Driven Rule-Based Features:** We enrich our models with nine expert-defined rules, adding depth and precision beyond typical consumption data-based approaches. This strategy enhances interpretability and aligns with current trends in machine learning.
- **On-Site Investigation Integration:** Our methodology includes real-world data from on-site investigations, ensuring practical relevance and applicability in real-life scenarios, a feature often missing in theoretical models.
- **Real vs. Synthetic Theft Patterns:** Unlike common practices using synthetic data, our study focuses on genuine theft patterns, offering a more accurate representation of real-world electricity theft scenarios, significantly improving the reliability and practicality of our detection models.

These innovative elements provide our research with a unique edge in the field of electricity theft detection, combining theoretical robustness with practical applicability.

In electricity theft studies, various methodologies and models have been employed to enhance detection accuracy while preserving privacy. Richardson et al. [50] utilized consumption data with an SVM model, injecting anomalies in feeders to detect irregularities. This approach was particularly focused on privacy preservation. In contrast, Figueroa et al. [9] enhanced the SVM model for datasets that are not balanced, addressing the challenge of skewed data distributions. Qu et al. [51] adopted the Random Forest method, with a

specific focus on handling class imbalance issues. They employed the k-means and SMOTE methods for oversampling before applying the classifier, demonstrating an innovative approach to improving data representation. Nagi et al. [52] utilized expert-written rules to filter output results from the SVM model. This approach leveraged domain expertise for more precise anomaly detection. Punmiya and Choe [53] explored the use of a Gradient Boosting classifier, where synthetic theft cases were generated based on historical theft data. This method was compared against various algorithms like SVM, Backpropagation Neural Network (BPNN), Extreme Learning Machine (ELM), Deep ELM (DELM), Logistic Regression (LR), Decision Tree (DT), Random Forest (RF), AdaBoost, Naïve Bayes (NB), and k-Nearest Neighbors (kNNs). The comparison aimed to evaluate which algorithms could detect electricity theft with higher accuracy or lower False Positive Rate (FPR).

It is noteworthy that in the above-mentioned studies, there appears to be a lack of on-site investigations and a sufficient number of real theft datasets. This limitation suggests an opportunity for future research to incorporate more comprehensive data and validation methods in electricity theft detection studies.

5. CONCLUSIONS (SONUÇLAR)

In conclusion, the realm of electricity theft detection is inundated with various supervised and unsupervised models, all claiming efficacy in identifying theft based on consumption patterns. However, real-world complexities such as sector variations, consumer dynamics (such as hiring new staff, acquiring new devices, vacancies, and changing business structures without altering power contracts), economic downturns, and other factors render relying solely on consumption data impractical for on-site inspections.

Our study addresses this challenge by emphasizing the significance of data preprocessing and post-processing, conducted with expert guidance, to mitigate the impact of false positive detections. Unlike many existing approaches, our methodology extended beyond consumption analysis. We meticulously crafted features to encapsulate theft indicators, employing them as inputs for our models. Subsequently, on-site inspections were carried out, enhancing the accuracy of our findings.

Among the models tested, Random Forest emerged as the standout performer, particularly due to its robustness in minimizing false positives and its strength in reducing overfitting—a key advantage that helped us to detect more instances of electricity theft accurately during on-site investigations. Its effectiveness is further enhanced by its ability to adeptly handle mixed numeric and categorical features without the need for extensive preprocessing or scaling, making it exceptionally versatile across different data types. Additionally, Random Forest exhibits remarkable resilience when dealing with imbalanced data, ensuring that minority classes are adequately represented. This model also benefits from requiring less hyperparameter tuning compared to other algorithms, making it both a powerful and user-friendly option for tackling complex classification tasks. By leveraging Random Forest, we achieved a substantial success rate, detecting 77% of anomalies as instances of electricity theft. This accomplishment underscores the importance of not only the choice of the model but also the thoughtful integration of domain knowledge and comprehensive feature engineering, which collectively enhance the effectiveness of theft detection efforts.

In the future work, we aim to expand our approach by incorporating additional features derived from elaborated smart meter datasets. This will involve analyzing more granular data points to better understand consumption patterns. The goal is to further decrease the rate of false positives, which will be instrumental in reducing the costs associated with on-site investigations. By refining our detection algorithms and integrating more detailed data, we hope to increase the efficiency and accuracy of electricity theft detection, providing significant cost savings for companies and improving the overall effectiveness of theft identification.

ACKNOWLEDGEMENTS (TEŞEKKÜR)

This study was conducted as a part of the project titled “Technical and Non-Technical Losses Estimation and Warning System for Transformers and Subscribers” with the project number 7210765 and supported by TÜBİTAK.

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)

Sheyda BAHRAMİ: She conducted the literature review, software development and writing process.

Literatür taraması, yazılım geliştirme ve makale yazım sürecini yürütmüştür.

Erol YUMUK: He conducted the research, data collection and control processes.

Araştırma, veri toplama ve kontrol süreçlerini yürütmüştür.

Alper KEREM: He conducted the literature review, research, editing and consultancy.

Literatür taraması, araştırma, düzenleme ve danışmanlık görevlerini yürütmüştür.

Beytullah TOPCU: He conducted the research, software development and data collection.

Araştırma, yazılım geliştirme ve veri toplama çalışmalarını yürütmüştür.

Ahmetcan KAYA: He conducted the research, software development and data collection.

Araştırma, yazılım geliştirme ve veri toplama çalışmalarını yürütmüştür.

CONFLICT OF INTEREST (ÇIKAR ÇATIŞMASI)

There is no conflict of interest in this study.

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

REFERENCES (KAYNAKLAR)

[1] Emadaleslami, M., Haghifam, M. R., & Zangiabadi, M. A two-stage approach to electricity theft detection in AMI using deep learning. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 150, 109088, (2023).

[2] Markovska, M., Gerazov, B., Zlatkova, A., & Taskovski, D. (2023, June). Electricity Theft Detection Based on Temporal Convolutional Networks with Self-Attention. In 2023³ 30th

International Conference on Systems, Signals and Image Processing (IWSSIP) (pp. 1-5). IEEE.

[3] Taha, K. Semi-supervised and un-supervised clustering: A review and experimental evaluation. *Information Systems*, 102178, (2023).

[4] Zheng Z, Yang Y, Niu X, Dai HN, Zhou Y. Wide and deep convolutional neural networks for electricity-theft detection to secure smart grids. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2017 Dec 21;14(4):1606-15.

[5] Himeur Y, Ghanem K, Alsalemi A, Bensaali F, Amira A. Artificial intelligence-based anomaly detection of energy consumption in buildings: A review, current trends and new perspectives. *Applied Energy*. Apr 1;287:116601, (2021).

[6] Oprea SV, Bâra A. Feature engineering solution with structured query language analytic functions in detecting electricity frauds using machine learning. *Scientific Reports*. 28; 12(1):3257, (2022).

[7] Monedero I, Biscarri F, León C, Guerrero JI, Biscarri J, Millán R. Detection of frauds and other non-technical losses in a power utility using Pearson coefficient, Bayesian networks and decision trees. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 34(1):90-8, (2012).

[8] Long H, Chen C, Gu W, Xie J, Wang Z, Li G. A data-driven combined algorithm for abnormal power loss detection in the distribution network. *IEEE Access*. 8:24675-86, (2020).

[9] Figueroa G, Chen YS, Avila N, Chu CC. Improved practices in machine learning algorithms for NTL detection with imbalanced data. In 2017 IEEE Power & Energy Society General Meeting 2017 Jul 16 (pp. 1-5). IEEE.

[10] Krishna VB, Gunter CA, Sanders WH. Evaluating detectors on optimal attack vectors that enable electricity theft and DER fraud. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*. 12(4):790-805, (2018).

[11] Razavi R, Gharipour A, Fleury M, Akpan IJ. A practical feature-engineering framework for electricity theft detection in smart grids. *Applied energy*. 238:481-94, (2019).

[12] Peng Y, Yang Y, Xu Y, Xue Y, Song R, Kang J, Zhao H. Electricity theft detection in AMI based on clustering and local outlier factor. *IEEE Access*. 2021 Jul 28;9:107250-9.

- [13] Jindal A, Schaeffer-Filho A, Marnerides AK, Smith P, Mauthe A, Granville L. Tackling energy theft in smart grids through data-driven analysis. In 2020 International Conference on Computing, Networking and Communications (ICNC) 2020 Feb 17 (pp. 410-414). IEEE.
- [14] Angelos EW, Saavedra OR, Cortés OA, De Souza AN. Detection and identification of abnormalities in customer consumptions in power distribution systems. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 26(4):2436-42, (2011).
- [15] Blazakis KV, Kapetanakis TN, Stavrakakis GS. Effective electricity theft detection in power distribution grids using an adaptive neuro fuzzy inference system. *Energies*. 13(12):3110, (2020).
- [16] Fernandes SE, Pereira DR, Ramos CC, Souza AN, Gastaldello DS, Papa JP. A probabilistic optimum-path forest classifier for non-technical losses detection. *IEEE Transactions on Smart Grid*. 10(3):3226-35, (2018).
- [17] Ramos CC, Souza AN, Papa JP, Falcao AX. Fast non-technical losses identification through optimum-path forest. In 2009 15th International Conference on Intelligent System Applications to Power Systems 2009 Nov 8 (pp. 1-5). IEEE.
- [18] Ramos CC, Souza AN, Chiachia G, Falcão AX, Papa JP. A novel algorithm for feature selection using harmony search and its application for non-technical losses detection. *Computers & Electrical Engineering*. 37(6):886-94, (2011).
- [19] Ramos CC, de Sousa AN, Papa JP, Falcao AX. A new approach for nontechnical losses detection based on optimum-path forest. *IEEE Transactions on Power Systems*. 26(1):181-9, (2010).
- [20] Ramos CC, de Souza AN, Falcao AX, Papa JP. New insights on nontechnical losses characterization through evolutionary-based feature selection. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 27(1):140-6, (2011).
- [21] Xiao F, Ai Q. Electricity theft detection in smart grid using random matrix theory. *IET Generation, Transmission & Distribution*. 12(2):371-8, (2018).
- [22] Depuru SS, Wang L, Devabhaktuni V, Green RC. High performance computing for detection of electricity theft. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 47:21-30, (2013).
- [23] Jain S, Choksi KA, Pindoriya NM. Rule-based classification of energy theft and anomalies in consumers load demand profile. *IET Smart Grid*. 2(4):612-24, (2019).
- [24] Biswas PP, Cai H, Zhou B, Chen B, Mashima D, Zheng VW. Electricity theft pinpointing through correlation analysis of master and individual meter readings. *IEEE Transactions on Smart Grid*. 11(4):3031-42, (2019).
- [25] Shah AL, Mesbah W, Al-Awami AT. An algorithm for accurate detection and correction of technical and nontechnical losses using smart metering. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 69(11):8809-20, (2020).
- [26] Zheng K, Chen Q, Wang Y, Kang C, Xia Q. A novel combined data-driven approach for electricity theft detection. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 15(3):1809-19, (2018).
- [27] Tao J, Michailidis G. A statistical framework for detecting electricity theft activities in smart grid distribution networks. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*. 38(1):205-16, (2019).
- [28] Xiang M, Rao H, Tan T, Wang Z, Ma Y. Abnormal behaviour analysis algorithm for electricity consumption based on density clustering. *The Journal of Engineering*. 2019(10):7250-5, (2019).
- [29] Kharal AY, Khalid HA, Gastli A, Guerrero JM. A novel features-based multivariate Gaussian distribution method for the fraudulent consumers detection in the power utilities of developing countries. *IEEE Access*. 9:81057-67, (2021).
- [30] Hock D, Kappes M, Ghita B. Using multiple data sources to detect manipulated electricity meter by an entropy-inspired metric. *Sustainable Energy, Grids and Networks*. 21:100290, (2020).
- [31] Singh SK, Bose R, Joshi A. Entropy-based electricity theft detection in AMI network. *IET Cyber-Physical Systems: Theory & Applications*. 3(2):99-105, (2018).
- [32] Jaiswal S, Ballal MS. Fuzzy inference based electricity theft prevention system to restrict direct tapping over distribution line. *Journal of Electrical Engineering & Technology*. 15:1095-106, (2020).
- [33] Aligholian A, Farajollahi M, Mohsenian-Rad H. Unsupervised learning for online abnormality detection in smart meter data. In 2019 IEEE Power

- & Energy Society General Meeting (PESGM) 2019 Aug 4 (pp. 1-5). IEEE.
- [34] Feng Z, Huang J, Tang WH, Shahidehpour M. Data mining for abnormal power consumption pattern detection based on local matrix reconstruction. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 123:106315, (2020).
- [35] Lu X, Zhou Y, Wang Z, Yi Y, Feng L, Wang F. Knowledge embedded semi-supervised deep learning for detecting non-technical losses in the smart grid. *Energies*. 12(18):3452, (2019).
- [36] Hu T, Guo Q, Shen X, Sun H, Wu R, Xi H. Utilizing unlabeled data to detect electricity fraud in AMI: A semisupervised deep learning approach. *IEEE transactions on neural networks and learning systems*. 30(11):3287-99, (2019).
- [37] Lu X, Zhou Y, Wang Z, Yi Y, Feng L, Wang F. Knowledge embedded semi-supervised deep learning for detecting non-technical losses in the smart grid. *Energies*. 12(18):3452, (2019).
- [38] Javaid N, Gul H, Baig S, Shehzad F, Xia C, Guan L, Sultana T. Using GANCNN and ERNET for detection of non technical losses to secure smart grids. *IEEE Access*. 9:98679-700, (2021).
- [39] Ismail M, Shaaban MF, Naidu M, Serpedin E. Deep learning detection of electricity theft cyber-attacks in renewable distributed generation. *IEEE Transactions on Smart Grid*. 11(4):3428-37, (2020).
- [40] Charwand M, Gitizadeh M, Siano P, Chicco G, Moshavash Z. Clustering of electrical load patterns and time periods using uncertainty-based multi-level amplitude thresholding. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 117:105624, (2020).
- [41] Xia R, Gao Y, Zhu Y, Gu D, Wang J. An attention-based wide and deep CNN with dilated convolutions for detecting electricity theft considering imbalanced data. *Electric Power Systems Research*. 214:108886, (2023).
- [42] Messinis GM, Hatziargyriou ND. Unsupervised classification for non-technical loss detection. In 2018 Power Systems Computation Conference (PSCC) 2018 Jun 11 (pp. 1-7). IEEE.
- [43] Breiman L. (2001) Random forests. *Machine learning*. Oct; 45:5-32.
- [44] Freund Y, Schapire RE. A decision-theoretic generalization of on-line learning and an application to boosting. *Journal of computer and system sciences*. 55(1):119-39, (1997).
- [45] Ghorri KM, Abbasi RA, Awais M, Imran M, Ullah A, Szathmary L. Performance analysis of different types of machine learning classifiers for non-technical loss detection. *IEEE Access*. 26;8:16033-48,(2019).
- [46] Raza M, Awais M, Ellahi W, Aslam N, Nguyen HX, Le-Minh H. Diagnosis and monitoring of Alzheimer's patients using classical and deep learning techniques. *Expert Systems with Applications*. 136:353-64, (2019).
- [47] Rumelhart DE, Hinton GE, Williams RJ. Learning representations by back-propagating errors. *Nature*. 323(6088):533-6, (1986).
- [48] Mujeeb S, Javaid N, Ahmed A, Gulfam SM, Qasim U, Shafiq M, Choi JG. Electricity theft detection with automatic labeling and enhanced RUSBoost classification using differential evolution and Jaya algorithm. *IEEE Access*. 9:128521-39, (2021).
- [49] Khan ZA, Adil M, Javaid N, Saqib MN, Shafiq M, Choi JG. Electricity theft detection using supervised learning techniques on smart meter data. *Sustainability*. 12(19):8023, (2020).
- [50] Richardson C, Race N, Smith P. A privacy preserving approach to energy theft detection in smart grids. In 2016 IEEE International Smart Cities Conference (ISC2) 2016 Sep 12 (pp. 1-4). IEEE.
- [51] Qu Z, Li H, Wang Y, Zhang J, Abu-Siada A, Yao Y. Detection of electricity theft behavior based on improved synthetic minority oversampling technique and random forest classifier. *Energies*. 13(8):2039, (2020).
- [52] Nagi J, Yap KS, Tiong SK, Ahmed SK, Nagi F. Improving SVM-based nontechnical loss detection in power utility using the fuzzy inference system. *IEEE Transactions on power delivery*. 26(2):1284-5, (2011).
- [53] Punmiya R, Choe S. Energy theft detection using gradient boosting theft detector with feature engineering based preprocessing. *IEEE Transactions on Smart Grid*. 10(2):2326-9, (2019).

Enhanced Control of Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell Fed Basic Series Positive Super Voltage Lift Luo Converter Using Interval Type-2 Fuzzy Logic

Ahmet GANI^{1*} , İlknur UÇAR¹ 

¹Kayseri University, Faculty of Engineering, Architecture and Design, Department of Electrical and Electronics Engineering, Kayseri, Turkey

Article Info

Research article
Received: 07/02/2024
Revision: 08/03/2024
Accepted: 27/03/2024

Keywords

Basic Series Positive Super
Voltage Lift Luo Converter
PEM Fuel Cell
Interval Type-2 Fuzzy
Logic

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 07/02/2024
Düzeltilme: 08/03/2024
Kabul: 27/03/2024

Anahtar Kelimeler

Temel Seri Pozitif Süper
Gerilim Yükseltmeli
Dönüştürücü
PEM Yakıt Hücresi
Aralıklı Tip-2 Bulanık
Mantık

Graphical/Tabular Abstract (Grafik Özet)

The polymer electrolyte membrane fuel cell (PEM) fed basic series positive super voltage lift luo converter reached optimum current and voltage values under nominal and different operating conditions using an interval type-2 takagi-sugeno-kang (TSK) fuzzy controller in this study. / Bu çalışmada polimer elektrolit membran (PEM) yakıt pilinden beslenen temel seri pozitif süper gerilim yükseltmeli luo dönüştürücü aralıklı tip-2 takagi-sugeno-kang (TSK) bulanık denetleyici kullanılarak nominal ve farklı çalışma koşulları altında optimum akım ve gerilim değerlerine ulaşılmıştır.

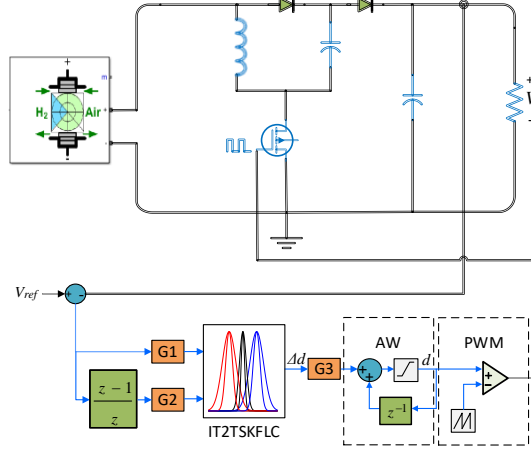


Figure A: The interval type-2 TSK fuzzy controller and PEM fuel cell fed basic series positive super voltage lift luo converter /**Şekil A:** PEM yakıt hücresi beslemeli temel seri pozitif süper gerilim yükseltmeli luo dönüştürücü ve aralıklı tip-2 TSK bulanık denetleyici

Highlights (Önemli noktalar)

- Efficient power transfer to the load. / Yüke verimli güç aktarımı
- Durable performance under nominal and different operating structures. / Nominal ve farklı çalışma koşulları altında dayanıklı performans
- Improvement average settling time of control system by 22.335% compared to the type-1 TSK fuzzy controller. / Tip-1 TSK bulanık denetleyiciye göre denetim sisteminin ortalama yerleşme süresinin %22.335 iyileştirilmesi

Aim (Amaç): The present study aims to control output voltage of PEM fed basic series positive super voltage lift luo converter via interval type-2 TSK fuzzy logic. /Bu çalışma PEM beslemeli temel seri pozitif süper gerilim yükseltmeli luo dönüştürücünün aralıklı tip-2 TSK bulanık mantık ile çıkış gerilimini denetlemeyi amaçlamaktadır.

Originality (Özgünlük): The control of the output voltage of the PEM fed basic series positive super voltage lift luo converter has been performed for the first time via interval type-2 TSK fuzzy logic. / PEM beslemeli temel seri pozitif süper gerilim yükseltmeli luo dönüştürücünün çıkış geriliminin denetimi aralıklı tip-2 TSK bulanık mantık ile ilk defa gerçekleştirilmiştir.

Results (Bulgular): Interval type-2 TSK fuzzy controller improved average settling time of system 22.335% compared to the type-1 TSK fuzzy controller. / Aralıklı tip-2 TSK bulanık denetleyici sistemin ortalama yerleşme süresini tip-1 TSK bulanık denetleyiciye göre 22,335% iyileştirmiştir.

Conclusion (Sonuç): The interval type-2 fuzzy controller provided a stable performance. / Aralıklı tip-2 TSK bulanık denetleyici kararlı bir çalışma sağlamıştır.



Enhanced Control of Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell Fed Basic Series Positive Super Voltage Lift Luo Converter Using Interval Type-2 Fuzzy Logic

Ahmet GANI^{1*} , İlknur UÇAR¹ 

¹Kayseri University, Faculty of Engineering, Architecture and Design, Department of Electrical and Electronics Engineering, Kayseri, Turkey

Article Info

Research article

Received: 07/02/2024

Revision: 08/03/2024

Accepted: 27/03/2024

Keywords

Basic Series Positive
Super Voltage Lift Luo
Converter
PEM Fuel Cell
Interval Type-2 Fuzzy
Logic

Abstract

An eco-friendly and renewable energy source, Polymer Electrolyte Membrane (PEM) fuel cells offer various advantages such as stability and efficiency. The present study aims to control output voltage of PEM fed basic series positive super voltage lift luo (PSVLL) converter. The model, which consists of a fuel cell and a basic series PSVLL converter, was designed in Matlab/Simulink simulation environment. The control of the PSVLL converter output voltage was performed using an interval type-2 takagi-sugeno-kang fuzzy logic (IT2TSKFL) and type-1 takagi-sugeno-kang fuzzy logic (T1TSKFL) controllers comparatively. The simulation study results demonstrated that the PEM fuel cell fed basic series PSVLL converter reached optimal current and voltage values with IT2TSKFL under nominal and different operating conditions. Moreover, IT2TSKFL improved average settling time of control system by 22.335% compared to T1TSKFL controller.

Polimer Elektrolit Membran Yakıt Pili Beslemeli Temel Seri Pozitif Süper Gerilim Yükseltmeli Luo Dönüştürücünün Aralıklı Tip-2 Bulanık Mantık Kullanılarak Denetimi

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi

Başvuru: 07/02/2024

Düzeltilme: 08/03/2024

Kabul: 27/03/2024

Anahtar Kelimeler

Temel Seri Pozitif Süper
Gerilim Yükseltmeli
Dönüştürücü
PEM Yakıt Pili
Aralıklı Tip-2 Bulanık
Mantık

Öz

Çevre dostu ve yenilenebilir bir enerji kaynağı olan Polimer Elektrolit Membran (PEM) yakıt hücreleri kararlılık ve verimlilik gibi çeşitli avantajlar sunmaktadır. Bu çalışma, PEM yakıt pili beslemeli temel seri pozitif süper gerilim yükseltmeli luo (PVLL) dönüştürücünün çıkış gerilimini denetlemeyi amaçlamaktadır. Bir yakıt hücresi ve bir temel seri PSVLL dönüştürücüden oluşan model Matlab/Simulink benzetim ortamında tasarlanmıştır. PSVLL dönüştürücünün çıkış geriliminin denetimi karşılaştırmalı olarak aralıklı tip-2 takagi-sugeno-kang bulanık mantık (IT2TSKFL) ve tip-1 bulanık mantık (T1FL) denetleyiciler kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Benzetim çalışması sonuçları PEM yakıt hücresinden beslenen temel seri PSVLL dönüştürücünün nominal ve farklı çalışma koşulları altında IT2TSKFL ile optimum akım ve gerilim değerlerine ulaşmıştır. Ayrıca IT2TSKFL denetim sisteminin ortalama yerleşme süresini T1TSKFL denetleyiciye kıyasla % 22.335 oranında iyileştirmiştir.

1. INTRODUCTION (GİRİŞ)

Polymer electrolyte membrane (PEM) fuel cell has benefits such as low operating temperature, high power density, low weight and eco-friendly nature [1-3]. Due to these benefits, PEM fuel cells are considered as one of the promising clean energy conversion systems of the future [4-5]. In today's world, the number of studies on power electronics

circuit structures are increasing day by day for highly efficient renewable energy sources. As fuel and photovoltaic cells are among renewable energy sources with a low output voltage, it is vital to increase output voltage via series and parallel circuits. However, this is likely to increase structure size and cost when greater energy is required. In this sense, many different power electronics have been

developed such as direct current-direct current (DC-DC) and isolated/non-isolated converters (Flyback, Cuk, Sepic, Zeta, Buck, Boost, Buck and Boost, and Luo) to manage the output voltage of cell fuels, photovoltaic panels and other renewable energy sources in various high energy applications [6-8]. Among the power electronics converter structures mentioned above, Luo converter is designed using on super voltage lift method. When compared with other power electronics converter circuit topologies, a basic series PSVLL converter yields a high voltage gain at a lower duty ratio [9]. Thus, it seems feasible to benefit from PSVLL power electronics converter in a system with an output voltage such as fuel cell. DC-DC power electronics circuits possess a non-linear structure [10]. Because conventional control methods (proportional+integral; proportional+derivative;proportional+integral+derivative) are designed for nominal operating conditions (NOCs), they cannot achieve an effective control performance under different operating conditions. Conventional controllers fail in the control of non-linear systems [11]. In recent years, many different intelligent controller structures have been developed in parallel with innovations in the field of controller systems. One of these controller systems is fuzzy logic controller (FLC). As these controllers are designed independently of the mathematical model of the controlled system, they are widely used. Conventional type-1 FLCs have been widely used in different systems for many years, yielding quite satisfying results. However, it was also reported that they could not succeed in the control of the systems with a certain level of uncertainty. Therefore, type-2 FLC was proposed by L. Zadeh as an advanced and improved version of conventional type-1 FLCs [12]. While uncertainty regions are used in membership functions for the system control of type-2 FLCs, certain membership values are used in type-1 FLCs. As a result, type-2 FLCs are acknowledged as a more successful controller system in terms of overcoming uncertainties [13-14]. In the existing literature, there are several studies on the control of PEM fuel cell fed DC power electronics converter circuit structures. S. Kart [6] performed the control of the output voltage of a PEM fuel cell fed cascade boost converter using a proportional+integral (PI) and Lyapunov based (PI) controller to compare the performances of two controllers. There was a 26.4% decrease in the rise time of the output voltage of the entire system using the new Lyapunov-based controller compared to the conventional PI controller. There were also a decrease rate of 91.6%

and 79.9% in settling time and overshoot, respectively. A. Karaarslan et al. [15] designed a PEM fuel cell fed buck converter and controlled its output voltage using PI and one-cycle controller. The output voltages were tested based on the input voltage; reference voltage and R_{load} changes. The output voltage response of the PI controller was faster compared to one-cycle controller, indicating that both control systems were suitable for buck converter. Ö. Özkara et al. [16] studied the control of the output voltage of a PEM fuel cell fed isolated fly-back converter using PI and one-cycle controllers. PI controller provided a higher rising time and a less percent overshoot compared to one-cycle controller. A. Bilhan [17] designed a super-lift DC/DC converter and conventional boost DC/DC converter circuit structures for fuel cell applications. The simulation results demonstrated that the output voltage waveforms of converters were investigated for the same duty ratio, and higher voltage levels were obtained via the super-lift DC/DC converter compared to conventional boost DC/DC converter. Unlike previous studies, the present study designs a basic series PSVLL converter for PEM fuel cell applications and proposes an IT2TSKFL controller to control the output voltage of the designed converter. The main innovations can be summarized as follows:

The IT2TSKFL controller structure efficiently (with a lower current and voltage ripple and a higher power density) converts the power of the PEM fuel cell to the load resistance.

The IT2TSKFL controller structure displays a stabilized performance under nominal and different operating structures.

Other parts of the study are organized as follows:Section 2 describes the material and method, while Section 3 discusses the findings. Section 4 presents the conclusion.

2. MATERIALS AND METHODS (MATERİYAL VE METOD)

2.1. Basic Series PSVLL Converter (Temel seri PSVLL dönüştürücü)

The present study uses a basic series PSVLL converter, which contains a semi-conductor switching element S , an inductor L ; two capacitors C_1 and C_2 and two diodes, as shown in Figure 1.

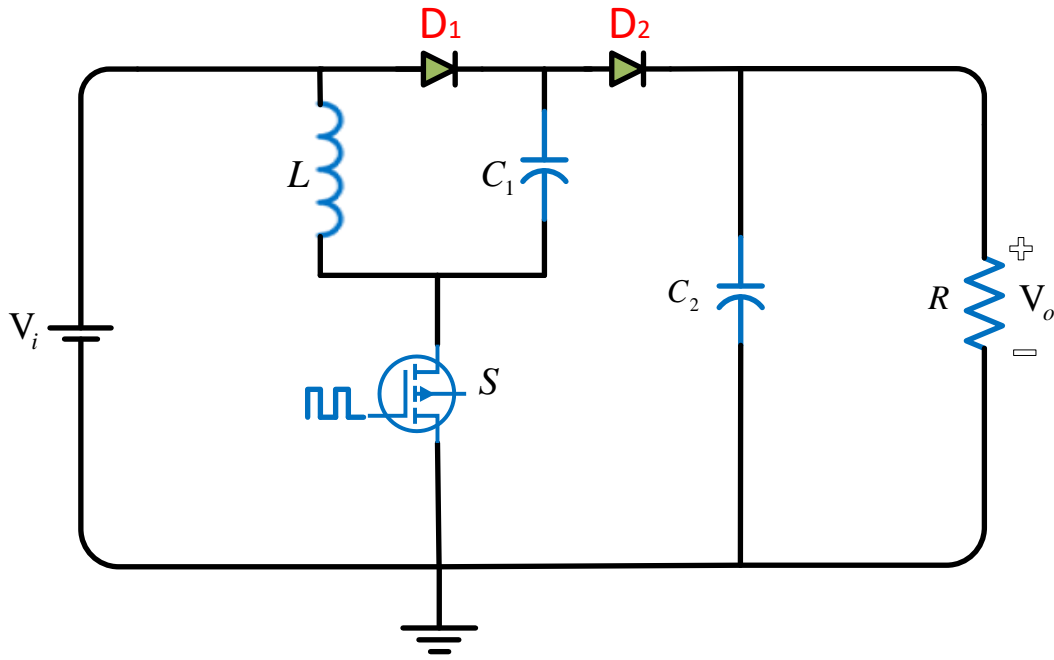


Figure 1. Basic series PSVLL converter (Temel seri PSVLL dönüştürücü)

S semi-conductor switching element and D_1 diode transmission forms the circuit shown in Figure 2. In this case, the current flows through L inductor, and C_1 capacitor is loaded with V_i voltage. When S semi-conductor switching element and D_1 diode is cut off, the circuit in Figure 3 is obtained, which decreases the inductor voltage to $(2V_i - V_o)$ value [18]. The voltage gain (G) of the basic series PSVLL converter can be defined as follows:

$$G = \frac{V_o}{V_i} = \frac{2-d}{1-d} \quad (1)$$

For the analysis of basic series PSVLL converter, based on the change in current ratio (δ) on L inductor and the change in voltage ratios on C_1 and C_2 capacitors (ε), the boundary values of the circuit elements are calculated using Equation (2-3).

$$\delta = \frac{d(1-d)^2 R}{2(2-d)fL} \quad (2)$$

$$\varepsilon = \frac{d}{2RfC_{1,2}} \quad (3)$$

The change in current ratio (δ) and change in voltage ratios on C_1 and C_2 capacitors (ε) were selected as 0.2 and 0.01 respectively. Actual converter element values need to be higher than the calculated boundary element values for an effective continuous operation mode (CCM) [19-20]. The element values for the PSVLL converter are presented in Table 1.

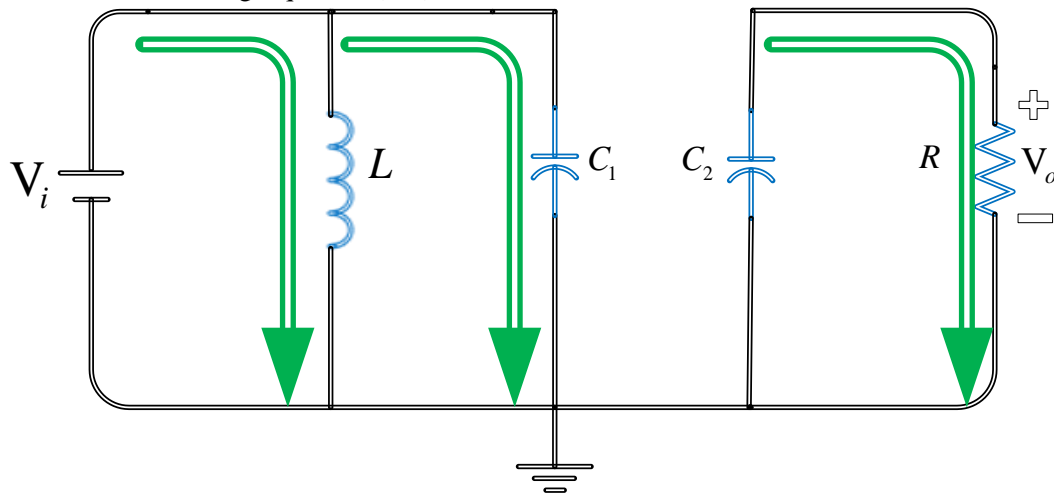


Figure 2. S semi-conductor switching element and D_1 diode transmission (S yarı iletken anahtarlama elemanı ve D_1 diyot iletimde)

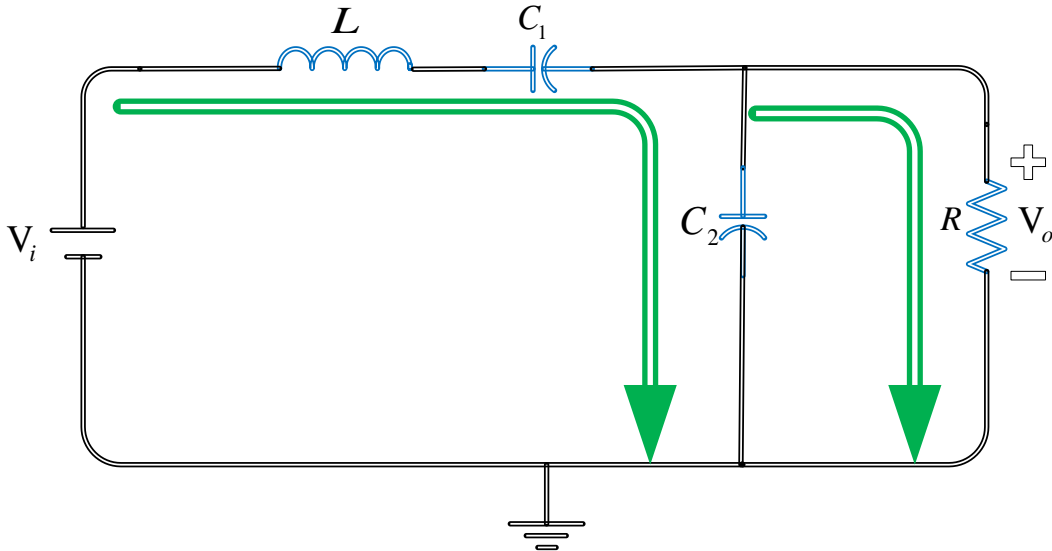


Figure 3. S semi-conductor switching element and D_1 diode cutoff (S yarı iletken anahtarlama elemanı ve D_1 diyot kesimde)

Table 1. The specified, calculated boundary and selected values of the PSVLL converter (PSVLL dönüştürücüsünün belirlenen, hesaplanan ve seçilen değerleri)

Specified Values		
Input Voltage	V_{in}	45V
Output (Load) Voltage	V_o	180V
Load Resistance	R	5Ω
Switching Frequency	f	50Khz
The variation ratio of the current flow on the L inductor	δ	0.2
The variation ratio of the voltage on $C_{1,2}$ capacitors	ε	0.01
Calculated Boundary Values		
Inductor	L_K	0.13mH
Capacitor	$C_{1,2K}$	$6.66\mu\text{F}$
Selected Values		
Inductor	L	1mH
Capacitor	$C_{1,2}$	$22\mu\text{F}$

2.2 PEM Fuel Cell (PEM Yakıt Hücresi)

The changes in voltage and current in a PEM fuel cell is non-linear [21]. Current-voltage (I-

V) and current-power (I-kW) characteristics of a PEM fuel cell operating at a nominal power of 6 kW are shown in Figure 4.

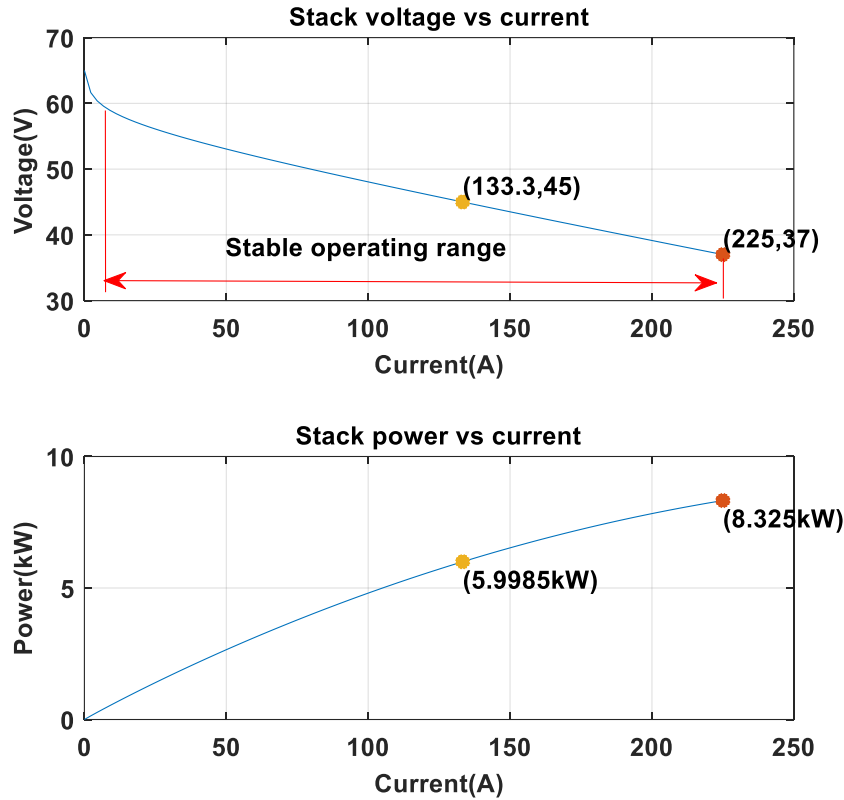


Figure 4. (I-V) and (I-kW) characteristics of a PEM fuel cell operating at a nominal power of 6 kW (6 kW nominal güçte çalışan bir PEM yakıt pilinin (I-V) ve (I-kW) karakteristikleri)

As shown in I-V characteristic in Figure 4, the current from the fuel cell is inversely proportional to the cell voltage. On the other hand, in I-V characteristic, the current from the fuel cell is directly proportional to the power from it until it reaches the maximum power level (8.325kW).

2.3 IT2FL Controller Structure (IT2FL denetleyici yapısı)

One of the non-linear DC-DC converter circuit topologies, PEM fuel cell fed basic series PSVLL converter must be controlled with a high performance in order to prevent the impact of changes in its output voltage. Therefore, it requires a suitable non-linear controller structure [22]. Type-2 FLCs are widely preferred because they display a more effective controlling performance against

system uncertainties compared to type-1 FLCs [23]. Type-2 FLCs also offer a different version with a lower computational load called interval type-2 fuzzy logic (IT2FL) controllers [24]. As shown in Figure 5 clearly, it consists of a fuzzifier, a rule base, an inference mechanism, a type reducer and defuzzification, and it was used in the present study. The inputs of IT2FL controller are error $e(n)$ and change in error $\Delta e(n)$. These inputs are scaled using G1 and G2 gains, and transferred to the fuzzifier. G3 is the input gain of the controller system.

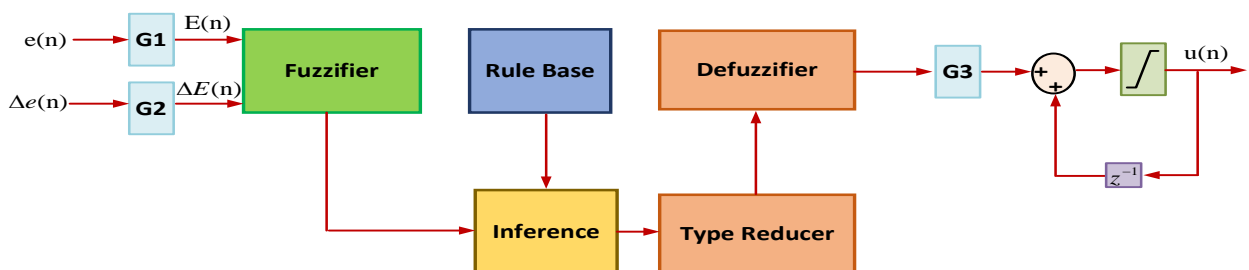


Figure 5. IT2FL controller structure (IT2FL denetleyici yapısı)

$$E(n) = e(n)G1 \tag{4}$$

$$\Delta E(n) = [\Delta e(n)]G2 \tag{5}$$

The fuzzified inputs help us procedure type-2 fuzzy outputs after the inference mechanism employs the rule base. In the present study, three Gaussian membership functions (MFs) were used for each input, as expressed in the following equation.

$$\mu_{\tilde{A}}(x) = e^{\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-m}{\sigma}\right)^2\right\}} \tag{6}$$

Here, x is the input variable. m and σ are the center of Gaussian MF and standard deviation, respectively. Type-2 Gaussian MF is shown in Figure 6. Three lower and upper Gaussian MFs for error (e) and change in error (Δe) in the present study are shown in Figure 7.

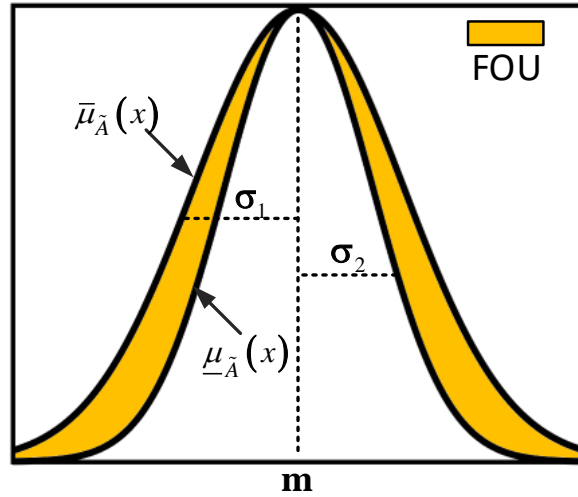


Figure 6. Gaussian MF [21] (Gauss MF)

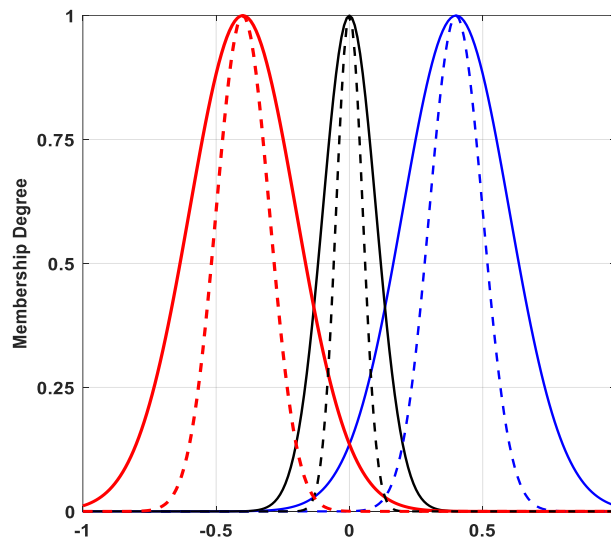


Figure 7. Lower and upper Gaussian MFs for (e) and (Δe) (e and Δe için alt ve üst Gauss üyelik fonksiyonları)

Lower and upper Gaussian MFs in Figure 7 were selected between $[-1,+1]$. The region between lower and upper MFs represents the footprint of uncertainty (FOU) [25]. When takagi-sugeno-kang (TSK) method represented by a linear function is used in the final parameters of this controller, it is called an interval type-2 TSK fuzzy logic controller

(IT2TSKFLC), and its rule base is defined as follows:

$$R^i: \text{If } E(n)\tilde{A}_1^i \text{ and } \Delta E(n)\tilde{A}_2^i, \text{ Then } u_n = a_1^i E(n) + a_2^i \Delta E(n) \tag{7}$$

Here, i ($i=1,\dots,25$) denotes the number of rules. a_1^i and a_2^i are the final parameters. The firing strengths

of lower and upper MFs for the i^{th} rule can be expressed as follows:

$$\underline{f}^i = \underline{\mu}_{\tilde{A}_1^i}(E(n)) * \underline{\mu}_{\tilde{A}_2^i}(\Delta E(n)) \quad (8)$$

$$\underline{f}^i = \underline{\mu}_{\tilde{A}_1^i}(E(n)) * \underline{\mu}_{\tilde{A}_2^i}(\Delta E(n)) \quad (9)$$

Here * t-norm is the operator. $\underline{\mu}_{\tilde{A}_j^i}$ and $\underline{\mu}_{\tilde{A}_j^i}$ represents lower and upper MF of the i^{th} rule. Normalization is performed using the following equations.

$$\underline{F}^i = \frac{\underline{f}^i}{\sum \underline{f}^i} \quad (10)$$

$$\underline{F}^i = \frac{\underline{f}^i}{\sum \underline{f}^i} \quad (11)$$

Biglarbegan-Melek-Mendel (BMM) [26] method was used for the type reducer and defuzzification, as it requires a lower computational load.

$$U_L(n) = \frac{\sum_i^M \underline{F}^i U_i(n)}{\sum_i^M \underline{F}^i} \quad (12)$$

$$U_R(n) = \frac{\sum_i^M \underline{F}^i U_i(n)}{\sum_i^M \underline{F}^i} \quad (13)$$

$$U(n) = qU_L(n) + (1 - q)U_R(n) \quad (14)$$

Here, q is a parameter which can be adjusted by the user. It was set to 0.5 in the present study.

3. FINDINGS AND DISCUSSION (BULGULAR VE TARTIŞMA)

It is of vital importance to select switching frequency, circuit element and input and output voltage values beforehand in order to design a basic series PSVLL converter.

3.1. Simulation Studies (Benzetim çalışmaları)

Input-output (load) voltage, load value and switching frequency values of the basic series PSVLL converter used the simulation studies are given in Table 1. The IT2TSKFL controller structure and block diagram of the PEM fuel cell fed basic series PSVLL converter are shown in Figure 8.

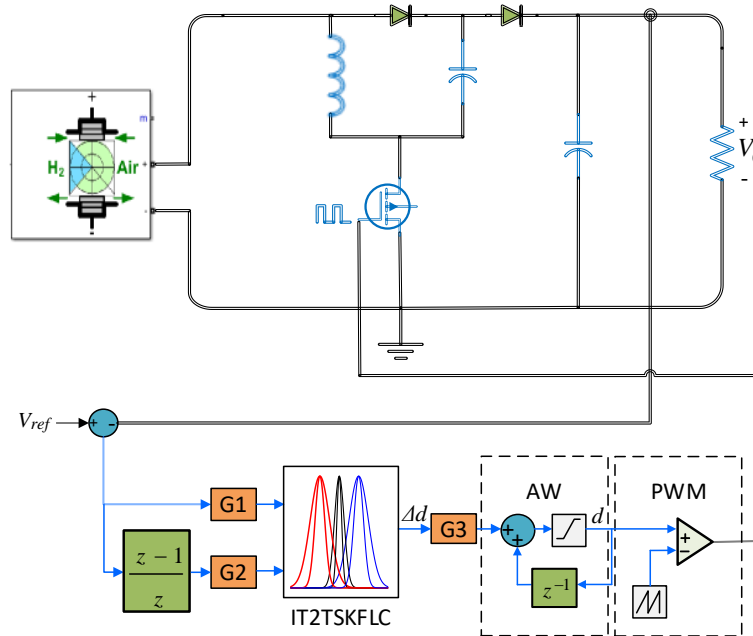


Figure 8. The IT2TSKFL controller structure and block diagram of the PEM fuel cell fed basic series PSVLL converter (PEM yakıt hücresi beslemeli temel seri PSVLL dönüştürücünün blok şeması ve IT2TSKFL denetleyici yapısı)

As shown in Figure 8, V_{ref} is the intended output reference voltage (V_0) of the basic series PSVLL converter. V_0 is the output voltage of the basic series PSVLL converter. After error and change in error values between the reference and output voltage are found, they are applied to the IT2TSKFL controller using G_1 and G_2 gain constants. Δd in the output of the IT2TSKFL

controller is the change in controller signal, and it is applied to the input of AW block using G_3 gain constant. Finally, d control signal in the output of AW block is applied to the semi-conductor switching element using pulse width modulation (PWM) block. Matlab/Simulink environment was employed to assess the performance of the IT2TSKFL controller. The first step in the

simulation studies was to analyze the suitability of the PEM fuel cell fed basic series PSVLL converter to the design criteria in Table 1 under NOCs. To this aim, the PEM fuel cell fed basic series PSVLL converter was operated at the constant (0.667) duty ratio in MATLAB/Simulink environment. Total

simulation time elapsed was 1s, and the sampling time was taken as $0.1\mu s$. The output voltage of the PEM fuel cell fed basic series PSVLL converter for the constant duty ratio under NOCs is shown in Figure 9.

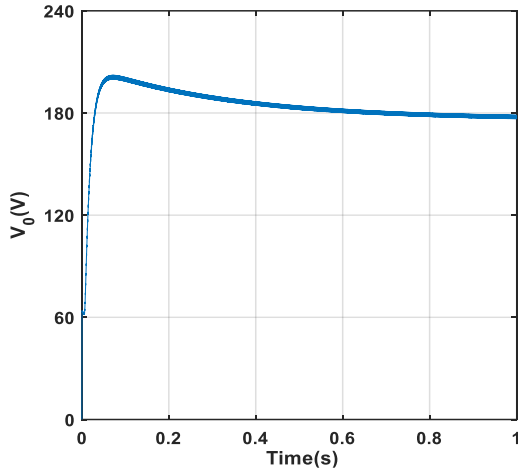


Figure 9. The output voltage of the PEM fuel cell fed basic series PSVLL converter for the constant duty ratio under NOCs. (NOC altında sabit görev oranı için PEM yakıt hücresinden beslenen temel seri PSVLL dönüştürücünün çıkış gerilimi)

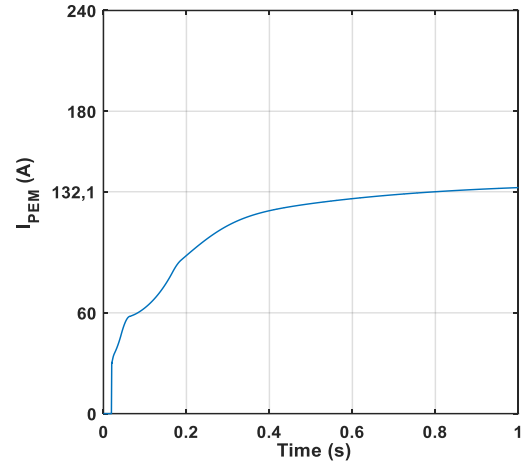


Figure 10. The current obtained from the PEM fuel cell fed basic series PSVLL converter under NOCs with the IT2TSKFL controller (IT2TSKFL denetleyici ile NOC altında PEM yakıt hücresinden beslenen temel seri PSVLL dönüştürücünden elde edilen akım)

It can be seen in Figure 9 that the output voltage reached 180V at the specified boundary variation ratio at 0.8s, which justified the accuracy of the parameters selected for the converter design. Secondly, the current (I_{PEM}), power (P_{PEM}), and cell voltage (V_{PEM}) values from the PEM fuel cell under

NOCs via the IT2TSKFL controller were analyzed and shown in Figure 10, 11 and 12, respectively. As shown in Figure 10, the current obtained from the PEM fuel cell under NOCs via the IT2TSKFL controller is 132.1 A.

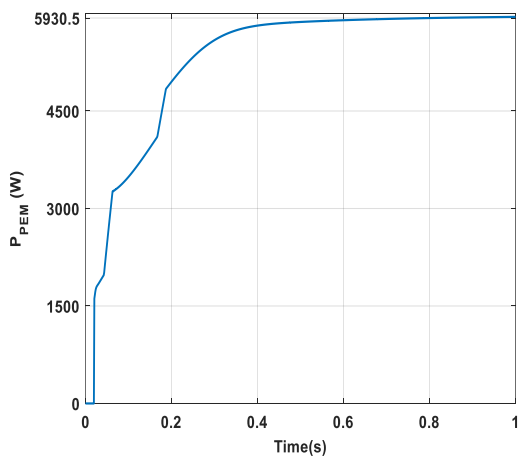


Figure 11. The power obtained from the PEM fuel cell fed basic series PSVLL converter under NOCs with the IT2TSKFL controller (IT2TSKFL denetleyici ile NOC altında PEM yakıt hücresinden beslenen temel seri PSVLL dönüştürücünden elde edilen güç)

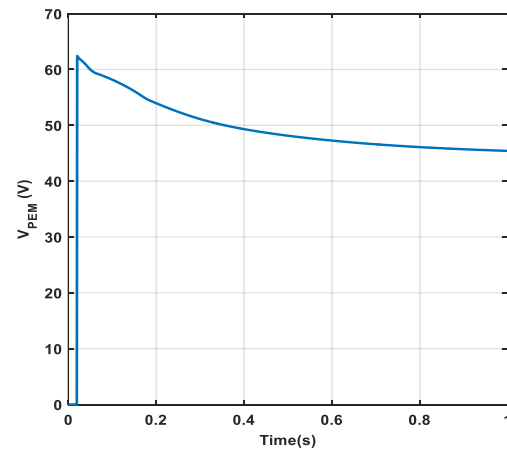


Figure 12. The voltage obtained from the PEM fuel cell fed basic series PSVLL converter under NOCs with the IT2TSKFL controller (IT2TSKFL denetleyici ile NOC altında PEM yakıt hücresinden beslenen temel seri PSVLL dönüştürücünden elde edilen gerilim)

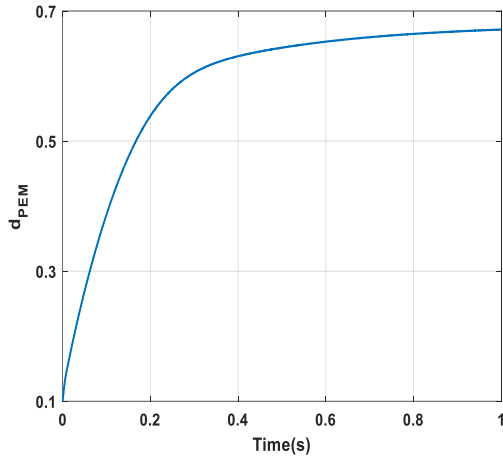


Figure 13. The control signal of the IT2TSKFL controller (d_{PEM}) (IT2TSKFL denetleyicinin denetim sinyali (d_{PEM}))

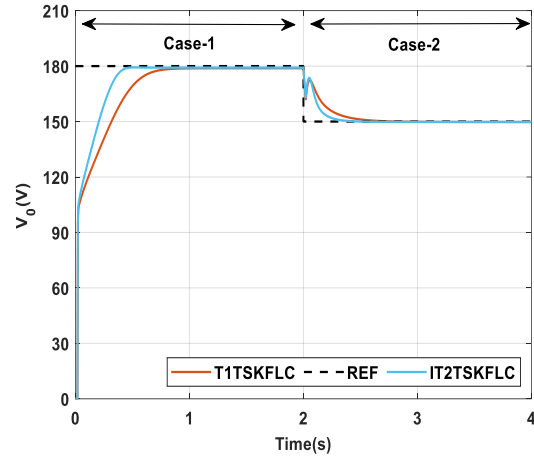


Figure 14. The dynamic response of the IT2TSKFL controller and T1TSKFLC against reference voltage changes (IT2TSKFL denetleyicinin ve T1TSKFLC'nin referans gerilim değişikliklerine karşı dinamik tepkisi)

In the last step of the simulation studies, the dynamic performance of the IT2TSKFL controller and T1TSKFLC were analyzed for different step reference voltage values in MATLAB/Simulink environment in terms of settling time. In this respect, reference voltage (V_0) value was decreased from 180V to 150V. Total simulation time elapsed

was 4s, while the sampling time was taken as $0.1\mu s$. Simulation results for different step reference voltage values obtained from IT2TSKFL controller and T1TSKFLC are shown in Fig. 14. The settling time values of IT2TSKFL controller and T1TSKFLC are given in Table 2 for two different cases.

Table 2. The settling time values of IT2TSKFL controller and T1TSKFLC (IT2TSKFL denetleyici ve T1TSKFLC'nin yerleşme süresi değerleri)

Cases Controllers	IT2TSKFL	T1TSKFLC
Case 1	1s	1.35s
Case 2	0.65s	0.8s

As can be seen in Table 2, compared to T1TSKFLC, IT2TSKFL controller could offer a lower settling time, improving settling times of PEM fuel cell fed

basic series PSVLL converter by 25.92% and 18.75% under different reference voltage changes for two different cases, respectively.

4. CONCLUSIONS (SONUÇLAR)

In the present study, a PEM fuel cell fed basic series PSVLL converter was designed. The most important advantage of the designed controller is its capacity to yield a high output voltage with a low duty ratio. In addition, the output (load) voltage was controlled using IT2TSKFL controller to create a more stabilized system at different operating points. The results of the simulation studies indicated that

the designed converter structure operated with optimal efficiency at the specified boundary current and voltage ripple ratios and that the IT2TSKFL controller ensured a stabilized operation. In future studies, the operation of the PEM fuel cell at the maximum power point will be discussed.

DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS (ETİK STANDARTLARIN BEYANI)

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

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

AUTHORS' CONTRIBUTIONS (YAZARLARIN KATKILARI)

Ahmet GANI: He conducted the literature review, research, editing and consultancy.

Literatür taraması, araştırma, düzenleme ve danışmanlık yapmıştır.

İlknur UÇAR: She conducted simulation studies and writing process.

Benzetim çalışmaları ve yazım sürecini yürütmüştür.

CONFLICT OF INTEREST (ÇIKAR ÇATIŞMASI)

There is no conflict of interest in this study.

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

REFERENCES (KAYNAKLAR)

- [1] Elden G, Çelik M, Genç G, Yapıcı, H. The effects of temperature on transport phenomena in phosphoric acid doped polybenzimidazole polymer electrolyte membrane fuel cell. *Energy*. 2016; 103:772-783.
- [2] Arıç T, Bilgili M, Özsunar, A.K. Numerical analysis of two units Pem fuel cell stack. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*. 2019; 7(4): 999-1011.
- [3] Demirtaş M, Akkoyun N, Akkoyun E, Çetinbaş İ. Akıllı şebekelerde güneş enerjisi üretiminin zamana bağlı olasılıksal tahmini. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*. 2019; 7(2): 411-424.
- [4] Celtek M, Bilgili M. Stokiyometri oranının iki hücreli PEM yakıt hücresi yığını performansına etkisinin incelenmesi. *Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology*. 2021; 9(1): 134-147.
- [5] Taş M, Elden G. An experimental investigation of the effects of operating conditions on anisotropic electrical conductivity in a PEM fuel cell. *Fuel Cells*. 2020; 20(5): 531-539.
- [6] Kart S. 2021. Yakıt hücre sistemleri için çift katlı yükselten da-da dönüştürücünün kontrolü.

Doktora Tezi, İstanbul Üniversitesi Cerrahpaşa Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İstanbul.

[7] Gani A. PEM yakıt hücresi ömrünü uzatmaya yönelik temel seri pozitif süper gerilim yükseltmeli Luo çevirici tasarımı, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fen Bilimleri Dergisi. 2023; 39(3): 403-416.

[8] Yıldız E. 2016. PEM tipi yakıt pillerinde çıkış akımının dalgalanmasını azaltmaya yönelik bir dc/dc dönüştürücü tasarımı ve uygulaması, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[9] Luo F. L, Ye H. Positive output super-lift converters. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2003; 18(1): 105-113.

[10] Gani A. PD-type-2 fuzzy neural network based control of a super-lift Luo converter designed for sustainable future energy applications. *Intelligent and Fuzzy Systems. INFUS 2023. Lecture Notes in Networks and Systems*, vol 758. Springer.

[11] Bereketoğlu S. Açıkgoz H. Şekkeli, M. Fırçasız doğru akım motorunun aralıklı tip-2 bulanık mantık denetleyici tabanlı hız denetimi, *EMO Bilimsel Dergi*. 2020; 10(2): 33-42.

[12] Zadeh L. A. The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning-I, *Information Sciences*. 1975; 8(3):199-249.

[13] Karnik N.N, Mendel J.M, Liang Q. Type-2 fuzzy logic systems. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*. 1999; 7(6): 643-658.

[14] Kececioğlu O.F, Gani A, Sekkeli M. Design and hardware implementation based on hybrid structure for MPPT of PV system using an interval type-2 TSK fuzzy logic controller. *Energies*. 2020; 13(7) :1842.

[15] Karaarslan A, Doğan R, Modeling and control of dc-dc buck converter using PEM fuel cell. *Gaziosmanpaşa Journal of Scientific Research*. 2017; 6: 94-105.

[16] Özkara Ö, Tokgöz N, Doğan R, Karaarslan A. The analysis of OCC and PI control method for isolated fly-back converter using PEM fuel cells. *Gaziosmanpaşa Journal of Scientific Research*. 2017; 6: 40-49.

[17] Bilhan A. Yakıt pili uygulamaları için kademeli yükseltici da/da dönüştürücü devresinin tasarımı, Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi. 2020; 11(1): 29-37.

[18] Tekade A, Juneja R, Kurwale M, Debre P. Analysis of a positive output super-lift Luo boost converter, *International Journal of Engineering Research and Applications*. 2016; 6(2): 74-78.

[19] Gani A. Yüksek kazançlı Luo çevirgeç için uyarlamalı sinirsel-bulanık çıkarım sistemi tabanlı gerilim düzenleyici tasarımı, *Fırat Üniversitesi Uzun ve Savunma Teknolojileri Dergisi*. 2022; 1(1): 8-13.

- [20] Şener E.2016.Şebeke bağlantılı inverterlerde süper lift luo konverter uygulaması, Yüksek Lisans Tezi, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bilecik.
- [21] Khan F, Nawaz A, Muhammad M. A, Khadim, M. A.Review and analysis of MATLAB® Simulink model of PEM fuel cell stack. International Journal of Engineering & Computer Science.2013; 13(3): 31-34.
- [22] Gani A. Aralık değerli tip-2 bulanık denetleyici ile negatif gerilim çıkışlı temel seri luo çeviricinin denetimi, Niğde Ömer Halisdemir University (NOHU) Journal of Engineering Sciences.2022;11 (4): 904-910.
- [23] Keçecioglu Ö.F., Gani A, Şekkeli M, Improved hybrid intelligent controller design for MPPT of stand-alone PV System.Turkish Journal of Engineering.2021; 5(1):20-28.
- [24] Gani A, Sekkeli M.Experimental evaluation of type-2 fuzzy logic controller adapted to real environmental conditions for maximum power point tracking of solar energy systems, International Journal of Circuit Theory and Applications.2022; 50 (11): 4131-4145.
- [25] Acikgoz H, Kececioğlu O F.Aralıklı tip-2 bulanık mantık denetleyici tabanlı yükseltilen tip da-da çevirici yapısının denetimi ve deneysel analizi, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi.2020; 7 (2): 1061-1074.
- [26] Biglarbegian M., Melek W W, Mendel J M. On the stability of Interval Type-2 TSK fuzzy logic control systems. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics.2010; 40: 798-818.

DC-Link Dynamics Examination of the Parallel-Connected Three-Phase Inverters in Islanded and Grid-Connected Modes

Seyfullah DEDEOĞLU^{1*} 

¹Hitit University, Faculty of Engineering, Department of Electrical and Electronics, Çorum, Turkey

Article Info

Research article
Received: 10/02/2024
Revision: 09/03/2024
Accepted: 18/03/2024

Keywords

Microgrids
Parallel-connected Three-
phase Inverters
DC-link Dynamics
Islanded and Grid-
connected Modes
Voltage Sag

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 10/02/2024
Düzeltilme: 09/03/2024
Kabul: 18/03/2024

Anahtar Kelimeler

Mikro Şebekeler
Paralel Bağlı Üç Fazlı
Eviriciler
DC-link Dinamikleri
İzole ve Şebekeye Bağlı
Modlar
Voltaj Düşümü

Graphical/Tabular Abstract (Grafik Özet)

This study introduces an improved method for AC microgrids with parallel three-phase inverters, focusing on DC-link voltage control and current limitation. Unlike existing methods, it can limit dq axis currents under all conditions, enhancing system stability and security, as demonstrated in simulation studies. / Bu çalışma, paralel üç fazlı eviricilere sahip AC mikro şebekeler için DC-link gerilim kontrolü ve akım sınırlama üzerine odaklanan geliştirilmiş bir yöntemi tanıtmaktadır. Önerilen yöntem, mevcut yöntemlerin aksine, tüm koşullar altında dq eksen akımlarını sınırlamakta, sistem kararlılığını ve güvenliğini garanti altına almaktadır. Bu durumlar simülasyon çalışmaları ile incelenmiştir.

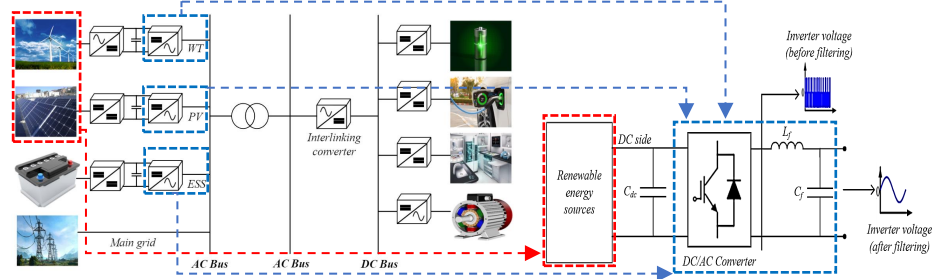


Figure A: Role of inverters in a modern microgrid / Şekil A: Modern mikro şebekelerde eviricilerin rolü

Highlights (Önemli noktalar)

- This study targets DC-link voltage and dq-axis current control in microgrids to ensure grid stability during disturbances and mode transitions. / Bu çalışma, mikro şebekelerde DC-link voltajı ve dq-ekseni akım kontrolünü hedefler, bozucu olaylar ve mod geçişleri sırasında şebeke kararlılığını sağlar.
- An enhanced control strategy combining a lead compensator mechanism with saturation-based current limitation is proposed. / Lead kompensatör mekanizması ile satürasyon tabanlı akım sınırlamayı birleştiren geliştirilmiş bir kontrol stratejisi önerir.
- It is shown through simulations that the strategy's effectiveness in reducing voltage fluctuations and current peaks, minimizing the need for protection relays. / Simülasyonlar aracılığıyla, voltaj dalgalanmaları ve akım piklerini azaltma, koruma rölelerine olan ihtiyacı minimize etme etkinliği gösterilmiştir.

Aim (Amaç): The aim of this study is to develop an improved control strategy for DC link voltage regulation and dq-axis current limitation in microgrids, enhancing stability and efficiency across various operational modes and grid disturbances. / Bu çalışmanın amacı, mikro şebekelerde DC-link voltaj kontrolü ve dq-ekseni akım sınırlaması için bir kontrol stratejisi geliştirmek, çeşitli sistem modları ve şebeke bozucuları boyunca kararlılığı ve verimliliği artırmaktır.

Originality (Özgünlük): This article presents an innovative control strategy, merging a lead compensator-like mechanism with saturation-based current limitation, for microgrid stability enhancement. / Bu makale, mikro şebeke stabilitesini artırmak için lead kompensatör benzeri bir mekanizmayı satürasyon tabanlı akım sınırlama ile birleştiren yenilikçi bir kontrol stratejisi sunmaktadır.

Results (Bulgular): It is demonstrated that the proposed DC-link controller significantly outperforms the existing method in regulating DC-link voltage and limiting dq axis currents, enhancing microgrid reliability and stability across various operational scenarios. / Bu çalışmada önerilen DC-link kontrolör, çeşitli sistem senaryoları boyunca mikro şebeke güvenilirliğini ve kararlılığını artırarak DC-link voltajını düzenleme ve dq eksen akımlarını sınırlama konusunda mevcut yöntemden önemli ölçüde daha iyi bir performans göstermiştir.

Conclusion(Sonuç):

This study presented a novel AC microgrid controller that enhances system stability and reliability, outperforming existing methods. / Bu çalışma, sistem kararlılığını ve güvenilirliğini artıran, mevcut yöntemlerden üstün yeni bir AC mikro şebeke kontrolörü sunmuştur.



DC-Link Dynamics Examination of the Parallel-Connected Three-Phase Inverters in Islanded and Grid-Connected Modes

Seyfullah DEDEOĞLU^{1*}

¹Hitit University, Faculty of Engineering, Department of Electrical and Electronics, Çorum, Turkey

Article Info

Research article
Received: 10/02/2024
Revision: 09/03/2024
Accepted: 18/03/2024

Keywords

Microgrids
Parallel-connected Three-
phase Inverters
DC-link Dynamics
Islanded and Grid-
connected Modes
Voltage Sag

Abstract

This paper presents a comprehensive analysis of an AC microgrid setup, consisting of parallel three-phase inverters. It introduces a novel controller that integrates the tasks of controlling the DC-link voltage and implementing a current limiting approach. The proposed design, which draws inspiration from the attributes of lead compensators, has a dual objective of controlling the DC-link voltage to mitigate undesired power transfer among the parallel inverters and ensuring the current-limiting ability of all inverters, regardless of the microgrid's operating state. This includes both standalone and grid-connected modes, voltage sags in the grid side, as well as transitional intervals between the two. In contrast to existing DC-link voltage control methods that do not incorporate a current limiting strategy, the proposed solution effectively restrains the dq axis current values in all operating conditions. This is crucial for preserving system stability, avoiding abrupt changes in DC-link voltage and current during sudden grid modifications and transitions. The implementation of Matlab/Simulink studies highlights the critical role of the controller algorithm in mitigating fluctuations in DC voltage and AC current during grid perturbations, as well as preventing the undesired activation of protection relays. Through extensive analysis, the controller demonstrates superior performance compared to existing methodologies, thus highlighting its potential in improving the resilience and efficiency of microgrids. Moreover, the adaptability of the proposed controller to various operational scenarios is demonstrated, emphasizing its versatility and practicality in real-world applications. Overall, the results confirm the effectiveness of the controller in stabilizing the system, minimizing fluctuations in DC-link voltage, and limiting the AC-side dq axis currents for each inverter without the risk of protection relay tripping in all operation modes.

İzole ve Şebekeye Bağlı Modlarda Paralel Bağlı Üç Fazlı Eviricilerin DC-Link Dinamiklerinin İncelenmesi

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 10/02/2024
Düzeltilme: 09/03/2024
Kabul: 18/03/2024

Anahtar Kelimeler

Mikro Şebekeler
Paralel Bağlı Üç Fazlı
Eviriciler
DC-link Dinamikleri
İzole ve Şebekeye Bağlı
Modlar
Voltaj Düşümü

Öz

Bu makale, paralel üç fazlı invertörlerden oluşan bir AC mikro şebeke kurulumunun kapsamlı bir analizini sunmaktadır. DC-link voltajının kontrol edilmesi ve bir akım sınırlama yaklaşımının uygulanması görevlerini entegre eden yenilikçi bir kontrolör tanımlanmaktadır. Önerilen tasarım, lead kompanzatorların özelliklerini kullanarak, paralel eviriciler arasındaki istenmeyen güç transferini azaltmak için DC-link voltajını kontrol etme ve mikro şebekenin çalışma modundan bağımsız olarak tüm eviricilerin akım sınırlama yeteneğini sağlama hedeflerine sahiptir. Önerilen yöntem izole ve şebekeye bağlı modları, şebeke tarafındaki voltaj düşüşlerini ve iki çalışma modu arasındaki geçiş durumlarını incelemiştir. Bir akım sınırlama stratejisi içermeyen mevcut DC-link voltaj kontrol yöntemlerinin aksine, önerilen çözüm, tüm işletim koşullarında dq eksen akım değerlerini etkili bir şekilde kısıtlar. Bu, sistem stabilitesini korumak, ani şebeke değişiklikleri ve mod geçişleri sırasında DC-link voltajı ve AC akımlardaki ani değişikliklerden kaçınmak için hayati öneme sahiptir. Matlab/Simulink çalışmalarının uygulanması, şebeke bozulmaları sırasında DC voltajı ve AC akımındaki dalgalanmaları hafifletmede, aynı zamanda koruma rölelerinin istenmeyen aktivasyonunu önlemede kontrolör algoritmasının kritik rolünü kanıtlamıştır. Kapsamlı analizler aracılığıyla, kontrolör mevcut yöntemlere kıyasla üstün performans sergileyerek, mikro şebekelerin dayanıklılığını ve verimliliğini artırma potansiyelini vurgular. Ayrıca, önerilen kontrolörün çeşitli sistem senaryolarına uyum sağlama yeteneği gösterilerek, çok yönlülüğü ve gerçek dünya uygulamalarındaki pratikliği vurgulanmıştır. Genel olarak, sonuçlar kontrolörün sistemi stabilize etme, DC-link voltajındaki dalgalanmaları en aza indirme ve tüm sistem modlarında koruma rölesi tetikleme riski olmadan her evirici için AC taraf dq eksen akımlarını sınırlama etkinliğini doğrulamaktadır.

1. INTRODUCTION (GİRİŞ)

Three-phase inverters play a critical role in both microgrids and smart grids, serving as key components in the integration of renewable energy sources and the effective management of power flow [1-2]. In microgrids, three-phase inverters facilitate the conversion of direct current (DC) generated by renewable sources such as solar panels or wind turbines into alternating current (AC) for use in the grid. This enables the efficient distribution and utilization of renewable energy within the microgrid. In smart grids, three-phase inverters are crucial for maintaining stability and balance in the grid by allowing for bidirectional flow of power between the grid and distributed energy resources [3-4]. Furthermore, three-phase inverters also enable advanced control and monitoring capabilities, making them vital for the successful implementation of smart grid technologies. Thus, the significance of three-phase inverters in microgrids and smart grids cannot be overstated, as they are integral in the advancement towards a more sustainable and efficient energy system [5-7].

Parallel-connected three-phase inverters have gained significant attention in recent years due to their numerous advantages over single-phase inverters, such as increased power capacity, improved efficiency, and enhanced power quality [8]. This configuration involves connecting multiple three-phase inverters in parallel, resulting in a higher total power output. As a result, it has become a popular solution for high-power applications, including renewable energy systems, electric vehicle charging, and industrial motor drives [9-10]. In this arrangement, each inverter is controlled individually and works together in a coordinated manner to supply power to the load. Extensive research has been conducted to explore various control strategies and operating modes for parallel three-phase inverters, with the aim of maximizing their performance and reliability. This has led to the development of novel techniques such as droop control, virtual impedance, and active power sharing methods. The use of parallel-connected three-phase inverters is expected to continue growing in the future, as they offer a promising solution for meeting the increasing demand for high-power, clean, and efficient energy systems [11-13].

Islanded and grid-connected modes refer to two distinct operational states of a power system. In the islanded mode, the system is disconnected from the larger grid and operates independently, relying

solely on its own generation and distribution resources. This mode is typically used in remote or isolated areas where access to the larger grid is not feasible. On the other hand, in the grid-connected mode, the system is connected to a larger network of power generation and distribution, allowing for the exchange of electricity between different regions. This mode is commonly used in urban and densely populated areas to meet the high demand for electricity [14-16]. The transition between these modes can be triggered by various factors such as power outages, changes in demand, or deliberate isolation for maintenance purposes. Understanding the dynamics and characteristics of these two modes is crucial for efficient and reliable operation of modern power systems [17-18].

In recent years, the use of inverters has become increasingly prevalent in various industrial and residential applications due to their efficient and versatile operation. However, the excessive current drawn by these devices can result in various adverse consequences such as overheating, voltage drops, and even system failure. To address these issues, implementing current-limiting methods in inverter control has gained significant attention from researchers and industry professionals. These methods work by regulating the current flow within safe limits, thereby preventing damage to the inverter and associated components [19-20]. Neglecting to incorporate current-limiting methods can not only lead to immediate consequences but also have long-term implications such as reduced lifespan and increased maintenance costs. Therefore, it is crucial to consider and implement appropriate current-limiting techniques in inverter control to ensure the safe and efficient operation of these devices [21].

The management of DC-link voltage control plays a crucial role in the operation of parallel-connected three-phase inverters in microgrid systems. To ensure the reliable and efficient performance of these inverters and the overall microgrid, it is essential to realize the control of the DC link voltage. This voltage serves as the primary source of power for the inverters, which then convert it into AC power for distribution to the connected loads. Any variations or asymmetries in the DC link voltage can result in disruptions and instabilities within the microgrid network, potentially leading to system failures. Therefore, the implementation of a robust and effective DC link voltage control

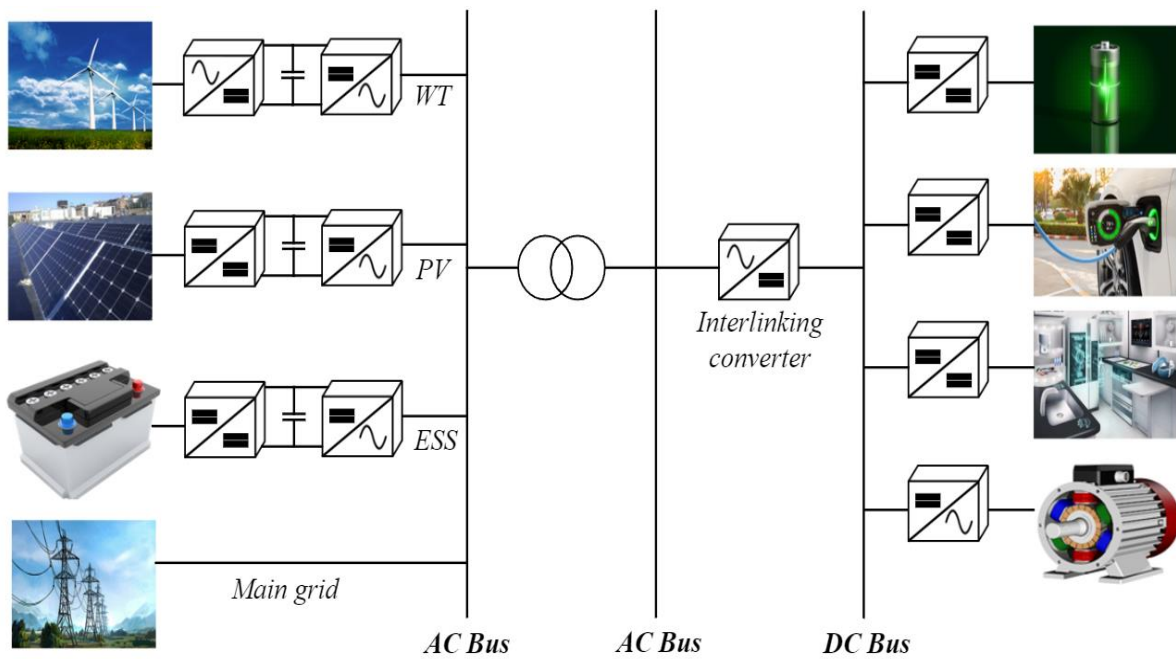


Figure 1. A modern microgrid (Modern bir mikro şebeke)

strategy is imperative for maintaining stable operation and optimal power quality in microgrids. Incorporating such control mechanisms will not only enhance the performance and longevity of the inverters, but also contribute towards the seamless integration of renewable energy sources and efficient energy management within microgrid systems [22-23].

Fault ride-through (FRT) capability has become a crucial aspect of grid-connected systems in recent years. This capability refers to the ability of a system to withstand and continue operating during faults in the electrical grid. The significance of FRT lies in its role in ensuring grid stability and reliability. In the modern electric power systems with high penetration of renewable energy sources, FRT capability has become even more important due to their intermittent nature. A lack of FRT capability can result in voltage dips, system instabilities, and ultimately lead to power outages. Therefore, it is indispensable for grid-connected systems to be equipped with robust FRT capability to achieve secure and stable operation. Moreover, with the increasing integration of distributed energy resources (DERs) in the grid, the importance of FRT has only amplified, as these systems can not only cause faults but are also vulnerable to them. Hence, from a professional and academic perspective, it is necessary to understand and investigate FRT in grid-connected systems to ensure the smooth and reliable operation of the power grid [24-26].

The primary objectives of this study are to address the challenges associated with direct current (DC)

link voltage control and dq-axis current limitation in microgrid systems that consist of multiple parallel-connected three-phase inverters and to tackle the issues that arise during grid voltage sags and the critical transitions between grid-connected and islanded modes.

To address the shortcomings of existing control techniques, particularly those described in [27], an in-depth evaluation of conventional strategies is conducted, and an enhanced control scheme is proposed. The proposed method combines a lead compensator-like structure for stabilizing the DC-link voltage and a saturation-based current limitation approach for managing AC-side dq inverter currents to overcome the existing problems and strengthen microgrid stability and efficiency during mode changes and grid disturbances. This study aims to bridge the gaps in the current literature by identifying the limitations of current methodologies and presenting an improved solution to enhance microgrid resilience and efficiency. The motivation for this research stems from the need for improved fault-ride-through (FRT) capabilities and smoother transitions between different operational states of microgrids. With extensive simulation studies, the effectiveness of the proposed strategy is thoroughly evaluated, its potentials in reducing DC-link voltage fluctuations and dq-axis current surges are demonstrated, thereby minimizing the risk of triggering protection relays. To this end, this research contributes significantly to the advancement of microgrid technologies, paving the way for a more secure, resilient, and optimized energy framework.

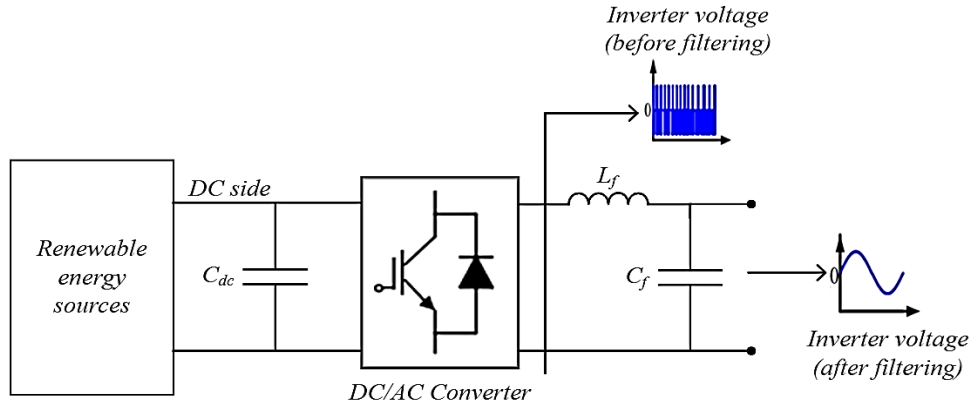


Figure 2. General structure of an inverter (Bir eviricinin genel yapısı)

2. OVERVIEW OF MICROGRIDS AND INVERTERS (EVİRİCİLER VE MİKRO ŞEBEKELERE GENEL BAKIŞ)

Microgrids are small-scale localized energy systems that can operate independently or in conjunction with the larger power grid. They typically consist of locally connected power sources, such as solar panels (PV), wind turbines (WT), and energy storage (ESS) devices, as well as distribution networks for delivering electricity to nearby buildings or communities as provided in Figure 1. Microgrids have gained significant attention in the industrial sector due to their potential to improve energy efficiency, reliability, and resilience. They also offer the flexibility to incorporate renewable energy sources and promote sustainable energy practices. The industrial use of microgrids has become increasingly prevalent in remote or isolated areas where connecting to the main grid may not be feasible or economically viable [28-29]. Additionally, they are being utilized in industrial settings, such as universities, hospitals, and military bases, to reduce energy costs and minimize the risk of power outages. Research in this field has led to the development of advanced control and optimization strategies to improve the performance of microgrids and enhance their integration with the overall power grid [30-31]. Inverters are electronic devices that convert direct current (DC) electricity into alternating current (AC) electricity as illustrated in Figure 2. They play a crucial role in modern industrial applications, where AC electricity is the preferred form of energy due to its high efficiency and ease of transmission over long distances. In addition to their use in industries such as manufacturing, transportation, and telecommunications, inverters are also utilized in the renewable energy sector, where they are essential components in solar and wind power systems. Furthermore, they are widely used in household and commercial settings to power

various electronic devices. Inverters have evolved over the years, with advancements in technology leading to the development of more efficient and reliable models that can meet the growing demands of the industrial sector. As a result, they have become an integral part of modern industrial infrastructure, contributing significantly to the efficient and sustainable production and distribution of energy [32].

3. SYSTEM MODELING AND NECESSARY DEFINITIONS (SİSTEM MODELLENMESİ VE GEREKLİ TANIMLAMALAR)

The study focuses on a microgrid configuration comprising three three-phase inverters operating in parallel, each connected to distinct loads and a common coupling point (PCC) through L filters and transmission lines, as illustrated in Figure 3. This configuration mirrors the setup described in [27], with the addition of considering the grid interface to examine grid-connected (GC) operations, fault ride through capability and mode transitions. The filters' inherent resistance and inductance are labeled as R_f and L_f , respectively, the inductance and resistance of the lines connecting the inverters are identified as $L_{L1}, L_{L2}, R_{L1}, R_{L2}$, respectively. The loads connected to each inverter are represented as resistive elements $R_{Load 1}, R_{Load 2}$, and $R_{Load 3}$. The transmission line linking the PCC to the main grid is characterized by a resistance R_g and an inductance L_g , with the grid-side phase voltages denoted as v_{ga}, v_{gb} , and v_{gc} . The DC components of the inverters consist of a DC source, a diode, and a capacitor (C_{dc}) following the model utilized in [33]. Voltages at the inverter common frame are presented as V_{Ai}, V_{Bi} , and V_{Ci} , where i indicates the

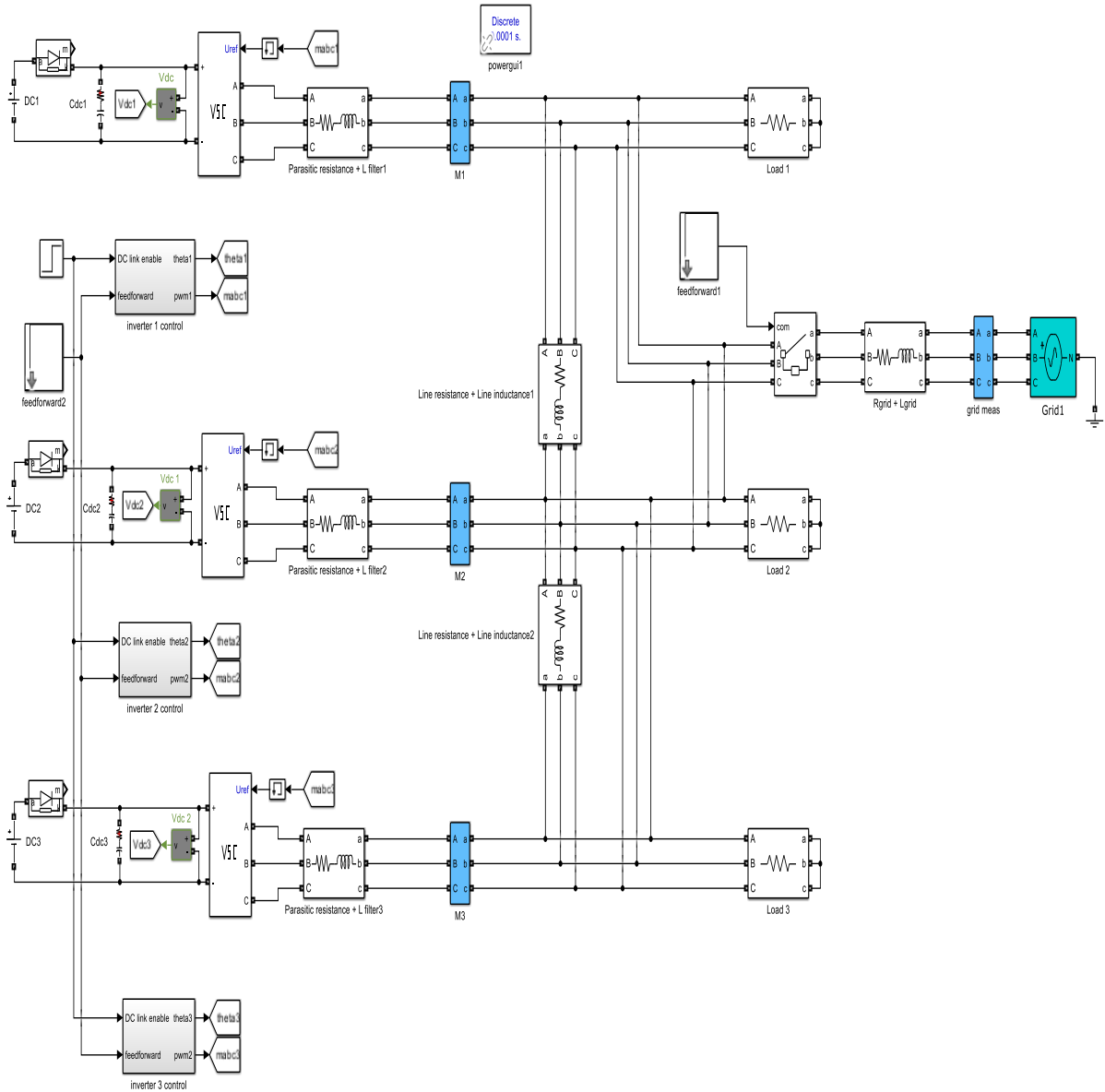


Figure 3. MATLAB/Simulink model of parallel-connected inverter system (Paralel bağlı evirici sisteminin MATLAB/Simulink modeli)

specific inverter. Adapting the approach from [27], the dq voltages at each inverter's local frame are calculated using

$$\begin{bmatrix} V_{dqi} \\ V_{qdi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{Di} \cos \delta_i + V_{Qi} \sin \delta_i \\ -V_{Di} \sin \delta_i + V_{Qi} \cos \delta_i \end{bmatrix}, \quad (1)$$

where $\delta_i = \theta_i - \theta_{com}$ represents the phase angle deviation between the inverter and the common point. Consequently, the dynamic equations for the inverters in the local dq frame are detailed as below

$$\begin{aligned} L_f \frac{di_{di}}{dt} &= -R_{fi} i_{di} + \omega_i L_{fi} i_{qi} - V_{dqi} + V_{di} \\ L_f \frac{di_{qi}}{dt} &= -R_{fi} i_{qi} - \omega_i L_{fi} i_{di} - V_{qdi} + V_{qi}. \end{aligned} \quad (2)$$

In the context of the described microgrid system, the currents and voltages in the local dq frame of the

inverters are symbolized by i_{di}, i_{qi} and V_{di}, V_{qi} , respectively, with $\omega_i = \dot{\theta}_i$ indicating the inverter's angular frequency. Utilizing equation (1) alongside the inverter's local frame currents, the expressions for calculating the active and reactive power of each inverter emerge as:

$$\begin{aligned} P_i &= \frac{3}{2} [\cos \delta_i (V_{Di} i_{di} + V_{Qi} i_{qi}) + \sin \delta_i (V_{Qi} i_{di} - V_{Di} i_{qi})] \\ Q_i &= \frac{3}{2} [\cos \delta_i (V_{Qi} i_{di} - V_{Di} i_{qi}) - \sin \delta_i (V_{Di} i_{di} + V_{Qi} i_{qi})] \end{aligned} \quad (3)$$

These power equations are integral for understanding the dynamics of power distribution within the microgrid, highlighting the dependency of active and reactive power on the phase angle

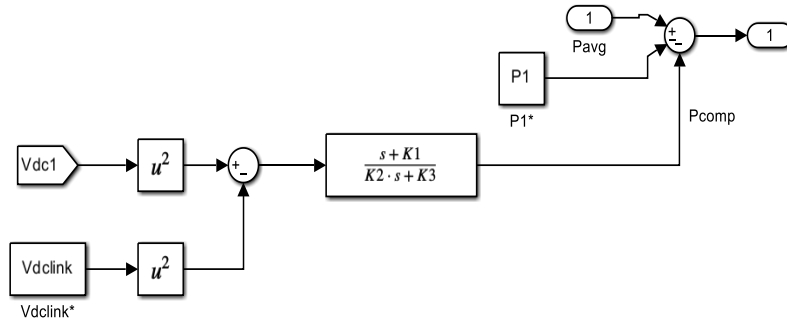


Figure 4. Proposed lead compensator like DC-link controller (Önerilen lead kompanzator benzeri DC-link kontrolör)

difference (δ_i) and the interplay between voltage and current components in the dq frame. Given the importance of maintaining stable operations and managing power distribution effectively, especially during significant faults or mode transitions, the establishment of a control mechanism that ensures the stability of DC-link voltage and limitation of current for each inverter is critical. The proposed approach aims to maintain the operational integrity of the microgrid without exploring the complexities introduced by nonlinearities (3) in the system.

4. PROPOSED DC-LINK CONTROLLER WITH EMBEDDED CURRENT LIMITATION (ÖNERİLEN AKIM LİMİTLEMELİ DC-LINK KONTROLÖR)

In a microgrid, which consists of several parallel-connected inverters, power imbalances and uneven load distribution among the inverters can result in undesired power transfer from high-power to low-power inverters. This could lead to a notable increase in the DC voltage of the low-power inverters, potentially causing harm to the system components or triggering safety mechanisms as mentioned in [27]. Additionally, in practical microgrid applications, it is essential to ensure system stability during various scenarios, such as transitions between islanded and grid-connected modes and grid voltage dips. While [27] has proposed a DC-link controller for an islanded microgrid, it does not consider the impact of these scenarios on the DC-link voltage and the system's dq-axis currents. Therefore, the main objective of this paper is to present a DC-link controller with an integrated current-limiting function to ensure stable and secure operation throughout the microgrid's operation.

In this part, the design and application procedure of a lead compensator like DC-link controller for the

multi-inverter microgrid model, which is given in Figure 3, will be discussed. The proposed controller is embedded to the active power/frequency (P/f) droop control as given in (4)-(5).

$$P_{comp_i} = \left(\frac{s+K_1}{K_2s+K_3} \right) (V_{DClink_i}^2 - V_{DClink}^{*2}) \quad (4)$$

$$\omega_i = \omega_o - m_{pi}(P_{avgi} - P_{comp_i} - P_i^*) \quad (5)$$

$$V_{di} = V_o - n_q Q_i, \quad V_{qi} = 0 \quad (6)$$

Within the framework of the controller provided in (4) and the droop equations presented as (5) and (6), the letter i indicates the individual inverter number, P_{comp_i} denotes the power allocated for compensation, which is integrated into the P/f droop equation. V_{DClink_i} denotes the DC-link voltage for each individual inverter, while V_{DClink}^* refers to the standard DC-link voltage. The gains K_1 , K_2 , and K_3 are identified as the gains associated with the proposed controller. Furthermore, ω_i represents the angular frequency of each inverter, with ω_o indicating the nominal angular frequency. The term m_{pi} is defined as the frequency droop coefficient, P_{avgi} accounts for the average power, which is the power output of each inverter post-application of a low pass filter, and P_i^* is the active power set point designated for each inverter. Additionally, in the context of the reactive power/voltage (Q/V) droop equation (6), V_o and n_q are employed to represent the voltage set point and the voltage droop coefficient, respectively. This framework explains the relationships between controller dynamics and droop mechanisms in regulating power distribution and maintaining system stability across individual inverters within a microgrid configuration. The schematic representation of the proposed compensator is provided in Figure 4.

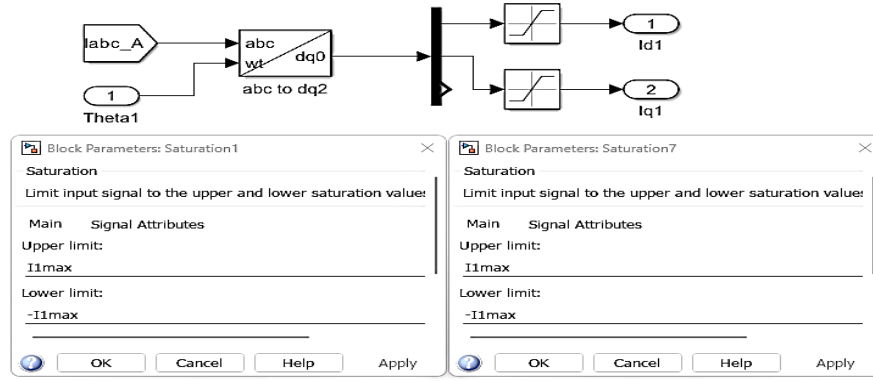


Figure 5. The adopted current limitation method (Kullanılan akım sınırlama yöntemi)

While the controller introduced in this study shares resemblance to the one described in reference [34], which focuses on the application to a singular inverter without detailed examination of the DC-side, the present proposal distinguishes itself through several innovative aspects tailored to microgrid applications. Specifically, this novel controller adopts a structure similar to a lead compensator, diverging significantly in its comprehensive integration with droop control equations, its applicability across various operational modes of the microgrid (including islanded operation, mode transitions, and grid-connected scenarios), and its implementation of a current limitation strategy. These distinctions emphasize the controller's unique contribution to enhancing microgrid performance by addressing the dynamic challenges inherent in multiple system states and ensuring stable, efficient operation through advanced control mechanisms. The emphasis on DC-link controller with droop control integration and current limitation method, in particular, highlights the controller's impact in managing power distribution and stability across the microgrid's different operational conditions.

The current limitation strategy employed within the proposed methodology utilizes an approach that individually saturates the d and q axis currents, as explained in [21]. For a comprehensive understanding of this technique, readers are encouraged to consult [21]. Figure 5 shows a schematic representation of the current-limiting method as implemented, providing a visual aid to better understand the mechanics behind this approach. This technique is integral to ensuring the proposed controller's effectiveness in maintaining

the system stability and performance by managing current flows within the microgrid infrastructure.

Both d and q axis current limits are given as I_{imax} and they can be calculated as [21]

$$I_{imax} = 1.2 * \sqrt{2} * P_i / (3 * V_{rms}^*) \quad (7)$$

P_i is the power rating of the individual inverters and V_{rms}^* is the rated root mean square (RMS) voltage.

5. SIMULATION AND COMPARISON STUDIES (SİMÜLASYON VE KARŞILAŞTIRMA ÇALIŞMALARI)

The effectiveness of the proposed DC-link controller was evaluated in this study by constructing a microgrid configuration with three parallel-connected three-phase inverters as given in Figure 3, as per [27], within Matlab/Simulink environment. In contrast to [27], which exclusively focused on standalone (SA) inverter functionality without addressing current limitations, the current study expands the analysis to involve both grid-connected (GC) scenarios and transitions between SA and GC modes. The specific parameters utilized for the simulated system and controllers for both proposed and comparison [27] systems are detailed in Table I. In the simulation studies, the performance of the proposed controller is displayed on the left-hand side (LHS) of Figures 6-10, while the performance of the existing system [27] is shown on the right-hand side (RHS).

The simulation is initiated in islanded mode, with the isolation switch open, at $t=0s$. The system quickly reaches steady-state conditions, as indicated by the stable behavior observed in Figures 6 and 7. Furthermore, there are no instances of overcurrent, as shown in the left-hand side of Figures 8, 9, and

Table 1. System and controller simulation parameters used in comparison studies (Karşılaştırma çalışmalarında kullanılan sistem ve kontrolör simülasyon parametreleri)

Parameters	Values	Parameters	Values	Parameters	Values
P_1^*	20 kW	P_2^*	10 kW	P_3^*	0 kW
$R_{Load 1}$	25 Ω	$R_{Load 2}$	20 Ω	$R_{Load 3}$	38 Ω
L_{fi}	2mH	R_{fi}	0.1 Ω	n	0.001
m_i	1.0472×10^{-4}	V_{rms}^*	220 V	f^*	50 Hz
V_{dclink}^*	750 V	R_{Line1}	0.23 Ω	L_{Line1}	0.32mH
R_{Line2}	0.35 Ω	L_{Line2}	1.85mH	C_{dc}	1.1mF
K_1	180	K_2	0.1	K_3	400
k_p	30	k_d	1	T_s	10^{-4}
ω_o	$2\pi f^*$	R_g	0.5 Ω	L_g	2.2mH
I_{1max}	51.43 A	I_{2max}	25.71 A	I_{3max}	0 A

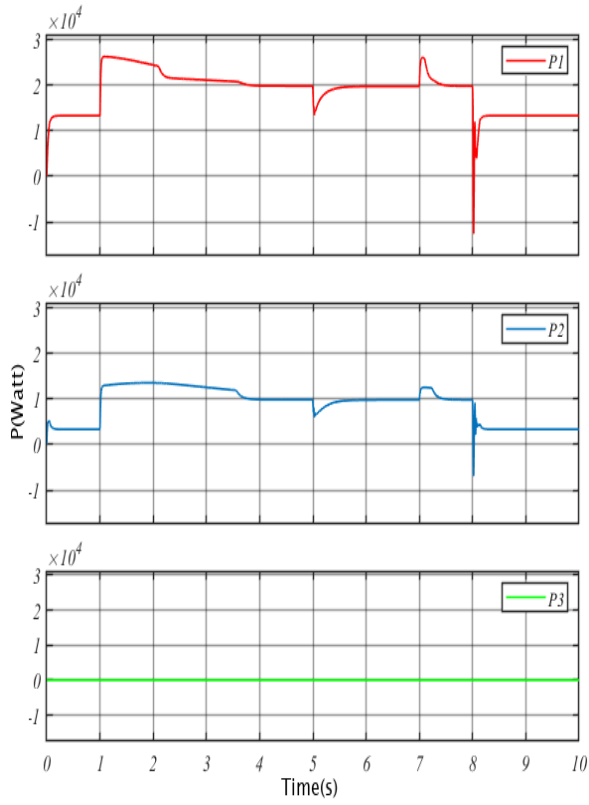
10. At $t=1s$, a seamless transition from SA to GC mode is achieved by closing the isolation switch. This transition does not cause any instability or current limit violation, as evidenced by the data presented in Figures 6-10. However, the existing approach leads to significant peaks in the active powers, DC voltages, d and q axis currents, which may result in protection relay triggers or damage to system components.

At $t=5s$, a 20% decrease in grid voltage is implemented as a means of evaluating the effectiveness of the controller in handling faulty conditions. Despite the severity of the situation, the controller successfully manages the regulation of the DC-link voltage, thereby maintaining the stability of the system. This is demonstrated in Figures 7-10. The temporary fluctuations in the DC-link voltages of the inverters, as shown in Figure 7, fall within acceptable limits [27], highlighting the system's capability to tolerate minor deviations.

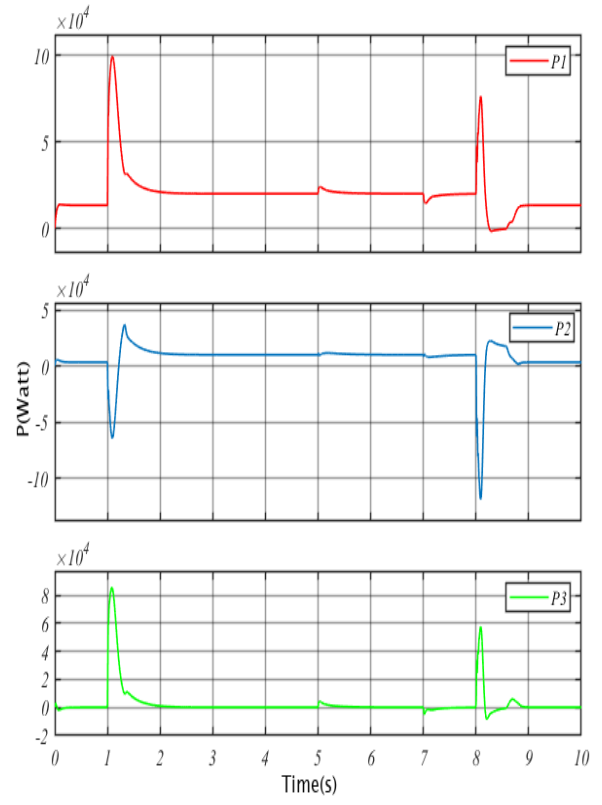
At $t=7s$, the grid voltage was restored, resulting in the system reverting to the SA mode at $t=8s$. This transition was successfully managed by the proposed method without any violation, effectively demonstrating its ability to handle normal and faulty operations without causing overcurrent or DC-link voltage issues. However, it should be noted that the

existing method [27] lacks the capability to limit the DC-link voltages and d and q inverter currents. The simulation ends at $t=10s$.

A comparative analysis was conducted between the controller proposed in this study and an existing method outlined in [27]. Results reveal significant advantages of the proposed controller, particularly in the regulation of DC-link voltage and current limitation, across a variety of operational scenarios. Overall, the proposed controller demonstrates superior performance in managing DC-link voltage and limiting system currents throughout the microgrid's operation. Such improvements are critical in ensuring the reliability and efficiency of microgrids, especially with varying grid conditions.

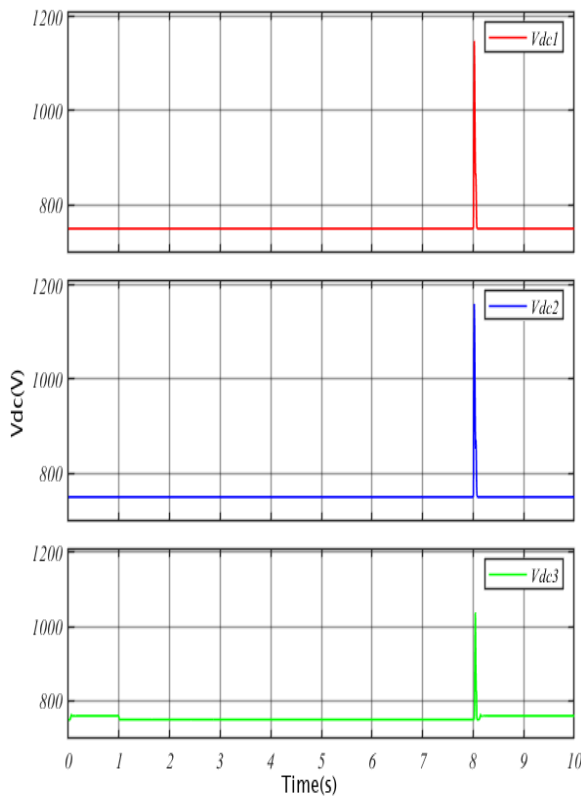


a. Proposed controller (Önerilen kontrolör)

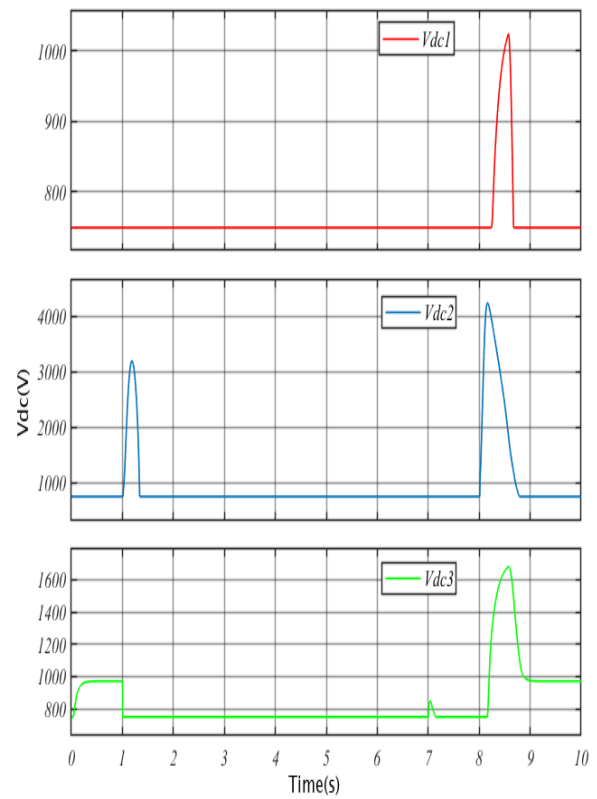


b. Existing controllers (Mevcut kontrolör)

Figure 6. Active power outputs of individual inverters (Eviricilerin herbirinin aktif güç çıkışları)

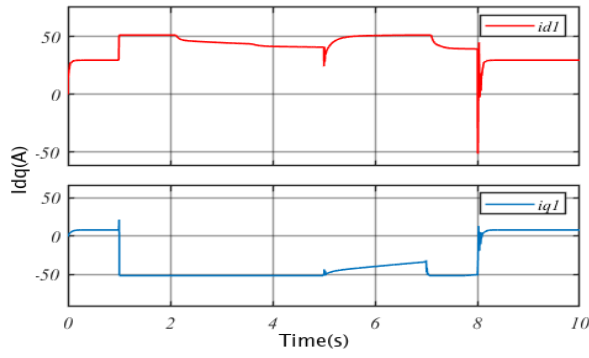


a. Proposed controller (Önerilen kontrolör)

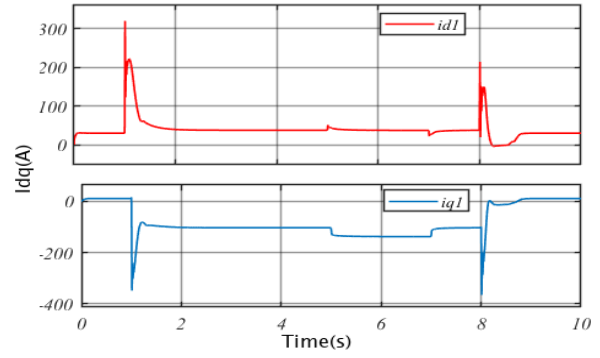


b. Existing controllers (Mevcut kontrolör)

Figure 7. DC-link voltages of individual inverters (Eviricilerin herbirinin DC-link voltajları)

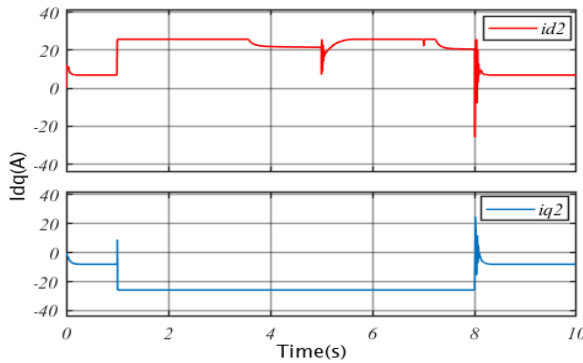


a. Proposed controller (Önerilen kontrolör)

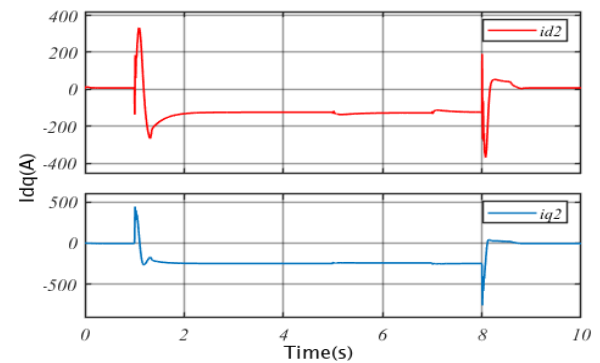


b. Existing controller (Mevcut kontrolör)

Figure 8. d and q axis currents of inverter 1 (1. Eviricinin d ve q eksen akımları)

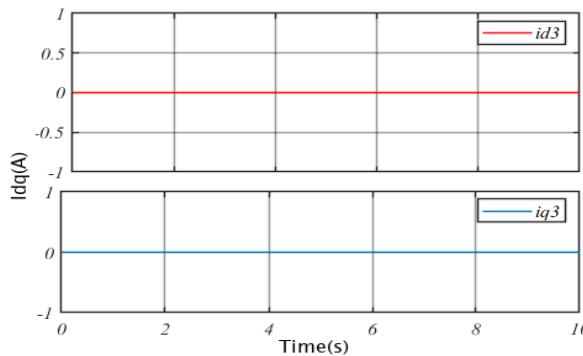


a. Proposed controller (Önerilen kontrolör)

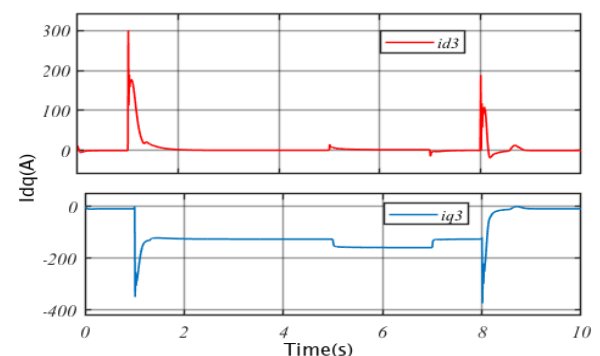


b. Existing controller (Mevcut kontrolör)

Figure 9. d and q axis currents of inverter 2 (2. Eviricinin d ve q eksen akımları)



a. Proposed controller (Önerilen kontrolör)



b. Existing controller (Mevcut kontrolör)

Figure 10. d and q axis currents of inverter 3 (3. Eviricinin d ve q eksen akımları)

6. CONCLUSIONS (SONUÇLAR)

This study aimed to investigate a novel design for an AC microgrid utilizing parallel three-phase inverters. The main focus was to develop a unique controller capable of effectively regulating the DC-link voltage and implementing a current limitation method. This strategy effectively managed the dq-axis currents, ensuring system stability and mitigating abrupt changes in DC-link voltage and currents during grid disruptions and transitions. The simulations conducted using Matlab/Simulink effectively demonstrated the efficiency of the proposed controller in stabilizing the system,

reducing DC-link voltage oscillations, and maintaining dq-axis currents below the rated maximum values for each inverter. The obtained findings clearly illustrated the effectiveness of the proposed methodology in mitigating the undesirable effects of DC-link voltage fluctuations and dq-axis currents during mode transitions in multi-inverter systems. By applying the proposed approach, it was ensured that the specified limits for these parameters are consistently maintained, thereby preventing any potential risk of instability or violations in the system. In contrast, the existing approach demonstrated a tendency to exceed the prescribed limits, emphasizing the superiority of the

proposed methodology in this regard. Hence, the proposed approach can be accepted as a reliable solution for addressing the challenges associated with mode transitions in multi-inverter systems. These improvements significantly reduced the likelihood of triggering protection relays and surpassed the performance of an existing approach. This highlights the potential of the proposed controller to enhance microgrid resilience and

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 eder.

AUTHORS' CONTRIBUTIONS (YAZARLARIN KATKILARI)

Seyfullah DEDEOĞLU: He conducted the simulations, analyzed the results and performed the writing process.

Simülasyonları 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] D. Baimel, J. Belikov, J. M. Guerrero and Y. Levron, "Dynamic Modeling of Networks, Microgrids, and Renewable Sources in the dq0 Reference Frame: A Survey," *IEEE Access*, vol. 5, pp. 21323-21335, 2017, doi: 10.1109/ACCESS.2017.2758523.
- [2] J. M. Guerrero, J. C. Vasquez, J. Matas, L. G. de Vicuna and M. Castilla, "Hierarchical Control of Droop-Controlled AC and DC Microgrids—A General Approach Toward Standardization," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 58, no. 1, pp. 158-172, Jan. 2011, doi: 10.1109/TIE.2010.2066534.
- [3] T. Jin and M. Mechehoul, "Ordering Electricity via Internet and its Potentials for Smart Grid Systems," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 1, no. 3, pp. 302-310, Dec. 2010, doi: 10.1109/TSG.2010.2072995.

reliability. To this end, this study not only presented a significant advancement in microgrid control strategies but also provided compelling evidence of the proposed controller's ability to strengthen microgrid stability and operational efficiency. Its adaptability in managing various operational scenarios makes it a valuable tool for future microgrid management.

- [4] C. Parthasarathy, Katja Sirviö, H. Hafezi, and H. Laaksonen, "Modelling battery energy storage systems for active network management—coordinated control design and validation," *IET Renewable Power Generation*, vol. 15, no. 11, pp. 2426–2437, Apr. 2021, doi: <https://doi.org/10.1049/rpg2.12174>.
- [5] T. Morstyn, B. Hredzak and V. G. Agelidis, "Control Strategies for Microgrids With Distributed Energy Storage Systems: An Overview," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 9, no. 4, pp. 3652-3666, July 2018, doi: 10.1109/TSG.2016.2637958.
- [6] N. Liu, X. Yu, C. Wang, C. Li, L. Ma and J. Lei, "Energy-Sharing Model With Price-Based Demand Response for Microgrids of Peer-to-Peer Prosumers," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 32, no. 5, pp. 3569-3583, Sept. 2017, doi: 10.1109/TPWRS.2017.2649558.
- [7] L. Wang, D. Zhang, Y. Wang, B. Wu and H. S. Athab, "Power and Voltage Balance Control of a Novel Three-Phase Solid-State Transformer Using Multilevel Cascaded H-Bridge Inverters for Microgrid Applications," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 31, no. 4, pp. 3289-3301, April 2016, doi: 10.1109/TPEL.2015.2450756.
- [8] J. M. Guerrero, P. C. Loh, T. -L. Lee and M. Chandorkar, "Advanced Control Architectures for Intelligent Microgrids—Part II: Power Quality, Energy Storage, and AC/DC Microgrids," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 60, no. 4, pp. 1263-1270, April 2013, doi: 10.1109/TIE.2012.2196889.
- [9] S. Bella et al., "Circulating Currents Control for Parallel Grid-Connected Three-Phase Inverters," 2018 International Conference on Electrical Sciences and Technologies in Maghreb (CISTEM), Algiers, Algeria, 2018, pp. 1-5, doi: 10.1109/CISTEM.2018.8613377.
- [10] Keliang Zhou and Danwei Wang, "Relationship between space-vector modulation and

- three-phase carrier-based PWM: a comprehensive analysis [three-phase inverters]," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 49, no. 1, pp. 186-196, Feb. 2002, doi: 10.1109/41.982262.
- [11] F. Deng, W. Yao, X. Zhang, Y. Tang and P. Mattavelli, "Review of Impedance-Reshaping-Based Power Sharing Strategies in Islanded AC Microgrids," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 14, no. 3, pp. 1692-1707, May 2023, doi: 10.1109/TSG.2022.3208752.
- [12] Y. Han, X. Ning, P. Yang and L. Xu, "Review of Power Sharing, Voltage Restoration and Stabilization Techniques in Hierarchical Controlled DC Microgrids," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 149202-149223, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2946706.
- [13] Y. Han, H. Li, P. Shen, E. A. A. Coelho and J. M. Guerrero, "Review of Active and Reactive Power Sharing Strategies in Hierarchical Controlled Microgrids," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 32, no. 3, pp. 2427-2451, March 2017, doi: 10.1109/TPEL.2016.2569597.
- [14] X. Hou et al., "Distributed Hierarchical Control of AC Microgrid Operating in Grid-Connected, Islanded and Their Transition Modes," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 77388-77401, 2018, doi: 10.1109/ACCESS.2018.2882678.
- [15] Rahul Ranjan Jha, Suresh Chandra Srivastava, and M. Kumar, "Development of control schemes for a cluster of PV-integrated houses in islanded mode," *IET Renewable Power Generation*, vol. 11, no. 7, pp. 903-911, Feb. 2017, doi: <https://doi.org/10.1049/iet-rpg.2016.0048>.
- [16] F. Wu, X. Li, F. Feng and H. B. Gooi, "Multi-topology-Mode Grid-Connected Inverter to Improve Comprehensive Performance of Renewable Energy Source Generation System," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 32, no. 5, pp. 3623-3633, May 2017, doi: 10.1109/TPEL.2016.2589974.
- [17] D. Velasco de la Fuente, C. L. Trujillo Rodríguez, G. Garcerá, E. Figueres and R. Ortega Gonzalez, "Photovoltaic Power System With Battery Backup With Grid-Connection and Islanded Operation Capabilities," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 60, no. 4, pp. 1571-1581, April 2013, doi: 10.1109/TIE.2012.2196011.
- [18] F. Rahimi, A. Ipakchi and F. Fletcher, "The Changing Electrical Landscape: End-to-End Power System Operation Under the Transactive Energy Paradigm," *IEEE Power and Energy Magazine*, vol. 14, no. 3, pp. 52-62, May-June 2016, doi: 10.1109/MPE.2016.2524966.
- [19] X. Lin, Z. Liang, Y. Zheng, Y. Lin and Y. Kang, "A Current Limiting Strategy With Parallel Virtual Impedance for Three-Phase Three-Leg Inverter Under Asymmetrical Short-Circuit Fault to Improve the Controllable Capability of Fault Currents," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 34, no. 8, pp. 8138-8149, Aug. 2019, doi: 10.1109/TPEL.2018.2879191.
- [20] I. Sadeghkhan, M. E. Hamedani Golshan, J. M. Guerrero and A. Mehrizi-Sani, "A Current Limiting Strategy to Improve Fault Ride-Through of Inverter Interfaced Autonomous Microgrids," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 8, no. 5, pp. 2138-2148, Sept. 2017, doi: 10.1109/TSG.2016.2517201.
- [21] N. Bottrell and T. C. Green, "Comparison of Current-Limiting Strategies During Fault Ride-Through of Inverters to Prevent Latch-Up and Wind-Up," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 29, no. 7, pp. 3786-3797, July 2014, doi: 10.1109/TPEL.2013.2279162.
- [22] M. Farrokhhabadi et al., "Microgrid Stability Definitions, Analysis, and Examples," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 35, no. 1, pp. 13-29, Jan. 2020, doi: 10.1109/TPWRS.2019.2925703.
- [23] Y. Gui, F. Blaabjerg, X. Wang, J. D. Bendtsen, D. Yang and J. Stoustrup, "Improved DC-Link Voltage Regulation Strategy for Grid-Connected Converters," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 68, no. 6, pp. 4977-4987, June 2021, doi: 10.1109/TIE.2020.2989720.
- [24] S. Xu, Y. Xue and L. Chang, "Review of Power System Support Functions for Inverter-Based Distributed Energy Resources- Standards, Control Algorithms, and Trends," *IEEE Open Journal of Power Electronics*, vol. 2, pp. 88-105, 2021, doi: 10.1109/OJPEL.2021.3056627.
- [25] M. J. Morshed and A. Fekih, "A Novel Fault Ride Through Scheme for Hybrid Wind/PV Power Generation Systems," *IEEE Transactions on*

- Sustainable Energy, vol. 11, no. 4, pp. 2427-2436, Oct. 2020, doi: 10.1109/TSTE.2019.2958918.
- [26] Y. Wang and B. Ren, "Fault Ride-Through Enhancement for Grid-Tied PV Systems With Robust Control," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 65, no. 3, pp. 2302-2312, March 2018, doi: 10.1109/TIE.2017.2740858.
- [27] W. Issa, Faris Al-naemi, G. Konstantopoulos, Sulieman Sharkh, and M. Abusara, "Stability Analysis and Control of a Microgrid against Circulating Power between Parallel Inverters," *Energy Procedia*, vol. 157, pp. 1061-1070, Jan. 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.11.273>.
- [28] A. Qazi et al., "Towards Sustainable Energy: A Systematic Review of Renewable Energy Sources, Technologies, and Public Opinions," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 63837-63851, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2906402.
- [29] S. Parhizi, H. Lotfi, A. Khodaei and S. Bahramirad, "State of the Art in Research on Microgrids: A Review," *IEEE Access*, vol. 3, pp. 890-925, 2015, doi: 10.1109/ACCESS.2015.2443119.
- [30] F. Nejabatkhah, Y. W. Li and H. Tian, "Power Quality Control of Smart Hybrid AC/DC Microgrids: An Overview," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 52295-52318, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2912376.
- [31] P. G. Arul, Vigna Kumaran Ramachandaramurthy, and R. K. Rajkumar, "Control strategies for a hybrid renewable energy system: A review," *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, vol. 42, pp. 597-608, Feb. 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.10.062>.
- [32] R. Domínguez, A. J. Conejo and M. Carrión, "Toward Fully Renewable Electric Energy Systems," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 30, no. 1, pp. 316-326, Jan. 2015, doi: 10.1109/TPWRS.2014.2322909.
- [33] W. R. Issa, M. A. Abusara and S. M. Sharkh, "Control of Transient Power During Unintentional Islanding of Microgrids," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 30, no. 8, pp. 4573-4584, Aug. 2015, doi: 10.1109/TPEL.2014.2359792.
- [34] L. Huang et al., "A Virtual Synchronous Control for Voltage-Source Converters Utilizing Dynamics of DC-Link Capacitor to Realize Self-Synchronization," *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 5, no. 4, pp. 1565-1577, Dec. 2017, doi: 10.1109/JESTPE.2017.2740424.

AlSi10Mg Alaşımının SLM Yöntemiyle Üretilmesinde Proses Parametrelerinin Yüzey Kalitesi Üzerindeki Etkisi

Arif Lütfi ÖZSOY¹ , Emine ŞİRİN² , Çağrı Vakkas YILDIRIM^{3*} , Murat SARIKAYA⁴ 

¹Türk Hava Kurumu Üniversitesi, Ankara Havacılık Meslek Yüksekokulu, Uçak Teknolojisi Bölümü, 06790, Etimesgut/ANKARA

²Düzce Üniversitesi, Gümüşova Meslek Yüksekokulu, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, 81850, Gümüşova/DÜZCE

³Erciyes Üniversitesi, Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Uçak Gövde ve Motor Bakımı Bölümü, 38030, Melikgazi/KAYSERİ

⁴Sinop Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 57000, SİNOP

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 15/02/2024
Düzeltilme: 06/03/2024
Kabul: 14/03/2024

Anahtar Kelimeler

Eklemler İmalat
Seçici Lazer Ergitme
AlSi10Mg
Yüzey Pürüzlülüğü,
Taguchi

Article Info

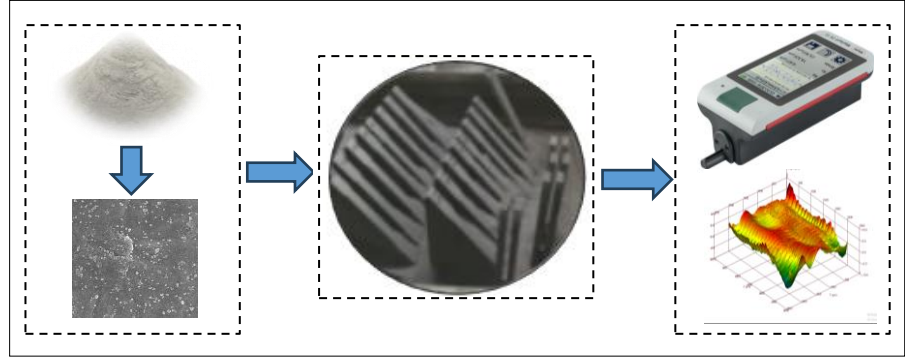
Research article
Received: 15/02/2024
Revision: 06/03/2024
Accepted: 14/03/2024

Keywords

Additive Manufacturing
Selective Laser Melting
AlSi10Mg
Surface Roughness
Taguchi

Grafik Özet (Graphical/Tabular Abstract)

Bu çalışmada farklı seviyelerde lazer gücü, tarama mesafesi, lazer çapı ve tarama hızı parametreleri kullanılarak SLM yöntemi ile AlSi10Mg alaşımı üretilerek, bu üretim parametrelerinin yüzey kalitesine etkileri incelenmiştir. /In this study, AlSi10Mg alloy was produced by the SLM method using different levels of laser power, scanning distance, laser diameter and scanning speed parameters, and the effects of these production parameters on the surface quality were examined.



Şekil A: Grafik özet / Figure A: Graphical abstract

Önemli noktalar (Highlights)

- SLM yöntemi ile AlSi10Mg alaşımı üretilirdi./ AlSi10Mg alloy was produced by SLM method.
- Üretim sırasında farklı üretim parametreleri kullanıldı./ Different production parameters were used during production.
- Üretim sırasında kullanılan farklı üretim parametrelere bağlı olarak yüzey kalitesi değerlendirildi./Surface quality was evaluated depending on different production parameters used during production.
- Taguchi optimizasyon tekniği kullanıldı./ Taguchi optimization technique was used

Amaç (Aim): Farklı üretim parametreleri kullanılarak üretilen AlSi10Mg alaşımının yüzey kalitesinin incelenmesi amaçlanmıştır./ It was aimed to examine the surface quality of the AlSi10Mg alloy produced using different production parameters.

Özgünlük (Originality): Lazer gücü, tarama mesafesi, lazer çapı ve tarama hızı gibi üretim parametreleriyle üretilen AlSi10Mg alaşımının yüzey kalitesi incelenmiştir./ The surface quality of the AlSi10Mg alloy produced with production parameters such as laser power, scanning distance, laser diameter and scanning speed was examined.

Bulgular (Results): Sonuçların analizine göre, en iyi yüzey pürüzlülüğü değerinin 360 W lazer gücü, 0,13 mm tarama mesafesi, 0,10 mm lazer çapı, 1200 mm/s tarama hızı kombinasyonu kullanılarak elde edildiği tespit edilmiştir./According to the analysis of the results, it was determined that the best surface roughness value was obtained using the combination of 360 W laser power, 0.13 mm scanning distance, 0.10 mm laser diameter, 1200 mm/s scanning speed.

Sonuç (Conclusion): Genel olarak değerlendirildiğinde en iyi yüzey kalitesi elde edilmesi bakımından yüksek lazer gücü ve düşük lazer çapı değerinin daha etkili olduğu tespit edilmiştir./ When evaluated in general, it has been determined that high laser power and low laser diameter values are more effective in obtaining the best surface quality.



AlSi10Mg Alaşımının SLM Yöntemiyle Üretilmesinde Proses Parametrelerinin Yüzey Kalitesi Üzerindeki Etkisi

Arif Lütfi ÖZSOY¹ , Emine ŞİRİN² , Çağrı Vakkas YILDIRIM^{3*} , Murat SARIKAYA⁴

¹Türk Hava Kurumu Üniversitesi, Ankara Havaçılık Meslek Yüksekokulu, Uçak Teknolojisi Bölümü, 06790, Etimesgut/ANKARA

²Düzce Üniversitesi, Gümüşova Meslek Yüksekokulu, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, 81850, Gümüşova/DÜZCE

³Erciyes Üniversitesi, Havaçılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Uçak Gövde ve Motor Bakımı Bölümü, 38030, Melikgazi/KAYSERİ

⁴Sinop Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 57000, SİNOP

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 15/02/2024
Düzeltilme: 06/03/2024
Kabul: 14/03/2024

Anahtar Kelimeler

Eklemler İmalat
Seçici Lazer Ergitme
AlSi10Mg
Yüzey Pürüzlülüğü,
Taguchi

Öz

Eklemler imalat (Eİ) yöntemi, dijital bir 3D model kullanılarak nesnelerin katman katman biriktirilmesiyle nihai ürünleri ortaya çıkaran bir üretim yöntemidir. Eİ sayesinde geleneksel yöntemle üretilmesi neredeyse imkansız olan karmaşık geometri ürünler üretilebilir. Dahası, yüksek malzeme israfı ve özel takımlara duyulan ihtiyaç gibi geleneksel üretimin diğer sınırlamaları da elimine edilebilir. Bununla beraber, Eİ yönteminin bazı dezavantajları vardır ve yüzey kalitesi bu dezavantajlardan biridir. Optimum yüzey kalitesinin elde edilmesi için ilk yapılması gereken de optimum üretim parametrelerinin belirlenmesidir. Bu çalışmada, bu amaca yönelik olarak yapılan deneylerde, farklı üretim parametreleri ve seviyeleri kullanılarak AlSi10Mg alaşımı üretilmiştir. Üretim esnasında Eİ yöntemlerinden birisi olan Seçici Lazer Ergitme (SLM) yöntemi tercih edilmiştir. Böylece bazı üretim parametreleri ve seviyelerinin ortalama yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisinin araştırılması amaçlanmıştır. Üretim parametresi olarak lazer gücü, tarama mesafesi, tarama hızı, lazer çapı ve her bir parametreye ait dört seviye seçilmiştir. Üretim maliyetlerini ve deney sayısını azaltmak için Taguchi L₁₆ dikey dizinine göre deney tasarımı yapılmıştır. Üretilen numunelere ait ortalama yüzey pürüzlülüğü (Ra) ölçülmüş ve daha detaylı bir yüzey analizi yapabilmek için yüzeylerin topoğrafya haritaları elde edilmiştir. Üretim parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisini göstermek için ANOVA analizi yapılmıştır. Deney sonuçlarının analiziyle birlikte, en iyi yüzey pürüzlülüğü değerinin 360 W lazer gücü, 0,13 mm tarama mesafesi, 0,10 mm lazer çapı, 1200 mm/s tarama hızı kombinasyonu kullanılarak elde edildiği tespit edilmiştir.

Effect of Process Parameters on Surface Quality in the Production of AlSi10Mg Alloy by SLM Method

Article Info

Research article
Received: 15/02/2024
Revision: 06/03/2024
Accepted: 14/03/2024

Keywords

Additive Manufacturing
Selective Laser Melting
AlSi10Mg
Surface Roughness
Taguchi

Abstract

Additive manufacturing (AM) is a manufacturing method that creates final products by depositing objects layer by layer using a digital 3D model. Thanks to AM, products with complex geometries that are almost impossible to manufacture using traditional methods can be produced. Additionally, other limitations of traditional manufacturing, such as high material waste and the need for special tooling, can be eliminated. However, the AM method has some disadvantages, and surface quality is one of them. In order to obtain optimum surface quality, the first thing to do is to determine the optimum production parameters. In this study, AlSi10Mg alloy was produced using different production parameters and levels in experiments conducted for this purpose. Selective Laser Melting (SLM) method, one of the AM methods, was preferred during production. Thus, it was aimed to investigate the effect of some production parameters and levels on average surface roughness. As production parameters, laser power, scanning distance, scanning speed, laser diameter and four levels for each parameter were selected. Experimental design was made according to the Taguchi L₁₆ vertical array to reduce production costs and the number of experiments. The average surface roughness (Ra) of the produced samples was measured and topographic maps of the surfaces were obtained in order to perform a more detailed surface analysis. ANOVA analysis was performed to show the effect of production parameters on surface roughness. From the analysis of results, it was determined that the best surface roughness value was obtained using the combination of 360 W laser power, 0.13 mm scanning distance, 0.10 mm laser diameter, 1200 mm/s scanning speed.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Alüminyum alaşımları, uçak yapılarında 1920'lerin sonlarından beri ana gövde malzemesi olarak kullanılmaktadır. Kompozit yapıların artan kullanımıyla beraber gelecekte rolünün azalacağı öngörülse de kompozit malzemelerin yüksek maliyeti, imalatının emek isteyen yoğun süreçlere sahip olması gibi önemli nedenlerden dolayı ana gövde yapısı ve bazı kritik parçalar için kritik malzeme olarak kullanılmaya devam edecektir [1]. Uçak yapılarında alüminyumun tercih edilmesindeki en önemli sebepler ucuz, hafif ve doğru alaşım ve/veya ısıl işleme birlikte oldukça yüksek mukavemet seviyelerine çıkmasıdır [2]. Alüminyum alaşımları sadece havacılık değil birçok mühendislik uygulaması için ideal bir malzeme grubudur. Bunun en büyük nedenleri ise hafiflik, yüksek korozyon direnci, tasarım kolaylığı, yüksek dövülebilirlik ve bunların mükemmel seviyede kombinasyonu olarak sıralanabilir [3]. Bu malzeme grubunun en bilinenlerinden biri de AlSi10Mg alaşımıdır. Al-Si-Mg sistemindeki ötektik altı bir alaşım olan AlSi10Mg alaşımı, yüksek mekanik özellikleri, hafifliği, korozyon direnci ve düşük termal genleşme özelliği nedeniyle havacılık, denizcilik, nükleer tesis uygulamaları ve otomotiv gibi kritik sektörlerde yoğun olarak tercih edilmektedir [4]. Bunların dışında, düşük ağırlık, yüksek mekanik özellik istenen birçok sektör için de alternatif malzeme tanımına uymaktadır [5]. Bu özelliklerinin yanında iyi kaynak edilebilirliğe sahip olması da endüstrilerin tercih etme nedenleri arasındadır [6]. Bunlara ek olarak, günümüz uçak ve havacılık endüstrisinin en önemli sorunlarından birisi uçuş maliyetlerini düşürmektir. Bu aşamada en büyük esneklik ana gövdeyi oluşturan malzeme yapısını hafifletmek olabilir. Örneğin, gözenekli yapıya sahip bir malzeme çok daha hafif olacaktır ve uçak gövdesinin ağırlığında önemli iyileştirmeler sunacaktır. Bu nedenle açık hücreli gözenekli yapıların üretilmesinde en çok tercih edilen yöntemlerden biri de eklemeli imalat yöntemidir. Ayrıca, uçak bileşenleri, yüksek standartlara sahip birçok parçadan oluşmaktadır. Bu parçaların da yalnızca %10'u düzenli değişime ihtiyaç duymaktadır. Bununla beraber, hemen her parçası da ön görülemeyen bir şekilde arızalanabilmekte ve değişimleri gerekmektedir. Böyle bir durumda, değişimi ön görülemeyen parçaların üretilmesi ve stokta bulunması önemli bir maliyet olarak ortaya çıkmaktadır ve bazı zamanlar tedarik zincirini kilitleyebilmektedir. İhtiyaç halinde üretilmesi durumunda ise klasik imalat yöntemlerinin kullanımında süre birkaç ayı bulabilmekte ve maliyetleri artırabilmektedir. Bu nedenlerden ötürü

Eİ teknolojisi uçak parçalarının imalatı için önemli bir alternatif olarak görülmektedir [7].

ASTM F42 komitesine göre eklemeli imalat, çıkarmalı imalatın tersine 3D model verilerinden nesnelere yapmak için malzemelerin katman katman birleştirilmesi olarak tanımlanmaktadır [8]. Son yıllarda katmanlı imalat teknolojisi hızla sanayileşmeye doğru gitmektedir. Örneğin, Amerika Birleşik Devletleri ve Almanya'daki büyük otomotiv şirketlerinin %75'i parça üretimi için Eİ teknolojisini kullanmaya başlamıştır. 2019 yılında yayınlanan bir rapora göre Eİ pazarının önümüzdeki 5 yıl için tahmini ortalama yıllık büyümesi %23'ün üzerindedir [9]. Bu teknoloji sayesinde talaşlı imalat veya döküm yöntemiyle üretilmesi zor olan karmaşık geometriye parçalar gözenekli, içi boş ve hafif olarak rahatlıkla üretilebilir. Böylelikle, geleneksel imalat yöntemlerinin vazgeçilemez bir parçası olan birçok kısıtlama ortadan kaldırılabilir ve çok daha esnek bir üretim süreci hayata geçirilebilir [4]. Ayrıca, Eİ teknolojisi 2025 yılına kadar CO₂ emisyonlarını 130,5-525,5 Mt ve tedarik zinciri maliyetlerini küresel olarak 170 ila 593 milyar dolar arasında düşürebileceği öngörülmektedir [10]. Wohlers Report 2021'e göre, Covid-19 salgınına rağmen, 2020'de %7,5'lik bir endüstri genişlemesi olmuş ve Eİ makineleri ve sistem yükseltme satışları yaklaşık 12,8 milyar dolara ulaşmıştır. Büyüme, son 10 yıldaki ortalama %27,4'tür [11]. Bu veriler Eİ sektörünün potansiyelinin daha net görülmesini sağlamaktadır. Eİ yöntemi kullanılarak yapılan parçalar sayesinde uçak yapılarındaki ağırlığın ve karbon emisyon oranının azaltıldığı çeşitli çalışmalarda rapor edilmiştir. Örneğin, Autodesk araştırma bilimcisi Andreas Bastian 3D baskı teknolojisini kullanarak uçak koltuklarının çerçevesini hafifletmiş ve böylece karbon emisyonu, yakıt tasarrufu gibi konularda önemli iyileştirmeler sunmuştur. 2015 yılında Autodesk ve Airbus arasında yapılan bir iş birliğine göre eklemeli imalat yöntemi kullanılarak 3D baskılı bir uçak kabini yapısal bileşeni oluşturulmuştur. Şu anda Federal Aviation Administration (FAA) testinden geçmekte olan bu bileşenin 96000 arabayı trafikten kaldırmaya eşit derecede karbon emisyonunu azalttığı iddia edilmektedir [12]. Rolls-Royce firması bazı jet motoru parçalarının Eİ teknolojisi ile üretilmesini planlarken 2013 yılında NASA Eİ teknolojisi ile üretilmiş parçalara sahip roket motorunu test etmiştir. Dahası, Amerikan Donanması F/A-18 (Hornet) jeti ve JSF için birçok plastik parçayı Eİ teknolojisi kullanarak üretmiştir. Bir başka sektörel uygulamada LZN, ILAS ve Airbus'tan oluşan şirketler birliği kabin içinde bulunan mutfak, lavabo, dolap gibi yapıları uçağın ana yapısına

tutturan braketleri yeniden tasarlayarak Eİ teknolojisi ile üretmiş ve eskisine göre daha iyi statik dayanım özellikleri elde etmiştir [13]. Tomlin ve Meyer [14], Airbus A320 nacelle hinge destek parçasını yeniden tasarlayarak Eİ teknolojisi ile üretmişler ve ağırlık açısından önemli iyileştirmeler elde ettiklerini iddia etmişlerdir. General Electric Aviation (GE) firması yeni GE9X motor serisi için birçok bileşeni Eİ teknolojisi ile üretmektedir. Günümüzde hali hazırda birçok hava aracının önemli sayıda yapısal parçası Eİ teknolojisi kullanılarak üretilmektedir [15]. Bununla beraber, Eİ teknolojisi yeni bir teknoloji olduğu için optimum sonuçları veren parametre gruplarının henüz tam netleşmediği ve bu yöndeki çalışmaların birçok araştırmacı için ilgi odağı olduğu literatürde görülmektedir.

Boschetto ve diğ. [16] SLM yöntemini kullandıkları çalışmalarında proses parametrelerini değiştirerek AlSi10Mg numuneleri üretmişler ve proses parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Geliştirdikleri model sayesinde yüzey pürüzlülüğü üzerinde önemli iyileşmeler kaydettiklerini sunmuşlardır. Gupta ve diğ. [4], SLM yöntemiyle AlSi10Mg alaşımı üretmişler ve tabaka rotasyonunun mikro yapı, tane boyutu, yüzey topografyası, artık gerilmeler ve mekanik özellikler üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Bu çalışma esnasında tabaka dönüş değeri olarak üç farklı açı (0° , 45° ve 90°) kullanmışlardır. Mikro yapısal analiz için EBSD, SEM ve XRD kullanan araştırmacılar en iyi sonucu 90° 'nin verdiğini iddia etmişlerdir. Tane boyutu, kalıntı gerilmeler ve yüzey pürüzlülüğü değerlerinin de tabaka dönüş açısı değerlerinin artmasıyla azaldığını tespit etmişlerdir. Wang ve diğ. [17], SLM yöntemiyle üretilen AlSi10Mg alaşımının yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkilerini lazer enerji yoğunluğu yöntemi ile incelemişlerdir. İlk başlarda düşen yüzey pürüzlülüğü ve gözenekliliğin, enerji yoğunluğunun artmasıyla yavaş yavaş arttığını gözlemlemişlerdir. Majeed ve diğ. [18], AlSi10Mg malzemenin SLM yöntemiyle üretiminde lazer gücü, tarama hızı ve tarama mesafesi gibi işlem parametrelerinin; yüzey kalitesine olan etkilerini araştırmışlardır. İşlem parametrelerinin yüzey kalitesini etkilediğini tespit eden araştırmacılar lazer gücünün artmasıyla yüzey pürüzlülüğünde artış gözlemlemişlerdir. Subbiah ve diğ. [19], SLM yöntemiyle ürettikleri AlSi10Mg alaşımında destek yapıları, tarama yönü ve son işlemin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisini incelemişlerdir. SLE yöntemiyle yapılan ürünlerde destek yapısının

önemini vurgulayan araştırmacılar, sonlu eleman analizini kullanarak optimum sonucu verecek destek türünü belirlemişler ve numune üretiminde bu yöntemi uygulamışlardır. Deney sonuçlarına göre yüzey pürüzlülüğü değerlerini analiz eden araştırmacılar SLM yönteminin geleneksel yöntemle alternatif olabileceğini iddia etmişlerdir. Fiegl ve diğ. [20], AlSi10Mg alaşımının SLM yöntemiyle üretilmesi esnasında proses parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü, prozite ve mekanik özellikler üzerindeki etkisini incelemek için bir dizi deney yapmışlardır. Numune üretimi esnasında giriş parametresi olarak katman kalınlığı, hacim enerjisi, nitrojen atmosferi ve ada tarama stratejisini seçen araştırmacılar kapsamlı bir araştırma yapmışlardır. Deney sonuçlarını analiz eden araştırmacılar proses tasarımı ve bileşen yerleşiminin ürün kalitesi üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu rapor etmişlerdir. Caiazza ve diğ. Inconel 718 malzemeyi lazer toz füzyon yatağı yöntemi ile üreterek hacimsel enerji yoğunluğunun yüzey pürüzlülüğü, gözenek sayısı ve boyutu ve mikrosertlik özelliği üzerine etkilerini incelemişlerdir. Hacimsel enerji yoğunluğunun artmasıyla yüzey pürüzlülüğünün azaldığını tespit etmişlerdir. İstatistiksel analiz sonucunda hacimsel enerji yoğunluğunun yüzey pürüzlülüğünde etkili parametre olduğunu gözlemlemişlerdir [21]. Burada bir kısmı verilen çalışmaların haricinde literatürde çok fazla SLM yöntemiyle numune üretildiği ve ısı transferi, yorulma, yüzey kalitesi, vb. gibi özelliklere bakıldığı görülecektir. Bir başka deyişle, Eİ yöntemiyle AlSi10Mg alaşımının üretilmesi oldukça yaygındır. Çünkü AlSi10Mg alaşımının düşük erime noktası ve ötektik bileşimi lazer tabanlı sistemler tarafından kolayca işlenmesini sağlamaktadır [22]. Bu alaşım otomotiv, denizcilik, havacılık ve nükleer sektörler gibi farklı uygulama alanlarında büyük potansiyele sahiptir. Bu nedenle Al alaşımlarının, özellikle AlSi10Mg'nin SLM yöntemi ile üretimi araştırma konuları arasındadır.

Eklemeli imalat teknolojisi çok yeni bir imalat yöntemi olduğu için optimum işleme parametrelerinin henüz netleşmediği literatürdeki çalışmalardan anlaşılmaktadır. Doğru parametre kombinasyonunun elde edilmesi malzemelerin, makinelerin ve tasarımların çok daha verimli bir şekilde kullanılmasına olanak tanıyacağından oldukça önemlidir. Bu çalışmada, dört farklı seviyeye sahip lazer gücü, tarama mesafesi, lazer çapı ve tarama hızı parametreleri seçilerek bitmiş ürünün yüzey kalitesi üzerindeki etkileri

incelenmiştir. Doğrudan parametre etkilerinin görülmesi amaçlandığından deney numunelerine ısıtma işlemi, yüzey kalitesini artırma vb. gibi ikincil işlemler yapılmamıştır. Çalışmaya ait deneysel prosedür, tartışma ve sonuçlar aşağıda başlıklar halinde detaylı olarak sunulmuştur.

2. MATERYAL VE METOD (MATERIAL AND METHOD)

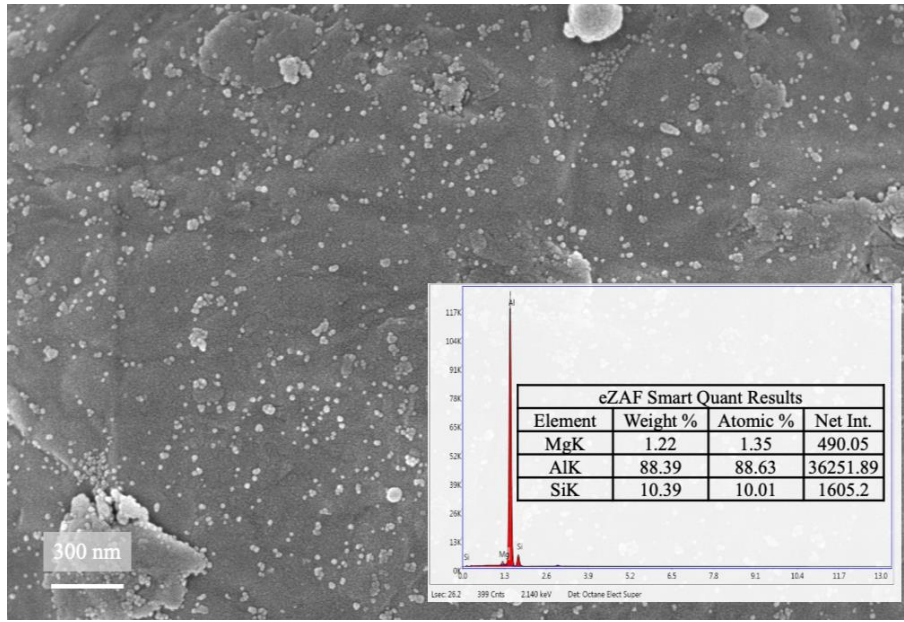
2.1. AlSi10Mg Numunelerin Üretimi (Production of AlSi10Mg Samples)

SLM işlemi, seçici lazer sintereleme (SLS) ve elektron ışını eritme (EBM) gibi toz yataklı füzyon teknolojileri sınıfına aittir. Bu işlemde, genellikle 20-60 µm kalınlığındaki bir toz tabakası, yeniden kaplayıcı bıçak olarak bilinen bir toz yayma sistemi kullanılarak üretim alanına yayılır. Toz tabakası, önceden ısıtılabilen üretim platformuna yerleştirildiğinde toz yatağına bir lazer yönlendirilir ve malzemeyi kaynak yapar gibi eritir. Isı enerjisine maruz kalan malzeme, tabaka kalınlığından daha büyük bir derinliğe kadar eritilir. Bir katman tamamlandıktan sonra üretim platformu bir katman kadar alçaltılır ve yeni bir toz katman serilir. Serilen toz katmanı daha sonra düzleştirilir ve eritilir. Bu işlem nihai ürün tamamlanmaya kadar devam eder [23]. Bu çalışmada, SLM yöntemi tercih edilmiş ve AlSi10Mg alaşımı bu yöntem aracılığıyla

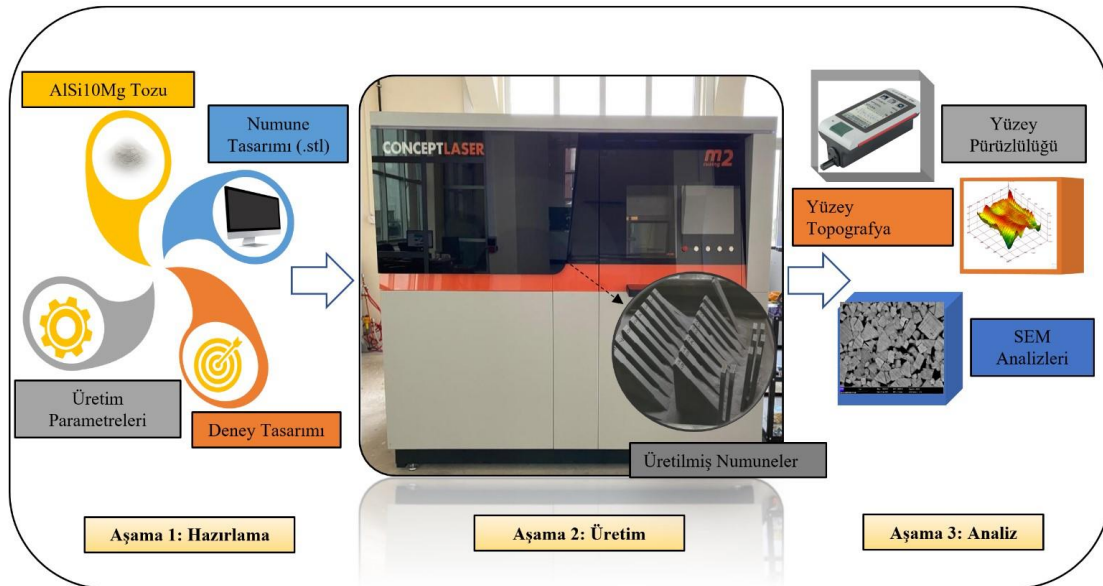
üretimiştir. Kimyasal bileşimi Tablo 1'de gösterilen AlSi10Mg tozu, EKTAM (Türkiye) aracılığıyla Concept Laser (Almanya) firmasından temin edilmiştir. Şekil 1 kullanılan tozun taramalı elektron mikroskobu (SEM) aracılığıyla elde edilmiş görüntüsünü ve EDX analizi sonucunu göstermektedir. Şekil incelendiğinde toz parçacıklarının küresel olmadığı açık bir şekilde görülmektedir. EDX analizi sonucu toza ait kimyasal içeriğin teoriyle uyumlu olduğu anlaşılmıştır. Ayrıca, partikül boyutu dağılımı toz yataklı sistemlerde tozun akışkanlığını ve erime davranışını etkilediği için boyut dağılımı analiz edilmiştir. Analiz neticesinde ortalama partikül boyutunun ~35 µm civarında olduğu tespit edilmiştir. Sonuç olarak, düzensiz morfolojiye rağmen, tozun SLM için makul bir akışkanlığı olduğu anlaşılmıştır. Tozlarla ilgili bilgilerin kesinleşmesinden sonra numune üretimine geçilmiştir. Numunelerin üretimi esnasında ürün işleme kapasitesi 250x250x350 mm (x, y, z) olan M2 Cusing Concept Laser SLM tezgâhı kullanılmıştır. Numuneler bilgisayar ortamında katı cisim modelleme yazılımlarından birinde tasarlanmıştır. Tasarlanan katı model verisinin üç boyutlu yazıcı arayüzüne aktarımı için .STL formatına dönüştürülerek belirlenen parametreler çerçevesinde üretimi gerçekleştirilmiştir. Üretilen numunelerin desteklerinin temizlenmesi için tel erazyon tezgâhı kullanılmıştır. Çalışmaya ait deney seti Şekil 2'de gösterilmektedir.

Tablo 1. AlSi10Mg kimyasal bileşimi (% ağırlıkça) (Chemical composition of AlSi10Mg (% by weight))

Si	Fe	Pb	Mn	Mg	Ni	Zn	Sn	Ti	Al
9,92	0,137	0,004	0,004	0,291	0,04	0,01	0,003	0,006	Geri kalan



Şekil 1. AlSi10Mg tozunun SEM görüntüsü ve EDX analizi (SEM image and EDX analysis of AlSi10Mg powder)



Şekil 2. Deney seti (Experimental setup)

2.2. Ölçümler (Measurements)

Deney numunelerinde ortalama yüzey pürüzlülüğü ölçümü için Mahr Marsurf PS 10 taşınabilir yüzey pürüzlülük cihazı kullanılmıştır. Ölçümler ISO 4287 [24] standardına göre yapılmış olup ortalama yüzey pürüzlülük değerleri (Ra) dikkate alınmıştır. Ortalama yüzey pürüzlülüğü ölçülürken üretim yönünde rastgele bölgelerden 3 ölçüm yapılmış ve bu değerlerin ortalaması alınarak ortalama yüzey pürüzlülük değeri elde edilmiştir. Yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı her deney öncesinde kalibrasyon bloklarıyla kalibre edilmiştir. Ayrıca, üretilen numunelere ait yüzey topografya haritasının çıkarılması ve daha sağlıklı bir yüzey kalitesi analizi

yapmak için Phase View marka optik yüzey profilometre kullanılmıştır. Yüzey profilometre, kamera ve sensörler yardımıyla yüzeylerin optik fotoğraflarını çekerek üç boyutlu yüzey topografyasına, yazılım vasıtasıyla dönüştüren bir cihazdır. Çalışmanın bu safhasında optik üç boyutlu yüzey topografya ölçümleri, yüzeylerden rastgele seçilen $2,5 \times 2,5$ mm boyutlarındaki alanlarda gerçekleştirilmiştir.

2.3. Deneysel Tasarım ve Analizler (Experimental Design and Analyzes)

Deney numunelerinin üretimi için planlanan deney setinde lazer gücü, tarama mesafesi, lazer çapı ve tarama hızının numune özellikleri üzerindeki etkisinin incelenmesi amaçlanmıştır. Bu amaca yönelik olarak Taguchi L_{16} dikey dizini kullanılarak deney tasarımı yapılmıştır. Deney setinde kullanılan parametre ve seviyeler Tablo 2’de sunulurken deney tasarımı Tablo 3’te sunulmuştur. Deney setine ait sabit parametre değerleri; tarama açısı 45° , ada tarama stratejisi ve katman kalınlığı 0,025 mm olarak belirlenerek argon gazı atmosferinde üretilmiştir. Klasik deneysel tasarım yöntemlerinin kullanımında üretim parametreleri ve üretim seviyelerinin artması deney sayısında artışa neden olduğundan maliyeti de doğru oranda etkilemektedir. Taguchi yönteminde ise üretim ve tasarım süreçlerinde zamandan tasarruf edildiği gibi maliyetten de önemli ölçüde kar edilmektedir. Taguchi yönteminin asıl amacı tasarımda ve parametrede kaliteli üretimi gerçekleştirerek deney sayısını minimuma indirmektir. Ayrıca bu yöntem ile klasik deneysel yöntemlerde kontrolü sağlanamayan, dikkate alınmayan ve bu durumlara

bağlı değişken faktörlerin de denetimi yapılabilmektedir. Taguchi yönteminin bahsedilen olumlu özellikleri göz önüne alınarak bu çalışmanın deney setinde kullanılmıştır. Taguchi yönteminde kontrol faktörlerinin kalitesini belirlemek için deney sonuçları S/N (sinyal/gürültü) oranına dönüştürülmektedir. Sinyal (S) üretim tasarımındaki süreçte uygun koşulları, gürültü (N) ise çeşitliliğe neden olacak bütün faktörleri özümlemektedir. S/N oranları analiz edilirken niteliğinin cinsine bağlı olarak üç farklı değer bulunmaktadır. Bunlar “en küçük en iyi”, “nominal en iyi” ve “en büyük en iyi” biçimindedir [25]. Deney setinde amaç en düşük yüzey pürüzlülük değerini hesaplamak olduğundan yüzey pürüzlülüğü için "en küçük en iyi" (Eşitlik. 1) yaklaşımı dikkate alınmış ve hesaplamalar aşağıdaki formüllere göre yapılmıştır;

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

Burada y performans karakteristiğine ait sonuçları gösterirken n deney sayısını temsil etmektedir [26].

Tablo 2. Üretim parametreleri ve Taguchi L_{16} seviyeleri (Production parameters and Taguchi L_{16} levels)

Parameters	Birim	Seviye	Seviye 2	Seviye 3	Seviye 4
Lazer gücü	W	120	200	280	360
Tarama mesafesi	mm	0,10	0,13	0,16	0,19
Lazer çapı	mm	0,10	0,12	0,14	0,16
Tarama hızı	mm/sn	800	1200	1600	2000

Varyans analizi kaliteyi belirleyen çıktı parametresinin (Yüzey pürüzlülüğü) etki eden faktörlerden ne ölçüde etkilediklerini ve farklı seviyelerin nasıl bir değişkenliğe yol açtıklarını belirleyen matematiksel bir tekniktir. Ayrıca elde edilen sonuçların güvenilirliği de belirlenebilir [27].

Regresyon analizi, bağımsız değişkenlerle bağımlı değişkenler arasındaki ilişkiyi matematiksel fonksiyon kullanarak belirleyen bir analiz yöntemidir. Regresyon analizinde bazı denklemler oluşturularak bağımlı değişkenlere bağlı olarak bağımsız değişkenlerin tahmini yapılabilmektedir [28].

3. DENEY VE OPTİMİZASYON SONUÇLARI (EXPERIMENT AND OPTIMIZATION RESULTS)

3.1. S/N Oranlarının Analizleri (Analysis of S/N Ratios Analyzes)

L_{16} deneyleri için ortalama yüzey pürüzlülüğüne ait kontrol faktörleri, seviyeleri,

deney sonuçları ve bu sonuçlara ait S/N oranları Tablo 4’te sunulmuştur. Deney sonuçlarına göre Ra ortalama değeri 2,99 μm olarak elde edilirken bu sonuçlara ait S/N oranlarının ortalama değeri ise -9,16 dB olarak bulunmuştur.

Tablo 3. Deneysel tasarım ve Taguchi L₁₆ deney sonuçları (Experimental design and Taguchi L₁₆ experimental results)

Deney No.	Kontrol Faktörleri				Deneysel Sonuçlar	
	Lazer gücü (W)	Tarama mesafesi (mm)	Lazer çapı (mm)	Tarama hızı (mm/sn)	Ra (µm)	S/N oranı (db)
1	120	0,10	0,10	800	4,09	-12,2345
2	120	0,13	0,12	1200	3,68	-11,3170
3	120	0,16	0,14	1600	4,61	-13,2740
4	120	0,19	0,16	2000	5,53	-14,8545
5	200	0,10	0,12	1600	2,79	-8,9121
6	200	0,13	0,10	2000	2,57	-8,1987
7	200	0,16	0,16	800	2,73	-8,7233
8	200	0,19	0,14	1200	2,94	-9,3669
9	280	0,10	0,14	2000	2,30	-7,2346
10	280	0,13	0,16	1600	2,50	-7,9588
11	280	0,16	0,10	1200	2,25	-7,0437
12	280	0,19	0,12	800	2,50	-7,9588
13	360	0,10	0,16	1200	2,36	-7,4582
14	360	0,13	0,14	800	2,26	-7,0822
15	360	0,16	0,12	2000	2,46	-7,8187
16	360	0,19	0,10	1600	2,27	-7,1205

Deney sonuçlarına bağlı olarak elde edilen S/N oranlarının optimizasyonu için Taguchi metodu kullanılmıştır. Ra sonuçları için S/N yanıt tablosu

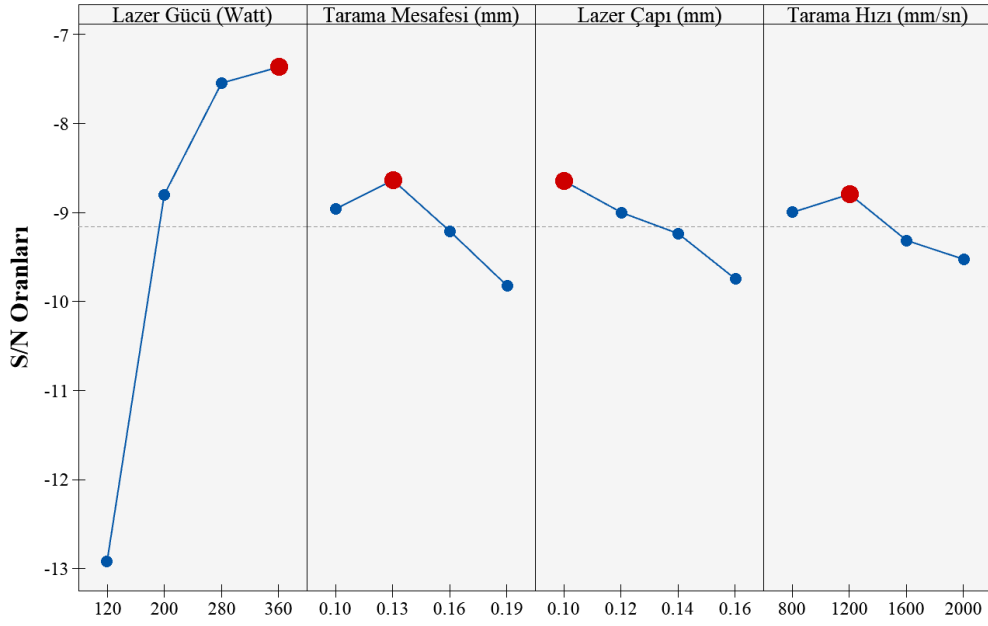
Şekil 3’de sunulmuştur. Şekil 3 incelendiğinde, optimum Ra değerleri için kontrol faktörlerine ait optimum seviyeler görülecektir.

Tablo 4. Yüzey pürüzlülüğü için S/N yanıt tablosu (S/N response table for surface roughness)

Seviyeler	Kontrol faktörleri			
	Lazer Gücü (Watt)	Tarama Mesafesi (mm)	Lazer Çapı (mm)	Tarama Hızı (mm/sn)
Seviye 1	-12,92	-8,96	-8,649	-9,000
Seviye 2	-8,80	-8,640	-9,002	-8,796
Seviye 3	-7,55	-9,215	-9,239	-9,316
Seviye 4	-7,37	-9,825	-9,749	-9,527
Delta	5,55	1,186	1,099	0,730

Tablo 4’e göre optimum Ra değerini veren parametre seviyeleri ve S/N oranları sıralanacak olursa; lazer gücü için Seviye 4, S/N oranı -7,37 dB, tarama mesafesi için Seviye 2, S/N oranı -8,640 dB, lazer çapı için Seviye 1, S/N oranı -8,649 dB ve

tarama hızı için Seviye 2, S/N oranı -8,796 dB olduğu görülmektedir. Ayrıca, Şekil 3’te Ra deneylerinde faktörler ve faktörlere ait seviyelerin etkisini gösteren ana etki grafiği sunulmuştur.



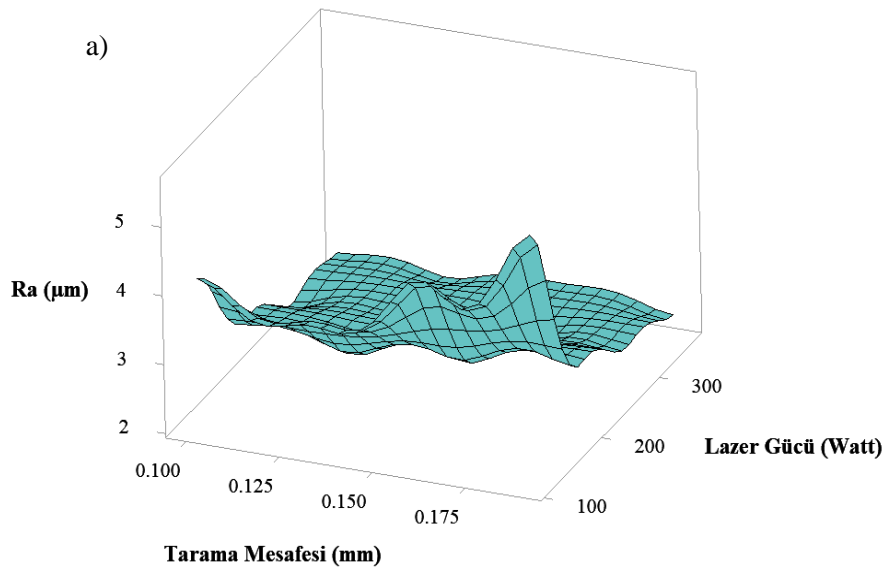
Sinyal-gürültü: En küçük en iyidir

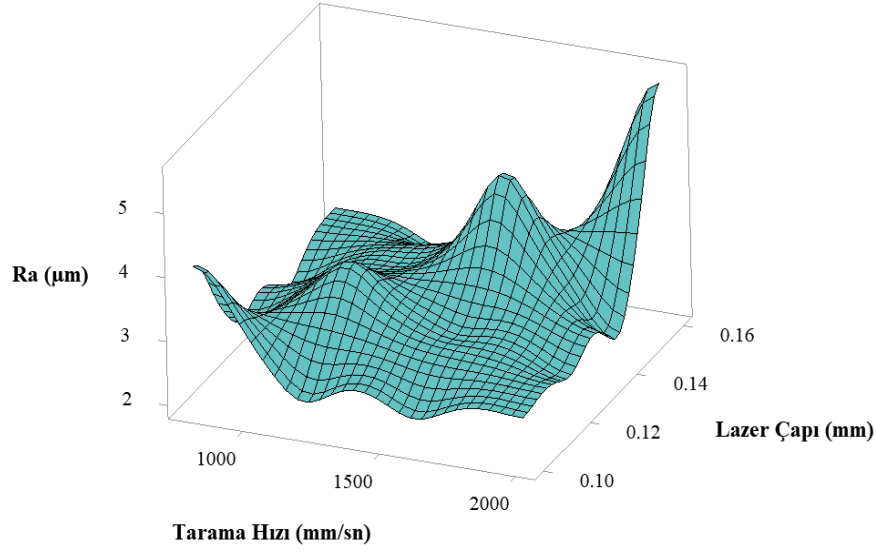
Şekil 3. Farklı üretim parametrelerine göre Ra ana etki grafiği (Ra main effect graphic according to different production parameters)

Şekil 3 incelendiğinde, optimum Ra değerini elde ederken lazer gücü için 4. seviye, tarama mesafesi için 2. seviye, lazer çapı için 1. seviye ve tarama hızı için 2. seviye değerlerin optimum sonucu verdiği görülmektedir. Bir başka deyişle, optimum Ra değeri 360 Watt lazer gücü, 0,13 mm tarama mesafesi, 0,10 mm lazer çapı ve 1200 mm/sn tarama hızı değerlerinin kombinasyonu ile elde edilmiştir.

3.2. Deneysel Sonuçlar (Experimental Results)

Yüzey pürüzlülüğü, lazer gücü, lazer çapı, tarama mesafesi, tarama hızı gibi faktörler tarafından kontrol edilebilmektedir [29]. AlSi10Mg alaşımının SLM yöntemi ile üretilmesinde lazer gücü, tarama mesafesi, lazer çapı ve tarama hızına bağlı olarak Ra değerleri belirgin bir şekilde değişiklik göstermektedir. Tarama mesafesi ve lazer gücüne bağlı olarak Ra değerindeki değişimi gösteren üç boyutlu yüzey grafiği Şekil 4'te sunulmuştur.





Şekil 4. SLM parametrelerinin ortalama yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisi: (a) tarama mesafesi ve lazer gücü, (b) tarama hızı ve lazer çapı. (Effect of SLM parameters on average surface roughness: (a) scanning distance and laser power, (b) scanning speed and laser diameter)

Şekil 4a tarama mesafesi açısından incelendiğinde, en yüksek Ra değeri 0,19 mm tarama mesafesinde görülürken en düşük Ra değeri ise 0,13 mm tarama mesafesinde görülmüştür. Tarama mesafesinin artmasıyla yüzey pürüzlülüğü artış eğilimi göstermiştir. Bu durum artan tarama mesafesine bağlı olarak eriyik havuzu boyutunun artmasına ve pürüzlü bir yüzey oluşmasına bağlanabilir [18]. Lazer gücü bakımından incelendiğinde lazer gücünün artmasının Ra değerini olumlu yönde etkilediği görülmektedir (Şekil 4a). Lazer gücü açısından en düşük Ra değeri 360 W lazer gücü ile elde edilirken en yüksek Ra değeri 120 W lazer gücü ile elde edilmiştir. Bu durum lazer gücünün artması lazer gücünde biriken izlerin artmasına neden olur şeklinde ifade edilebilir. Dahası biriken izlerin artması lazer gücünün izlerinin kararlılığını artırarak tozların yapışma kalitesini artırmasıyla ilişkilendirilir. Ayrıca artan lazer gücü enerji yoğunluğunu artırmakta ve Eİ ile üretilen parçaların Ra değerini etkili bir şekilde azaltmaktadır. Enerji yoğunluğunun azalması ise yapışan parçacıklar ve topaklanmaya bağlı olarak Ra değeri artış göstermektedir. Bunun sonucunda lazer gücünün artması Ra değerinde bir azalmaya neden olmaktadır [30–33].

Tarama hızı ve lazer çapına bağlı olarak Ra değerindeki değişimi gösteren üç boyutlu yüzey grafiği Şekil 4b’de sunulmuştur. Şekil 4b tarama hızı açısından incelendiğinde en yüksek Ra değeri 2000 mm/sn tarama hızında görülürken en düşük Ra değeri 1200 mm/sn tarama hızında elde edilmiştir.

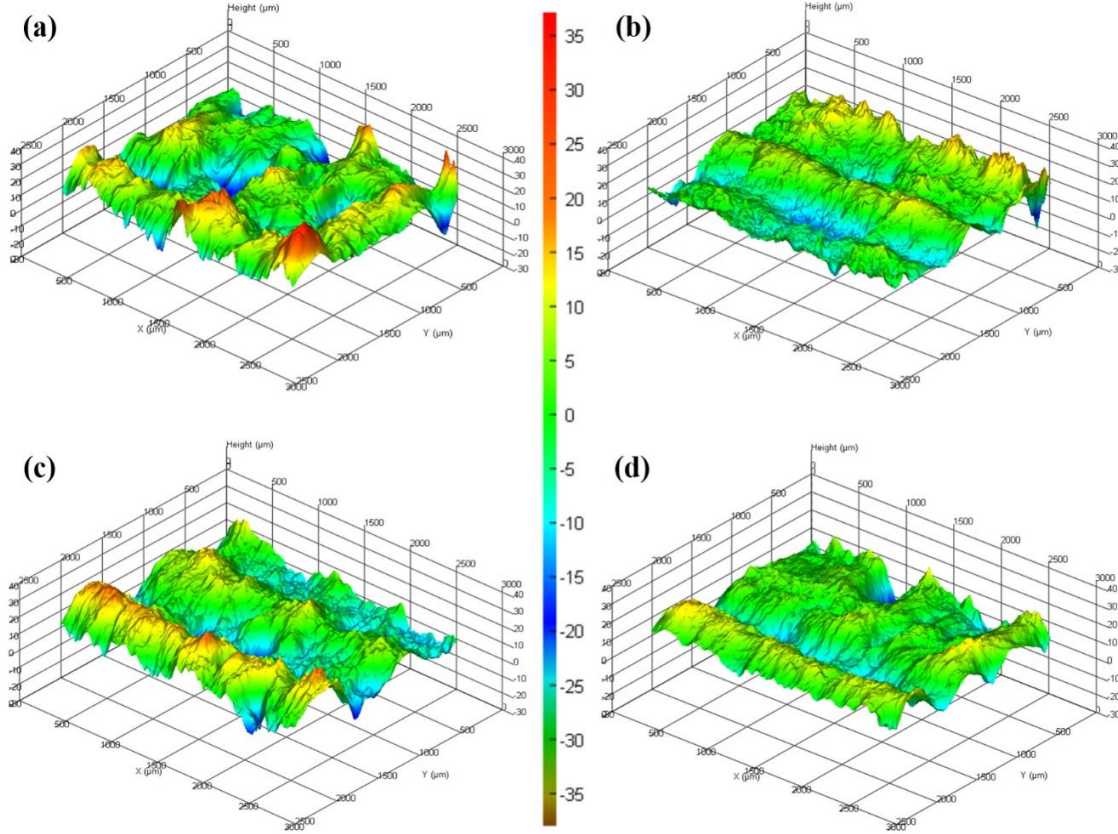
Tarama hızının artmasıyla Ra değeri önce bir miktar düşüş göstermektedir. Tarama hızı artmaya devam ettikçe Ra değerinde küçük oranlarda artış ve azalmalar göstermektedir. Bu durum tarama hızındaki artışın toz malzemenin ergime hızını düşürdüğünden katılma hızını da düşürmesine bağlanmaktadır. Katılma hızının düşmesiyle beraber Ra değerinde artış olabileceği beklenen bir durumdur ve literatürde de örnekleri mevcuttur [31].

Şekil 4b lazer çapı açısından incelendiğinde lazer çapının artmasıyla Ra değerinin olumsuz yönde etkilendiği gözlemlenmektedir. Lazer çapı açısından en yüksek Ra değeri 0,16 mm lazer çapında elde edilirken en düşük Ra değeri 0,10 mm lazer çapında elde edilmiştir. Lazer çapının artması lazer izlerinde bir azalmaya neden olur. Bunun sonucu olarak tozlar erimez ve parçacıklar arasında boşluklar meydana gelerek yüzey pürüzlülüğünde bir artışa neden olmaktadır [17]. Deneysel çalışma sonucunda lazer çapının azaltılarak lazer gücünün artırılmasının daha iyi Ra sonuçları verdiği görülmüştür. Koutiri ve diğ. yaptıkları çalışmada Inconel 625 malzemenin SLM yöntemi ile üretiminde proses parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü üzerine etkilerini inceleyerek benzer durumu vurgulamışlardır [34].

3.3. YüzeY Topografya Sonuçları (Surface Topography Results)

Birbiriyle temas halinde çalışan parçalarda çalışma bölgesinde gerçek temas yüzeyinin artırılarak sürtünmenin ve aşınmanın azaltılması için parçaların yüzey kalitesi önemli parametrelerden biridir. Yüzey kalitesi aşınmayı azaltarak parçaların ömrünü artırmaktadır. Dolayısıyla yüzey kalitesinin

detaylı bir şekilde incelenmesi derinlemesine analiz yapmak için elzem bir durumdur. Lazer gücünün Ra üzerinde etkili parametre olduğu bilindiğinden, sabit tarama mesafesinde (0,19 mm) lazer gücü artışına bağlı olarak yüzey topografya görüntüleri incelenmiştir. Şekil 5 üretim sonrası malzemelerin sabit tarama mesafesi ve farklı lazer gücüne bağlı yüzey topografya görüntüleri verilmektedir.



Şekil 5. Yüzey topografya görüntüleri (a) DeneY 4 (b)DeneY 8 (c)DeneY 12, (d)DeneY 16 (Surface topography images (a) Experiment 4 (b)Experiment 8 (c)Experiment 12, (d)Experiment 16)

Görüntüler incelendiğinde Şekil 5a'da tepe ve çukur noktaların daha fazla olduğu görülmektedir. Daha az dalgalı bir yüzey yapısına yani daha düzgün bir profile sahip olan görüntü ise DeneY 16 ya ait olan görüntüdür (Şekil 5d). En düşük Ra değerine sahip yüzey topografya görüntüsü 360 Watt lazer gücüne, 0,19 mm tarama mesafesine, 0,10 mm lazer çapına ve 1600 mm/sn tarama hızına sahip deneY koşullarında elde edilmiştir. Şekil genel olarak incelendiğinde lazer gücünün artmasıyla yüzey topografya görüntülerinin daha düzgün hale geldiği, tepe ve çukur noktaların azalarak daha yüzeysel olduğu anlaşılmaktadır. Yüzey topografya sonuçları

ile yüzey pürüzlülük sonuçları paralellik göstermektedir.

3.4. Varyans Analizi (Analysis of Variance)

Girdi faktörleri olan tarama mesafesi, lazer gücü, tarama hızı ve lazer çapının Ra değeri üzerindeki etkisini göstermek için ANOVA kullanılmıştır. ANOVA, % 95 güven aralığında gerçekleştirilmiş ve sonuçları Tablo 5'de sunulmuştur. Hata oranı % 3,02 olması ile elde edilen sonuçlar analizin güvenilirliğini kanıtlar niteliktedir.

Tablo 5. Yüzey pürüzlülüğü deney sonuçlarına ait ANOVA tablosu (ANOVA table of surface roughness experiment results)

Faktörler	Serbestlik derecesi	Kareler toplamı	Kareler ortalaması	F değeri	P değeri	Katkı oranı (%)
Lazer gücü	3	12,2219	4,0740	28,35	0,011	85,58
Tarama mesafesi	3	0,6814	0,2271	1,58	0,358	4,77
Lazer çapı	3	0,5644	0,1881	1,31	0,415	3,95
Tarama hızı	3	0,3829	0,1276	0,89	0,538	2,68
Hata	3	0,4312	0,1437	-	-	3,02
Toplam	15	-	-	-	-	100,00

Tablo 5’de yer alan katkı oranları girdi parametrelerinin Ra değeri üzerindeki önem derecesini göstermektedir. Ra üzerinde en etkili faktör % 85,58 oranı ile lazer gücü olarak elde edilmiştir. Bunu sırasıyla % 4,77, % 3,95 ve % 2,68 oranları ile tarama mesafesi, lazer çapı ve tarama hızı takip etmiştir.

3.5. Regresyon Analizi (Analysis of Regression)

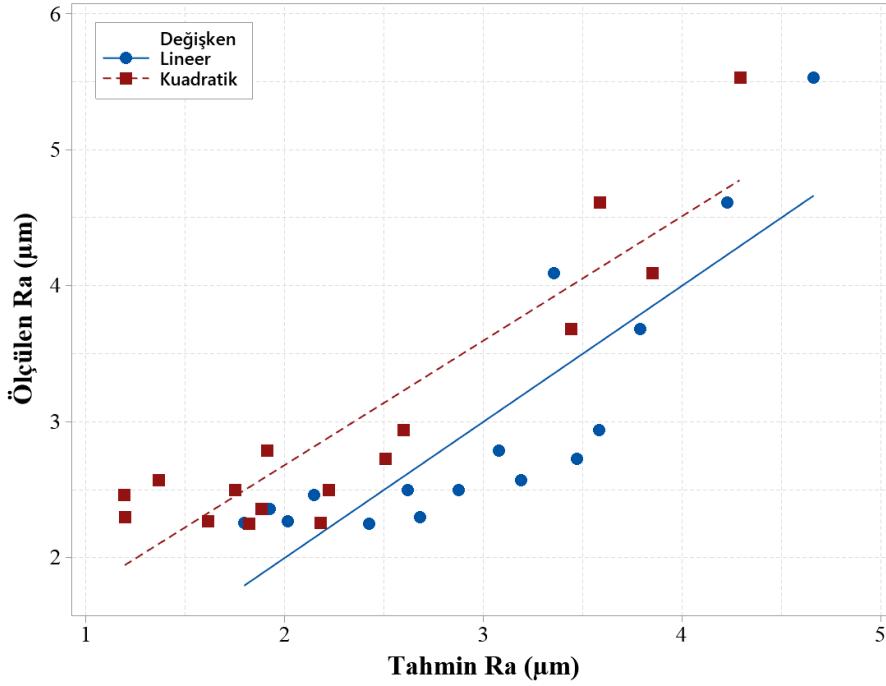
Regresyon analizleri bağımlı ve bağımsız değişkenler arasındaki etkileşimi belirlemek için kullanılan bir analiz yöntemidir. Deneysel yöntemlerle elde edilen 16 adet yüzey pürüzlülüğü sonucu için regresyon analizi uygulanmıştır. Regresyon denklemlerinin oluşturulmasında lazer gücü, tarama mesafesi, lazer çapı ve tarama hızı proses girdi faktörü olarak kullanılmıştır. Proses girdi faktörleri kullanılarak elde edilen birinci dereceden denklem Eşitlik 2’deki gibi elde edilmiştir.

$$Ra(\mu\text{m}) = 2,81 - 0,00849 * LG + 5,12 * TM + 8,13 * LC + 0,000299 * TH \quad (2)$$

Eşitlik 2’ye göre elde edilen denklemin belirleme katsayısı (R^2) 0,7356 olarak bulunmuştur. Ancak, bulunan katsayıya göre gerçek değerler ile tahmin değerleri arasındaki fark fazla olacağından faktör etkileşimlerini de kapsayan ikinci dereceden denklem üretilmiştir. Elde edilen ikinci dereceden denklem Eşitlik 3’teki gibidir.

$$Ra(\mu\text{m}) = -36,7 + 0,0671 * LG + 69,5 * TM + 764 * LC - 0,0292 * TH - 0,000166 * LG^2 + 119,4 * TM^2 - 1731 * LC^2 + 0,000004 * TH^2 - 0,0048 * LG * TM - 0,0197 * LG * LC - 0,000002 * LG * TH - 2092 * TM * LC + 0,1233 * TM * TH \quad (3)$$

Eşitlik 3’e göre ikinci derece denklemin belirleme katsayısı (R^2) ise 0,9887 olarak bulunmuştur. Deney sonuçları ile her iki denklemden elde edilen tahmin sonuçlarının karşılaştırılması Şekil 6’da sunulmaktadır. Şekil incelendiğinde, deney sonuçlarına en yakın tahmin değerlerinin ikinci dereceden denklem ile elde edildiği görülmektedir.



Şekil 6. Tahmin sonuçları ile gerçek ölçümlerin karşılaştırılması (Comparison of prediction results and actual measurements)

4. CONCLUSIONS (SONUÇLAR)

Bu çalışmada, SLM yöntemi kullanılarak üretilen AlSi10Mg parçalarının proses parametrelerinin ortalama yüzey pürüzlülüğü ve yüzey topografyaları üzerine etkileri incelenmiştir. Taguchi dikey dizini kullanılarak deney tasarımı ve sonuçların analizi yapılmıştır. Yapılan çalışma sonucunda elde edilen bilgiler aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

- Çalışma sonucunda ortalama yüzey pürüzlülüğü değerinin farklı parametre ve seviyelerde farklı sonuçlar verdiği görülmüştür.
- Genel olarak tarama mesafesinin artmasıyla yüzey pürüzlülüğü artış eğilimi göstermiştir.
- ANOVA, % 95 güven aralığında gerçekleştirilmiştir. Hata oranının % 3,02 olması elde edilen analiz sonuçlarının güvenilirliğini göstermektedir.
- Ortalama yüzey pürüzlülüğünü etkileyen en önemli parametre % 85,58 katkı oranıyla lazer gücü olmuştur. Bunu sırasıyla % 4,77, % 3,95 ve % 2,68 oranları ile tarama mesafesi, lazer çapı ve tarama hızı takip etmiştir.
- Yüzey pürüzlülük ortalama değeri Ra için geliştirilen kuadratik regresyon analiz

denklemleriyle hesaplanan verilerin, deneysel çalışma sonucunda elde edilen gerçek verilerle % 98,87 oranında yakınlık gösterdiği tespit edilmiştir.

Yapılan çalışma neticesinde, S/N analizi yapılarak gerçekleştirilen optimizasyon da en düşük yüzey pürüzlülüğünü veren proses parametreleri 360 W lazer gücü, 0,10 mm lazer çapı, 1200 mm/sn tarama hızı ve 0,13 mm tarama mesafesi olarak bulunmuştur

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

Bu çalışma, Erciyes Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından FYL-2021-10915 kodlu proje ile desteklenmiştir.

This study was supported by Erciyes University Scientific Research Projects Unit with the project code FYL-2021-10915.

ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

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

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

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

Arif Lütfi ÖZSOY: Deney düzeneğini hazırlayarak deneyleri yapmıştır.

He prepared the experimental setup and performed the experiments

Emine ŞİRİN: Deney sonuçlarını analiz etmiş ve makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

She analyzed the results and performed the writing process.

Çağrı Vakkas YILDIRIM: Deneyleri yapmış, sonuçlarını analiz etmiş ve makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

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

Murat SARIKAYA: Deney sonuçlarını analiz etmiş ve makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

He analyzed the results and performed the writing process.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

There is no conflict of interest in this study.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Choi, J. W. Architecture of a knowledge based engineering system for weight and cost estimation for a composite airplane structures. *Expert Systems with Applications*. 2009;36(8), 10828-10836.
- [2] Rambabu P, Eswara Prasad N, Kutumbarao V V., Wanhill RJH. Aluminium Alloys for Aerospace Applications. 2017:29–52.
- [3] Abioye, T. E., Zuhailawati, H., Aizad, S., Anasyida AS. Geometrical, microstructural and mechanical characterization of pulse laser welded thin sheet 5052-H32 aluminium alloy for aerospace applications. *Trans Nonferrous Met Soc China*. 2019;29:667–79.
- [4] Gupta MK, Singla AK, Ji H, Song Q, Liu Z, Cai W, et al. Impact of layer rotation on micro-structure, grain size, surface integrity and mechanical behaviour of SLM Al-Si-10Mg alloy. *J Mater Res Technol*. 2020;9:9506–22.
- [5] Li W, Li S, Liu J, Zhang A, Zhou Y, Wei Q, et al. Effect of heat treatment on AlSi10Mg alloy fabricated by selective laser melting: Microstructure evolution, mechanical properties and fracture mechanism. *Mater Sci Eng A*. 2016;663:116–25.
- [6] Liu X, Zhao C, Zhou X, Shen Z, Liu W. Microstructure of selective laser melted AlSi10Mg alloy. *Mater Des*. 2019;168:107677.
- [7] Singamneni, S., Yifan, L. V., Hewitt, A., Chalk, R., Thomas, W., & Jordison D. Additive Manufacturing for the Aircraft Industry: A Review. 2019.
- [8] ASTM52901-16 standard guide for additive manufacturing—general principles—requirements for purchased AM parts. ASTM International, West Conshohocken. 2016.
- [9] Kandukuri S, Ze · Chen. Progress of Metal AM and Certification Pathway. *Trans Indian Natl Acad Eng*. 2021;6:909–15.
- [10] Gebler M, Schoot Uiterkamp AJM, Visser C. A global sustainability perspective on 3D printing technologies. *Energy Policy*. 2014;74:158–67.
- [11] Wohlers, T. Wohlers report 2021: 3D printing and additive manufacturing global state of the industry.2021.
- [12] Froes F. Combining additive manufacturing with conventional casting and reduced density materials to greatly reduce the weight of airplane components such as passenger seat frames. *Addit Manuf Aerosp Ind*. 2019:419–25.
- [13] Aktimur B, Gökpınar ES. Katmanlı Üretimin Havacılıkdaki Uygulamaları. *Gazi Univ J Sci Part C Des Technol*. 2015;3:463–9.
- [14] Tomlin M. Topology Optimization of an Additive Layer Manufactured (ALM) Aerospace Part.2011.
- [15] Blakey-Milner B, Gradl P, Snedden G, Brooks M, Pitot J, Lopez E, et al. Metal additive manufacturing in aerospace: A review. *Mater Des*. 2021;209:110008.
- [16] Boschetto A, Bottini L, Veniali F. Roughness modeling of AlSi10Mg parts fabricated by selective laser melting. *J Mater Process Technol*. 2017;241:154–63.
- [17] Wang L zhi, Wang S, Wu J jiao.

- Experimental investigation on densification behavior and surface roughness of AlSi10Mg powders produced by selective laser melting. *Opt Laser Technol.* 2017;96:88–96.
- [18] Majeed A, Ahmed A, Salam A, Sheikh MZ. Surface quality improvement by parameters analysis, optimization and heat treatment of AlSi10Mg parts manufactured by SLM additive manufacturing. *Int J Light Mater Manuf.* 2019;2:288–95.
- [19] Subbiah, R., Bensingh, J., Kader, A., & Nayak, S. Influence of printing parameters on structures, mechanical properties and surface characterization of aluminium alloy manufactured using selective laser melting. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology.* 2020; 106, 5137-5147.
- [20] Fiegl T, Franke M, Körner C. Impact of build envelope on the properties of additive manufactured parts from AlSi10Mg. *Opt Laser Technol.* 2019;111:51–7.
- [21] Caiazza F, Alfieri V, Casalino G. On the Relevance of Volumetric Energy Density in the Investigation of Inconel 718 Laser Powder Bed Fusion. *Mater.* 2020, Vol 13, Page 538 2020;13:538.
- [22] Wang P, Lei H, Zhu X, Chen H, Fang D. Influence of manufacturing geometric defects on the mechanical properties of AlSi10Mg alloy fabricated by selective laser melting. *J Alloys Compd.* 2019;789:852–9.
- [23] Trevisan F, Calignano F, Lorusso M, Materials JP-, 2017 U. On the selective laser melting (SLM) of the AlSi10Mg alloy: process, microstructure, and mechanical properties. *Materials (Basel)* 2017;10:76.
- [24] 4287: 1997: Geometrical product specifications (GPS)–Surface texture: profile method–Terms, definitions and surface texture parameters. 1998.
- [25] Yıldırım ÇV, Kıvak · Turgay, Murat Sarıkaya, Fehmi Erzincanlı . Determination of MQL Parameters Contributing to Sustainable Machining in the Milling of Nickel-Base Superalloy Waspaloy. *Arab J Sci Eng.* 2017;42:4667–81.
- [26] Kıvak T. Optimization of surface roughness and flank wear using the Taguchi method in milling of Hadfield steel with PVD and CVD coated inserts. *Measurement* 2014;50:19–28.
- [27] Savaşkan M, Taptık Y, Ürgen M. Deney tasarımı yöntemi ile matkap uçlarında performans optimizasyonu. *İTÜDERGİSİ/D.* 2010;3.
- [28] Yücel A, Yıldırım ÇV. AA2024 Alaşımının Tornalanmasında Nanoakışkan Konsantrasyon Oranı ve MMY Parametrelerinin Yüzey Pürüzlülüğü ve Kesme Sıcaklığı Üzerindeki Etkisi. *Manuf Technol Appl.* 2020;1:18–32.
- [29] Bean GE, Witkin DB, McLouth TD, Patel DN, Zaldivar RJ. Effect of laser focus shift on surface quality and density of Inconel 718 parts produced via selective laser melting. *Addit Manuf.* 2018;22:207–15.
- [30] Yang T, Liu T, Liao W, MacDonald E, Wei H, Chen X, et al. The influence of process parameters on vertical surface roughness of the AlSi10Mg parts fabricated by selective laser melting. *J Mater Process Technol.* 2019;266:26–36.
- [31] Bhaduri D, Penchev P, Dimov S, Essa K, Carter LN, Pruncu CI, et al. On the surface integrity of additive manufactured and post-processed AlSi10Mg parts. *Procedia CIRP.* 2020;87:339–44.
- [32] Wang Z, Xiao Z, Tse Y, Huang C, Zhang W. Optimization of processing parameters and establishment of a relationship between microstructure and mechanical properties of SLM titanium alloy. *Opt Laser Technol.* 2019;112:159–67.
- [33] Maamoun AH, Xue YF, Elbestawi MA, Veldhuis SC. Effect of Selective Laser Melting Process Parameters on the Quality of Al Alloy Parts: Powder Characterization, Density, Surface Roughness, and Dimensional Accuracy. *Mater.* 2018, Vol 11, 2018;11:2343.
- [34] Koutiri I, Pessard E, Peyre P, Amlou O, De Terris T. Influence of SLM process parameters on the surface finish, porosity rate and fatigue behavior of as-built Inconel 625 parts. *J Mater Process Technol.* 2018;255:536–46.

Sanayide Enerji Verimliliğinde Son Gelişmeler: Türkiye Örneği

Cemre YILDIZ^{1*} 

¹İstanbul Teknik Üniversitesi, Enerji Enstitüsü, Maslak Kampüsü, İstanbul, Türkiye

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 23/02/2024
Düzeltilme: 28/03/2024
Kabul: 22/04/2024

Anahtar Kelimeler

Enerji verimliliği
Atık ısı
Kojenerasyon
Karbon yakalama ve
depolama
Yapay Zekâ
Sanayide robotlaşma

Article Info

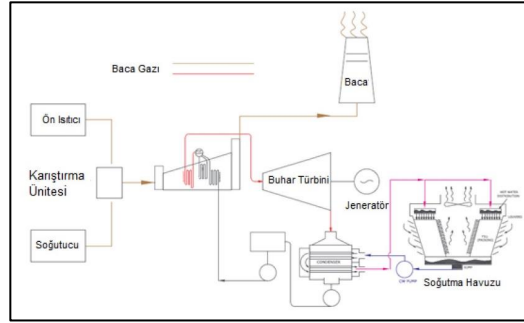
Research article
Received: 23/02/2024
Revision: 28/03/2024
Accepted: 22/04/2024

Keywords

Energy efficiency
Waste heat
Cogeneration
Carbon capture and
storage
Artificial intelligence
Robotization in industry

Grafik Özet (Graphical/Tabular Abstract)

Bu çalışmada, küresel enerji tüketimi ve karbon salınımının başlıca sorumlularından olan sanayi sektöründeki güncel enerji verimliliği çalışmalarıyla ilgili yerli ve yabancı kaynaklar taranarak olası çözüm önerileri aktarılmıştır. Sonuç olarak Türkiye'de, geniş ölçekli bir yenileme hareketi ile önemli miktarda enerji tasarrufu sağlanabileceği tespit edilmiştir. / In this study, local and foreign sources regarding current energy efficiency studies in the industrial sector, which is one of the main responsible for global energy consumption and carbon emissions, were scanned and solution suggestions were presented. As a result, it is shared that significant amounts of energy savings can be achieved in Türkiye with a large-scale renewal movement.



Şekil A: Atık ısı geri kazanımı / Figure A: Waste heat recovery

Önemli noktalar (Highlights)

- Yürütülecek çalışmaların verimli bir şekilde ilerleyebilmesi için öncelikle durum tespitinin doğru yapılması, sonrasında da ulaşılabilir gerçekçi hedeflerin belirlenmesi gerekmektedir. / To ensure that the work is completed efficiently, it is essential to first assess the situation accurately and then set achievable targets.
- Sanayi tesislerinde enerji verimliliğini artırmak için çalışanlara yönelik bilinçlendirme ve eğitim programları düzenlenmelidir. / Awareness and training programs should be organized for employees to enhance energy efficiency in industrial facilities.
- Enerji verimliliğini artırmak için gerekli yasal düzenlemelerin güçlendirilmesi ve uygulanabilirliklerinin sağlanması önemlidir. / Strengthening the necessary legal regulations and ensuring their applicability are crucial steps in enhancing energy efficiency.

Amaç (Aim): Türkiye'nin enerji görünümü, yürürlükte olan verimlilik politikaları derlenerek, sanayideki enerji verimliliğini artırmaya yönelik çalışmalar yürütecek akademi ve özel sektör çalışanlarına katkıda bulunulması amaçlanmıştır / By compiling Turkey's energy outlook and current efficiency policies, it is aimed to contribute to academic and private sector employees who will conduct studies to increase energy efficiency in industry.

Özgünlük (Originality): Küresel enerji tüketimine bağlı olarak giderek artan çevresel sorunlarda önemli payı olan sanayi sektöründeki güncel enerji verimliliği çalışmaları, yerli ve yabancı kaynaklar taranarak belirli bir düzen içerisinde bir araya getirilmeye çalışılmıştır. / Current energy efficiency studies in the industrial sector, which has a significant share in the increasing environmental problems due to global energy consumption, have been tried to be brought together in a certain order by scanning domestic and foreign sources.

Bulgular (Results): Türkiye'deki toplam tüketimin yaklaşık %43'nün sanayide tüketildiği ortaya çıkmaktadır. / It has been determined that industry consume around 43% of overall consumption in Türkiye.

Sonuç (Conclusion): Türkiye'deki sanayi sektörünün enerji tasarruf potansiyelinin en az %20 olduğu ve bunun yaklaşık %50'sinin küçük yatırım miktarları ile iki yıldan az sürede kendini amorti ederek gerçekleştirilebileceği tespit edilmiştir. / It has been estimated that Turkey's industrial sector has an energy savings potential of at least 20%, with about 50% of this achievable with minimal investments and amortization in less than two years.



Sanayide Enerji Verimliliğinde Son Gelişmeler: Türkiye Örneği

Cemre YILDIZ^{1*}

¹Istanbul Teknik Üniversitesi, Enerji Enstitüsü, Maslak Kampüsü, İstanbul, Türkiye

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 23/02/2024
Düzeltilme: 28/03/2024
Kabul: 22/04/2024

Anahtar Kelimeler

Enerji verimliliği
Atık ısı
Kojenerasyon
Karbon yakalama ve depolama
Yapay Zekâ
Sanayide robotlaşma

Abstract

Ülkelerin kalkınma sürecindeki vazgeçilmez faktörlerden birisi olan üretimin kesintisiz bir şekilde sürabilmesi için uygun maliyetli, sürekli, güvenli ve temiz enerjiye ulaşabilmeleri büyük önem arz etmektedir. Ülkeler bir yandan büyümeye devam ederken, diğer yandan 2030 için belirlenen 2° ve 2050 yılına kadar karbon nötr hedeflerini göz önüne almak durumundadır. Bu amaç doğrultusunda çeşitli sektörel inovasyonların kullanılması gerekmektedir. Bu derlemede, küresel enerji tüketimi ve karbon salınımının başlıca sorumlularından olan sanayi sektöründeki güncel enerji verimliliği çalışmalarıyla ilgili yerli ve yabancı kaynaklar taranarak, ulaşılan olası çözüm önerileri başlıklar altında aktarılmıştır. Araştırmalar sonucunda, atık ısı geri kazanım sistemi ile ısıtma veriminin %32,32 artarak tüketilen elektrik enerjisinin yaklaşık %30'nun geri kazanılabildiği hesaplanmıştır. Kojenerasyon sistemlerinin var olan yapıya entegrasyonu ile gaz türbinlerinin elektrik dönüşüm verimliliğinin %30-40 seviyelerinden %80-90'lara çıktığı görülmüştür. Yapılan denetimlerde yatırımın kendini 1,5-3 yıl gibi bir sürede amorti ettiği tespit edilmiştir. Çalışmanın devamında, Türkiye'nin enerji görünümü, yürürlükte olan verimlilik politikaları ile güncel sanayi istatistikleri derlenerek, endüstrideki enerji verimliliğini artırmaya yönelik çalışmalar yürütecek akademi ve özel sektör çalışanlarına katkıda bulunulması amaçlanmıştır. Sanayi sektöründeki en kapsamlı yasal düzenleme 5627 sayılı Enerji Verimliliği Kanunu ve ISO 50001 Enerji Yönetimi Sistemi Standardı'dır. Türkiye'deki sanayi sektörünün enerji tasarruf potansiyelinin en az %20 olduğu ve bunun yaklaşık %50'sinin küçük yatırım miktarları ile iki yıldan az sürede kendini amorti ederek gerçekleştirilebileceği tespit edilmiştir. Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü'nün çalışmalarına göre, sanayi sektöründe atılacak doğru adımlar ile Türkiye'nin toplam birincil enerji talebinin %15 düşürülebileceği hesaplanmıştır.

Recent Developments in Energy Efficiency of Industry: The Case of Türkiye

Article Info

Research article
Received: 23/02/2024
Revision: 28/03/2024
Accepted: 22/04/2024

Keywords

Energy efficiency
Waste heat
Cogeneration
Carbon capture and storage
Artificial intelligence
Robotization in industry

Abstract

It is critical that countries have access to affordable, continuous, safe, and clean energy in order for production, which is one of the most important aspects in their development processes, to continue uninterrupted. While countries continue to grow, they must also consider the 2°C targets for 2030 and carbon neutrality by 2050. For this purpose, various sectoral innovations need to be used. In this review, domestic and foreign sources related to current energy efficiency studies in the industrial sector, which is one of the main responsible for global energy consumption and carbon emissions, have been scanned and possible solution suggestions have been presented under headings. As a result of the research, it was calculated that with the waste heat recovery system, the heating efficiency could increase by 32.32% and approximately 30% of the consumed electrical energy could be recovered. It has been observed that with the integration of cogeneration systems into the existing structure, the electricity conversion efficiency of gas turbines increased from 30-40% to 80-90%. During the audits, it was determined that the investment amortized itself in a period of 1.5-3 years. In the continuation of the study, it is aimed to contribute to academic and private sector employees who will carry out studies to increase energy efficiency in the industry by compiling Turkey's energy outlook, current efficiency policies and current industrial statistics. The most comprehensive legal regulation in the industrial sector is the Energy Efficiency Law numbered 5627 and the ISO 50001 Energy Management System Standard. It has been estimated that Turkey's industrial sector has an energy savings potential of at least 20%, with about 50% of this achievable with minimal investments and amortization in less than two years. According to research conducted by the General Directorate of Renewable Energy, Turkey's overall primary energy demand can be decreased by 15% with the proper industrial sector policies implemented.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Enerji, üretimin temel bileşeni olarak ülkelerin kalkınmasına yön veren temel faktörlerden birisidir [1–4]. Bu bağlamda ülkeler ihtiyaç duydukları enerjiyi uygun maliyetli, sürekli, kaliteli, güvenli ve temiz bir şekilde karşılayabilmelidir [5]. Enerjiye duyulan ihtiyaç, enerji verimliliği kavramının önemini küresel ve ulusal düzeyde artırmaktadır. Enerji verimliliği, endüstriyel işletmelerde üretim kalitesi ve miktarını düşürmeden, birim hizmet veya ürün miktarı başına enerji tüketimini azaltmayı ifade etmektedir. Sanayileşme, yaşam standartlarının yükselmesi ve nüfus artışı gibi sebeplerle enerji tüketimi dünya genelinde olduğu gibi Türkiye'de de artmaktadır [6]. Yükselen enerji fiyatları, enerji güvenliğine ilişkin endişeler, teknolojik ilerlemeler, iklim değişikliği ve enerji bağımsızlığına yönelik eğilimler, enerji verimliliği çalışmalarının önemini artırmaktadır [7].

Projeksiyonlar 2040 yılında dünya nüfusunun 9 milyara çıkacağını gösterirken, bu durum yaklaşık 1 milyar insan için ek enerji sağlanmasını gerekli kılmaktadır. 1990 yılında 8.779 Mtep olan dünya enerji arzı yaklaşık %58 artarak günümüzde 13.865 Mtep'e ulaşmıştır [8]. Bu değer, artan nüfus ve gereksinimlerle birlikte 2040 yılına kadar yıllık ortalama %2 olmak üzere toplamda %70 artması beklenmektedir [9]. Buna karşılık kontrolsüz büyümenin neden olduğu yüksek enerji yoğunluğu, iklim değişikliğine bağlı çevresel tahribatı hızlandırarak sağlık sorunlarına yol açmaktadır. Bu durum uluslararası düzenlemelerin gerekliliğini ortaya koymaktadır [10–13].

İklim değişikliğinin neden olduğu çevresel etkileri araştıran Abbass ve arkadaşları [14], sera gazı emisyonlarındaki artış ile küresel ısınma arasında 1851-2021 dönemi boyunca pozitif bir korelasyon olduğunu tespit etmiştir [15]. Bu bağlamda, enerji yoğunluğunu etkileyen faktörlerin belirlenerek enerji yoğunluğunun azaltılması, küresel enerji talebinin artış eğilimini engellemekle kalmayacak, aynı zamanda çevresel sorunlara duyarlı sürdürülebilir bir ekonomik gelişimi de mümkün kılacaktır. Uluslararası Enerji Ajansı (IEA), Paris Anlaşması'nda belirlenen iki derece hedefine ulaşılabilmesi için gereken yatırımların %40'ının enerji verimliliği alanına yönlendirilmesinin gerekliliğini vurgulamaktadır [16].

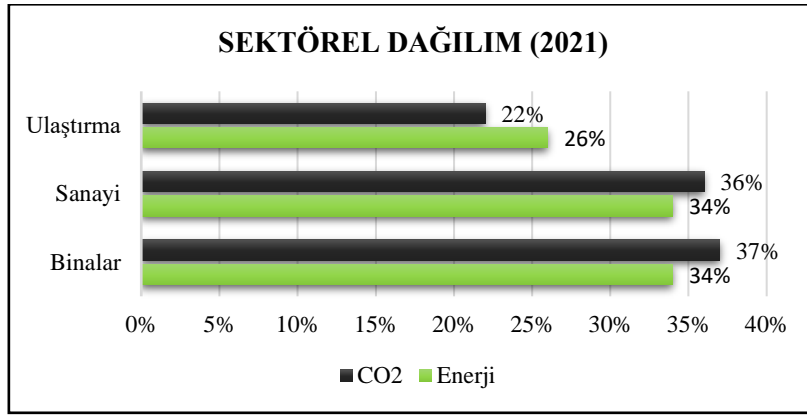
IEA, diğer enerji kaynaklarına nazaran ülkeler için uygulanabilirliği daha yüksek olan enerji

verimliliğini "ilk yakıt" olarak adlandırmaktadır [17]. Görüşe göre, en temiz ve ucuz enerji kaynağı israf edilmeyip tasarruf edilen enerjidir. Bu nedenle, dünya genelinde ilk yakıt olarak kabul edilen enerji verimliliğine olan ilginin destekleyici politikalarla artırılması gerekmektedir. Ortaya konan kavram daha sonra Avrupa Birliği (AB) tarafından enerji politikası çerçevesinde "önce enerji verimliliği" ilkesi olarak benimsenmiştir. Bu yaklaşım, arz yönlü enerji altyapısına göre daha az maliyetle daha fazla değer dönüşü sağladığı için enerji verimliliğine yapılan yatırımlara öncelik verilmesine yol açmıştır [18].

Ekonomik faktörler enerji verimliliğini açıklama konusunda en sık kullanılan değişkenlerdir. Ulusal düzeyde yapılan çalışmalar, gayri safi yurtiçi hasıla (GSYİH) ile ulusal enerji arzı ve tüketimi arasında pozitif bir ilişki olduğunu doğrulamıştır [19–23]. Bazı araştırmalar, ekonomideki büyümeyle birlikte enerji yoğunluğundaki düşüşün doğrudan yabancı yatırımlardaki artışla ilişkili olduğunu gösterirken [24], diğerleri kişi başına düşen GSYİH'nın enerji verimliliğini artırdığını öne sürmektedir [25–28]. Endüstriyel büyüklük genellikle bir ülkenin sanayi sektörünün GSYİH içindeki payı olarak tanımlanırken, imalat sektörünün hizmet sektörüne kıyasla daha fazla enerji tükettiği bir ülkede ulusal enerji verimliliği performansının daha düşük olacağı dile getirilmektedir. [28–32].

Küresel enerji kullanımında sanayi sektörünün payı 2022 yılında %37 (170 EJ) olurken [33], bu oranın 2002'de %34 olduğu belirtilmektedir. Enerji verimliliği çalışmalarının giderek yaygınlaşmasına rağmen, sanayinin genel enerji tüketimindeki payının artmaya devam ettiği gözlemlenmektedir. Bu artışın büyük ölçüde enerji yoğun sanayi alt sektörlerindeki üretim artışından kaynaklandığı anlaşılmaktadır [34]. Özellikle, çelik, çimento ve alüminyum gibi başlıca alt sektörlerin endüstriyel enerji tüketiminin %60'ını oluşturduğu ifade edilmektedir [33].

Küresel endüstriyel enerji tüketiminin yaklaşık %38'i Çin'de gerçekleşirken, bu oran Avrupa Birliği, Amerika Birleşik Devletleri, Hindistan ve Japonya'nın toplamından (%28) daha yüksektir [33]. Endüstriyel enerji kullanımında elektriğin payı artan yatırımlara rağmen %23 seviyesinde kalırken, günümüzde sektöre ağırlıklı olarak fosil yakıtlar (%28 kömür, %18 doğal gaz, %19 petrol) hakimdir [33].



Şekil 1. Sektörel tüketim ve emisyon dağılımı (Sectoral consumption and emission distribution)

2021 yılındaki enerji tüketimi ile CO₂ emisyonunun küresel ölçekteki sektörel dağılımları Şekil 1’de gösterilmektedir [35].

IEA’na göre, fiziksel ve/veya kimyasal süreçler kullanarak ara veya nihai ürünler üretmek amacıyla hammaddelerin çıkarılması, taşınması ve işlenmesini kapsayan proses (süreç) endüstrisi, sanayi sektörünün tükettiği toplam enerjide en büyük paya sahiptir [16]. Toplam endüstriyel fosil yakıt tüketiminin yaklaşık %80-90’ı, ısıtma ve soğutma prosesleriyle birlikte buhar üretimi için

kazanlarda kullanılmaktadır [36, 37]. Bu nedenle, sanayi sektörünün verimliliğini artırmayı hedefleyen ülkelerin yatırımlarını yoğunlaştırdıkları başlıca alanlardan birisi süreç endüstrisidir [38, 39]. Öyle ki, bu yatırımlar doğrultusunda Avrupa’daki süreç endüstrisinin enerji yoğunluğunun 1991’den 2020’ye kadar %45 azaldığı Avrupa kimya endüstrisi konseyi tarafından paylaşılmıştır [39]. Ancak bu kayda değer iyileşmeye rağmen, talepte beklenen artış nedeniyle enerji tüketiminin artmaya devam ederek fosil yakıtların sektördeki ağırlığını sürdürüleceği öngörülmektedir [40].

$$\text{Spesifik Enerji Tüketimi (SET)} = \frac{\text{tüketilen enerji}}{\text{üretim adedi}} \quad (1)$$

Yukarıdaki denkleme göre spesifik enerji tüketimini düşürmenin iki yolu olduğu ortaya çıkmaktadır:

- Aynı miktarda üretimi daha az enerji tüketerek gerçekleştirmek,
- Ya da aynı enerji tüketimiyle daha fazla üretim adedine ulaşmak.

Endüstride daha fazla üretim gerçekleştirmek, kapasite kullanımını artırmaktan geçmektedir. Avrupa’nın 1995-2022 arasındaki ortalama kapasite kullanımı %81,6 seviyesindedir [39]. Kapasite kullanımının artırılması, daha yüksek enerji verimliliği ile üretim yapılmasını mümkün kılarak birim başına üretim maliyetinin düşmesine imkân sağlamaktadır [41].

Enerji Verimliliği Hareketi (Energy Efficiency Movement) endüstri forumu tarafından yapılan yeni bir çalışma [42] IoT (Nesnelerin İnterneti), akıllı bina yönetimi ve endüstriyel ısı entegrasyonu gibi sistemik önlemlerin, enerji verimliliği önlemleri arasında en yüksek emisyon tasarrufu potansiyeline sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Bununla birlikte, sanayide kullanılan kompresör, fan ve

pompa gibi sistemlerin kilit bileşeni olan motorların, hafif sanayi süreçlerindeki enerji yoğunluğunun azaltılmasına yönelik atılacak tekil adımlar içerisinde en yüksek potansiyele sahip olduğu belirtilmektedir. Maksimum verimliliği sağlamak için motorun kendisinin verimlilik performansı önemli olsa da, diğer sistem bileşenlerinin de verimli motorla kullanım için optimize edilerek uygun şekilde boyutlandırılması gerektiğinin altı çizilmektedir [43].

Jiao ve arkadaşlarının çalışmasında [44], sanayide verimliliği artırarak enerji tasarrufu sağlamanın en önemli adımının teknolojik gelişmelerin takibi olduğu vurgulanmaktadır. Bu yaklaşıma örnek olarak, İsveç çelik endüstrisinin karbon yoğunluğunu azaltmak amacıyla geliştirdiği yeni yüksek fırın teknolojisi gösterilebilir [45]. Ek olarak Hindistan’daki ağır sanayi üzerine yapılan çalışmalar, teknolojik yatırımların enerji ve karbon yoğunluğunu önemli ölçüde azaltabileceğini göstermesi bu görüşü desteklemektedir [46]. Worrell ve Boyd’un çalışmalarına göre, karbondan arındırma tekniği ile imalat sanayinin çevresel etkileri azaltılabilir [47]. Roy ve arkadaşları ise,

nesnelerin interneti (IoT) gibi modern kontrol teknolojilerinin var olan yapılara entegre edilerek verimliliğin artırılabilceğini paylaşmaktadır [48]. Enerji verimliliğini Enerji Stratejisi 2050'nin temel taşlarından biri olarak gören İsviçre, farklı politika senaryoları altında 2010'daki seviyeye göre 2050 yılında toplam nihai enerji talebini %22-46 oranında azaltmayı hedeflemektedir [49]. Bu senaryoların bir parçası olarak, sanayide nihai enerji kullanımının 2010'dan 2050'ye %26-39 oranında azalması öngörülmektedir [50].

Dünya genelinde çeşitli ülkelerde enerji verimliliği ve alınması gereken tedbirlerle ilgili araştırmalar yürütülmeye devam etmektedir [51]. Çalışma yürütülen ülkelere örnek olarak;

- Amerika Birleşik Devletleri [52],
- Bangladeş [53]
- Çin [54],
- Etiyopya [55],
- Hollanda [56],
- İsveç [57],
- İsviçre [49],
- Tayland [58],
- Türkiye [59] gösterilebilir.

Son yıllarda enerji verimliliği konusunda büyük atılım içerisinde olan Çin'de artan kentleşme, cam, petrokimya, çimento ve demirçelik gibi enerji yoğun ağır sanayiye olan ihtiyacı da artırmaktadır [60, 61]. Yayınlanan 2021 ekoloji raporuna göre, 2020 yılındaki sanayi kaynaklı kükürt dioksit emisyon oranının ulusal miktarın %79,6'sını, sanayi kaynaklı partikül madde emisyon oranının ise ulusal miktarın %65,6'sını oluşturduğu görülmektedir [62].

Çin'in 2019 yılındaki toplam CO₂ emisyon miktarı 11,6 milyar tonu aşarak, 2006 yılından bu yana küresel çapta ilk sırada yer almaya devam etmektedir [63]. CO₂ emisyonunu azaltmayı hedefleyen Çin hükümeti, 2030 yılına kadar karbon yoğunluğunun 2005'teki seviyeye göre %60 ila %65 oranında azaltılacağını taahhüt etmektedir [64]. Bu koşullar altında, Çin'in toplam CO₂ emisyonunun yaklaşık %55'ini oluşturan ağır sanayide karbon yoğunluğunun azaltılması, 2030 hedefleri kapsamında atılması gereken önemli adımlardan biri olarak öne çıkmaktadır [65, 66].

Endüstriyel gelişimde yeşil ve düşük karbonlu teknolojilere yönelim, karbon nötr hedefi açısından kritik bir stratejik fırsatı temsil etmektedir [67].

Eko-verimlilik kavramı, ekonomik ve çevresel kazançları koordine ederek, minimum kaynak tüketimi ve çevresel etki ile maksimum ekonomik girdi yaratmayı amaçlamaktadır [68]. Endüstriyel enerji verimliliğine ilişkin itici faktörlerin doğru şekilde analiz edilmesi, karar vericilerin önceki politik hatalardan kaçınarak gelecekte atacakları adımları belirlemelerine yardımcı olabilir. Bu doğrultuda hazırlanacak detaylı yol haritası rehberliğinde, sanayi sektöründe verimli ve sürdürülebilir kalkınma süreci teşvik edilerek geniş çaplı katılım sağlanabilir [69, 70].

Enerji ekonomisi alanında yapılmış çalışmalar araştırıldığında;

- Kişi başına düşen gelir özelinde [71, 72],
- Teknolojik yenilikler bakımından [73],
- Kentleşmenin etkileri söz konusu olduğunda [74],
- Ticari açıklık ve ülkeler arası bağlantılar hakkında [75, 76],
- Enerji fiyatlarındaki dalgalanmaların etkileri için [77, 78] incelenebilir.

Bu çalışma, binalardaki enerji verimliliğinin incelendiği bir araştırmanın devamı niteliğindedir ve endüstriyel tesislerde enerji verimliliği üzerine odaklanmaktadır [79]. Çalışmada, küresel enerji tüketimi ve karbon salınımının başlıca sorumlularından olan sanayi sektöründeki güncel enerji verimliliği gelişmeleri yerli ve yabancı kaynaklar taranarak belirli bir düzen içerisinde bir araya getirilmiştir. Çalışmanın ileriki bölümlerinde, Türkiye'nin enerji görünümü, yürürlükte olan verimlilik politikaları ile güncel sanayi istatistikleri derlenerek, sanayideki enerji verimliliğini artırmaya yönelik çalışmalar yürütecek olan paydaşlara katkıda bulunulması amaçlanmaktadır.

2. SANAYİDE ENERJİ VERİMLİLİĞİ (ENERGY EFFICIENCY IN INDUSTRY)

Verimlilik, üretim sürecinde yer alan unsurların nicel bir ilişki içinde olması ve bu unsurlar arasındaki etkileşim yoluyla elde edilen üretimi en iyi noktaya çıkarmasıdır. Bu tanımdan da anlaşılacağı üzere verimlilik, bir sürecin ürettiği ürün ile o ürünü üretmek için kullanılan girdi arasındaki ilişkilerin bütünüdür. Ekonomik bir terim olarak verimlilik, bir ürün veya hizmetin üretim sürecinde kullanılan üretim faktörleri ile gerçekleştirilen üretim arasındaki ilişkiyi tanımlayan bir katsayı olarak da ifade edilebilir [80, 81].

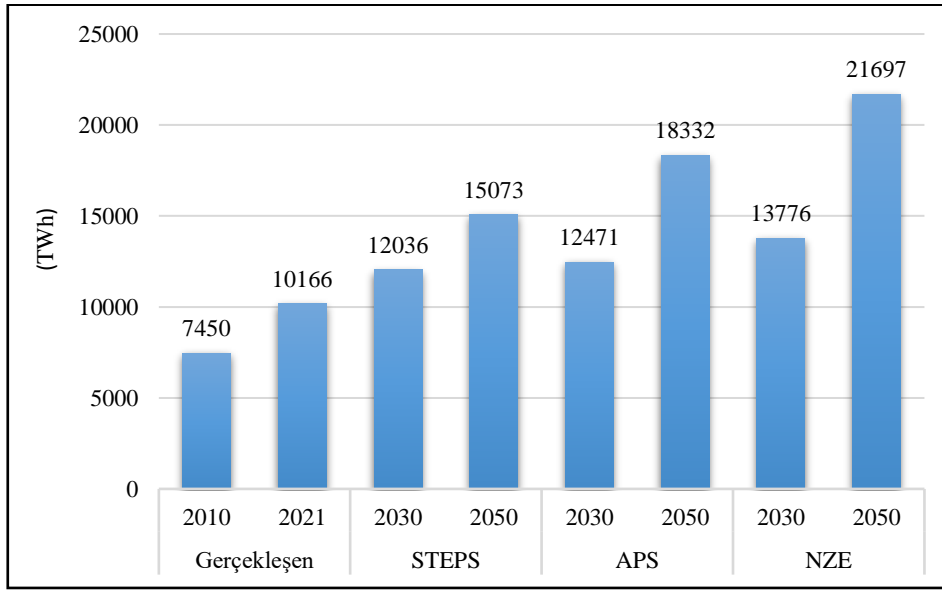
Verimlilik, durağan değil dinamik bir ölçüdür. Verimliliği ölçmek için, belirli bir üretim döneminde üretime dahil olan her faktörün birim başına çıktı miktarını ölçmek ve faktörlerin verimliliğini farklı dönemler arasında karşılaştırmak gerekir. Enerji verimliliği ise, üretimin miktar ve kalitesini düşürmeden, ekonomik kalkınmayı ve sosyal refahı engellemeden tüketilen enerji miktarının en aza indirilmesini ifade etmektedir.

Enerji üretim ve tüketiminin hesaplanmasında yaygın olarak kullanılan ölçü birimi “Ton Eşdeğer Petrol (TEP)”dür. Endüstride üretim veya ısıtma amacıyla bir veya daha fazla yakıt türü

kullanılabilirken, her yakıtın kendine ait ısıl değeri ve birimi bulunmaktadır. Bir ton ham petrolün eşdeğeri olarak tanımlanan TEP, yakıtların ısıl değerlerinin bir çevrim katsayısı ile ortak bir enerji birimine dönüştürülmesine imkân sağlamaktadır.

IEA, sanayi sektörünün güncel tüketim miktarı üzerinden 2030 ve 2050 enerji talebini belirleyebilmek için genel kabul gören senaryolar üzerinden çeşitli projeksiyonlar hazırlamıştır. Yapılan çalışmada kullanılan senaryolar:

- Açıklanan Politikalar Senaryosu (STEPS)
- Açıklanan Taahhütler Senaryosu (APS)
- Net Sıfır Emisyon (NZE)

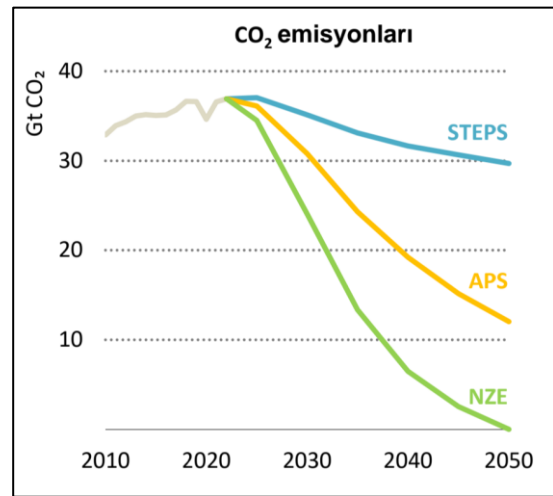


Şekil 2. Çeşitli senaryolara göre sanayi sektörünün global enerji talebi (The global energy demand of the industrial sector according to various scenarios)

Küresel elektrik talebinin her üç senaryoda da 2050 yılına kadar önemli ölçüde artacağı Şekil 2’de görülmektedir. 2021’de gerçekleşen 10.166 TWh tüketim miktarının, STEPS’e göre yaklaşık %70, APS’ye göre %110 ve NZE’ye göre ise %145 oranında yükseleceği hesaplanmaktadır [82].

Enerji kaynaklı küresel CO₂ emisyonu, 2022’de 37 gigaton (Gt) ile tüm zamanların en yüksek seviyesine ulaşmıştır. STEPS’e göre emisyon miktarı 2020’lerin sonuna kadar büyük ölçüde sabit kalırken, sonrasında yavaş yavaş 30 Gt’a kadar düşmesi beklenmektedir. APS tahminlerine göre ise emisyon miktarının yıllık bazlı yaklaşık %2 düşerek 2030’da 31 Gt, 2050’de ise 12 Gt seviyesine gerileyeceği aktarılmaktadır. Son olarak NZE Senaryosunda, CO₂ miktarının yıllık %5’ten fazla düşerek 2030’da 24 Gt ardından ise 2050’de net sıfıra düşeceği belirtilmektedir [82]. Üç tahmin için

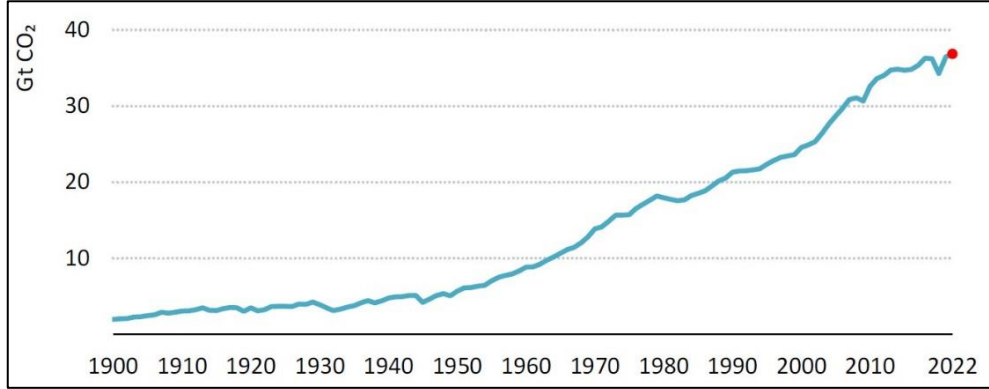
de oluşması beklenen süreç Şekil 3’te gösterilmektedir.



Şekil 3. 2050 küresel CO₂ emisyon senaryoları (Global CO₂ emission scenarios for 2050) [82]

Sanayi bazlı CO₂ emisyonu 2022'de %1,7 düşerek 9,2 Gt seviyesine gerilemiştir. Yıl içerisinde çeşitli bölgelerde yaşanan üretim kesintilerinin yanı sıra, küresel düşüşün asıl nedeni olarak Çin'in sanayi

emisyonlarını 161 Mt azaltması gösterilmektedir [83]. 1900-2022 arasındaki toplam küresel CO₂ salınımı Şekil 4'te görülmektedir.



Şekil 4. Enerji tüketimi kaynaklı küresel CO₂ emisyonları 1900-2022 (Global CO₂ emissions from energy consumption 1900-2022) [83]

Global enerji verimliliği çalışmaları için örnek teşkil edebilecek Çin'in elektrik tüketimi 2000-2013 yılları arasında yıllık ortalama %11,22 artarken, yoğunlaşan enerji verimliliği yatırımlarının etkisiyle bu oran 2014-2019 yılları arasında ortalama %5,55 olarak gerçekleşmiştir [84]. Guang ve arkadaşları [85] ekonomik büyümenin elektrik tüketimini teşvik eden birincil faktör olduğunu belirtirken, uygulanacak enerji politikalarının enerji yoğunluğunu azaltmaya yönelik olması gerektiği vurgulanmaktadır. Atılacak adımlar arasında;

- Teknolojik iyileştirmeye yönelik girişimlerin kolaylaştırılması,
- İşleme tekniklerinin geliştirilerek eski nesil üretim tesislerinin kullanımdan çıkarılması [86],
- Enerji yönetimi uygulamalarının geliştirilmesi yer almaktadır.

Enerji verimliliği aynı miktarda çıktıyı üretmek için daha az enerji kullanılması olarak tanımlanmakla birlikte, özellikle sanayi gibi enerji yoğun alanlarda verimliliğinin belirlenebilmesine yönelik pek çok çalışma bulunmaktadır [87-90]. Enerji verimliliği oranının belirlenmesinde kullanılan göstergeler araştırma alanlarına göre farklılık göstermektedir [52, 91-94]. Bir sistemin enerji verimliliğini belirleyebilmek için; olasılık teorisi [95], çok kriterli karar verme sistemi (MCDM) [96], en iyi-en kötü yöntemi (BWM) gibi birçok farklı yöntem kullanılmaktadır [97].

MCDM'lerinden biri olan veri zarflama analizi (VZA), doğrusal programlama modeline dayalı

parametrik olmayan bir analiz yöntemidir. Benzer girdileri kullanarak, aynı tür çıktıları üreten karar verme birimlerinin (KVB) görece etkinliğinin ölçülmesine olanak sağlamaktadır [98]. VZA, kamudan özel sektöre kadar çok geniş bir uygulama alanına sahiptir [99-102]. Charnes ve arkadaşları [103] tarafından önerilen Charnes, Cooper ve Rhodes (CCR) modelinden sonra geliştirilen bu yöntem 40 yılı aşkın süredir büyük ölçüde geliştirilerek farklı sektörlerin verimliliğinin değerlendirilebilmesi için popüler olarak kullanılmaya başlanmıştır:

- Tarım [104, 105],
- Ulaşım [106, 107],
- Finans [108, 109],
- Demirçelikte [110],
- Demir dışı metallerde [111],
- Kâğıt sektöründe [112].

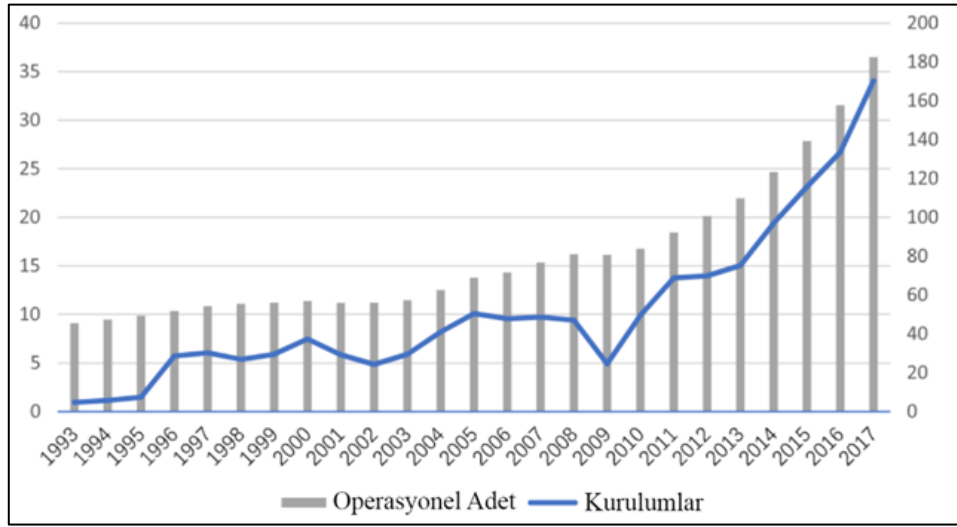
Bu alanlara ek olarak VZA yöntemi endüstriyel enerji verimliliği analizinde de yaygın olarak uygulanmaktadır [113-120]. VZA yöntemi özellikle ulusal, bölgesel ve sektörel düzeylerde endüstriyel enerji verimliliğini analiz etmek için tercih edilen analiz yöntemlerindedir. Bu yöntem ile enerji verimliliği değerlendirilmekle birlikte, aynı zamanda verimsiz KVB için de uygun düzenlemelerin yapılabilmesine imkân sağlanmaktadır [121]. Günümüzde farklı endüstrilerin enerji tüketimini değerlendirmek için kullanılan bir diğer metot ise Enerji verimliliği ölçümleridir (EEM'ler). Ayrıca veri toplama tekniği, endüstriyel cihazların enerji tüketiminin izlenmesinde yeni ortaya çıkan bir alandır [122].

Sanayide enerji verimliliğini iyileştirme tedbirleri genel olarak:

- Isı yalıtımı,
- Atık ısı geri kazanımı,
- Mekanik tesisatın yenilenmesi (Fırın, kazan, buhar ve kurutma sistemleri, fan ve pompa, basınçlı hava sistemleri)
- Aydınlatma,
- Isıtma-soğutma-havalandırma,
- Elektrik sistemleri (elektrikli cihaz ve motorlar),
- Ve otomasyonu kapsamaktadır.

2.1. Sanayide Robotlaşma (Robotization in Industry)

Uluslararası Robotik Federasyonu (IFR) tarafından, otomatik olarak kontrol edilerek yeniden programlanabilen ve çok amaçlı bir makine olarak tanımlanan endüstriyel robotlar, gelişen yapay zekâ (AI) ile imalat sanayinde dijital dönüşümün sembolü olarak aktarılmaktadır [123, 124]. Endüstriyel robotlar, dördüncü sanayi devrimiyle birlikte yeniden şekillenen imalat sektörünün en önemli bileşenlerinden biri olarak görülmektedir [125].



Şekil 5. Sol eksen kurulum sayısını, sağ eksen ise operasyonel adeti yansıtmaktadır (10.000 adet) (The left axis represents the number of installations, while the right axis reflects the operational count (10.000 units))

Şekil 5'te görülebileceği gibi [125], son yıllarda dünya genelindeki imalat sanayinde endüstriyel robotların kurulum ve işletme sayısında belirgin bir artış yaşanmaktadır. Bu artışa paralel olarak robotların endüstride yol açtığı etki ve potansiyel değişimlerle ilgili akademik çalışmalar da önem kazanmaktadır. Bu çalışmalara örnek olarak;

- Ekonomik sonuçlara ilişkin [126–128],
- Üretkenlik değişimi bakımından [129, 130],
- İşgücü ve ücretler alanında [131, 132],
- Teknolojideki gelişmelerle ilgili [133, 134] değerlendirilebilir.

Geçtiğimiz yıllar içerisinde pek çok araştırmacı, robotların sanayide kullanımının yaygınlaşmasının ekonomik değişkenler üzerinde yaratacağı etkileri vurguladılar. Bu konu hakkında referans kabul edilen çalışmalardan birinde Keynes [135], otomasyon teknolojisinin yayılmasının "teknolojik işsizliğe" yol açacağını öngörmüştür. Acemoğlu ve Restrepo ise çalışmalarında [132], bu durumun büyük iş kayıplarına yol açarak ücretlerde düşüslere

neden olabileceğini aktarmaktadır. Çok sayıda araştırmada [136–139] öne çıkan bir diğer nokta ise, yaşanacak endüstriyel dönüşümden en çok düşük ve orta vasıflı işlerde çalışan insanların etkilenerek olmasındır. Robotların endüstride yaygınlaşmasının bir diğer muhtemel sonucu ise, artacak verimlilikle birlikte ürün fiyatlarının düşeceği beklentisidir. Düşen fiyatlara bağlı olarak talepte yaşanacak artış, firmaları üretim ölçeklerini genişletmeye teşvik ederek yeni iş alanları da yaratabileceği öngörülmektedir [140]. Sürecin bu şekilde ilerlemesi durumunda, önceki aşamalarda yaşanacak iş kayıplarının yıkıcı etkileri hafifletilebilir.

Bu konuların yanı sıra, üretimde artan robotlaşma oranının fabrikaların elektrik tüketimine yaptığı etkiler bir diğer güncel çalışma alanıdır. Örnek olarak aynı sektörde faaliyet gösteren firmalar arasında yapılan çalışmalarda, üretim proseslerinde robotların kullanıldığı fabrikaların daha yüksek enerji yoğunluğuna sahip olduğu ve süreç içerisinde

elektrik tüketimlerinde artış yaşandığı tespit edilmiştir [141]. Firmaların elektrik tüketimlerinde yaşanan bu artışın ortalama %8 seviyesinde olduğu aktarılmaktadır [142]. Buna karşın yapılan birçok araştırmada ise, artan elektrik tüketimine kıyasla üretim miktarında yaşanan yükselişin toplam verimi yukarı çekecek seviyede olduğu vurgulanmaktadır [143, 144].

2.2. Kazan, Fırın, Elektrik Motorları, Pompa ve Fanlar (Boiler, Furnace, Electric Motors, Pumps and Fans)

İçten yanmalı motorlar, kazanlar, fırınlar, pompalar, elektrik motorları, basınçlı hava ve soğutma sistemlerine gibi konularda enerji verimliliği yönetimini araştırmak üzere çalışmalar yapan çok sayıda araştırmacı bulunmaktadır [145]. Kazanlarda verimliliği etkileyen başlıca faktörler şu şekilde sıralanabilir [146]:

- Eksik yanma
- Aşırı hava
- Baca gazında su buharı nedeniyle ısı kaybı
- Baca gazı sıcaklığı
- Yakıt tipi
- Brülörler
- Kazan yükü
- Kazan yüzeyinden ısı kayıpları
- Isıtma yüzeyinin kirlenmesi

Kazanların verimli çalışmasında dikkat edilmesi gereken önemli noktalar baca gazı sıcaklığı ve atık ısı geri kazanımının sağlanmasıdır. Bacadan çıkan atık gazlar genellikle üretilen buharın sıcaklığından 40°C ila 80°C daha yüksek bir sıcaklıkta bacadan tahliye edilir. Atık ısının bir kısmının geri kazanılması kazan verimliliğini artıracak ve yakıt tasarrufu sağlayacaktır. Isı geri kazanımı, kazan besleme suyunun ön ısıtılması için bir ekonomizer veya yanma havasının ön ısıtılması kullanılarak gerçekleştirilebilir [147].

Kazanların verimli çalışması için baca gazı sıcaklığının belirli bir düzeyde tutulması önemlidir. Temiz yüzeylerde baca gazı sıcaklığı istenilen sıcaklığın 30 °C üzerinde ise kombinin temizlenmesi gerekmektedir. Aksi takdirde kazan veriminde %1 ila %2 civarında bir düşüş yaşanmaktadır [146]. Akaryakıtla çalışan bir kazanın temizliğini sağlamanın en iyi yöntemi, brülör ayarlarının doğru yapılmasıdır. Ayarlama bir duman test cihazı kullanılarak yapılabilir. Bacadan koyu siyah duman çıkması halinde sistem içerisinde kurum oluştuğu anlaşılacaktır.

Fırınların verimini etkileyen başlıca faktörler şu şekilde sıralanabilir [146]:

- Eksik yanma
- Yakıt türü ve hava/yakıt oranı
- Baca gazı sıcaklığı
- Reküperatörler
- Yalıtım kayıpları
- Malzeme ve soğutma suyu kayıpları

Endüstriyel tesislerdeki en önemli kaynaklardan biri olan basınçlı hava, tesislerin en fazla yatırım yaptığı proseslerin başında gelmektedir. Birçok sanayi tesisinde kompresörler en fazla enerji tüketen cihazlar arasında yer alırken, kurutucu ve diğer destekleyici ekipmanlarla birlikte sistemin yıllık işletme maliyetleri toplam yıllık ödenen elektrik faturasının %70'ine ulaşabilmektedir [148].

Basınçlı hava sistemlerinde meydana gelen arızalar, birçok firma için üretim duraksamalarına neden olmaktadır. Sektörel analizler, basınçlı hava sistemlerindeki enerji kaybının temel nedeninin hava kaçakları olduğunu ortaya koymaktadır. Hava sızıntıları nedeniyle oluşan basınç kaybını engellemek için kompresörün daha uzun süre çalıştırılması gerekmektedir. Yapılan çeşitli çalışmalar, üretilen basınçlı havanın yaklaşık %25'inin sızıntılar nedeniyle kaybolduğunu göstermektedir [149].

Elektrik motorları başta pompa, fan ve kompresör olmak üzere birçok endüstriyel cihaz ve ekipmanda farklı tip ve kapasitelerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Sektördeki elektrik motorlarının enerji tüketim dağılım oranlarına bakıldığında, yaklaşık %20'sinin pompalarda, %17'sinin hava kompresörlerinde, %11'inin soğutma kompresörlerinde, %4'ünün konveyörlerde ve geri kalan kısmın ise diğer uygulama alanlarında kullanıldığı aktarılmaktadır. Günümüzde kullanılan elektrik motorlarının %90'ı asenkron motorlardır, bu nedenle endüstride düşük motor kaybına sahip yüksek verimli motorların kullanılması önemlidir [150]. Motor kayıp ve verim tahminlerine yönelik literatür çalışmaları mevcuttur [151, 152].

Elektrik motorlarında enerji kayıpları dört kategoride ele alınmaktadır [146]:

- Güç kayıpları
- Histerezis Kayıpları
- Sürtünme ve salınım kayıpları
- Yanlış yük kayıpları

Pompalarda verimliliğin artırılması ve enerji tasarrufunun sağlanması üzerine literatürdeki çalışmalar ağırlıklı olarak frekans dönüştürücü uygulamalarını kapsamaktadır [153–158]. VSD değişken hızlı sürücü (frekans dönüştürücü) veya yumuşak yol verici (soft starter) kullanımı, yüksek verimli motorların tercih edilmesi ve gereğinden fazla kapasiteye sahip pompalarda enerji verimliliğini artırmak için pompa çarklarının tornalanarak küçültülmesine yönelik araştırmalar, pompalarda uygulanan başlıca verimlilik artırıcı projeler arasında yer almaktadır [159].

Fanlarda tüketiminin azaltılması üzerine yapılan literatür çalışmaları genellikle tasarım iyileştirmelerini içermekte olup, özellikle aksiyal fanların aerodinamik, mekanik, elektriksel, yapısal ve operasyonel faktörlerinin fan performansına ve minimum güç tüketimine etkisi yoğun bir şekilde araştırılmıştır [160–163]. Akhan'ın çalışmasına göre [159], değişken debili fan ve pompa sistemlerinde debi ayarı devri değiştirilerek %60'a varan enerji tasarrufu sağlanabileceği aktarılmaktadır.

3. ENDÜSTRİYEL ALT SEKTÖRLER (INDUSTRIAL SUBSECTORS)

Sanayide enerji maliyetleri toplam üretim maliyetlerinin %20 ile %50 arasında değişmektedir. Demirçelik sektörü %22'lik payla enerji tüketiminde ilk sıraya sahipken, onu %19 ile çimento, cam, seramik ve tuğla sanayi takip etmektedir. Küresel istatistiklere ek olarak, sanayi sektörlerinin elektrik tüketim oranları ülkeler bazında farklılık gösterebilir. Örnek olarak kâğıt hamuru ve kâğıt sanayi dünya çapında enerjinin en yoğun kullandığı beşinci sektör olurken, İsveç'teki kâğıt sektörü ülkenin tüm sanayi tüketiminin yarısını teşkil etmektedir [164]. Belirtilen alt sektörlerin enerji tüketimleri yüksek olduğu gibi, enerji verimliliği potansiyelleri de yüksektir ve yapılacak yatırımlar bu yönde önemli fırsatlar sunmaktadır [165].

3.1. Demirçelik Sanayi (Iron and Steel Industry)

Demirçelik sanayiindeki enerji tüketimine bakıldığında, en yüksek payın %50-60 ile yüksek fırınlara ait olduğu görülmektedir. Yüksek fırın prosesi, demir içeren malzemelerdeki demir oksidi azaltarak sıcak cevher oluşturma işlemidir. Yüksek fırınlar genellikle çok büyük tesisler olup entegre çelik fabrikalarının ana ünitesi konumundadır

[166]. Yüksek fırınlar ile ilgili enerji verimliliği çalışmaları üç ana kısımda incelenmektedir:

- Fırın baca gazlarından ısı geri kazanımıyla sağlanabilecek tasarruf,
- Yüksek fırın iyileştirme projeleriyle elde edilebilecek tasarruf,
- Proses odaklı tasarruf potansiyelleri.

Demirçelik sanayi, enerji ve karbon yoğun üretim süreçlerine dayandığından sektördeki sera gazı emisyonlarını azaltmak için üç ana seçenek akla gelmektedir [167, 168]:

- Enerji verimliliğinin artırılması,
- Karbon yakalama teknolojilerinin uygulanması,
- Geri dönüşüme dayalı döngüsel üretim payının artması.

Sektörde kullanılan tav fırınları hem yakıt tüketimleri hem de çevreye salınan atık gazlarından kaynaklanan kirlilik sebebiyle işletmelerde mümkün olduğunca verimli çalışması gereken sistemlerdir. Tav fırınlarının ısı verimi genellikle %35-45 aralığındadır ve sistem içindeki verim kaybı çoğunlukla egzoz gazlarından kaynaklanmaktadır. Ortaya çıkan kaybın nedeni, tav fırınlarının görevleri gereği çok yüksek sıcaklıklarda çalışması ve bu sırada brülörlerdeki yanma neticesinde sistemden dışarıya atılan gazın yüksek sıcaklıkta olmasıdır. Sıcaklığı 650 °C civarında olan baca gazlarının enerjisi, çeşitli ekonomizer ve eşanjör uygulamaları ile ortam ısıtmasında, ön ısıtmada, kızgın su ve buhar ihtiyacının karşılanmasında ya da sıcak su üretiminde kullanılabilir. Yüzey kayıplarını azaltmak içinse, fırının iç yüzey yalıtımını artırarak fırın yüzeyinden kaynaklanan radyasyon ve konveksiyon kayıpları önlenebilir [169].

3.2. Çimento Sanayi (Cement Industry)

Çimento sanayi CO₂ salınımı yüksek, enerji yoğun bir sektör olmakla birlikte, artan kentleşme oranlarına bağlı olarak ihtiyaç duyulan alt ve üst yapıların temel malzeme tedarikçisi konumundadır [170–172]. Küresel çimento üretimi, 4,28 milyar ton kapasiteyle toplam enerji tüketiminin %3'ünü ve toplam CO₂ salınımının ise %7'sini oluşturmaktadır [173, 174]. Bu üretimin yarısından fazlasını tek başına Çin üstlenmektedir [175].

Çimento, TS EN 197-1 standardına göre su ile karıştırıldığında hidrasyon reaksiyonları ve prosesler nedeniyle çeşitli tepkimelere giren ve

bunun sonucunda sertleşen bir hamur (pasta) oluşturan ve sertleşme sonrası suyun altında bile dayanımını ve kararlılığını koruyan, inorganik ve ince öğütülmüş, hidrolik bağlayıcıdır. Çimento sektörü ülkemizin en eski sektörlerinden biri olup enerji tüketiminde demirçelik sanayinin ardından ikinci sırada yer almaktadır [148]. Çimento üretim maliyetinin yaklaşık %60-70'i enerji kökenli harcamalardan kaynaklanırken [176], üretim aşamaları kısaca şu şekilde sıralanabilir:

- Hammadde çıkarma
- Öğütme
- Klinker üretimi
- Çimento öğütme
- Paketleme

Çimento sektöründe, her 1 ton çimento üretimi için 0,6t ile 1t arasında CO₂ salınımı gerçekleşmektedir. Bu emisyonun %60'ı kalsinasyon prosesinden kaynaklanırken, kalan %40'ı fırınlarda oluşan ısıdan gelmektedir [177]. Leeson ve arkadaşları [177], kalsinasyon prosesindeki emisyonların genel üretim miktarı düşürülmeden azaltılamayacağına dikkat çekmektedir. Buna sebep olarak, meydana gelen kimyasal sürecin kireçtaşının klinker ve CO₂'e ayrışmasının doğal bir sonucu olarak ortaya çıkması gösterilmektedir [177, 178]. Bu soruna çözüm olarak Tomatis ve arkadaşları [179] kalsinasyon sürecinde güneş enerjisi kullanımının olası etkilerini araştırdıkları çalışmalarında, termal enerjinin ortaya çıkan sera gazlarını %48 oranında azaltabildiğini tespit etmişlerdir. Ayrıca, bu oran karbon yakalama teknolojisinin sisteme eklenmesiyle %63-81 seviyesine yükselmektedir. Ek olarak, çeşitli araştırmacılar atık ısı geri kazanım sistemi ile klinker üretimi sırasında ortaya çıkan ısının verimli bir şekilde kullanılmasının sağlanabileceğini belirtmektedir [180, 181].

Yıldız ve arkadaşları [148] araştırmalarında bir çimento fabrikasının yardımcı operasyonlarındaki enerji tüketimi incelenmiştir. Araştırma sonuçlarına göre verimliliği artırmak amacıyla:

- Döner fırın soğutma atık gazı kullanılarak reküperatör sistemi kurulabilir. Bu yolla elde edilecek sıcak buhardan, ısınma ve sıcak su için kazan beslemesinde tüketilen likit doğal gaz miktarının düşürülmesinde faydalanılabilir.
- Kompresör hattının ısı eşanjörleri düzenli olarak temizlenmelidir, böylece aşırı ısınma nedeniyle ortaya çıkan devreden çıkma sorunu ortadan kalkabilir.

- Basınçlı hava tanklarının, tanklarda biriken sudan sistemin etkilenmesini önlemek amacıyla otomatik drenaj sistemi eklenerek basınç hatlarında oluşacak korozyon en aza indirilebilir.

Farklı bir çalışmada [182], değişken hızlı sürücülerin (VSD) çimento endüstrisindeki motorlara uygulanmasının küresel ölçekte yaklaşık 1.865.925 MWh tasarruf sağlayabileceğini ortaya koymaktadır. Bu çalışmanın sonuçlarına göre, VSD'ler kullanılarak düşük voltajlı motor hızlarının %60 oranında azaltılmasıyla yılda yaklaşık 2.122.675 ton CO₂ emisyonunun önüne geçilebileceği belirtilmektedir.

3.3. Gıda Sanayi (Food Industry)

Avrupa Birliği'nde gıda endüstrisinin son zamanlarda en fazla enerji tüketen sektörlerden biri haline geldiği belirtilirken, bunun kısmen artan üretim hacimleriyle birlikte gıda güvenliği standartlarının zorunlu kıldığı soğuk zincir sistemi sebebiyle yükselen enerji tüketiminden kaynaklandığı vurgulanmaktadır [183–186]. Literatürde gıda sanayinde yapılan enerji verimliliği uygulamalarına sıkça rastlanmaktadır [187]. Jagtap ve arkadaşları [188], içecek doldurma pompalarında yapılan revizyon ve soğutma tesisini nemlendirme tesisine dönüştürme gibi işletmeler için geri ödeme süresi 3 yıldan kısa olan uygulamaları önermektedir. Rüşen ve Çevik'in [189] Karaman'daki bir gıda işletmesine ait gofret üretim hattının enerji verimliliğini değerlendirdiği çalışmada, kazan sistemlerinde brülör değişimi ile kazan veriminin %5,2 artacağı belirtilmektedir.

Bir diğer çalışmada ise Kıyılmaz ve arkadaşları [190], dondurma üretimi yapan büyük ölçekli bir gıda tesisinde yapılan denetimlerde enerji kayıplarının özellikle buhar ve kondens hatlarında, basınçlı hava dağıtımında ve transformatörlerde yoğunlaştığını göstermektedir. Bu durum Kaya'nın [191] benzer özelliklere sahip tesisleri içeren çalışmasında vardığı sonuçları doğrular niteliktedir. Çalışmada [190]:

- 620.155 kWh değerinde 800 ton buhar kaçağının olduğu tespit edilirken alınacak basit önlemler ile yıllık 54 TEP buhar kaçağının önlenilebileceği aktarılmaktadır.

3.4. Otomotiv Sanayi (Automotive Industry)

Sanayide yer alan sektörlerden bir diğeri olan otomotiv sektörü de enerjinin yoğun tüketildiği alanlardan biridir. Otomotiv işletmelerinde yapılan enerji verimliliği uygulamaları ile ilgili öne çıkan bazı çalışmalar şu şekilde özetlenebilir:

- Akbaş ve arkadaşlarının [192] yaptığı çalışmada, seçilen işletmede kullanılan pompa ve fanların daha verimliliyle değiştirilmesi ve halihazırda kullanılan kompresörlerin basınçlarının düşürülmesi gibi uygulamaların sonuçları belirtilmiştir.
- Rivera ve arkadaşları [193], araç boyama ünitesindeki proses ve tekniklerde yapılacak geliştirmelerle elde edilebilecek enerji kazanımlarını aktarmaktadır.
- Kılıç ve arkadaşlarının [194] araştırmasında, bir otomobil montaj tesisinin enerji tüketimi incelenmiş ve enerjinin yoğun olarak kullanıldığı imalat süreci için çeşitli iyileştirmeler önerilmiştir.
- Uylukçuoğlu [195] tarafından yapılan çalışmada, önerilen uygulamaların ısı enerjisinden 427.212 m³, elektrik enerjisinden ise 8.124.198 kWh tasarruf sağlayabileceği hesaplanmıştır.

4. ENERJİ YÖNETİM VE DENETİMİ (ENERGY MANAGEMENT AND AUDIT)

Enerji yönetimi, rekabetçi konumu güçlendirmek ve karlılığı en üst düzeye çıkarmak için enerjinin akılcı ve etkili bir şekilde kullanılmasıdır [196]. Bu hedefe ulaşmak için, enerji tüketen süreçler ve prosedürler için üretim birimi başına enerji gereksiniminin azaltılması veya aynı üretim biriminin daha düşük enerji maliyetleriyle işletilmesi gerekmektedir.

Endüstriyel işletmelerde enerji verimliliğinin artırılması amacıyla pek çok faaliyet yürütülmektedir. Planlanan faaliyetler özetle;

- Enerji yöneticilerinin şirketlerinin bulunduğu ülkelerin yasal düzenlemelerine uygun çalışması,
- Enerji Yönetim Sistemi ISO 50001 kapsamında yürütülmesi,
- Enerji etütleri ve araştırma sonuçlarına dayalı olarak yapılan iyileştirme ve yenileme yatırımları,
- Gönüllülük esasına dayalı düzenlemeler ve teşvikler yoluyla verimliliği artırmaya yönelik projeler,

- Enerji verimliliği danışmanlık şirketleri veya özel danışmanlıklarla yapılan çalışmalar,
- Teknoloji yatırımlarıyla sağlanan enerji tasarrufu,
- Pinch analiziyle elde edilen enerji tasarrufları şeklinde ifade edilebilir.

Pinch analizi, süreç veya süreç sistemindeki kaynakların mantıksal ve sistematik bir çerçevede mümkün olan en iyi şekilde tespit edilmesine olanak sağlayan bir araçtır. Pinch yöntemi petrokimya endüstrisinde ortaya çıkmakla birlikte, şu anda kimya endüstrisindeki (ör. kâğıt, gıda ve kimya) çeşitli sorunları çözmek için kullanılmaktadır. Pinch analizinin ilk uygulamaları endüstride enerji tasarrufunu sağlamaya yönelik olmakla birlikte, günümüzde atık ve emisyonların azaltılması, darboğazların belirlenip ortadan kaldırılması, güvenliğin ve süreç esnekliğinin artırılması, enerjinin en aza indirilmesi gibi sorunların çözümünde de yaygın olarak kullanılmaktadır. Pinch analizi sonuçlarına göre, enerji maliyetlerinde %15-40 oranında düşüş, kapasite darboğazının kaldırılmasında %5-15 oranında artış ve yeni tasarımlarda toplam maliyetlerin %5-10 oranında azalma sağlanabilmektedir [197].

İşletmelerde enerji yönetiminin var olabilmesi için bazı temel bileşenlerin mevcut olması gerektiği aktarılmaktadır [198]:

- Firma üst yönetim taahhüdünün yapılması,
- Enerji yönetim sistemi ve program amaçlarının açıkça tanımlanması,
- Organizasyon yapısının, tanım ve sorumluluklarının belirlenmesi,
- Mevcut kaynakların (insan ve mali) sağlanması,
- Ölçme ve izleme süreçlerinin sağlanması,
- İlerlemenin düzenli olarak gözden geçirilmesi.

Enerji yönetimi, temelde enerji tüketimini optimize etme sürecidir ve doğası gereği multidisipliner bir yaklaşım gerektirir. Bu yaklaşım, mimarlık, mühendislik, işletme, finans ve diğer ilgili becerilerin bir bütünlük içinde ele alınmasını gerektirir. Bu farklı disiplinlerin bir araya gelmesi, enerji yönetimi hedeflerinin başarılması ve enerji verimliliğinin artırılması için gereklidir [199–202].

Enerji yönetimi kavramı ilk olarak 1970 enerji krizinin ardından ortaya çıkarken, çeşitli endüstriyel alanlarda üretim süreçlerinin denetlenerek enerji verimliliğinin artırılması amaçlanmıştır [203]. Enerji yönetimi ve özellikle enerji verimliliği, tüm faaliyet sektörlerinde Sürdürülebilir Kalkınma

Hedeflerine (SDGs) yönelik değişimin ana unsuru kabul edilmektedir [204]. Thollander ve Palm [205], "Enerji yönetimi, bir şirketin enerji üzerinde stratejik olarak çalıştığı prosedür olarak tanımlanırken, enerji yönetim sistemi bu prosedürleri uygulamak için bir araçtır" şeklinde belirtmektedir.

Enerji Verimliliği Direktifi, üye devletlerin endüstrilerinin enerji denetimlerinden geçmesini teşvik etmek için enerji verimliliği programları geliştirmelerini özendirilmektedir [206]. Enerji denetimlerinin, enerji verimliliği önlemlerine [207] yapılan yatırımları hızlandırmak ve uygulamak için yararlı bir araç olduğu ve böylece şirketlerin daha verimli olmasına ve CO₂ emisyonlarının azaltılmasına katkıda bulunmasına yardımcı olduğu gösterilmiştir. KOBİ'ler için gönüllü enerji denetimi politika programları, en yaygın kullanılan politikalardan biridir [208]. Yıllık toplam enerji tüketimleri 500 TEP ve üzeri olan ticaret ve sanayi odası, ticaret veya sanayi odasına bağlı olarak faaliyet gösteren ve her türlü mal üretimi yapan işletmeler VAP (Verimlilik Artırıcı Proje) desteklerinden yararlanmak için başvuruda bulunabilmektedir. Bir diğer zorunlu politika yaklaşımı ise AB üye devletlerinde, KOBİ olmayan şirketlerin her dört yılda bir bağımsız ve uygun maliyetli bir şekilde enerji denetimleri gerçekleştirmelerine yönelik mevzuattır [209].

Düzenli olarak gerçekleştirilen denetimlerin, enerji verimliliğinin yanı sıra çalışma koşullarının iyileştirilmesi yoluyla çalışanların iş verimini de artırdığı gözlemlenmiştir [210, 211]. Bu bağlamda Worrel ve arkadaşları [212] yaptıkları araştırmada, sanayide uygulanan verimlilik önlemlerinin genel üretkenliği önemli ölçüde artırdığı sonucuna varmıştır. Bu çalışmaya ek olarak Pye ve McKane [213], yapılan iyileştirmeler sonucunda enerji dışı kazançların genellikle öngörülenin çok üzerinde gerçekleştiğini aktarmaktadır. Genel olarak araştırmacılar, enerji tasarrufunu ana hedef olarak görmekten ziyade elde edilecek toplam faydanın bir parçası olarak değerlendirilmesi gerektiğini öne sürmektedir.

Enerji denetimi üzerine yapılan çalışmalar sonucunda [214]:

- Enerji denetimlerinin daha uzun ekipman ömrü sağladığı,
- Artan ekipman ömrünün bakım masraflarını düşürdüğü,

- Makine arızaları kaynaklı üretim kaybını en aza indirdiği,
- İyileşen çalışma ortamının iş verimini artırdığı tespit edilmiştir.

Zuberi ve arkadaşlarının [215] yassı demir, tel ve levha imalatı yapan küçük ölçekli bir tesiste gerçekleştirdikleri enerji denetimlerinde:

- Termal (soğutulmuş su depolama tankı ve boruları) ve elektrik (armatürler) altyapısındaki iyileştirmeler [216] ile yaklaşık %23 enerji tasarrufu sağlanabileceği,
- Buna karşılık yapılacak yatırımın 4 ay gibi kısa bir sürede kendisini geri ödeyeceği tespit edilmiştir.

Bir diğer çalışmada ise Bosu ve arkadaşlarının [217], Mısır'da yer alan Almasrya Dökme Kalıplama Bileşikleri (BMC) tesisinin enerji verimliliğini incelediği belirtilmektedir. Tesis genel olarak enerji talebini şebekeden karşılamakla birlikte, 2022'de faaliyete aldığı 220 kWp'lık PV sistem ile (Şekil 6) tüketiminin 1/3'ü kadar üretim yapar hale gelmiştir.



Şekil 6. Fabrikada yer alan çatı üstü PV sisteminin görüntüsü (Image of the rooftop PV system in the factory)

Araştırmacılar yapılan inceleme sonucunda çeşitli tespit ve önerilerde bulunmuşlardır [217]:

- Enerji denetimi sırasında karşılaşılan en büyük zorluk, durum tespiti ve verim önerileri için ilk adım olarak görülebilecek makine ve binaların enerji verilerini içeren etiketlerdeki eksikliklerdir. Denetim işleminin daha detaylı ve kesin sonuçlara ulaşabilmesi için ilk olarak işletmelerdeki veri etiketlerinin tamamlanması gerekmektedir.
- PV sisteminin kullanılmayan çatı alanı üzerine genişletilmesi ile yıllık 677 MWh üretim kapasitesine ulaşılabilir, bu da yaklaşık olarak fabrikanın yıllık elektrik tüketiminin %51'ne denk gelmektedir. Yapılacak yatırımın geri ödeme süresinin 3 yıl olacağı ön görülürken, ayrıca yıllık 293 ton CO₂ emisyonunun önüne geçilebilecektir.

- Var olan motor sistemlerine değişken hızlı sürücülerin (VSD's) takılması ile yıllık elektrik tüketiminde %4,11 tasarruf sağlanacaktır. Yatırımın geri ödeme süresi 21 ay olurken, CO₂ emisyonunda yıllık 21 tonluk düşüş beklenmektedir.
- Kalıpların alt ve üst yüzeylerine termal levhalar eklenerek hava boşluklu olarak tasarlanması, yıllık yaklaşık 320.000 kWh enerji tasarrufu sağlarken 138 ton CO₂ salınımı engellenebilecektir.
- Tıkanmış, kirli ve eski fanların bakımının doğru yapılması ile %9 enerji tasarrufu sağlanabilir.
- Fan hızlarını düzenlemek için iki merkezi ayarlanabilir hız sürücüsünün (ASD) kurulması ile yıllık yaklaşık 121.461 kWh enerji tasarrufu sağlarken, 53 ton CO₂ azaltımı mümkündür. Sistemin geri ödeme süresinin 8 ay olacağı hesaplanmaktadır.
- İki vidalı kompresörlerde tespit edilen fazla basıncının düşürülmesi ile yaklaşık 9.407 kWh/yıl tasarruf yakalanabilir. Ek olarak yıllık 6,4 ton CO₂ azaltımı öngörülmektedir.
- Atölyede tespit edilen aşırı aydınlatma, gereksiz lambaların söndürülüp gün ışığından daha fazla faydalanılarak bertaraf edilebilir. Bu eylem yaklaşık 23.000 kWh/yıl enerji tasarrufu sağlarken, CO₂ salınımı yıllık 14 ton azaltılabilir.
- Dört fosil yakıt bazlı forkliftin elektrikli forkliftlerle değiştirilmesi ile yıllık 27,6 ton CO₂ emisyonun önüne geçilebilir. Yatırımın tahmin edilen geri ödeme süresi 67 ay olmaktadır.

Martin ve arkadaşlarının çalışmalarına göre [218], yönetim uygulamaları ile üretkenlik arasında pozitif bir korelasyon bulunmaktadır. Yöneticiler ile çalışanlar arasındaki uyum arttıkça çalışan verimliliği de artmaktadır. Bu nedenle bir organizasyon yapısı planlanırken, yönetim kademesinin ön görülen iş tanımına uygun, mesleki yeterliliklerinin yanı sıra sosyal becerilere de sahip doğru kişilerden oluşmasına dikkat edilmesi gerekmektedir [219, 220].

Japonya'daki endüstriyel elektrik tüketimini etkileyen faktörleri araştıran Otsuka [221], çalışmada çeşitli politika önerilerine de yer vermektedir:

- Yerel iklim koşulları ile elektrik tüketimi arasında pozitif korelasyon bulunmaktadır. Yaz aylarının uzun sürdüğü bölgelerde artan klima kullanımı nedeniyle iklimlendirme amaçlı elektrik tüketiminin maliyeti daha yüksek olup,

firmalar maliyet tasarrufu sağlayıcı davranmaya teşvik edilmelidir.

- İşletme büyüklüğü ile enerji verimliliği arasında negatif korelasyon tespit edilmiştir. Çalışan sayısı arttıkça gerekli çalışma alanıyla birlikte elektronik cihaz ihtiyacı da artmaktadır. Artan ofis sayısı, tüketilen elektriğin çalışanlar tarafından eşit paylaşım imkanını azaltması israfa neden olabilmektedir. Bu nedenle büyük işletmelerde enerji verimliliğinin artırılmasına yönelik politikalara ihtiyaç duyulmaktadır.
- Müessese yoğunluğunun elektrik tüketimi verimliliğini olumlu yönde etkilediği tespit edilmiştir. İşletmelerin organize sanayi bölgeleri (OSB) gibi alanlarda mekânsal olarak yoğunlaşması, yığılma ekonomileri yoluyla üretkenliği artırmaktadır.

Sonuç olarak birçok araştırmaya göre [222–224] ISO 14001 ve ISO 50001 gibi çevre yönetim sistemlerinin firmalar tarafından benimsenmesi, enerji verimliliğini artırmaya yönelik önemli bir adım olurken, aynı zamanda çalışanların iş motivasyonunu artırıcı çeşitli sosyal faydalar da sağladığı tespit edilmiştir. ISO 50001: Enerji Yönetim Sistemi ve araçları ile yıllık enerji maliyetlerinin %5 ile %20 arasında düşebileceği rapor edilmektedir [81]. Töre ve Eltaş'ta araştırmalarında benzer verim artış oranlarına ulaşmış olup [147], sanayide geniş çaplı bir verim artışının yakalanabilmesi için ISO 50001'in yaygınlaşması gerektiğini ve hatta mümkünse sanayide yasal zorunluluk olarak uygulanmasını aktarmaktadır.

5. ATIK ISI (WASTE HEAT)

Sanayideki enerji verimliliğini artırmaya yönelik güncel çalışmalardan birisi de atık ısının geri kazanımıdır (WHR) [225–228]. Endüstriyel süreçler yan ürün olarak ısı üretirken, genellikle bu ısıdan yeterince faydalanılmamaktadır. Isıtma proseslerinin %50'ye varan oranlarda atık ısıya yol açtığı tahmin edilmektedir [229]. Bu sebeple sanayi sektöründe, endüstriyel atık ısı geri kazanım teknolojisi de dahil olmak üzere çeşitli yenilenebilir enerji kaynaklarından enerji verimliliğini artırmaya yönelik çalışmalar yapılmaktadır [230, 231]. WHR sistemlerini kullanmanın başlıca faydaları aşağıda verilmiştir [232]:

- Fosil yakıtlara olan ihtiyacın azaltılması,
- Sektörel bazda enerji yoğunluğunun düşürülmesi,

- Düşen enerji maliyetlerine bağlı olarak artan kâr marjı,
- Enerji fiyatlarında yaşanacak dalgalanmalara karşı korunma,
- CO₂ emisyonlarının azaltılarak karbon ticareti için fırsat yaratılması.

Isıtmaya ek olarak üretim safhalarında da ciddi miktarda atık ısının ortaya çıktığı bilinirken bu oranın [226, 228];

- Birleşik Krallık'taki sanayi üretiminde ortalama %17,
- ABD'de yaklaşık %20,
- Avrupa Birliğinde ise %15 olduğu tespit edilmiştir.

Yapılan araştırmalar ve incelenen uygulamalar neticesinde ölçek ve koşullara bağlı olarak WHR'den yararlanılabilecek farklı kullanım alanları tespit edilmiştir:

- Isı üretimi [233],
- Soğutma [234, 235],
- Güç üretimi [236, 237],
- Yakıtlar [238, 239].

Ayrıca, özellikle organize sanayi bölgeleri gibi bütünleşik üretim alanlarında, ısıtma/soğutma hatları üzerinden ihtiyaç fazlası atık ısının diğer üreticilerin kullanımı için aktarılabileceği belirtilmektedir [240, 241].

5.1. Atık Isı Kazanları (Waste Heat Boilers)

Atık ısının geri kazanımı, endüstriyel kazanlarda enerji verimliliğini artırmanın etkili bir yoludur. Bu amaçla, yoğunlaşma kazanlarda, soğuk kaynak ile baca gazı arasındaki sıcaklık farkını artırmayı hedefleyen atık ısı sistemleri önerilmektedir [242]. Bu yaklaşıma göre baca gazı atık ısısının geri kazanımı, enerji verimliliğini artırmak, fosil yakıt tüketimini ve sera gazı emisyonlarını azaltmak için etkilidir [243, 244].

Çeşitli yöntemler ile elde edilen atık ısı sıcaklık değerlerine göre:

- Yüksek ve orta sıcaklıktaki atık ısı (≥ 70 °C),
- Düşük sıcaklıktaki atık ısı (40–70 °C) olarak iki ana kategoride değerlendirilmektedir.

Kimya, metalurji, kâğıt, tekstil ve inşaat endüstrilerinde yaygın olarak kullanılan düşük sıcaklıktaki (40–70 °C) atık ısı, üretilen toplam atık ısının yaklaşık %30'unu oluşturmaktadır [245].

Orta-düşük sıcaklıktaki atık ısının geri kazanılmasına yönelik en yaygın uygulamalar sırasıyla baca gazlarını soğutup, kazan besleme suyunu veya hava/hava-yakıt karışımını ısıtan ısı eşanjörlerini içermektedir [246, 247]. Yan ve arkadaşları [248], mevcut ısıtma kurulumlarına faz değiştirici malzeme (PCM) eklemenin atık ısı geri kazanım sistemi üzerindeki etkilerini inceledikleri çalışmalarında, ortalama enerji verimliliğinin %40 oranında arttığını bildirmektedir.

5.2. Sanayiden Örnek Vaka İncelemeleri (Case Studies from Industry)

Remeli [249], termoelektrik ısı borusu jeneratörü kullanarak ısı geri kazanımı ve enerji üretimi için pasif bir ısı değişim sistemi geliştirmiştir. Sistemin eş zamanlı olarak atık ısıyı geri kazanma ve hiçbir yardımcı enerji kullanmadan tamamen pasif bir şekilde elektrik üretme potansiyeline sahip olduğu kanıtlanmıştır.

Jouhara [250], çelik endüstrisi için düz ısı borulu ısı eşanjörü ve ısı geri kazanım sisteminin tasarımı ve üretimi üzerinde çalışmaktadır. Araştırma sonucunda, düz ısı borulu ısı değiştiricinin endüstriyel uygulamalarda atık ısının geri kazanımı için yenilikçi ve yüksek verimli bir teknoloji olduğu sonucuna varılmıştır.

Oğulata ve Doba [251] yaptıkları çalışmada, atık ısı geri kazanım sistemlerindeki yüksek verimliliği nedeniyle çapraz akışlı plakalı ısı değiştiriciyi araştırmışlardır. Sistemdeki sıcaklık, hava hızı ve basınç kayıplarını ölçerek araştırmalarında sistemin etkinliğini değerlendirmişlerdir.

Farshi çalışmasında [252], kademeli sıkıştırma absorpsiyonlu ısı pompası adı verilen yeni bir ısı pompası tasarlayarak bunu diğer ısı pompalarıyla (sıkıştırma, absorpsiyon ve hibrit sıkıştırma-absorpsiyon) karşılaştırmıştır. Araştırmada, dört farklı ısı pompasının verim oranlarının karşılaştırılması amacıyla enerji ve ekserji analizleri yapılmıştır.

Gibbs çalışmasında [253], kazana ekonomizer takılması sonucunda elde edilecek yakıt tasarruf miktarını araştırmıştır. Yapılan testler, ekonomizerin takılmasıyla %6 ila %16 arasında yakıt tasarrufu sağlandığını göstermektedir.

Butcher ve Litzke [254], kömürle çalışan kazanlarda kullanılan yoğunlaşma ekonomizerlerin etkinliğini ve emisyon kontrolünde baca gazlarının

potansiyel kullanımını inceledikleri bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Araştırmaları kapsamında bu tip kazanlara entegre hava ve su soğutmalı ekonomizörler üzerinde ısı transferi hesaplamaları yaparak çeşitli testler gerçekleştirmişlerdir.

He [255], kömürlü enerji santrallerinde atık ısı geri kazanımı için düşük basınçlı bir ekonomizör tasarlayarak sistemin termodinamik analizini gerçekleştirmiştir. Sonuç olarak, düşük basınçlı ekonomizör kullanımının egzoz gazı ısını etkili bir şekilde geri kazanabileceğini ve bu sayede su tüketiminin azaltılabileceğini belirtmektedir.

Willems [256], endüstriyel kazanlar için gelişmiş sistem kontrolleri ve enerji tasarrufu yöntemlerini inceleyerek, kazanlarda enerji tasarrufu sağlamak için kullanılabilecek yöntemleri ele almıştır.

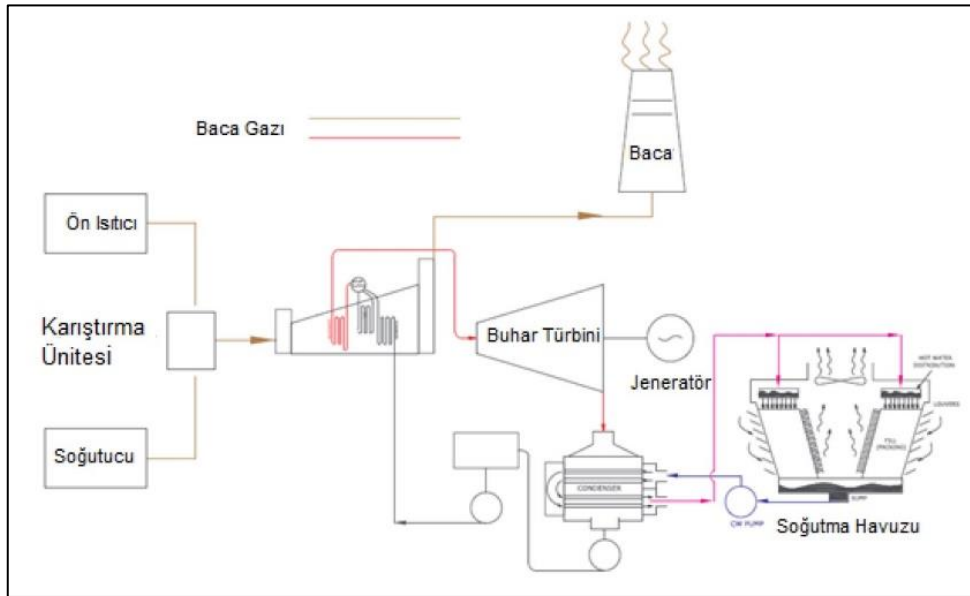
Wang'ın [257] çalışmasında, endüstriyel buhar kazanlarından atık ısı ve suyun geri kazanılması için geliştirilen membran kondenser teknolojisi incelenmiştir. Bu teknoloji ile egzoz buharı miktarının %40 azaldığı ve bu sayede genel verimliliğin %5 arttığı belirtilmektedir.

Peris [258], seramik endüstrisindeki düşük dereceli atık ısının geri kazanılmasında organik Rankine döngüsünün deneysel bir uygulamasını test etmiştir. Araştırmanın amacı, organik Rankine çevriminin performansını gerçek endüstriyel koşullar altında doğrulamak ve uygulamanın maliyet etkinliğini

değerlendirmektir. Isı geri kazanım modeli, laboratuvar testleri ve endüstriyel uygulamalardan elde edilen organik Rankine çevrimi performans verilerine dayanılarak geliştirilmiştir. Sistemin bir mali yıl boyunca elektrik üretimini simüle eden modelde 115 MWh'nin üzerinde enerji üretimi sağlanmıştır. Ramirez ve arkadaşları ise [259], bir çelik fabrikasına uyguladıkları farklı bir model ile 1,8 MW nominal güç çıkışı ve %21,7 net verimlilik elde etmişlerdir.

Çelik endüstrisindeki cüruf soğutma sürecinde atık ısıyı geri kazanmak için kullanılan ısı borulu ısı eşanjörünü inceleyen pek çok araştırma bulunmaktadır [260–262]. Araştırmaların sonuçları, atık ısının geri kazanılmasının enerji ve ekonomik verimliliği artırabileceğini ve CO₂ emisyonlarını azaltılabileceğini göstermektedir.

Naeimi ve arkadaşları [263] yaptıkları çalışmada, enerji israfının büyük kısmının ön ısıtıcı bölgesinde meydana geldiğini belirtmektedir. Şekil 7'de görülebileceği üzere ön ısıtıcıdan çıkan egzoz gazları karıştırma odasından çıkan sıcak hava ile karşılaşmaktadır. Sıcak gazlar ile su arasındaki ısı transferi suyu buhara dönüştürmektedir. Daha sonra buhar türbinine gönderilir ve burada güç üretmek için kullanılır. Isı geri kazanım sistemi ile tüketilen elektrik enerjisinin yaklaşık %30'nun geri kazanıldığı hesaplanmıştır. Ayrıca ısı geri kazanımı sayesinde ısıtma veriminin %32,32 arttığı aktarılmaktadır [263].



Şekil 7. Atık ısı geri kazanımı (Waste heat recovery) [263]

6. KOJENERASYON & TRİJENERASYON (COGENERATION & TRIGENERATION)

Kojenerasyon sistemleri, endüstrideki verimliliğe katkıda bulunan yardımcı bileşenlerin başında yer almaktadır. Bu sistemler, ısı ve elektriğin birlikte üretildiği yapılar olduğu için kojenerasyon olarak adlandırılmaktadır (Şekil 8). Isı ve elektrik enerjisinin aynı yerde üretilebilmesi, artan verimlilik ve düşen üretim maliyetleri gibi önemli avantajlar sağlar. Normal şartlarda sadece elektrik üreten bir gaz türbin veya motorunun elektrik dönüşüm verimliliği %30-40 seviyelerindeyken,

kojenerasyon sistemlerinde ısı üretimi ile desteklenen sistemin verimi %80-90'lara kadar çıkmaktadır [264, 265]. Benzer şekilde, termik santrallerin ortalama elektrik üretim verimi %36 iken, ısı verimi %80 seviyesindedir. Elektrik ve ısının ayrı ayrı üretilmesi durumunda ortalama verim %58 seviyesine düşerken, elektrik ve ısının birlikte üretildiği kojenerasyon uygulamalarında verim %85 dolaylarına çıkmaktadır [148]. Kurulumları yapılan tesislerin yüksek verimleri sayesinde ilk yatırım maliyetlerini 1,5-3 yıl gibi bir sürede karşıladığı gözlemlenmiştir [265].



Şekil 8. Kojenerasyon enerji üretim sistemi (Cogeneration energy production system)

Tablo 1. Kojenerasyon uygulamaları (Cogeneration applications)

Endüstriyel Uygulamalar	Konut/Ticari ve Bölgesel Uygulamalar
Tekstil ve çelik endüstrisi	Okullar, Üniversiteler
Gıda Üretimi yapılan tesisler	Hastaneler
Biyokütle kullanılan tesisler	Oteller ve alışveriş merkezleri
Rafineriler	Çok katlı konutlar, büyük siteler
Çimento, seramik vb. fabrikaları	Büyük marketler ve is merkezleri
Kimyasal işletmeler	Özel büyük spor kompleksleri
Kağıt ve selüloz işleme tesisleri	Toplu yerleşim birimleri
Gübre tesisleri	Seralar
Katı ve sıvı atık arıtma tesisleri	

Endüstriyel kojenerasyon yapıları yıl boyunca ısı ve elektriğe talebin yüksek olduğu tesislerde kullanılırken, bu tesisler genel olarak iki grup altında toplanmaktadır (Tablo 1):

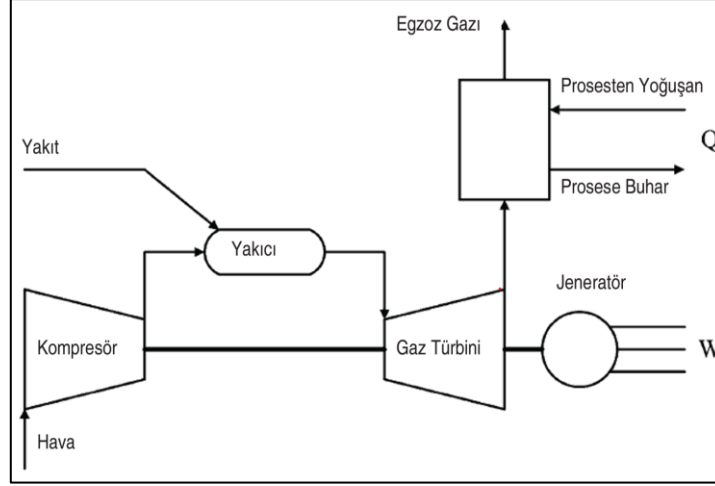
- Yüksek sıcaklıkta termal enerjiye ihtiyaç duyan tesisler (rafineriler, gübre fabrikaları, çelik, çimento, seramik ve cam endüstrileri),
- Düşük sıcaklıkta termal enerjiye ihtiyaç duyan tesisler (kâğıt fabrikaları, tekstil fabrikaları, yiyecek ve içecek fabrikaları).

Endüstriyel kojenerasyon tesislerinde (Şekil 9), proses atıklarından veya prosesin kendisinden termal enerji üretmek mümkündür. Örneğin, kâğıt

fabrikalarında kâğıt yapımı sırasında ortaya çıkan büyük miktardaki atık malzeme (ağaç kabuğu, ıskartalar, kâğıt hamuruna uygun olmayan ağaç parçaları) yardımcı yakıt olarak kullanılabilir veya çelik üretimi sırasında açığa çıkan sıcak gazlar buhar üretim sürecine katkıda bulunabilir. Bu yöntemler, proses atıklarının değerlendirilmesi ve enerji geri kazanımı açısından önemli bir strateji oluştururken, aynı zamanda enerji tüketimini azaltarak çevresel etkileri de azaltmaya yardımcı olur. Bu şekilde endüstriyel işletmeler, atık malzemeleri ve yan ürünleri yeniden kullanarak enerji maliyetlerini düşürebilir ve sürdürülebilir bir üretim sürecine katkıda bulunabilir.

Sanayide ihtiyaç duyulan ısı ağırlıklı olarak buhar formundadır. Bu nedenle, gaz türbini çevriminin çıkışındaki egzoz gazlarının ısısından buhar elde edilerek enerji üretiminde kullanılan kombine çevrimli kojenerasyon sistemleri endüstriyel tesislerde yaygın olarak kullanılmaktadır.

Endüstriyel kojenerasyon tesislerinin yılda 8.000 saat ve üzerinde sürekli çalışabilmesi, yüksek ısı potansiyeline sahip gelişmiş ülkelerde kojenerasyonun uygulanabilir bir seçenek haline gelmesini sağlamaktadır [264].



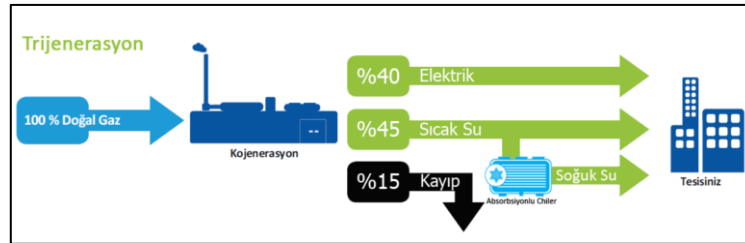
Şekil 9. Endüstriyel kojenerasyon (Industrial cogeneration)

Trijenerasyon sistemi ise, ısı üretimi sağlayan kojenerasyon sisteminin ek bir soğutma özelliği eklenmiş versiyonudur (Şekil 10). Trijenerasyon sistemi şebekeye yalnızca elektrik ve ısı enerjisi sağlamakla kalmaz, aynı zamanda soğutma hattına soğuk su takviyesi de yapmaktadır. Trijenerasyon

sistemi, soğutma için gerekli olan soğuk suyu absorpsiyonlu chiller aracılığıyla sağlar (Şekil 11). Absorpsiyonlu chiller ünitesi, lityum bromür gibi bir soğurucu madde içerir ve motor tarafından gönderilen sıcak suyu absorbe ederek şebekeyi 12-7°C sıcaklıkta tutar [264].



Şekil 10. Trijenerasyon enerji üretim sistemi (Trigeneration energy production system)



Şekil 11. Trijenerasyon sistem şeması (Trigeneration system diagram) [266]

7. KARBON YAKALAMA VE DEPOLAMA (CARBON CAPTURE AND STORAGE)

Küresel ısınma ve iklim değişikliğinin etkilerini azaltma amacıyla belirlenen 2030'a kadar 2°C hedefinin yanı sıra, ülkeler için bir diğer ortak hedef

de 2050 yılına kadar karbon nötr olmaktır. Bu hedefe ulaşmak için çeşitli sektörel inovasyonların kullanılması gerekmektedir [267, 268]. Sanayi alanında bu hedefe ulaşmak için geliştirilen teknolojik alternatiflerden biri karbon yakalama ve depolama (CCS) yöntemidir [177, 269–271].

Karbon yakalama kısaca, endüstriyel ve termik santral bacalarından salınan veya atmosferde bulunan CO₂'in doğrudan hava yakalama (DAC) teknolojisiyle teknolojisiyle toplanarak ayrıştırılması işlemidir [272, 273]. Bu süreçten sonra toplanan CO₂ depolanabilir veya tekrar gerekli alanlarda hammadde olarak kullanılabilir [274, 275]. Yakalanıp depolanan CO₂'ten daha sonra mavi hidrojen üretiminde faydalanılabilmektedir.

Endüstriyel bacalardaki yakalama teknolojileri [276, 277]:

- Yanma sonrası,
- Ön yakma,
- Oksi-yakıt yanması,
- Kimyasal döngü yanması olarak sınıflandırılabilir.

Karbon yakalamanın kullanılması, demirçelik, çimento ve cam gibi yüksek karbon yoğunluğuna sahip endüstrilerde CO₂ emisyonlarının önemli ölçüde azaltılmasına yardımcı olmaktadır [16, 268, 278–281]. IEA tarafından hazırlanan ve çimento, çelik sektörleri ile birlikte petrol rafinelerini de kapsayan 2055 emisyon tahminlerine göre, AB'deki imalat sektöründe, 2016 yılına kıyasla sabit bir büyüme oranı varsayımıyla %25 artış beklenmektedir [282]. Bu sektörlere ek olarak, halihazırda fosil yakıtlarla çalışan termik santrallere de karbon yakalama entegre edilebilmektedir [283].

Böylece enerji üretiminde karbon yakalamanın yaygınlaşması sağlarken, aynı zamanda enerji sektörünün neden olduğu CO₂ salınımı azaltılarak sektörde yaşanan yeşil dönüşüm hızlandırılabilir [281].

Cachola ve arkadaşlarının görüşüne göre [284], endüstriyel fırınlarda hidrojenin kullanılması, karbon yakalama gereksinimini azaltabilir. Dolayısıyla, karbon yakalama ile hidrojenin birlikte kullanımının araştırıldığı çalışmaların büyük önem taşıdığı ifade edilmektedir.

7.1. CO₂ Taşımacılığı (CO₂ Transport)

Avrupa'da karasal CO₂ depolamaya karşı var olan güçlü muhalefet nedeniyle, yalnızca açık denize kıyısı olan dört ülkenin (Hollanda, Kanada, Norveç, ABD, İngiltere) CCS tesisi bulunmaktadır [285]. CO₂ taşımaya uygun limanlar için aday ülkelerin liman konumları, Şekil 12'de gösterilmektedir.



Şekil 12. Avrupa için olası CO₂ ithalat/ihracat limanları (Potential CO₂ import/export ports for Europe)

Ortak CO₂ taşıma ve depolama altyapısına yatırım yapmak, ölçek ekonomilerinden faydalanarak birim maliyetleri azaltabilir ve yeni tesislerin kurulmasını daha çekici hale getirebilir. Kurulması planlanan yeni merkezlerin sonrasında başka yatırımları da teşvik edeceği düşünülmektedir. Bu nedenle zaman içinde gelişen ve komşu ülkeleri birbirine bağlayan bir boru hattı ağı, CO₂'nin kıyıya taşınması için en ideal yol olarak önerilmektedir.

Açık deniz CO₂ taşımacılığı için iki yöntem önerilmektedir:

- Açık deniz boru hatları,
- Gemi taşımacılığı.

Açık deniz boru hatları, kısa ve orta mesafelerde yüksek kapasite taşımacılığı için uygunken, uzun mesafelerde gemi taşımacılığı düşük yatırım maliyeti ve esnek planlama olanağı ile en ekonomik çözüm olarak değerlendirilmektedir [286, 287].

Dünya çapındaki karbon yakalama ve depolama tesislerine bakıldığında zaman, 2023'ün ikinci çeyreği itibarıyla 41'i faal durumda (49 Mtpa CO₂), 26'sı inşaat halinde (32 Mtpa CO₂) ve 325'i geliştirme aşamasında (280 Mtpa CO₂) olmak üzere toplamda 392 CCS tesisi bulunduğu belirlenmiştir [288]. 2050 yılına kadar sıfır emisyon hedefine ulaşma çabaları göz önüne alındığında, faal olan projelerin sayısının hala nispeten düşük olduğu görülmektedir [283]. Yapılan araştırmalara göre, küresel ısınmayı 1,5°C'de sınırlamak için atmosferdeki 10 milyar ton CO₂'in yakalanması gerektiği hesaplanmıştır. Bu değer faaliyette bulunan tesislere ek olarak yaklaşık 2.000 karbon tesisinin daha işletmeye sokulması gerektiği anlamına gelmektedir [281, 289]. Karbon yakalama potansiyeli en yüksek ülkeler olarak, CO₂ üretim oranları dikkate alındığında Çin ve Amerika Birleşik Devletleri öne çıkmaktadır [284].

7.2. Alt Sektörler (Industrial Subsectors)

Karbon yakalama teknolojisinin uygulanmasına uygun ana sektörler örnek olarak demirçelik, çimento, enerji üretim santralleri, kimya endüstrisi, petrol rafineleri ve kâğıt üretim tesisleri gösterilebilir [284].

Demirçelik sektöründeki en büyük karbon yakalama potansiyeli, büyük üretim kapasiteleri nedeniyle entegre tesislerde bulunmaktadır. Özellikle tesislerde bulunan yüksek fırınların neden olduğu CO₂ salınımının %65'inin tutulabileceği hesaplanırken, bunu sırasıyla kok (%27) ve sinterleme (%6) tesisleri takip etmektedir [177].

Çimento endüstrisinde karbon yakalama teknolojisinin kullanımıyla ilgili tahmini sektörel verimlilik yaklaşık %85 seviyelerindedir. Bu oran, geleneksel mono etanolamin (MEA) karışımlarının yaklaşık iki katına eşittir [177]. Cormos ve meslektaşlarının [290] farklı karbon azaltma yöntemlerini karşılaştırdıkları vaka çalışmalarında ise, karbon yakalama teknolojisinin uygulandığı bir çimento fabrikasında verimlilik %90'a ulaşmaktadır. Uygulama sonucunda fabrikanın CO₂ emisyonlarında %92'lik bir azalma gözlemlenmiştir.

Hanak ve ekibinin [291] araştırmasına göre, kimyasal döngü teknolojisine dayalı karbon yakalama yöntemi diğer geleneksel yöntemlere kıyasla CO₂ emisyonlarını azaltma konusunda çeşitli tekno-ekonomik avantajlar sunmaktadır. Kömürle çalışan termik santrallerde karbon yakalama teknolojilerinin kullanımını inceledikleri araştırmada:

- Kimyasal döngü bazlı karbon yakalama teknolojisinin (%5-8),
- Oksi-yakıt yakma teknolojisinin (%8-12),
- Amin bazlı yanma sonrası tutulum metodunun ise (%9,5-12,5) verim kaybına neden olduğu ortaya çıkmıştır.

Kimya endüstrisi bir diğer enerji ve karbon yoğun sektör olarak karşımıza çıkmaktadır [292], öyle ki endüstri sanayinin toplam enerji tüketiminin %5,8'nden sorumludur [267]. Karbon yakalama çevresel bir çözüm olarak öne çıkmakta olup, kimya endüstrisinde kullanılmasıyla sera gazı emisyonlarında %15'lik bir azalmanın mümkün olduğu belirtilmektedir [293].

Karbon yakalamadan faydalanılabilecek diğer bir işletme olarak petrol rafineleri incelendiğinde ise, amin bazlı yanma sonrası karbon tutulum metodunun %65'lik CO₂ yakalama oranı ile tesislerde kurulması en muhtemel karbon yakalama teknolojisi olduğu belirtilmektedir [177].

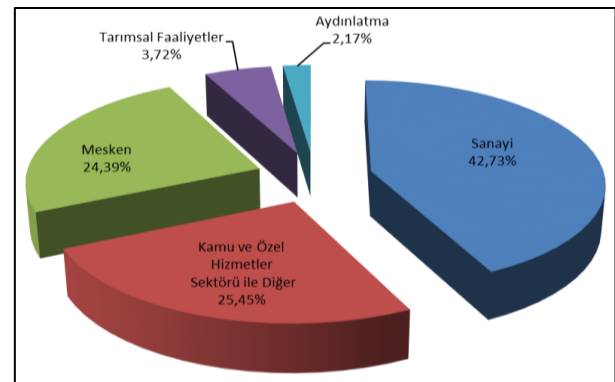
8. TÜRKİYE ÖRNEĞİ (THE CASE OF TURKEY)

Enerji talebindeki artışlar, enerji politikalarının odaklanma noktasını enerjinin verimli kullanımına çevirmiştir [294]. Bu nedenle, enerji verimliliğinin artırılması ve ithalata olan bağımlılığın azaltılması için etkin politikalara öncelik verilmesi son derece önemlidir. Sanayi sektörlerinin temiz enerji teknolojilerine yönelik çabaları desteklenmeli ve teşvik edilmelidir [295].

8.1. Elektrik Tüketimi (Electricity Consumption)

Türkiye'nin Ulusal Enerji Planına göre, elektrik tüketiminin 2000'den 2020'ye kadar yıllık ortalama %4,4 artışla 128 TWh'den 306,1 TWh'e yükseldiği belirtilmektedir. 2035 yılına kadar ise ortalama %3,5 artışla tüketimin 510,5 TWh'e ulaşması öngörülmektedir. Projeksiyonlara göre süreç boyunca sanayi sektörünün tüketiminde ortalama %3,7 artış beklenirken, bu oranın hane halkında %2,3 olacağı hesaplanmaktadır [296].

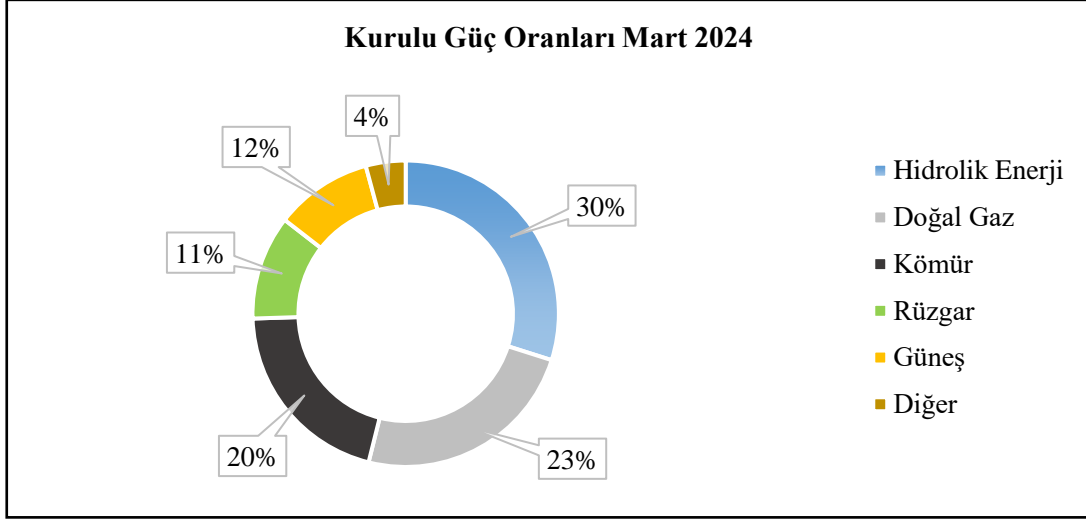
Türkiye genelinde faturalanan elektrik tüketimi incelendiğinde, 2022 yılında 253 TWh olarak gerçekleştiği belirlenmiştir [297]. Şekil 13'te gösterilen dağılıma bakıldığında, tüketilen toplam elektriğin yaklaşık %43'ünün sanayide üretimi desteklemek için ısıtma, soğutma, havalandırma ve aydınlatma gibi gereksinimler için kullanıldığı görülmektedir.



Şekil 13. 2022 yılı faturalanan tüketimin tüketici türüne göre dağılımı (%) (Consumer type distribution of invoiced consumption in 2022) [297]

Kurulu güç miktarı 2024 Mart sonu itibarıyla 107.959 MW'a ulaşırken, kaynaklara göre dağılımı Şekil 14'te gösterilmektedir. Elektrik tüketimine

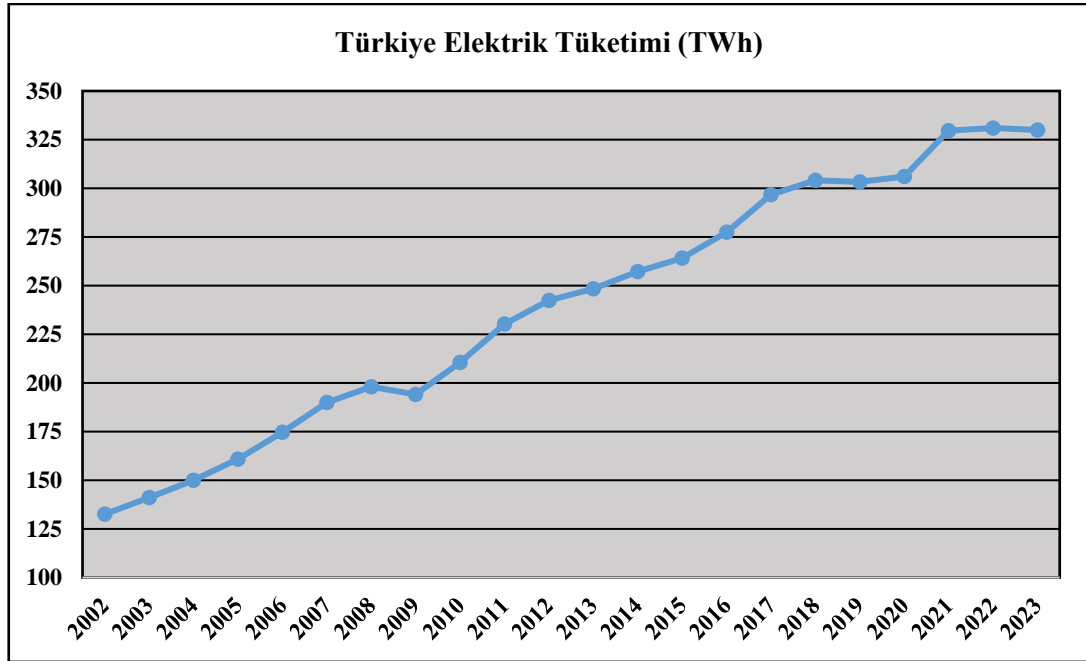
bakıldığı zaman ise, 2023 yılında bir önceki yıla göre %0,2 oranında azalarak 330,3 TWh olarak gerçekleştiği saptanmıştır [298].



Şekil 14. Mart 2024 itibarıyla kurulu güç oranları (%) (Installed capacity rates as of March 2024) [298]

Türkiye'nin elektrik tüketiminin 2002-2023 yılları arasındaki değişimi incelendiğinde (Şekil 15), 2008 yılındaki küresel ekonomik kriz ile 2019 yılındaki

COVID-19 pandemi süreci haricinde genel bir artış eğilimi gösterdiği görülmektedir.

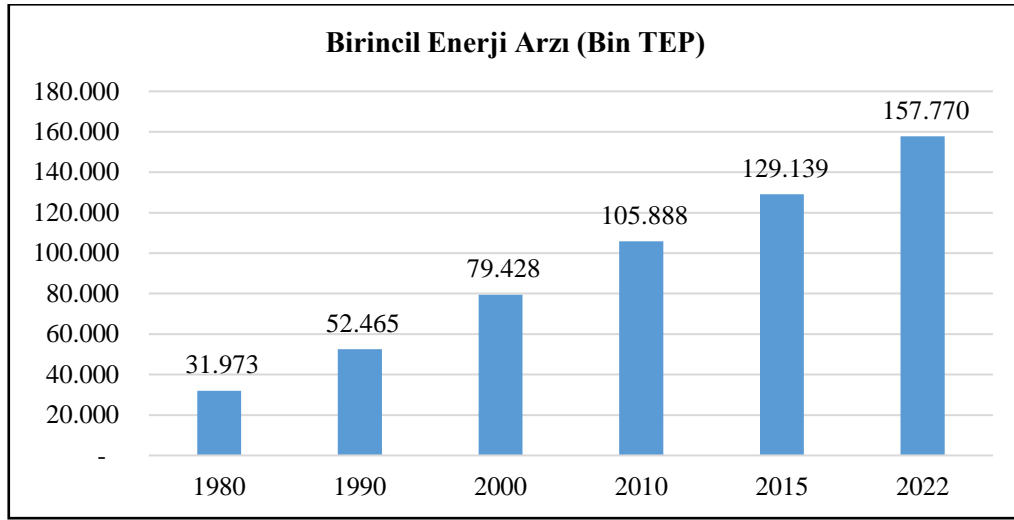


Şekil 15. 2002-2023 yılları arasında Türkiye elektrik tüketiminin değişimi (Change in Türkiye's electricity consumption between 2002-2023)

8.2. Enerji Görünümü ve Enerji Verimliliği Kavramı (Energy Outlook and Energy Efficiency Concept)

Şekil 16'da görüldüğü üzere Türkiye'nin 1980 yılında 31,9 milyon TEP olan birincil enerji arzı, 2022 yılında 157,8 milyon TEP'e ulaşmıştır [299].

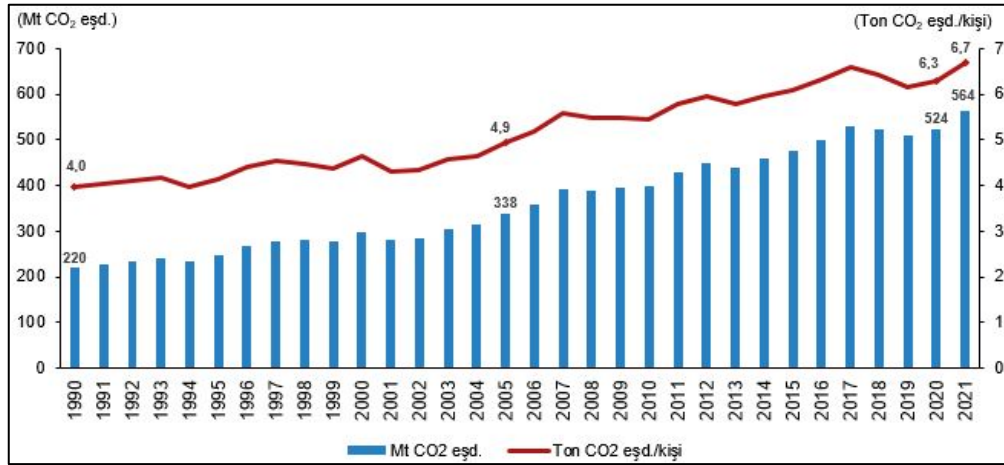
Türkiye'nin enerji talebi üzerine yapılan bir çalışmada ise 2040 yılı için enerji talep tahmininin 220,8 milyon TEP olarak hesaplandığı belirtilmektedir [300]. Bu veriler ışığında, Türkiye'nin enerji talebinin zaman içinde daha da artacağı tahmin edilmektedir.



Şekil 16. Türkiye'nin yıllar içerisindeki enerji arzı (Turkey's energy supply over the years)

Sera gazı emisyon miktarının 1990-2021 yılları arasındaki değişim istatistiklerine göre (Şekil 17), 2021 yılı toplam sera gazı emisyonu bir önceki yıla göre %7,7 artarak 564,4 milyon ton (Mt) CO₂ eşdeğeri olarak hesaplandığı belirtilmektedir [301].

1990 yılındaki kişi başı toplam sera gazı emisyonu 4 ton CO₂ olurken, 2021 yılında bu değer 6,7 ton CO₂ seviyesine çıktığı görülmektedir.



Şekil 17. Toplam ve kişi başı sera gazı emisyonu, 1990-2021 (Total and per capita greenhouse gas emissions, 1990-2021) [301]

Enerji verimliliği ile ilgili bir diğer önemli çalışma, Amerika Enerji Verimli Ekonomi Konseyi'nin (ACEEE) 2022 yılı raporudur. 2022 yılı Uluslararası Enerji Verimliliği Puan Tablosu (The 2022 International Energy Efficiency Scorecard)

adlı raporda Türkiye dahil 25 ülkenin uyguladıkları enerji verimliliği politikalarına göre karşılaştırma yapılmıştır. Sanayi kategorisinde aldıkları toplam puanlara göre ülkeler Tablo 2'de sıralanmaktadır [302].

Tablo 2. 2022 Uluslararası Enerji Verimliliği Puan Durumu Sanayi (International energy efficiency standings)

Sıralama	Ülkeler	Puan	Sıralama	Ülkeler	Puan
1	Japonya	21	13	Hindistan	12,5
2	İngiltere	20,5	15	Amerika	12
3	Almanya	19,5	16	Rusya	10
4	İtalya	18,5	17	Çin	9,5
5	Fransa	18	18	Brezilya	9
6	İspanya	16	18	Kanada	9

Sıralama	Ülkeler	Puan	Sıralama	Ülkeler	Puan
6	Tayvan	16	20	Mısır	8
8	Endonezya	15	21	Polonya	7,5
8	Güney Kore	15	22	Avustralya	6
8	Hollanda	15	23	Suudi Arabistan	5,5
11	Türkiye	13,5	24	Birleşik Arap Emirlikleri	3
11	Meksika	13,5	25	Güney Afrika	1
13	Tayland	12,5			

ACEEE raporuna göre, Türkiye'de endüstriyel enerji yoğunluğunun yüksek seyretmesine rağmen, sanayi sektöründe enerji verimliliğine yönelik cazip teşvikler bulunmaktadır. Raporda belirtildiğine göre, sanayicilerin enerji yoğunluklarını üç yıllık süreçte ortalama %10 oranında azaltma taahhüdünde bulunmaları durumunda, Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü'nün takip eden yıl enerji maliyetlerinin %20'sini sübvansedeceği ifade edilmektedir. Son olarak, raporda Türkiye'nin enerji verimliliğini artırmak için büyük endüstriyel tesislerde enerji yöneticilerinin istihdam edilmesine yönelik talimatların uygulanmasından, ISO 50001 sertifikalı tesislerin sayısının artırılmasından ve endüstriyel Ar-Ge yatırımlarının artırılmasından bahsedilerek, bu adımların ulusal enerji yoğunluğunun azaltılmasına katkı sağlayabileceği vurgulanmaktadır [302].

Türkiye'deki sanayi sektöründe enerji tasarrufu potansiyelinin en az %20 olduğu ve bu tasarrufun yaklaşık %50'sinin küçük yatırımlarla ve iki yıldan az geri dönüş süreleriyle elde edilebileceği tespit edilmiştir. Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü'nün yaptığı çalışmalara göre, Türkiye'nin toplam birincil enerji talebi içerisinde %15 tasarruf potansiyeli bulunmaktadır [303].

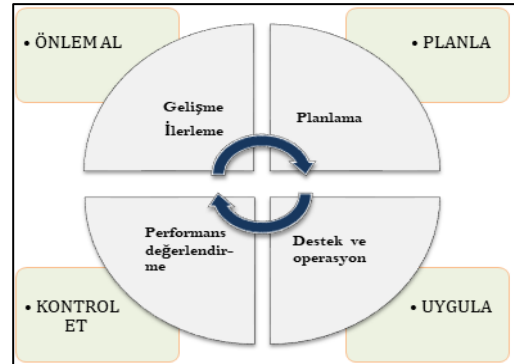
8.3. Enerji Verimliliği Politikaları (Energy Efficiency Policies)

Sanayide enerji verimliliğine yönelik sürdürülebilir bir yaklaşımın benimsenmesi önemlidir. Bu yaklaşım, enerji politikalarının incelenmesi, atanan enerji yöneticisi tarafından 5627 Sayılı Enerji Verimliliği Kanunu ve Enerji Verimliliği Strateji Belgesi dahil olmak üzere mevcut mevzuata uygunluğun denetlenmesi, ISO 50001 Enerji Yönetim Sistemi ve Enerji Denetimlerinin gerçekleştirilerek işlemlerin doğrulanması gibi adımları içermektedir [197].

ISO 50001 Enerji Yönetim Sistemi (EnYS) Standardı, enerjinin verimli kullanılmasıyla enerji

israfının önlenmesi, ekonomi üzerindeki enerji yükünün azaltılması ve çevresel etkilerin minimize edilmesine yönelik usul ve esasları düzenlemektedir [304]. 2022 yılında dünya genelinde verilen ISO 50001 sertifikalarının sayısı yaklaşık %30 artarak 28.000'e yükselmiştir [33].

ISO 50001 EnYS modeli Şekil 18'de sunulan şekilde planla, uygula, kontrol et, önlem al (P-U-K-Ö döngüsü) olarak özetlenebilir. Bu döngü, kuruluşların günlük rutin uygulamalarıyla birlikte enerji yönetimini içeren sürekli iyileştirme çerçevesine dayanır [190].



Şekil 18. ISO 50001 EnYS modeli için PUKÖ döngüsü (PDCA cycle for ISO 50001 EnYS model) [190]

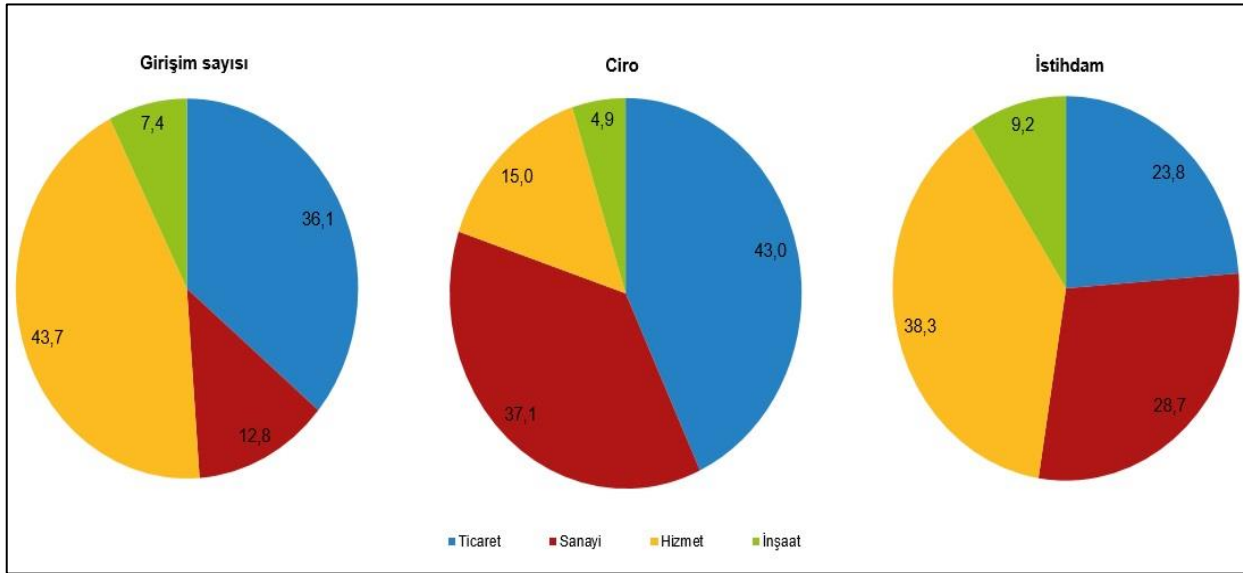
Planlama, enerji yönetimi programının en kritik unsurudur ve iki temel işlevi vardır. İlk olarak, iyi bir planlama ile firmalar enerji arzı noktasında yaşanabilecek sorunlardan korunabilir. Sonrasında, enerji yönetimi programı yıl boyunca devamlı vurgulanarak programın etkin ve işletilebilir kalması sağlanır. Planlama sürecinde elde edilen eylem planları ve diğer çıktılar, uygulama ve işletim aşamasında kullanılır. Tüm çalışanlar, enerji kullanımının önemine dair farkındalıklarının artırılması, eğitime katılım ve yetenekleriyle bağlantılı deneyime sahip olmaları için desteklenmelidir. Süreç boyunca firma içerisinde enerji performansını etkileyen faaliyetlerin temel özelliklerinin düzenli olarak takip edilmesi, ölçülmesi ve analiz edilmesi gerekmektedir.

Önlem al aşamasına gelindiğinde ise, firma yönetimleri enerji yönetimini güvence altına almak amacıyla düzenli aralıklarla gözden geçirmelidir. Bu gözden geçirme, uygunluk, yeterlilik ve etkinlik açısından gerçekleştirilmelidir.

T.C. Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu (EPDK)'nın 2012 yılında yayınladığı Lisanssız Elektrik Üretim Yönetmeliğinin Tebliği'ne göre; enerji verimliliği %80'in üzerinde olan durumlarda, güç sınırı olmadan lisanssız kojenerasyon tesislerinin kurulmasına izin verilmektedir. Bu tebliğe göre, mikro ölçekli kojenerasyon uygulamaları evlere kadar yaygınlaştırılabilecek ve böylece bireyler kendi elektriğini üretme imkânına sahip olacaktır [6].

8.4. Sanayi Sektörüne Genel Bakış (Industry Overview)

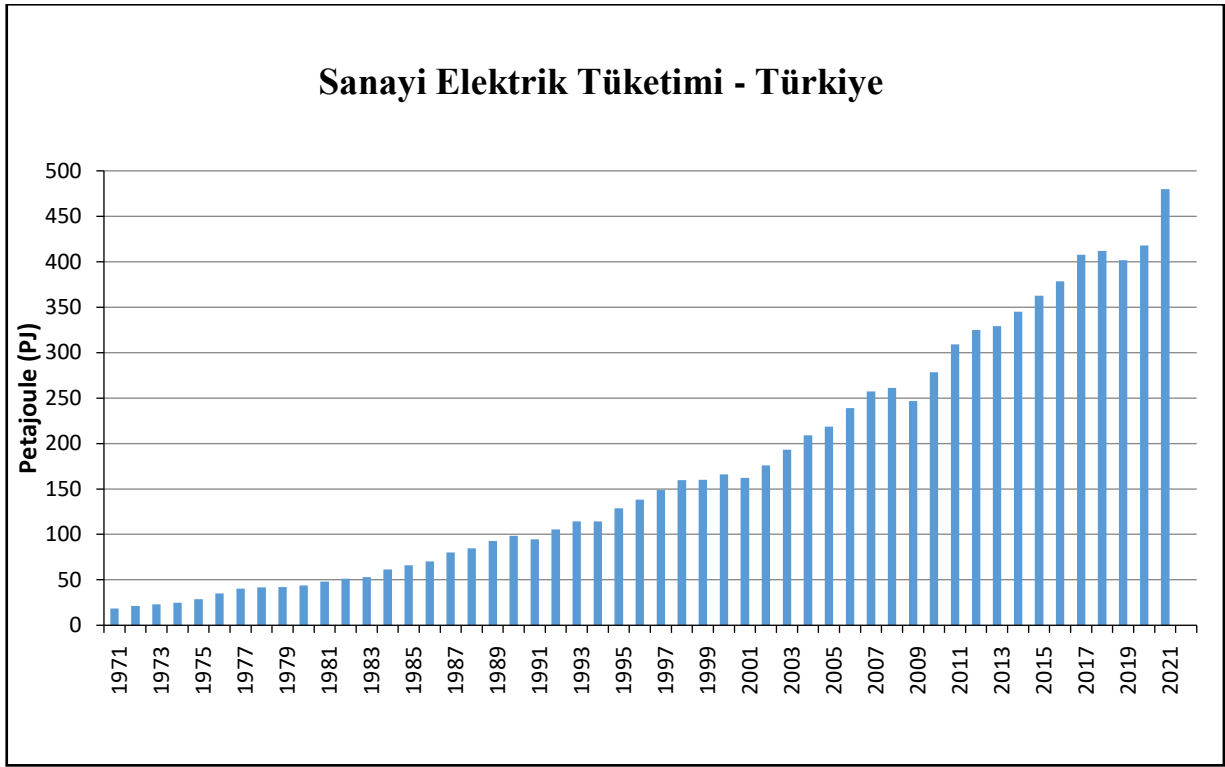
Türkiye'nin 2023 yılındaki nüfusu 85 milyon 372 bin 377 kişi olarak kaydedilirken [305], Sektör Bilançoları İstatistikleri idari kayıtlarında bilanço esasına göre defter tutan 983 bin 182 girişim tespit edilmiştir [306]. Faal girişimlerin %43,7'si hizmet sektöründe yer alırken, onu %36,1 ile ticaret sektörü takip etmektedir. İstihdam verilerine göre 2022 yılında hizmet sektörü toplam istihdamın %38,3'ünü oluştururken, ikinci sırada %28,7 ile sanayi sektörü gelmektedir [307]. Sanayi sektörü var olan işletmelerin %12,8'ni oluşturmasına rağmen, toplam cironun %37,1'ni üretmektedir (Şekil 19). Bu durum katma değerli üretimin önemini ortaya koyan verilerden birisidir. Buna ek olarak sanayi, inşaat ve ticaret-hizmet sektörlerinin toplamında ücretli çalışan sayısı Aralık 2023 tarihinde %1,7 artarak 15 milyon 57 bin 373 kişi olmuştur [308].



Şekil 19. 2022'deki girişim sayısı, istihdam ve cironun sektörlere göre oransal dağılımı (%) (The proportional distribution of the number of enterprises, employment, and revenue by sector in 2022) [307]

Türkiye'deki sanayi sektörünün 1971-2021 arasındaki elektrik tüketiminin değişimi incelendiğinde (Şekil 20), ekonomik krizler ve pandemi süreci dışında gözlenen düzenli artışın, Türkiye'nin genel elektrik tüketimi (Şekil 15) ile paralellik gösterdiği görülmektedir. Tüketim artışının sekteye uğradığı başlıca kriz yılları:

- 1990 Körfez Krizi,
- Nisan 1994 krizi,
- 2001 krizi,
- 2008 küresel ekonomik krizi,
- 2019 COVID-19 pandemisi.



Şekil 20. Sanayinin 1971-2021 arası elektrik tüketimi (Industrial electricity consumption from 1971-2021) [309]

8.5. Türkiye’de Ticari Açıklık ve Büyümenin Enerji Tüketimine Olan Etkisi (The Impact of Trade Openness and Economic Growth on Energy Consumption in Turkey)

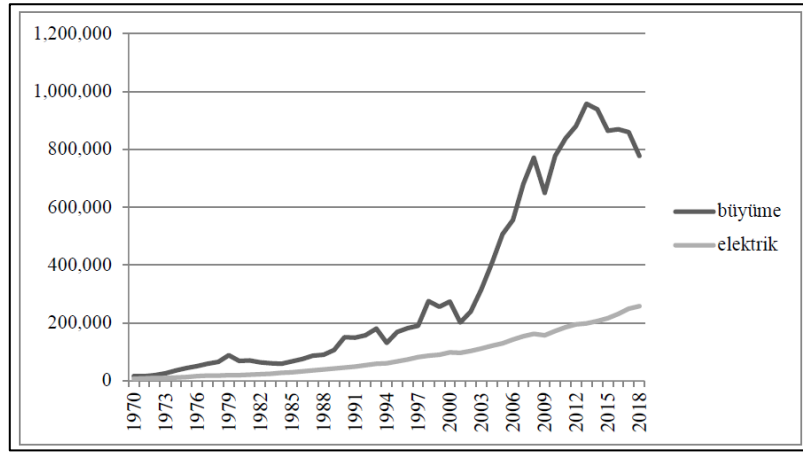
Ekonomik büyüme genellikle, Reel Gayri Safi Yurt İçi Hasıla (GSYİH) artışına bağlı olarak ölçülmektedir [310]. Dışa açıklığın ve serbest ticaretin güçlü olduğu ülkelerin daha hızlı büyüyeceği inancı iktisat literatüründe birçok çalışmaya konu olmuştur. Özellikle 1990’lı yıllarda artan bir ivme kazanan bu liberalizasyon olgusunun, Güneydoğu Asya ülkeleri üzerindeki etkisi diğer ekonomilerin de dikkatini çekmeyi başarmıştır [311]. Ancak üretim sürecinin başlatılması, devam ettirilmesi ve ticaretin yapılabilmesi için enerjiye ihtiyaç duyulmaktadır [312, 313].

Temelleri Solow [314] ve Swan [315] tarafından çeşitli çalışmalarda atılan büyüme modelinde, teknolojik ilerlemenin büyüme doğrudan tetikleyici etkisinin olduğu ileri sürülmektedir. Bu modelde dışsal olarak yerini alan teknolojik düzey daha sonra Romer’in [316] İçsel Büyüme Modelleri ile güncellenerek içsel olarak kabul edilmiştir. Bu

teori, günümüzdeki ekonomik verilerinin çoğu tarafından da desteklenmektedir. Günümüz dünyasında nüfus artışı, teknolojik gelişmeler ve değişen tüketici alışkanlıkları gibi pek çok nedenden ötürü enerji talebinin giderek artması beklenmektedir.

Literatürde enerji tüketimi ile büyüme arasındaki olası ilişkinin kapsamlı olarak araştırıldığı görülmektedir. Paul ve Bhattacharya [317] Hindistan’ın enerji ve ekonomik büyüme arasındaki ilişkisini inceleyerek, enerji tüketimi ile ekonomik büyüme arasında iki yönlü bir nedensel ilişkinin varlığını ortaya koymuştur. Diğer pek çok araştırmacı da bu sonuçları desteklemiş ve Türkiye ile diğer farklı ülkeler özelinde yaptıkları araştırmalarda aynı korelasyonu tespit etmişlerdir [318–336].

Türkiye’nin enerji talebi, 1980’lerde serbest piyasaya açılmasının ardından artış göstermiştir [337]. Şekil 21’de Türkiye’nin 1970-2018 yılları arasında elektrik tüketimi ile ekonomik büyüme arasındaki pozitif korelasyon görülebilmektedir [338].



Şekil 21. Türkiye’de 1970-2018 yılları arası ekonomik büyüme ve elektrik tüketimi (Economic growth and electricity consumption in Turkey between 1970-2018) [338]

Türkiye'nin kendi iç dinamikleri nedeniyle 1980 ve 1994 yapısal krizlerin yanı sıra, dünya çapında yaşanan 2001 ve 2008 ekonomik kriz yıllarında da ekonomik büyüme ciddi bir düşüş göstermiştir. Şekil 21'deki büyüme oranları buna işaret etmektedir.

8.6. Enerji Verimliliği: Örnek Çalışmalar (Energy Efficiency: Case Studies)

Caffal'ın araştırması [339], Enerji Yönetim Sistemi uygulamalarıyla sanayinin toplam enerji tüketiminde %40'a kadar tasarruf yaşanabileceğini göstermektedir. Bu çalışmaya ek olarak, enerji denetimleri ve gönüllü anlaşmalar gibi enerji yönetiminin farklı unsurlarının uygulanmasının çeşitli kuruluşlarda enerji tasarrufuna yol açtığını gösteren farklı araştırmalar da bulunmaktadır [340–342]. Yapılan çalışmalar [59], enerji yönetiminin doğru bir şekilde uygulanmasının Türk sanayisinin enerji yoğunluğunu düşürerek dünya ile rekabet gücünü artıracak ve Türkiye’de giderek artan enerji talebini frenleyeceğini göstermektedir.

Enerji yönetiminin uygulanmasına ilişkin bir araştırmada, dünya genelindeki kuruluşların yalnızca %3-14’ünün enerji yönetimi uyguladığı görülürken, bu oran İsveç’te %25-40, Türkiye’de ise %22 düzeyindedir [343]. Enerji yönetimi çalışmalarıyla elde edilen verilere dayanarak, enerji verimliliği iyileştirmelerinin herhangi bir özel programa bağlı olmaksızın %5 ile %15 arasında geri dönüş ve iyileştirmeler sağlayabileceği öngörülmektedir [344].

Ateş ve Durakbaşa çalışmasında [59], Türk sanayisinin toplam enerji tüketiminin %68’ini oluşturan çimento, kağıt ve kağıt hamuru,

demirçelik, seramik ve tekstil gibi sektörlerde enerji yönetimi kullanımını araştırarak enerji verimliliğini analiz etmişlerdir.

Yıldız ve arkadaşlarının [148] çeşitli sanayi sektörlerini ele aldıkları araştırmaları neticesinde, sanayi tesislerinin %95’inde %5-40 arasında enerji tasarrufunun mümkün olduğu tespit edilmiştir. Daha da çarpıcı olanı, sanayi tesis ve işletmelerde çok az veya hiç yatırım yapılmadan gerçekleştirilecek önlemlerin uygulanmasıyla minimum %10 enerji tasarrufu sağlanabilmesidir. Bu oran enerji tüketimine ve enerji tasarrufuna verilmesi gereken önemi ortaya koymaktadır.

Türkiye’nin tekstil ihracatı, 2021 yılında bir önceki yıla göre %31,0 oranında artarak 16,2 milyar dolar seviyesine yükselirken, dünya pazarından aldığı pay %4,2 ile 4’üncü sıraya yükselmiştir [345]. Tekstil sanayisi, enerji yoğun sektörlerden biri olarak değerlendirilmekte olup, sektördeki toplam maliyetlerin %10’dan fazlasını enerji tüketimi oluşturmaktadır [346]. Bu durum enerji maliyetlerini düşürmeye yönelik çok sayıda araştırmanın yürütülmesine yol açmıştır. Örneğin Gelir’in tez çalışmasında [347], bir tekstil fabrikasının terbiye bölümünde yer alan ramöz makinelerinde atık ısı geri kazanımının sağlanabilirliği ile ilgili araştırma yapmıştır. Termodinamik analizi yapılan ramöz makinasına atık ısı geri kazanımı için bir eşanjör tasarlanmış ve sistemin yakıt tüketim değerleri karşılaştırılmıştır. Benzer bir çalışmayı yürüten Tunç ve arkadaşları [348], İstanbul’da bulunan farklı bir fabrikaya uygulanacak atık ısı yatırımının enerji maliyetini yaklaşık %11 azaltarak, sistemin kendisini 2 ile 4 yıl arasında geri ödeyeceğini belirtmektedir.

Tekstil sektöründeki bir diğer işlem olan boyama sırasında oluşan atık ısının geri kazanılma potansiyelini araştıran Can [349], gövde ve borulu sudan suya ısı eşanjörü ile atık ısı geri kazanım sisteminin verimli çalışma koşullarını optimize etmek için enerji temelli bir yaklaşım kullanmıştır. Sistem performansını etkileyen parametreler arasında girişteki atık su sıcaklığı, kütleles akış hızı, soğutma suyunun giriş basıncı ve referans durum koşulları bulunmaktadır. Koçlu [350] ise, boyama işleminden sonra ortaya çıkan yüksek yoğunluk ve sıcaklıktaki sıvıların plakalı eşanjör kullanılarak geri kazanımını ve sistem performans analizini incelemiştir. Sistem kurulduktan sonra 1 kg pamuğun boyanmasında kullanılan doğalgaz miktarında aylık ortalama %28,36 azalma yaşandığı aktarılmaktadır.

Bursa'da faaliyet gösteren orta ölçekli bir havlu üretim tesisinin enerji verimliliği potansiyelini araştıran Değirmen ve Şanlı [346], gerçekleştirdikleri incelemeler neticesinde yapılacak yatırımı 3 yıldan kısa bir sürede karşılayabilecek 7 alan tespit ettiklerini belirtmektedir. Bu alanlar sırasıyla jet makinelerine yalıtım yapılması, buhar kazanı su seviyesinin otomatik kontrolü, kondens dönüşlerinin toplanması, kondenslerde seviye kontrol sistemi uygulaması, kazan besisi suyu şartlandırma sisteminin kurulması, kompresör emiş havasının düzenlenmesi ile ring hattı ve tesisat revizyonudur. Aktarılan iyileştirmeler neticesinde elde edilecek kazanımlar Tablo 3'te yer almaktadır.

Tablo 3. Enerji verimliliği çalışmaları ve kazanımlar (Energy efficiency efforts and achievements)

Uygulanan Enerji Verimliliği Çalışmaları	Enerji Tasarrufu (Nm ³ /yıl)	Maddi Tasarruf (TL/yıl)	Önlenen Emisyon (ton CO ₂ /yıl)	Ödeme Süresi (yıl)
Jet makineleri izolasyonu	16.980	28.866	30,6	0,88
Kazan su seviyesi otomatik kontrolü	18.828	32.000	33,8	2,5
Kondens dönüşlerinin toplanması	103.284	175.583	186	2,7
Kondenslerde seviye kontrol sistemi uygulaması	11.310	19.227	20,4	0,14
Kazan temizlenmesi ve kazan besisi suyu şartlandırma	42.000	71.400	75	1,7
Kompresör emiş havasının düzenlenmesi	5.927	3.141	2,7	0,5
Ring hattı ve tesisat revizyonu	11.340	6.010	2,8	3,3

Tablo 3'te gözlemlendiği üzere, geri ödeme süresi en kısa olan iyileştirme kondenslerde seviye kontrol sistemi uygulamasıdır. CO₂ emisyonlarını önleyerek sağlanacak çevresel fayda açısından ise en avantajlı uygulama kondens dönüşlerinin toplanarak atık ısıdan faydalanılmasıdır.

Kaşka [351], çelik endüstrisindeki tav fırınlarında geri kazanılan atık ısının organik Rankine çevrimi ile kullanımının performansını incelemiştir. Çalışma, evaporatör ve kondenser basınçları, evaporatör çıkışındaki aşırı ısı, kondenserin aşırı soğutulması ve evaporatördeki ısı değişiminin sıkışma noktasındaki sıcaklık farkı gibi çeşitli

çalışma parametrelerinin analizini içermiştir. Bu parametrelerin incelenmesi, tesisin işleyişi ve termal çevrim süreci hakkında önemli bilgiler sunmuştur.

Çimento fabrikalarında WHR sisteminin enerji verimliliği üzerine olan etkisini araştıran Tütüncü ve Özgener [352], 1955 yılında kurulan seçili tesisin ekserji verimini %55,69 olarak hesaplamışlardır. Yıllık klinker üretim kapasitesinin 1.000.000 ton/yıl olduğu tesisteki üretim hatlarında yer alan döner fırınlardan çıkan atık ısının geri kazanılarak kullanılması hedeflenmiştir. Hazırlanan projede, karışık basınç kabullü yoğunlaşma türbin-jeneratör

Türkiye'nin otomotiv ihracatı, 2022 yılında bir önceki yıla göre %1,18 oranında artarak 16,4 milyar dolar seviyesine yükselirken, üretim kapasitesi bakımından dünyada 13'üncü sırada yer almaktadır [358]. Bu alandaki verimliliği yükselterek tüketim değerlerini düşürmeyi hedefleyen birçok araştırmadan birini yürüten Sipahi [359], bir otomotiv firması için verimlilik artırıcı çalışmalar gerçekleştirerek uygulamaların sonuçlarını paylaşmıştır:

- Kütleme fırınlarında bulunan egzoz bacalarından salınan ısıyı yeniden kullanarak fırın içerisindeki havaya ön ısıtma uygulanması sonucunda 177.824 m³/yıl doğalgaz tasarrufu sağlanmıştır.
- Brülör gruplarında ön ısıtma yaparak 37.440 m³/yıl doğalgaz tasarrufu elde edilmiştir.
- Flaş buhar geri kazanım sistemi ile 83.089 m³/yıl doğalgaz tasarrufu sağlanmıştır.
- Soğutma ünitelerinde yapılan set değeri yükseltme çalışması sonucunda 505.440 kWh/yıl elektrik tasarrufu sağlanmıştır.
- Tesise ısı pompası kurularak 108.000 kWh/yıl elektrik ve 252.195 Sm³/yıl doğalgaz tasarrufu sağlanmıştır.
- Yapılan çalışmalar neticesinde toplam 1.436 ton CO₂ emisyonunun doğaya salınmasının engellenebileceği görülmüştür.

Otomotiv sektörü üzerine yapılan bir diğer çalışmada Ediz [360], belirli bir otomobil fabrikasının enerji verimliliğini artırmaya yönelik 10 farklı uygulamanın tasarruf potansiyellerini karşılaştırmıştır. En yüksek verim artışı sağlayan 4 iyileştirme ile:

- Verimsiz kompresörlerin verimliliği ile değiştirilmesi sonucunda 1.475.473 kWh,
- İşletmenin çatısına yerleştirilecek güneş panelleri ile 1.389.772 kWh,
- Kompresörlere atık ısı geri kazanım uygulamasının eklenmesiyle 1.186.517 kWh,
- Basınçlı hava kaçaklarının giderimi ile 375.622 kWh tasarruf sağlanacağı sonucuna varılmıştır.

Göçer ve arkadaşları [361], otomotiv sektöründe kullanılan basınçlı hava sistemleri üzerine bir

araştırma yürütmüştür. Bu çalışmada, şebeke hava hattı bulunan fabrikalar için şebeke basıncından daha yüksek basınç gerektiren cihazlarda basınç yükseltici kullanımının verimliliği üzerinde durulmuştur. Yapılan incelemeler sonucunda, 12 bar yüksek basınç gerektiren cihazlarda ek kompresör kullanmak yerine basınç yükseltici kullanılmasının elektrik tüketiminde %100 tasarruf sağladığı belirlenmiştir. Kompresörlerin sistemdeki basıncı artırmak için elektrik enerjisine ihtiyaç duyduğu, ancak basınç yükselticilerin aynı işlemi mekanik olarak gerçekleştirmesi nedeniyle bu tasarrufun sağlandığı vurgulanmıştır. Basınçlı hava sistemine sahip bir başka tesiste gerçekleştirilen enerji verimliliği çalışması neticesinde Sapmaz ve Kaya [362], çeşitli önerilerde bulunmuştur. Araştırmacılar atık ısı geri kazanımı, sızıntıların tamiri, kompresör hava giriş sıcaklığının düşürülmesi, kompresör çıkış basıncının düşürülmesi ve daha yüksek verime sahip motorların kullanımı gibi önlemlerle yıllık 7.781.689 kWh enerji tasarrufu sağlanabileceğini aktarmıştır. Bunun yanı sıra, toplam 1.714,8 ton CO₂ emisyonunun önüne geçilebileceği belirtilmiştir.

Değirmen ve arkadaşlarının [363] gıda ve otomotiv sektörlerinde faaliyet gösteren 2 farklı fabrikada yürüttükleri çalışmanın amacı, yapılabilecek enerji verimliliği uygulamalarını değerlendirmek ve bu uygulamalarla sağlanacak enerji tasarrufunu (Nm³/yıl) ve önlenecak karbon emisyon miktarını (ton CO₂/yıl) belirlemektir. Araştırmacılar, her iki tesiste de gerçekleştirilebilecek ortak iyileştirmeleri; sıcak hatlara izolasyon uygulaması, basınçlı hava kaçaklarının giderilmesi, basınçlı hava sistemi basıncının 1 bar düşürülmesi, kompresör emiş havasının düzenlenmesi, selenoid vana uygulaması ve flash buhar uygulaması olarak sıralamaktadır. Bunların yanı sıra gıda işletmesi özelinde 2 ve otomotivde 1 adet tekil enerji tasarruf çalışması önerisinde bulunulmuştur. Gıda ve otomotiv işletmelerinde gerçekleştirilmesi önerilen enerji verimliliği uygulamalarıyla sağlanacak çevresel faydalar ve bu uygulamaların maliyetleri Tablo 4'te özetlenmektedir.

Tablo 4. Enerji verimliliği uygulamalarının çevresel etkileri ve maliyetleri (Environmental impacts and costs of energy efficiency practices)

Basınçlı hava kaçaklarının giderilmesinin etkileri ve maliyeti			
İşletme	Önlenen Emisyon Miktarı	Yatırım Maliyeti	Geri Ödeme Süresi
	Ton CO ₂ /yıl	Euro	Yıl
Gıda	33	1.143	0,3
Otomotiv	152,3	1.763	0,07

Basınçlı hava sisteminin 1 bar düşürülmesinin etkileri ve maliyeti			
İşletme	Önlenen Emisyon Miktarı	Yatırım Maliyeti	Geri Ödeme Süresi
	Ton CO ₂ /yıl	Euro	Yıl
Gıda	13,2	-	-
Otomotiv	25,3	0	Hemen
Kompresör emiş havasının düzenlenmesinin etkileri ve maliyeti			
İşletme	Önlenen Emisyon Miktarı	Yatırım Maliyeti	Geri Ödeme Süresi
	Ton CO ₂ /yıl	Euro	Yıl
Gıda	7,56	-	-
Otomotiv	7,2	2.350	1,97
Selenoid vana uygulamasının etkileri ve maliyeti			
İşletme	Önlenen Emisyon Miktarı	Yatırım Maliyeti	Geri Ödeme Süresi
	Ton CO ₂ /yıl	Euro	Yıl
Gıda	3,8	1.486	3,2
Otomotiv	7,2	2.248	1,9
Flash buhar uygulamasının etkileri ve maliyeti			
İşletme	Önlenen Emisyon Miktarı	Yatırım Maliyeti	Geri Ödeme Süresi
	Ton CO ₂ /yıl	Euro	Yıl
Gıda	48	5.733	0,67
Vana ve armatür yalıtımının etkileri ve maliyeti			
İşletme	Önlenen Emisyon Miktarı	Yatırım Maliyeti	Geri Ödeme Süresi
	Ton CO ₂ /yıl	Euro	Yıl
Gıda	15	1.857	0,7
Sıcak hatlara izolasyon uygulamasının etkileri ve maliyeti			
İşletme	Önlenen Emisyon Miktarı	Yatırım Maliyeti	Geri Ödeme Süresi
	Ton CO ₂ /yıl	Euro	Yıl
Otomotiv	130,5	3.525	0,26

Tablodan anlaşılacağı üzere gıda sektöründe en yüksek çevresel fayda (48 ton CO₂/yıl) flash buhar uygulamasında görülürken, iyileştirmenin yıllık enerji tasarrufunun 22 TEP olduğu aktarılmaktadır [363]. Otomotiv işletmesine gelindiğinde ise, çevresel fayda açısından en yararlı yatırım (152 ton CO₂/yıl) ile basınçlı hava kaçaklarının giderilmesi olurken, enerji tasarrufu verimliliği açısından sıcak hatlara izolasyon uygulaması (60 TEP/yıl) en avantajlı uygulama olarak tespit edilmiştir.

Farklı bir gıda tesisinde araştırma yürüten Ruşen [364], Karaman'da faaliyet gösteren bir hazır gıda fabrikasının üretim hattında kullanılan elektrik motorlarından verimleri düşük olanların değiştirilmesi durumunda sağlanacak tasarruf miktarıyla birlikte CO₂ miktarındaki azalma ve uygulamanın geri ödeme sürelerini hesaplamıştır. Çalışmada belirtilen uygulama ile tesisin elektrik maliyetinde 31.500 € düşüş yaşanırken, artan verimle birlikte CO₂ emisyonunda %12,15 azalma tespit edilmiştir. Yatırımın 1,5 yıldan kısa sürede kendisini geri ödemesi beklenmektedir.

Günümüzde LED lambalı armatürlerin geliştirilmesiyle, konvansiyonel aydınlatma çözümlerine kıyasla daha düşük güçlerde daha yüksek ışık akısı değerleri sağlanabilmektedir. Bu

durum, mekanlarda bulunan floresan lambaların LED lambalarla değiştirilmesini gündeme getirmiştir [365]. Perdahçı [366] çalışmada, bir metal işleme tesisinde kullanılan konvansiyonel armatürlerle gerçekleştirilen aydınlatmanın var olan aydınlık seviyesini koruyarak LED lambalı armatürlerle değiştirilmesini bilgisayar programı üzerinden simüle ederek enerji analizini gerçekleştirmiştir. Tesisteki 234W'lık 48 floresan armatürün 90W'lık LED olanlarla değiştirilmesi durumunda 830.040Wh enerji tasarrufu sağlanacağı aktarılırken, bu miktarın yıllık aydınlatmada %61,5'lik bir verim artışına denk geldiği ifade edilmiştir.

Yıldız ve Akgül çalışmalarında [367], Akdeniz Bölgesinden 4 farklı yer seçerek kıyı alanlarında bulunan küçük ve orta ölçekli işletmeler için gerekli enerjinin deniz yüzeyine kurulacak rüzgâr santralleri ve yüzer GES'ler ile karşılanmasına yönelik karşılaştırmalar yapmışlardır. Araştırmacılar, Türkiye'nin yüksek güneş enerjisi potansiyeli nedeniyle güneş enerjisinin önemini giderek arttığını belirtmişler ve global alandaki sektörel eğilim olan su üstü açık deniz güneş santrallerinin ülkemizde de kurulmaya başlayacağını öngörmektedirler.

Buna ek olarak Yıldız çalışmasında [368], sistemin yüksek güneş potansiyeline sahip olup yeterli rüzgâr yoğunluğuna sahip olmayan kıyı şeritleri için uygulanabilir bir çözüm olduğunu belirtmektedir. Yapılan analizler neticesinde:

- Anamur, Antalya, Finike ve Mersin bölgelerinin tamamında, açık deniz güneş kurulumlarının rüzgâr santrallerine kıyasla daha yüksek verim sağladığı tespit edilmiştir.
- 5 MW'lık tasarım projeksiyonuna göre 8.354 (MWh/yıl) ile en yüksek üretim Mersin'de gerçekleşirken, onu 8.209 (MWh/yıl) ile Antalya, 8.124 (MWh/yıl) ile Finike ve 8.064 (MWh/yıl) ile Anamur takip etmektedir.

9. SONUÇ VE ÖNERİLER (CONCLUSION AND RECOMMENDATIONS)

Endüstri 4.0'ın etkisiyle yeniden şekillenen imalat sektöründe, robotların önemi hızla artmaktadır. Rekabette geri kalmak istemeyen üreticilerin artan ilgisiyle birlikte robotların üretimde iş gücünün yerini almaya başlaması üzerine pek çok sektörel araştırma yapılmıştır [136–140]. Yaşanacak endüstriyel dönüşümün en çok düşük ve orta vasıflı işlerde çalışan insanları etkileyeceği belirtilirken, Acemoğlu ve Restrepo [132] bu durumun büyük iş kayıplarına yol açarak ücretleri düşüreceğini ön görmektedir. Buna karşılık, robotlaşmanın doğuracağı verimlilik artışının ürün fiyatlarını aşağı çekerek talebi tetikleyebileceğini belirten Acemoğlu [131], artan talebin firmaları üretim ölçeklerini genişletmeye teşvik ederek yeni iş alanları yaratılmasının mümkün olduğunu paylaşmaktadır.

Enerji yönetimi enerji tüketimini optimize etme süreci olarak özetlenebilirken, Enerji Yönetim Sistemi ISO 50001 bu kapsamda geliştirilmiştir. ISO 50001: Enerji Yönetim Sistemi ve araçları ile yıllık enerji maliyetlerinin %5 ile %20 arasında düşebileceği rapor edilmektedir [81, 147]. Pek çok araştırmacı, sanayide geniş çaplı bir verim artışının yakalanabilmesi için ISO 50001'in yaygınlaşması gerektiğini ve bu amaç doğrultusunda mümkünse sanayide yasal zorunluluk olarak uygulanmasının önemini vurgulamaktadır. Bu doğrultuda çalışmada bulunan Yıldız ve arkadaşları [148], tesis ve işletmelerde çok az veya hiç yatırım yapmadan alınacak önlemlerle minimum %10 tasarruf oranının elde edilebileceğini belirtmektedir. Çalışmanın devamında, yapılacak yatırımlar sonucunda Türkiye'deki sanayi tesislerinin

%95'inde %40'a varan enerji tasarrufunun mümkün olduğu ifade edilmektedir.

Enerji denetimlerinin [207], enerji verimliliği kapsamında yapılan yatırımların belirli bir takvim içerisinde ilerlemesine katkı sağladığı belirtilmektedir. Enerji denetimi sırasında karşılaşılan en büyük zorluk olarak, durum tespiti ve verim önerileri için ilk adım olarak görülebilecek makine ve binaların enerji verilerini içeren etiketlerdeki eksiklik gösterilmektedir. Denetim işleminin daha detaylı ve kesin sonuçlara ulaşabilmesi için ilk olarak işletmelerdeki veri etiketlerinin tamamlanması gerekmektedir. Enerji denetimi üzerine yapılan çalışmalar sonucunda [214]:

- Enerji denetimlerinin daha uzun ekipman ömrü sağladığı,
- Artan ekipman ömrünün bakım masraflarını düşürdüğü,
- Makine arızaları kaynaklı üretim kaybını en aza indirdiği,
- İyileşen çalışma ortamının iş verimini artırdığı tespit edilmiştir.

Birçok araştırmacının uzlaştığı üzere [222–224], ISO 14001 ve ISO 50001 gibi çevre yönetim sistemlerinin firmalar tarafından benimsenmesi, enerji verimliliğini artırmaya yönelik önemli bir adım olurken, aynı zamanda çalışanların iş motivasyonunu artırıcı çeşitli sosyal faydalar da sağladığı tespit edilmiştir [218]. Yöneticiler ve çalışanlar arasındaki uyum arttıkça çalışan verimliliği de yükselmektedir. Bu sebeple bir organizasyon yapısı planlanırken, yönetim kademesinin ön görülen iş tanımına uygun, mesleki yeterliliğinin yanı sıra sosyal becerileri de yüksek doğru kişilerden oluşmasına dikkat edilmesi gerekmektedir [219, 220].

Enerji verimliliğini artırmaya yönelik sanayideki güncel çalışmalar incelendiğinde, atık ısının geri kazanımı (WHR) [225–228], kojenerasyon [264, 265] ve karbon yakalama teknolojisinin [177, 269–271] öne çıktığı görülmektedir. Atık ısı geri kazanımı hakkında yapılan çalışmalarda [229, 263], endüstriyel süreçlerin yan ürün olarak %50'ye varan oranda atık ısı ürettiği aktarılırken, atık ısı geri kazanım sistemiyle ısıtma veriminin %32,32 arttığı ve tüketilen elektrik enerjisinin yaklaşık %30'unun geri kazanılabildiği hesaplanmıştır. Örneğin, 1955 yılında devreye alınan 1.000.000 ton/yıl kapasiteli bir çimento fabrikasına WHR sisteminin entegrasyonu

üzerinde çalışan Tütüncü ve Özgener [352], kurulan türbin setinin sisteme yıllık 35.000 MWh katkı sağlayarak enerji maliyetini 7 milyon dolar düşürdüğünü belirlemiştir.

Akhan [357] tarafından ETKB'nın enerji laboratuvarında gerçekleştirilen çalışmalar sonucunda:

- Kazan odasının yalıtımı ile enerji tüketiminde %30,4 tasarruf,
- Yakma fırınında reküperatör kullanımı ile %38,2 ısı geri kazanımı ve %15,79 tasarruf,
- HVAC sistemlerinde reküperatör kullanımı ile %47, ısı eşanjörü ile ise %51 ısı geri kazanımı,
- Kazanlarda reküperatör kullanımıyla birlikte %12,08 ısı verim artışı sağlanmaktadır.

Kojenerasyon sistemlerinin mevcut yapıya entegrasyonu ile ilgili yapılan araştırmalar [264, 265], gaz türbinlerinin elektrik dönüşüm verimliliğinin %30-40'tan %80-90'lara çıktığını ortaya koymuştur. İşletmeye alınan tesislerde yapılan denetimlerde verim artışı gözlemlenmiş ve yapılan yatırımın kendini 1,5-3 yıl gibi kısa bir sürede amorti ettiği tespit edilmiştir. Günümüzde, sanayinin iklim değişikliğine uyum için gereken temiz üretim programlarının dışında tutulması düşünülemez. Firmalara temiz üretim teknolojileri uygulamalarının maliyetlerini artırmayacağı, aksine ekonomik açıdan kısa vadeli geri dönüş sağlayacağı vurgulanarak, sanayi genelinde farkındalığın artırılması önemlidir.

Küresel ısınma ve iklim değişikliğinin etkilerini en aza indirmek için belirlenen 2030'a kadar 2°C hedefine ek olarak, ülkeler için bir diğer ortak amaç da 2050'ye kadar karbon nötr hale gelmektir. Bu hedef doğrultusunda geliştirilen karbon yakalama teknolojisi, demirçelik gibi karbon yoğun sektörlerde CO₂ salınımını %65 azaltabileceği hesaplanmaktadır [177]. Ancak, karbon yakalama teknolojisinin geliştirme ve uygulama maliyeti oldukça yüksektir ve bu da yaygın kullanımını zorlaştıran başlıca faktör olarak öne çıkmaktadır [284]. Karbon vergisi, emisyon üst sınırı ve ticareti gibi karbon fiyatlandırma mekanizmalarının uygulanmasıyla, şirketlerin bu teknolojilere yatırım yapmaları için mali teşvik sağlanabileceği düşünülmektedir. Ek olarak yakın gelecekte doğal gazla birlikte yenilenebilir enerji fiyatlarının düşmesi [369], ağır sanayide kömür kullanımının oranını azaltarak tüketicileri temiz enerji kullanımına teşvik edeceği öngörülmektedir [370].

Bu çalışmaların yanı sıra, sanayi tesislerinde yer alan kazanlar, fırınlar, elektrik motorları, pompalar ve fanlar gibi ekipmanlarla ilgili verimliliği artırmaya yönelik çeşitli araştırmalar da yürütülmektedir. Örneğin, bir tekstil atölyesindeki boyama işleminden kaynaklanan yüksek sıcaklıktaki sıvıların geri kazanımını inceleyen Koçlu [350], plakalı eşanjör kullanımıyla sistemin kurulmasından sonra 1 kg pamuğun boyanması için kullanılan doğalgaz miktarında aylık ortalama %28,36 azalma olduğunu belirtmektedir.

Sıvılaştırılmış doğal gaz (LNG) ile çalışan haddehane tavlama fırınına sahip bir diğer tesiste araştırmada bulunan Eyidoğan [353], genel verimi %52,76 olan fırının yüksek hava fazlalık katsayısı ile çalıştırılması ve reküperatörün ısı transfer alanında yapılacak iyileştirmelerle yıllık 150.910\$ tasarruf sağlanırken aynı zamanda 678.500 kg CO₂ emisyonunun da önlenebileceği belirtilmektedir.

Tokgöz ve Özgün [356], bir sanayi kuruluşuna ait 2 adet kızgın su alev borulu kazan üzerinde enerji verimliliği çalışmaları yapmışlardır. Kazandan çıkan sıcak gazın geri kazanılması için bir ön ısıtıcı sistem tasarlayan araştırmacılar, artan üretim verimi sonucunda yatırımın kendisini 7 ay gibi çok kısa bir sürede geri ödeyeceğini hesaplamıştır. Kazanlarla ilgili başka bir araştırmada ise Rüsen ve Çevik [189], Karaman'daki bir gıda işletmesine ait gofret üretim hattının enerji verimliliğini değerlendirmiş ve brülör değişimi ile kazan veriminde %5,2 artış sağlanacağını belirtmiştir.

Türkiye ekonomisi için önemli bir yer tutan tekstil sanayinde [345] üretim verimliliğini artırmaya yönelik birçok araştırma yapılmaktadır. Örnek olarak Tunç ve arkadaşları [348], İstanbul'da yer alan bir fabrikaya uygulanacak atık ısı yatırımının enerji maliyetini yaklaşık %11 azaltarak, düşen maliyetin etkisiyle sistemin kendisini 2 ile 4 yıl arasında geri ödeyeceğini belirtmektedir. Bir diğer örnekte Koçlu [350], boyama işleminden sonra ortaya çıkan yüksek yoğunluk ve sıcaklıktaki sıvıların plakalı eşanjör kullanılarak geri kazanımını incelemiş ve sistem kurulduktan sonra 1 kg pamuğun boyanması için kullanılan doğalgazın %28,36 azaldığını göstermiştir. Farklı bir çalışmada ise Değirmen ve Şanlı [346], Bursa'da faaliyet gösteren bir tesisinin enerji verimliliği potansiyelini araştırarak, yapılacak yatırımı 3 yıldan kısa bir sürede karşılayabilecek 7 alan tespit etmişlerdir. Bu alanlar içerisinde geri ödeme süresi en kısa olan iyileştirme kondenslerde seviye kontrol sistemi

uygulanması iken (0,14 yıl), CO₂ emisyonunun önlenerek sağlanacak çevresel fayda bakımından en avantajlı uygulama kondens dönüşlerinin toplanarak atık ısısından (186 ton CO₂/yıl) faydalanılmasıdır.

Türkiye'nin 2023 yılındaki toplam ihracat miktarının %6,4'ünü oluşturan [371] otomotiv sanayide üretim verimliliğini artırmak üzerine yürütülen birçok araştırma bulunmaktadır. Örnek olarak bir otomotiv firması için verimlilik artırıcı çalışmalar gerçekleştiren Sipahi'nin [365] bulduğu sonuçlar aşağıdaki gibidir:

- Kütleme fırınlarında bulunan egzoz bacalarından salınan ısıyı yeniden kullanarak fırın içerisindeki havaya ön ısıtma uygulanması sonucunda 177.824 m³/yıl doğalgaz tasarrufu,
- Brülör gruplarında ön ısıtma yaparak 37.440 m³/yıl doğalgaz tasarrufu,
- Flaş buhar geri kazanım sistemi ile 83.089 m³/yıl doğalgaz tasarrufu,
- Soğutma ünitelerinde yapılan set değeri yükseltme çalışması sonucunda 505.440 kWh/yıl elektrik tasarrufu,
- Tesise ısı pompası kurularak 108.000 kWh/yıl elektrik ve 252.195 m³/yıl doğalgaz tasarrufu sağlanmıştır.
- Yapılan çalışmalar neticesinde toplam 1.436 ton CO₂ emisyonunun doğaya salınmasının engellenebileceği görülmüştür.

Bir diğer çalışmada Ediz [360], seçtiği otomobil fabrikasında yürüttüğü çalışmalara göre en yüksek verim artışı sağlayan 4 iyileştirmeyi şu şekilde sıralamaktadır:

- Verimsiz kompresörlerin verimliliği ile değiştirilmesi sonucunda 1.475.473 kWh,
- İşletmenin çatısına yerleştirilecek güneş panelleri ile 1.389.772 kWh,
- Kompresörlere atık ısı geri kazanım uygulamasının eklenmesiyle 1.186.517 kWh,
- Basınçlı hava kaçaklarının giderimi ile 375.622 kWh tasarruf sağlanmaktadır.

Otomotiv sektörü üzerine yapılan farklı bir çalışmada Göçer ve arkadaşları [361], şebeke basıncından daha yüksek basınç gerektiren cihazlarda basınç artışı için elektrik kullanan ek kompresör yerine mekanik şekilde çalışan basınç yükseltici kullanılmasının elektrik tüketiminde %100 tasarruf sağladığını tespit etmiştir. Basınçlı hava sistemine sahip bir başka tesiste yapılan incelemelerde ise Sapmaz ve Kaya [362], yapılacak

iyileştirmelerle yıllık 7.781.689 kWh enerji tasarrufu sağlanacağını aktarırken, buna ek olarak toplam 1.714,8 ton CO₂ emisyonunun önüne geçileceğini belirtmektedir.

Otomotiv ve gıda sektörlerinde faaliyet gösteren iki fabrikada çalışmalar yürüten Değirmen ve arkadaşları [363], detayları Tablo 4'te verilen inceleme sonucunda gıda sektörü için en yüksek çevresel faydanın (48 ton CO₂/yıl) flash buhar uygulamasında olduğunu tespit ederken, bu alanda otomotiv işletmesi için en verimli yatırım (152 ton CO₂/yıl) basınçlı hava kaçaklarının giderilmesi olduğunu belirlemiştir. Bir hazır gıda fabrikasının üretim hattında incelemelerde bulunan Ruşen [364] ise, elektrik motorlarından verimleri düşük olanların değiştirilmesi durumunda tesisin elektrik maliyetinde 31.500 € düşüş yaşanacağını aktarmaktadır. Artan verimle birlikte CO₂ emisyonunda %12,15 düşüş gözlenirken, yatırımın kendisini 1,5 yıldan kısa sürede geri ödemesi beklenmektedir.

Kıyılmaz ve arkadaşlarının [190], dondurma üretimi yapan bir gıda tesisinde gerçekleştirdiği denetimlerde, enerji kayıplarının özellikle buhar ve kondens hatlarında, basınçlı hava dağıtımında ve transformatörlerde yoğunlaştığı anlaşılmaktadır. Bu durum Kaya'nın [191] benzer özelliklere sahip tesisleri incelediği çalışmasında vardığı sonuçları doğrular niteliktedir. Çalışmada 620.155 kWh değerinde 800 ton buhar kaçığının olduğu paylaşılrken, alınacak basit önlemler ile yıllık 54 TEP buhar kaçığının önüne geçilebileceği aktarılmaktadır.

Bu çalışmalara ek olarak, bir metal işleme tesisindeki konvansiyonel armatürlerin LED lambalı olanlarla değiştirilmesini bilgisayar programı üzerinden simüle eden Perdahçı [366], tesisdeki 48 floresan armatürün LED olanlarla değiştirilmesi sonucunda 830.040Wh enerji tasarrufu sağlanacağını aktarmaktadır. Ayrıca, bu miktarın yıllık aydınlatmada %61,5'lik bir verim artışı anlamına geldiğini belirtmektedir.

Sanayide enerji maliyetleri genellikle toplam üretim maliyetlerinin %20 ila %50 arasında değişmektedir. Türkiye'deki sanayi sektörünün enerji tasarruf potansiyelinin en az %20 olduğu tespit edilmiş olup, bunun yaklaşık %50'sinin küçük yatırım miktarları ile iki yıldan az sürede kendini amorti ederek gerçekleştirilebileceği belirlenmiştir. Enerji yönetimi çözümlerinin İsveç'teki sanayi kuruluşlarının

%40'ında uygulandığı görülürken, bu oranın Türkiye'de %22 seviyesinde olduğu tespit edilmiştir [343]. İki ülke arasındaki bu uygulama yaygınlığı farkı, enerji yönetimi alanında yaşanabilecek yüksek gelişim potansiyelini ortaya koymaktadır. Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü'nün çalışmalarına göre, sanayi sektöründe atılacak doğru adımlar ile Türkiye'nin toplam birincil enerji talebinin %15 düşürülebileceği hesaplanmıştır [303]. Kaya ve Öztürk'ün çalışmasındaki bulgular da bu değeri destekler niteliktedir [344].

Sonuç olarak, iklim değişikliğinin etkileriyle ilgili ulusal ve uluslararası düzeyde yapılan çalışmalar göz önüne alındığında, Türkiye'nin Akdeniz bölgesinde bulunması ve bu bölgenin çevresel değişikliklerden önemli ölçüde etkilenmesi dikkate değerdir. Bu nedenle, Türk siyaset yapıcılarının ve özel sektör temsilcilerinin, iklim değişikliğiyle mücadelede etkili bir şekilde hareket etmeleri ve uygun politikaları geliştirmeleri kritik öneme sahiptir. Türkiye'nin iklim değişikliğiyle mücadelede kararlı ve etkili bir şekilde hareket etmesi hem çevresel sürdürülebilirliği sağlamak hem de ekonomik ve endüstriyel kalkınmayı desteklemek açısından büyük önem taşımaktadır.

Siyaset yapıcıların, iklim değişikliğiyle mücadele konusunda güçlü politika ve düzenlemeleri desteklemeleri, yenilenebilir enerji kaynaklarına yatırım yapmaları ve sera gazı emisyonlarını azaltıcı tedbirler alması gerekmektedir. Özel sektör ise, çevresel sürdürülebilirlik ilkelerini benimseyerek üretim süreçlerini optimize etmeli, enerji verimliliğini artırmalı ve çevre dostu teknolojilere yatırım yapmalıdır. Sürdürülebilir enerji kullanımı, çevresel koruma ve adaptasyon stratejileri gibi konularda kararlılıkla hareket etmek, Türk sanayisinin geleceği açısından hayati öneme sahiptir.

Dünya genelinde 2000 yılından itibaren yükselen enerji verimliliğinin temel kaynağı, kişi başına düşen GSYİH'deki artışla paralel olarak yaygınlaşan yenilenebilir enerji kullanımınıdır. Hizmete yönelik endüstriyel dönüşüm, ticari ve finansal dışa açıklık dünya genelinde endüstriyel enerji verimliliğini artıran faktörlerin başında gelmektedir [372, 373]. Bu konu hakkındaki önerileri özetlemek gerekirse;

- Kişi başına düşen GSYİH'deki büyüme, enerji verimliliğinin geliştirilmesinde temel bir faktördür. Enerji tasarrufu sağlamak için

ekonomik kalkınmayı kısıtlamak gerçekçi değildir. Aksine, politika yapıcılar ekonominin sürdürülebilir bir geleceğe doğru büyümesini desteklemek için mevcut politika araçlarını uygun şekilde kullanmalıdır.

- Sanayi sektöründeki büyüme her zaman enerji verimliliğinin düşmesi anlamına gelmemektedir. Her ülkenin endüstriyel yapısı, uluslararası endüstriyel uzmanlaşma eğiliminin bir sonucu olarak şekillenmektedir. Endüstriyel uzmanlaşma dengesi göz önüne alındığında, politika yapıcıların geçmiş dönemlerle karşılaştırmalar yaparak sanayi sektöründeki enerji verimliliğinin geliştirilmesini destekleyici adımlar atmaya devam etmeleri gerekmektedir.
- Endüstriyel dönüşüm sürecinde iş gücünün yeniden eğitilmesi ve yeni teknolojilere uyum sağlaması için politikalar geliştirilmelidir. Bu, iş kayıplarının önlenmesine ve yeni iş alanlarının oluşturulmasına yardımcı olacaktır.
- Enerji verimliliğini artırmak için gerekli yasal düzenlemelerin güçlendirilmesi ve uygulanabilirliklerinin sağlanması önemlidir. Örneğin, enerji performans standartlarının belirlenmesi ve bu standartlara uyumun zorunlu hale getirilmesi gerekebilir.
- Sanayi tesislerinde enerji verimliliğini artırmak için çalışanlara yönelik bilinçlendirme ve eğitim programları düzenlenmelidir. Bu programlar, enerji tasarrufu sağlayacak pratik yöntemlerin yanı sıra ISO 50001 gibi standartların gereklilikleri hakkında bilgi vermelidir.
- Enerji verimliliğini artırmaya yönelik yatırımları teşvik etmek için ekonomik destek mekanizmaları oluşturulmalıdır. Örneğin, enerji verimliliği yatırımlarını gerçekleştiren işletmelere vergi indirimleri veya finansal teşvikler sağlanabilir.
- Sürekli olarak gelişen enerji verimliliği teknolojilerini izlemek ve uygulamak önemlidir. Yenilikçi çözümlerle, enerji tüketimini azaltmak ve verimliliği artırmak mümkündür.

KISALTMALAR (ABBREVIATIONS)

AB	Avrupa Birliği
ACEEE	Amerika Enerji Verimli Ekonomi Konseyi
AI	Yapay zekâ
APS	Açıklanan Taahhütler Senaryosu
ASD	Ayarlanabilir hız sürücüsü
BMC	Dökme Kalıplama Bileşikleri
BWM	En iyi-en kötü yöntemi

CCR	Charnes, Cooper ve Rhodes
CCS	Karbon yakalama ve depolama
DAC	Doğrudan hava yakalama
EEM's	Enerji verimliliği ölçümleri
EnYS	Enerji Yönetim Sistemi
GSYİH	Gayri safi yurtiçi hasıla
HVAC	Isıtma, havalandırma ve iklimlendirme
IEA	Uluslararası Enerji Ajansı
IFR	Uluslararası Robotik Federasyonu
IoT	Nesnelerin interneti
KVB	Karar verme birimleri
LNG	Sıvılaştırılmış doğal gaz
MCDM	Çok kriterli karar verme sistemi
MEA	Geleneksel mono etanolamin
NZE	Net Sıfır Emisyon
PCM	Faz değiştirici malzeme
SDGs	Sürdürülebilir Kalkınma Hedefleri
STEPS	Açıklanan Politikalar Senaryosu
TEP	Ton eşdeğer petrol
VAP	Verimlilik Artırıcı Proje
VSD	Değişken hızlı sürücüler
VZA	Veri zarflama analizi
WHR	Atık ısının geri kazanımı

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)

Cemre YILDIZ: Araştırmaları yapmış, sonuçları derleyerek makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

He conducted the research, compiled 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] Apergis, N., & Payne, J. E. (2009). Energy consumption and economic growth in Central America: Evidence from a panel cointegration and error correction model. *Energy Economics*, 31(2), 211–216. <https://doi.org/10.1016/J.ENECO.2008.09.002>
- [2] Mishra, V., Smyth, R., & Sharma, S. (2009). The energy-GDP nexus: Evidence from a panel of Pacific Island countries. *Resource and Energy Economics*, 31(3), 210–220. <https://doi.org/10.1016/J.RESENEECO.2009.04.002>
- [3] Liu, T. Y., & Lee, C. C. (2020). Convergence of the world's energy use. *Resource and Energy Economics*, 62, 101199. <https://doi.org/10.1016/J.RESENEECO.2020.101199>
- [4] Lee, C. C., Wang, C. W., Ho, S. J., & Wu, T. P. (2021). The impact of natural disaster on energy consumption: International evidence. *Energy Economics*, 97, 105021. <https://doi.org/10.1016/J.ENECO.2020.105021>
- [5] Flavin, C., & Lenssen, N. (1994). Reshaping the electric power industry. *Energy Policy*, 22(12), 1029–1044. [https://doi.org/10.1016/0301-4215\(94\)90017-5](https://doi.org/10.1016/0301-4215(94)90017-5)
- [6] Doğan, H., & Yılankırkan, N. (2015). Türkiye'nin Enerji Verimliliği Potansiyeli ve Projeksiyonu. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 3(1), 375–384. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/gujsc/issue/7466/98302>
- [7] Hardcastle, A., & Waterman-Hoey, S. (2009). *Energy Efficiency Industry Trends and Workforce Development in Washington State*. <https://pubs.extension.wsu.edu/energy-efficiency-industry-trends-and-workforce-development-in-washington-state>
- [8] IEA. (2022). *World Energy Outlook 2022*. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2022>
- [9] AEO. (2018). *Annual Energy Outlook 2018 with projections to 2050*. Washington, DC. <https://www.eia.gov/outlooks/aeo/>
- [10] Lee, C. C., Lee, C. C., & Li, Y. Y. (2021). Oil price shocks, geopolitical risks, and green bond market dynamics. *The North American Journal of Economics and Finance*, 55, 101309. <https://doi.org/10.1016/J.NAJEF.2020.101309>
- [11] Schmidt, T. S., & Sewerin, S. (2019). Measuring the temporal dynamics of policy mixes – An empirical analysis of renewable energy policy mixes' balance and design features in nine countries. *Research Policy*,

- 48(10), 103557.
<https://doi.org/10.1016/J.RESPOL.2018.03.012>
- [12] Wang, Z., & Feng, C. (2015). A performance evaluation of the energy, environmental, and economic efficiency and productivity in China: An application of global data envelopment analysis. *Applied Energy*, 147, 617–626. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2015.01.108>
- [13] Ghoneem, M. Y. M. (2016). Planning for Climate Change, Why does it Matter? (From Phenomenon to Integrative Action Plan). *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 216, 675–688. <https://doi.org/10.1016/J.SBSPRO.2015.12.060>
- [14] Abbass, K., Qasim, M. Z., Song, H., Murshed, M., Mahmood, H., & Younis, I. (2022). A review of the global climate change impacts, adaptation, and sustainable mitigation measures. *Environmental Science and Pollution Research* 29(28), 42539–42559. <https://doi.org/10.1007/S11356-022-19718-6>
- [15] Jones, M. W., Peters, G. P., Gasser, T., Andrew, R. M., Schwingshackl, C., Gütschow, J., ... Le Quéré, C. (2023). National contributions to climate change due to historical emissions of carbon dioxide, methane, and nitrous oxide since 1850. *Scientific Data*, 10(1). <https://doi.org/10.1038/S41597-023-02041-1>
- [16] IEA. (2023). *Energy Technology Perspectives 2023*. <https://www.iea.org/reports/energy-technology-perspectives-2023>
- [17] IEA. (2013). *Energy Efficiency Market Trends and Medium-Term Prospects*. OECD. <https://doi.org/10.1787/9789264206052-EN>
- [18] EC. (2015). *COM(2015) 80 final - A Framework Strategy for a Resilient Energy Union with a Forward-Looking Climate Change Policy*. Brussels. http://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:1bd46c90-bdd4-11e4-bbe1-01aa75ed71a1.0001.03/DOC_1&format=PDF
- [19] Ang, B. W. (2006). Monitoring changes in economy-wide energy efficiency: From energy–GDP ratio to composite efficiency index. *Energy Policy*, 34(5), 574–582. <https://doi.org/10.1016/J.ENPOL.2005.11.011>
- [20] Hu, J. L., & Lin, C. H. (2008). Disaggregated energy consumption and GDP in Taiwan: A threshold co-integration analysis. *Energy Economics*, 30(5), 2342–2358. <https://doi.org/10.1016/J.ENERCO.2007.11.007>
- [21] Huang, B. N., Hwang, M. J., & Yang, C. W. (2008). Causal relationship between energy consumption and GDP growth revisited: A dynamic panel data approach. *Ecological Economics*, 67(1), 41–54. <https://doi.org/10.1016/J.ECOLECON.2007.11.006>
- [22] Li, R., Wang, Q., Liu, Y., & Jiang, R. (2021). Per-capita carbon emissions in 147 countries: The effect of economic, energy, social, and trade structural changes. *Sustainable Production and Consumption*, 27, 1149–1164. <https://doi.org/10.1016/J.SPC.2021.02.031>
- [23] Wang, Q., Yang, T., & Li, R. (2023). Does income inequality reshape the environmental Kuznets curve (EKC) hypothesis? A nonlinear panel data analysis. *Environmental Research*, 216, 114575. <https://doi.org/10.1016/J.ENVRES.2022.114575>
- [24] Mielnik, O., & Goldemberg, J. (2002). Foreign direct investment and decoupling between energy and gross domestic product in developing countries. *Energy Policy*, 30(2), 87–89. [https://doi.org/10.1016/S0301-4215\(01\)00080-5](https://doi.org/10.1016/S0301-4215(01)00080-5)
- [25] Duro, J. A., Alcántara, V., & Padilla, E. (2010). International inequality in energy intensity levels and the role of production composition and energy efficiency: An analysis of OECD countries. *Ecological Economics*, 69(12), 2468–2474. <https://doi.org/10.1016/J.ECOLECON.2010.07.022>
- [26] Sineviciene, L., Sotnyk, I., & Kubatko, O. (2017). Determinants of energy efficiency and energy consumption of Eastern Europe post-communist economies. *Energy & Environment*, 28(8), 870–884. <https://doi.org/10.1177/0958305X17734386>
- [27] Chang, C. P., Wen, J., Zheng, M., Dong, M., & Hao, Y. (2018). Is higher government efficiency conducive to improving energy use efficiency? Evidence from OECD countries. *Economic Modelling*, 72, 65–77. <https://doi.org/10.1016/J.ECONMOD.2018.01.006>
- [28] Su, Y. W. (2018). Electricity demand in industrial and service sectors in Taiwan. *Energy Efficiency*, 11(6), 1541–1557. <https://doi.org/10.1007/S12053-018-9615-Y/METRICS>
- [29] Newell, R. G., Jaffe, A. B., & Stavins, R. N. (1999). The induced innovation hypothesis and energy-saving technological change. *Quarterly Journal of Economics*, 114(3), 941–975. <https://doi.org/10.1162/003355399556188>

- [30] Shi, G. M., Bi, J., & Wang, J. N. (2010). Chinese regional industrial energy efficiency evaluation based on a DEA model of fixing non-energy inputs. *Energy Policy*, 38(10), 6172–6179. <https://doi.org/10.1016/J.ENPOL.2010.06.003>
- [31] Wu, H., Hao, Y., Ren, S., Yang, X., & Xie, G. (2021). Does internet development improve green total factor energy efficiency? Evidence from China. *Energy Policy*, 153, 112247. <https://doi.org/10.1016/J.ENPOL.2021.112247>
- [32] Han, J., Miao, J., Shi, Y., & Miao, Z. (2021). Can the semi-urbanization of population promote or inhibit the improvement of energy efficiency in China? *Sustainable Production and Consumption*, 26, 921–932. <https://doi.org/10.1016/J.SPC.2021.01.008>
- [33] IEA. (2023). *Energy Efficiency 2023*. <https://www.iea.org/reports/energy-efficiency-2023>
- [34] IEA. (2023). *Industry*. <https://www.iea.org/energy-system/industry>
- [35] UNEP. (2022). *2022 Global Status Report for Buildings and Construction*. <https://www.unep.org/resources/publication/2022-global-status-report-buildings-and-construction>
- [36] Thiel, G. P., & Stark, A. K. (2021). To decarbonize industry, we must decarbonize heat. *Joule*, 5(3), 531–550. <https://doi.org/10.1016/J.JOULE.2020.12.007>
- [37] Rissman, J., Bataille, C., Masanet, E., Aden, N., Morrow, W. R., Zhou, N., ... Helseth, J. (2020). Technologies and policies to decarbonize global industry: Review and assessment of mitigation drivers through 2070. *Applied Energy*, 266, 114848. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2020.114848>
- [38] Napp, T. A., Gambhir, A., Hills, T. P., Florin, N., & Fennell, P. S. (2014). A review of the technologies, economics and policy instruments for decarbonising energy-intensive manufacturing industries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 30, 616–640. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2013.10.036>
- [39] CEFIC. (2023). *2023 Facts and Figures of the European Chemical Industry*. <https://cefic.org/a-pillar-of-the-european-economy/facts-and-figures-of-the-european-chemical-industry/>
- [40] BP. (2023). *Energy Outlook 2023*. <https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/energy-outlook.html>
- [41] Maghrabi, A. M., Song, J., & Markides, C. N. (2023). How can industrial heat decarbonisation be accelerated through energy efficiency? *Applied Thermal Engineering*, 233, 121092. <https://doi.org/10.1016/J.APPLTHERMALEN.2023.121092>
- [42] Energy Efficiency Movement. (2022). *The Energy Efficiency Playbook*. https://www.energyefficiencymovement.com/insights/playbook/?utm_source=foleon&utm_medium=referral&utm_campaign=industrial_efficiency_2023
- [43] Weis, B., Leprettre, B., Patra, M., Hanigovszki, N., Holm, P., Schuman, T., ... Anderson, K. (2021). Increasing the Energy Savings of Motor Applications: The Extended Product Approach, 37–52. https://doi.org/10.1007/978-3-030-69799-0_4
- [44] Jiao, J., Chen, C., & Bai, Y. (2020). Is green technology vertical spillovers more significant in mitigating carbon intensity? Evidence from Chinese industries. *Journal of Cleaner Production*, 257, 120354. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2020.120354>
- [45] Kushnir, D., Hansen, T., Vogl, V., & Åhman, M. (2020). Adopting hydrogen direct reduction for the Swedish steel industry: A technological innovation system (TIS) study. *Journal of Cleaner Production*, 242, 118185. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2019.118185>
- [46] Wang, Q., & Wang, S. (2020). Why does China's carbon intensity decline and India's carbon intensity rise? a decomposition analysis on the sectors. *Journal of Cleaner Production*, 265, 121569. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2020.121569>
- [47] Worrell, E., & Boyd, G. (2022). Bottom-up estimates of deep decarbonization of U.S. manufacturing in 2050. *Journal of Cleaner Production*, 330, 129758. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2021.129758>
- [48] Roy, S., Tran, T. A., & Natarajan, K. (2023). Recent Advancement of IoT Devices in Pollution Control and Health Applications. *Recent Advancement of IoT Devices in Pollution Control and Health Applications*, 1–208. <https://doi.org/10.1016/C2021-0-03490-8>
- [49] Malinauskaite, J., Jouhara, H., Ahmad, L., Milani, M., Montorsi, L., & Venturelli, M. (2019). Energy Efficiency in Industry: EU and national policies in Italy and the UK. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.01.130>
- [50] Prognos. (2012). *Die Energieperspektiven für die Schweiz bis 2050*.

- <https://www.bfe.admin.ch/bfe/de/home/politik/energieperspektiven-2050-plus.html>
- [51] Cagno, E., Worrell, E., Trianni, A., & Pugliese, G. (2013). A novel approach for barriers to industrial energy efficiency. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *19*, 290–308. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2012.11.007>
- [52] Worrell, E., Bernstein, L., Roy, J., Price, L., & Harnisch, J. (2009). Industrial energy efficiency and climate change mitigation. *Energy Efficiency*, *2*(2), 109–123. <https://doi.org/10.1007/S12053-008-9032-8/TABLES/2>
- [53] Hossain, S. R., Ahmed, I., Azad, F. S., & Monjurul Hasan, A. S. M. (2020). Empirical investigation of energy management practices in cement industries of Bangladesh. *Energy*, *212*, 118741. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2020.118741>
- [54] Zhang, S., Worrell, E., & Crijs-Graus, W. (2015). Evaluating co-benefits of energy efficiency and air pollution abatement in China's cement industry. *Applied Energy*, *147*, 192–213. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2015.02.081>
- [55] Tesema, G., & Worrell, E. (2015). Energy efficiency improvement potentials for the cement industry in Ethiopia. *Energy*, *93*, 2042–2052. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2015.10.057>
- [56] Thollander, P., & Ottosson, M. (2010). Energy management practices in Swedish energy-intensive industries. *Journal of Cleaner Production*, *18*(12), 1125–1133. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2010.04.011>
- [57] Andersson, E., & Thollander, P. (2019). Key performance indicators for energy management in the Swedish pulp and paper industry. *Energy Strategy Reviews*, *24*, 229–235. <https://doi.org/10.1016/J.ESR.2019.03.004>
- [58] Hasanbeigi, A., Menke, C., & Therdyothin, A. (2011). Technical and cost assessment of energy efficiency improvement and greenhouse gas emission reduction potentials in Thai cement industry. *Energy Efficiency*, *4*(1), 93–113. <https://doi.org/10.1007/S12053-010-9079-1/METRICS>
- [59] Ates, S. A., & Durakbasa, N. M. (2012). Evaluation of corporate energy management practices of energy intensive industries in Turkey. *Energy*, *45*(1), 81–91. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2012.03.032>
- [60] Xu, B., & Lin, B. (2019). Can expanding natural gas consumption reduce China's CO2 emissions? *Energy Economics*, *81*, 393–407. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2019.04.012>
- [61] Su, B., & Ang, B. W. (2020). Demand contributors and driving factors of Singapore's aggregate carbon intensities. *Energy Policy*, *146*, 111817. <https://doi.org/10.1016/J.ENPOL.2020.111817>
- [62] Han, Y., Zhang, F., Huang, L., Peng, K., & Wang, X. (2021). Does industrial upgrading promote eco-efficiency? —A panel space estimation based on Chinese evidence. *Energy Policy*, *154*, 112286. <https://doi.org/10.1016/J.ENPOL.2021.112286>
- [63] Ofosu-Adarkwa, J., Xie, N., & Javed, S. A. (2020). Forecasting CO2 emissions of China's cement industry using a hybrid Verhulst-GM(1,N) model and emissions' technical conversion. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *130*, 109945. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2020.109945>
- [64] Jin, G., Shi, X., Zhang, L., & Hu, S. (2020). Measuring the SCCs of different Chinese regions under future scenarios. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *130*, 109949. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2020.109949>
- [65] Xu, B., & Lin, B. (2021). Investigating spatial variability of CO2 emissions in heavy industry: Evidence from a geographically weighted regression model. *Energy Policy*, *149*, 112011. <https://doi.org/10.1016/J.ENPOL.2020.112011>
- [66] Lin, B., & Xu, B. (2020). Effective ways to reduce CO2 emissions from China's heavy industry? Evidence from semiparametric regression models. *Energy Economics*, *92*, 104974. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2020.104974>
- [67] Xiong, S., Ma, X., & Ji, J. (2019). The impact of industrial structure efficiency on provincial industrial energy efficiency in China. *Journal of Cleaner Production*, *215*, 952–962. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2019.01.095>
- [68] Schaltegger, S., & Sturm, A. (1990). Ökologische Rationalität: Ansatzpunkte zur Ausgestaltung von ökologieorientierten Managementinstrumenten. *Die Unternehmung*, *44*(4), 273–290. <https://www.jstor.org/stable/24180467>
- [69] Zhang, F., & Huang, K. (2017). The role of government in industrial energy conservation in China: Lessons from the iron and steel industry. *Energy for Sustainable Development*, *39*, 101–

114.
<https://doi.org/10.1016/J.ESD.2017.05.003>
- [70] Liao, N., & He, Y. (2018). Exploring the effects of influencing factors on energy efficiency in industrial sector using cluster analysis and panel regression model. *Energy*, 158, 782–795. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2018.06.049>
- [71] Agovino, M., Bartoletto, S., & Garofalo, A. (2019). Modelling the relationship between energy intensity and GDP for European countries: An historical perspective (1800–2000). *Energy Economics*, 82, 114–134. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2018.02.017>
- [72] Jimenez, R., & Mercado, J. (2014). Energy intensity: A decomposition and counterfactual exercise for Latin American countries. *Energy Economics*, 42, 161–171. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2013.12.015>
- [73] Wurlod, J. D., & Noailly, J. (2018). The impact of green innovation on energy intensity: An empirical analysis for 14 industrial sectors in OECD countries. *Energy Economics*, 71, 47–61. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2017.12.012>
- [74] Farajzadeh, Z., & Nematollahi, M. A. (2018). Energy intensity and its components in Iran: Determinants and trends. *Energy Economics*, 73, 161–177. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2018.05.021>
- [75] Pan, X., Uddin, M. K., Han, C., & Pan, X. (2019). Dynamics of financial development, trade openness, technological innovation and energy intensity: Evidence from Bangladesh. *Energy*, 171, 456–464. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2018.12.200>
- [76] Rafiq, S., Salim, R., & Nielsen, I. (2016). Urbanization, openness, emissions, and energy intensity: A study of increasingly urbanized emerging economies. *Energy Economics*, 56, 20–28. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2016.02.007>
- [77] Tajudeen, I. A. (2021). The underlying drivers of economy-wide energy efficiency and asymmetric energy price responses. *Energy Economics*, 98, 105222. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2021.105222>
- [78] Karimu, A., Brännlund, R., Lundgren, T., & Söderholm, P. (2017). Energy intensity and convergence in Swedish industry: A combined econometric and decomposition analysis. *Energy Economics*, 62, 347–356. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2016.07.017>
- [79] YILDIZ, C. (2024). Binalarda Enerji Verimliliğinde Son Gelişmeler: Türkiye Örneği. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 12(1), 176–213. <https://doi.org/10.29109/GUJSC.1293759>
- [80] Kaynak, S. (2005). Enerjinin Verimli Kullanımına Yaklaşımlar Küreselleşmenin Enerji Değişim Programı ve Enerji Politikaları. In *TMMOB TÜRKİYE V. ENERJİ SEMPOZYUMU*. Ankara: Elektrik Mühendisleri Odası. https://www.emo.org.tr/etkinlikler/enerji/etkinlik_metin.php?etkinlikkod=3&metin_kod=42
- [81] Uzun, A., & Değirmen, M. (2018). Endüstriyel İşletmelerde Enerji Verimliliği ve Enerji Yönetimi. *Uluslararası Ekonomik Araştırmalar Dergisi*, 4(2), 83–97. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/ead/issue/48247/610769>
- [82] IEA. (2023). *World Energy Outlook 2023*. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023>
- [83] IEA. (2022). *CO2 Emissions in 2022*. <https://www.iea.org/reports/co2-emissions-in-2022>
- [84] Guo, H., Davidson, M. R., Chen, Q., Zhang, D., Jiang, N., Xia, Q., ... Zhang, X. (2020). Power market reform in China: Motivations, progress, and recommendations. *Energy Policy*, 145, 111717. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2020.111717>
- [85] Guang, F., Wen, L., & Sharp, B. (2022). Energy efficiency improvements and industry transition: An analysis of China's electricity consumption. *Energy*, 244, 122625. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2021.122625>
- [86] Lü, Y. L., Geng, J., & He, G. Z. (2015). Industrial transformation and green production to reduce environmental emissions: Taking cement industry as a case. *Advances in Climate Change Research*, 6(3–4), 202–209. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2015.10.002>
- [87] Allcott, H., & Greenstone, M. (2012). Is There an Energy Efficiency Gap? *Journal of Economic Perspectives*, 26(1), 3–28. <https://doi.org/10.1257/JEP.26.1.3>
- [88] Gillingham, K., Keyes, A., & Palmer, K. (2018). Advances in Evaluating Energy Efficiency Policies and Programs. <https://doi.org/10.1146/annurev-resource-100517-023028>, 10, 511–532. <https://doi.org/10.1146/ANNUREV-RESOURCE-100517-023028>
- [89] Malinauskaite, J., Jouhara, H., Egilegor, B., Al-Mansour, F., Ahmad, L., & Pusnik, M. (2020). Energy efficiency in the industrial sector in the EU, Slovenia, and Spain. *Energy*, 208, 118398.

- <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2020.118398>
- [90] Ural, T., Akgün, M., Ertürk, M., Sıtkı Koçman Üniversitesi, M., Fakültesi, T., Sistemleri Mühendisliği, E., ... Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, S. (2020). Türkiye’de Doğalgazın Tüketildiği Mahallerde Kullanılan Havalandırma Menfezlerin Optimizasyonu. *International Journal of Pure and Applied Sciences*, 6(2), 157–168. <https://doi.org/10.29132/IJPAS.814457>
- [91] Patterson, M. G. (1996). What is energy efficiency?: Concepts, indicators and methodological issues. *Energy Policy*, 24(5), 377–390. [https://doi.org/10.1016/0301-4215\(96\)00017-1](https://doi.org/10.1016/0301-4215(96)00017-1)
- [92] Herring, H. (2006). Energy efficiency—a critical view. *Energy*, 31(1), 10–20. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2004.04.055>
- [93] Zhou, P., & Ang, B. W. (2008). Linear programming models for measuring economy-wide energy efficiency performance. *Energy Policy*, 36(8), 2911–2916. <https://doi.org/10.1016/J.ENPOL.2008.03.041>
- [94] Kaufman, N., & Palmer, K. L. (2012). Energy efficiency program evaluations: Opportunities for learning and inputs to incentive mechanisms. *Energy Efficiency*, 5(2), 243–268. <https://doi.org/10.1007/S12053-011-9130-X/TABLES/10>
- [95] Heutel, G. (2019). Prospect theory and energy efficiency. *Journal of Environmental Economics and Management*, 96, 236–254. <https://doi.org/10.1016/J.JEEM.2019.06.005>
- [96] Musbah, H., Ali, G., Aly, H. H., & Little, T. A. (2022). Energy management using multi-criteria decision making and machine learning classification algorithms for intelligent system. *Electric Power Systems Research*, 203, 107645. <https://doi.org/10.1016/J.EPSR.2021.107645>
- [97] Liu, P., Zhu, B., & Wang, P. (2021). A weighting model based on best–worst method and its application for environmental performance evaluation. *Applied Soft Computing*, 103, 107168. <https://doi.org/10.1016/J.ASOC.2021.107168>
- [98] Okursoy, A., & Tezsürücü, D. (2015). Veri Zarflama Analizi ile Göreli Etkinliklerin Karşılaştırılması: Türkiye’deki İllerin Kültürel Göstergelerine İlişkin Bir Uygulama. *Yönetim ve Ekonomi Dergisi*, 21(2), 1–18. <https://doi.org/10.18657/YECBU.92031>
- [99] Beltrán-Esteve, M., & Picazo-Tadeo, A. J. (2017). Assessing environmental performance in the European Union: Eco-innovation versus catching-up. *Energy Policy*, 104, 240–252. <https://doi.org/10.1016/J.ENPOL.2017.01.054>
- [100] Chen, X., Liu, Z., & Zhu, Q. (2018). Performance evaluation of China’s high-tech innovation process: Analysis based on the innovation value chain. *Technovation*, 74–75, 42–53. <https://doi.org/10.1016/J.TECHNOVATION.2018.02.009>
- [101] Koltai, T., Lozano, S., Uzonyi-Kecskés, J., & Moreno, P. (2017). Evaluation of the results of a production simulation game using a dynamic DEA approach. *Computers & Industrial Engineering*, 105, 1–11. <https://doi.org/10.1016/J.CIE.2016.12.048>
- [102] Zhou, X., Luo, R., An, Q., Wang, S., & Lev, B. (2019). Water resource environmental carrying capacity-based reward and penalty mechanism: A DEA benchmarking approach. *Journal of Cleaner Production*, 229, 1294–1306. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2019.05.004>
- [103] Charnes, A., Cooper, W. W., & Rhodes, E. (1978). Measuring the efficiency of decision making units. *European Journal of Operational Research*, 2(6), 429–444. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(78\)90138-8](https://doi.org/10.1016/0377-2217(78)90138-8)
- [104] Asghar, S., Sasaki, N., Jourdain, D., & Tsusaka, T. W. (2018). Levels of Technical, Allocative, and Groundwater Use Efficiency and the Factors Affecting the Allocative Efficiency of Wheat Farmers in Pakistan. *Sustainability 2018, Vol. 10, Page 1619*, 10(5), 1619. <https://doi.org/10.3390/SU10051619>
- [105] Singh, G., Singh, P., Sodhi, G. P. S., & Tiwari, D. (2021). Energy auditing and data envelopment analysis (DEA) based optimization for increased energy use efficiency in wheat cultivation (*Triticum aestivum* L.) in north-western India. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 47, 101453. <https://doi.org/10.1016/J.SETA.2021.101453>
- [106] Michali, M., Emrouznejad, A., Dehnohalaji, A., & Clegg, B. (2021). Noise-pollution efficiency analysis of European railways: A network DEA model. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 98, 102980. <https://doi.org/10.1016/J.TRD.2021.102980>
- [107] Izadikhah, M., Azadi, M., Toloo, M., & Hussain, F. K. (2021). Sustainably resilient supply chains evaluation in public transport: A fuzzy chance-constrained two-stage DEA approach. *Applied Soft Computing*, 113, 107879. <https://doi.org/10.1016/J.ASOC.2021.107879>

- [108] Fukuyama, H., Matousek, R., & Tzeremes, N. G. (2020). A Nerlovian cost inefficiency two-stage DEA model for modeling banks' production process: Evidence from the Turkish banking system. *Omega*, 95, 102198. <https://doi.org/10.1016/J.OMEGA.2020.102198>
- [109] Henriques, I. C., Sobreiro, V. A., Kimura, H., & Mariano, E. B. (2020). Two-stage DEA in banks: Terminological controversies and future directions. *Expert Systems with Applications*, 161, 113632. <https://doi.org/10.1016/J.ESWA.2020.113632>
- [110] Wu, H., Lv, K., Liang, L., & Hu, H. (2017). Measuring performance of sustainable manufacturing with recyclable wastes: A case from China's iron and steel industry. *Omega*, 66, 38–47. <https://doi.org/10.1016/J.OMEGA.2016.01.009>
- [111] Chen, X., & Lin, B. (2020). Assessment of eco-efficiency change considering energy and environment: A study of China's non-ferrous metals industry. *Journal of Cleaner Production*, 277, 123388. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2020.123388>
- [112] Yu, C., Shi, L., Wang, Y., Chang, Y., & Cheng, B. (2016). The eco-efficiency of pulp and paper industry in China: an assessment based on slacks-based measure and Malmquist–Luenberger index. *Journal of Cleaner Production*, 127, 511–521. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2016.03.153>
- [113] Feng, C., Huang, J. B., Wang, M., & Song, Y. (2018). Energy efficiency in China's iron and steel industry: Evidence and policy implications. *Journal of Cleaner Production*, 177, 837–845. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2017.12.231>
- [114] He, Y., Liao, N., & Zhou, Y. (2018). Analysis on provincial industrial energy efficiency and its influencing factors in China based on DEA-RS-FANN. *Energy*, 142, 79–89. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2017.10.011>
- [115] Lin, B., & Zhang, G. (2017). Energy efficiency of Chinese service sector and its regional differences. *Journal of Cleaner Production*, 168, 614–625. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2017.09.020>
- [116] Lin, B., & Zhao, H. (2016). Technology gap and regional energy efficiency in China's textile industry: A non-parametric meta-frontier approach. *Journal of Cleaner Production*, 137, 21–28. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2016.07.055>
- [117] Zhu, Q., Li, X., Li, F., & Zhou, D. (2020). The potential for energy saving and carbon emission reduction in China's regional industrial sectors. *Science of The Total Environment*, 716, 135009. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2019.135009>
- [118] Lin, B., & Xu, M. (2018). Regional differences on CO2 emission efficiency in metallurgical industry of China. *Energy Policy*, 120, 302–311. <https://doi.org/10.1016/J.ENPOL.2018.05.050>
- [119] Hahn, G. J., Brandenburg, M., & Becker, J. (2021). Valuing supply chain performance within and across manufacturing industries: A DEA-based approach. *International Journal of Production Economics*, 240, 108203. <https://doi.org/10.1016/J.IJPE.2021.108203>
- [120] Zhou, X., Chen, H., Chai, J., Wang, S., & Lev, B. (2020). Performance evaluation and prediction of the integrated circuit industry in China: A hybrid method. *Socio-Economic Planning Sciences*, 69, 100712. <https://doi.org/10.1016/J.SEPS.2019.05.003>
- [121] Chen, H., Qi, S., & Tan, X. (2022). The improvement pathway for industrial energy efficiency under sustainability perspective. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 51, 101949. <https://doi.org/10.1016/J.SETA.2022.101949>
- [122] Henning, S., Hasselbring, W., Burmester, H., Möbius, A., & Wojcieszak, M. (2021). Goals and measures for analyzing power consumption data in manufacturing enterprises. *Journal of Data, Information and Management*, 3(1), 65–82. <https://doi.org/10.1007/S42488-021-00043-5/FIGURES/7>
- [123] Graetz, G., & Michaels, G. (2018). Robots at Work. *The Review of Economics and Statistics*, 100(5), 753–768. https://doi.org/10.1162/REST_A_00754
- [124] Kumaresan, N., & Miyazaki, K. (1999). An integrated network approach to systems of innovation—the case of robotics in Japan. *Research Policy*, 28(6), 563–585. [https://doi.org/10.1016/S0048-7333\(98\)00128-0](https://doi.org/10.1016/S0048-7333(98)00128-0)
- [125] Sherwani, F., Asad, M. M., & Ibrahim, B. S. K. K. (2020). Collaborative Robots and Industrial Revolution 4.0 (IR 4.0). *2020 International Conference on Emerging Trends in Smart Technologies, ICETST 2020*.

- <https://doi.org/10.1109/ICETST49965.2020.9080724>
- [126] Aghion, P., Jones, B. F., Jones, C. I., Agrawal, A., Ahmadpoor, M., Auclert, A., ... Jones, C. (2017). Artificial Intelligence and Economic Growth. <https://doi.org/10.3386/W23928>
- [127] Berg, A., Buffie, E. F., & Zanna, L. F. (2018). Should we fear the robot revolution? (The correct answer is yes). *Journal of Monetary Economics*, 97, 117–148. <https://doi.org/10.1016/J.JMONECO.2018.05.014>
- [128] Zeira, J. (1998). Workers, Machines, and Economic Growth. *The Quarterly Journal of Economics*, 113(4), 1091–1117. <https://doi.org/10.1162/003355398555847>
- [129] Kromann, L., Malchow-Møller, N., Skaksen, J. R., & Sørensen, A. (2020). Automation and productivity—a cross-country, cross-industry comparison. *Industrial and Corporate Change*, 29(2), 265–287. <https://doi.org/10.1093/ICC/DTZ039>
- [130] Ballestar, M. T., Díaz-Chao, Á., Sainz, J., & Torrent-Sellens, J. (2020). Knowledge, robots and productivity in SMEs: Explaining the second digital wave. *Journal of Business Research*, 108, 119–131. <https://doi.org/10.1016/J.JBUSRES.2019.11.017>
- [131] Acemoglu, D., & Restrepo, P. (2018). Low-Skill and High-Skill Automation. <https://doi.org/10.1086/697242>, 12(2), 204–232. <https://doi.org/10.1086/697242>
- [132] Acemoglu, D., & Restrepo, P. (2020). Robots and Jobs: Evidence from US Labor Markets. <https://doi.org/10.1086/705716>, 128(6), 2188–2244. <https://doi.org/10.1086/705716>
- [133] Yun, J. H. J., Won, D. K., Jeong, E. S., Park, K. B., Yang, J. H., & Park, J. Y. (2016). The relationship between technology, business model, and market in autonomous car and intelligent robot industries. *Technological Forecasting and Social Change*, 103, 142–155. <https://doi.org/10.1016/J.TECHFORE.2015.11.016>
- [134] Jung, J. H., & Lim, D. G. (2020). Industrial robots, employment growth, and labor cost: A simultaneous equation analysis. *Technological Forecasting and Social Change*, 159, 120202. <https://doi.org/10.1016/J.TECHFORE.2020.12.020>
- [135] Keynes, J. M. (2010). Economic Possibilities for Our Grandchildren. *Essays in Persuasion*, 321–332. https://doi.org/10.1007/978-1-349-59072-8_25
- [136] Goos, M., Manning, A., & Salomons, A. (2014). Explaining Job Polarization: Routine-Biased Technological Change and Offshoring. *American Economic Review*, 104(8), 2509–26. <https://doi.org/10.1257/AER.104.8.2509>
- [137] Michaels, G., Natraj, A., & Van Reenen, J. V. (2014). Has ICT Polarized Skill Demand? Evidence from Eleven Countries over Twenty-Five Years. *The Review of Economics and Statistics*, 96(1), 60–77. https://doi.org/10.1162/REST_A_00366
- [138] Autor, D. H., & Dorn, D. (2013). The Growth of Low-Skill Service Jobs and the Polarization of the US Labor Market. *American Economic Review*, 103(5), 1553–97. <https://doi.org/10.1257/AER.103.5.1553>
- [139] Herrendorf, B., Rogerson, R., & Valentinyi, Á. (2013). Two Perspectives on Preferences and Structural Transformation. *American Economic Review*, 103(7), 2752–89. <https://doi.org/10.1257/AER.103.7.2752>
- [140] Wang, E. Z., Lee, C. C., & Li, Y. (2022). Assessing the impact of industrial robots on manufacturing energy intensity in 38 countries. *Energy Economics*, 105, 105748. <https://doi.org/10.1016/J.ENERCO.2021.105748>
- [141] Meike, D., & Ribickis, L. (2011). Energy efficient use of robotics in the automobile industry. *IEEE 15th International Conference on Advanced Robotics: New Boundaries for Robotics*, ICAR 2011, 507–511. <https://doi.org/10.1109/ICAR.2011.6088567>
- [142] Paryanto, Brossog, M., Bornschlegl, M., & Franke, J. (2015). Reducing the energy consumption of industrial robots in manufacturing systems. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 78(5–8), 1315–1328. <https://doi.org/10.1007/S00170-014-6737-Z/METRICS>
- [143] Gadaleta, M., Pellicciari, M., & Berselli, G. (2019). Optimization of the energy consumption of industrial robots for automatic code generation. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 57, 452–464. <https://doi.org/10.1016/J.RCIM.2018.12.020>
- [144] Scalera, L., Boscariol, P., Carabin, G., Vidoni, R., & Gasparetto, A. (2020). Enhancing Energy Efficiency of a 4-DOF Parallel Robot Through Task-Related Analysis. *Machines* 2020, Vol. 8, Page 10, 8(1), 10. <https://doi.org/10.3390/MACHINES8010010>
- [145] Kaya, D., Çanka Kılıç, F., & Öztürk, H. H. (2021). Energy Management and Energy Efficiency in Industry. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-25995-2>

- [146] Çanka Kılıç, F. (2017). Endüstriyel Kazanlarda Enerji Verimliliği ve Emisyon Azalımı Fırsatları. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 5(2), 147–158. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/gujsc/issue/49772/638531>
- [147] Yıldız Töre, G., & Elitaş, G. (2022). Industrial Energy Efficiency Technologies and Management Applications in Turkey. *European Journal of Engineering and Applied Sciences*, 5(2), 55–72. <https://doi.org/10.55581/EJEAS.1217357>
- [148] Yıldız, A., Akgül, S., & Güvercin, S. (2018). Enerji Verimliliği ve Sanayideki Uygulamaları. *İleri Teknoloji Bilimleri Dergisi*, 7(1), 16–22. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/duzceitbd/issue/37903/362117>
- [149] Terrell, R. E. (2012). Improving Compressed Air System Efficiency—Know What You Really Need. <http://dx.doi.org/10.1080/01998595.1999.10530444>, 96(1), 7–15. <https://doi.org/10.1080/01998595.1999.10530444>
- [150] Rusen, S. E., Topcu, M. A., Celtek, S. A., Celep, G. K., & Rusen, A. (2018). Investigation of energy saving potentials of a food factory by energy audit. *Journal of Engineering Research and Applied Science*, 7(1), 848–860. <https://www.journaleras.com/index.php/jeras/article/view/116>
- [151] Sousa Santos, V., Cabello Eras, J. J., Sagastume Gutierrez, A., & Cabello Ulloa, M. J. (2019). Assessment of the energy efficiency estimation methods on induction motors considering real-time monitoring. *Measurement*, 136, 237–247. <https://doi.org/10.1016/J.MEASUREMENT.2018.12.080>
- [152] Chuang, H. C., Li, G. De, & Lee, C. T. (2019). The efficiency improvement of AC induction motor with constant frequency technology. *Energy*, 174, 805–813. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2019.03.019>
- [153] Ahmed, A. A., Moharam, B. A., & Rashad, E. E. (2022). Improving energy efficiency and economics of motor-pump-system using electric variable-speed drives for automatic transition of working points. *Computers & Electrical Engineering*, 97, 107607. <https://doi.org/10.1016/J.COMPELECENG.2021.107607>
- [154] John, N., Mohandas, R., Rajappan, S. C., & Shakthi, S. (2013). Energy Saving Mechanism Using Variable Frequency Drives.
- [155] Bakman, I., Gevorkov, L., & Vodovozov, V. (2014). Predictive control of a variable-speed multi-pump motor drive. *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, 1409–1414. <https://doi.org/10.1109/ISIE.2014.6864820>
- [156] Bakman, I., & Gevorkov, L. (2015). Speed control strategy selection for multi-pump systems. *2015 56th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University, RTUCON 2015*. <https://doi.org/10.1109/RTUCON.2015.7343174>
- [157] Vodovozov, V., Lehtla, T., Bakman, I., Raud, Z., & Gevorkov, L. (2016). Energy-efficient predictive control of centrifugal multi-pump stations. *10th International Conference - 2016 Electric Power Quality and Supply Reliability, PQ 2016, Proceedings*, 233–238. <https://doi.org/10.1109/PQ.2016.7724119>
- [158] Vodovozov, V., & Raud, Z. (2017). Predictive control of multi-pump stations with variable-speed drives. *IET Electric Power Applications*, 11(5), 911–917. <https://doi.org/10.1049/IET-EPA.2016.0361>
- [159] Akhan, H. (2022). Sanayide enerji yönetimi: Pompa ve fan sistemlerinde verimlilik artırıcı uygulamalar. *Trakya Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 23(1), 11–23. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/tujes/issue/70957/1039319>
- [160] Sen, P. K. (1997). Reducing power consumption for axial flow mine ventilation fans. *Journal of Mines, Metals and Fuels*, 45(9–10), 301–303. <https://www.informaticsjournals.com/index.php/jmmf/issue/archive/5>
- [161] De Souza, E. (2015). Improving the energy efficiency of mine fan assemblages. *Applied Thermal Engineering*, 90, 1092–1097. <https://doi.org/10.1016/J.APPLTHERMALEN.2015.04.048>
- [162] Panigrahi, D. C., & Mishra, D. P. (2014). CFD Simulations for the Selection of an Appropriate Blade Profile for Improving Energy Efficiency in Axial Flow Mine Ventilation Fans. *Journal of Sustainable Mining*, 13(1), 15–21. <https://doi.org/10.7424/JSM140104>
- [163] Okochi, G. S., & Yao, Y. (2016). A review of recent developments and technological advancements of variable-air-volume (VAV)

- air-conditioning systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 59, 784–817. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2015.12.328>
- [164] Andersson, E., & Thollander, P. (2019). Key performance indicators for energy management in the Swedish pulp and paper industry. *Energy Strategy Reviews*, 24, 229–235. <https://doi.org/10.1016/J.ESR.2019.03.004>
- [165] Dünya Bankası. (2011). *Türkiye’de Enerji Tasarrufu Potansiyelini Kullanmak*. <https://documents1.worldbank.org/curated/pt/521081468318313907/pdf/522100Energy0S0entia0Energy0Turkey.pdf>
- [166] Kaya, D. (2019). Demir Çelik Sektöründe Enerji Verimliliği. *Bayburt Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 2(2), 201–204. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/bufbd/issue/50962/650393>
- [167] Chisalita, D. A., Petrescu, L., Cobden, P., van Dijk, H. A. J. (Eric), Cormos, A. M., & Cormos, C. C. (2019). Assessing the environmental impact of an integrated steel mill with post-combustion CO₂ capture and storage using the LCA methodology. *Journal of Cleaner Production*, 211, 1015–1025. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2018.11.256>
- [168] Luh, S., Budinis, S., Giarola, S., Schmidt, T. J., & Hawkes, A. (2020). Long-term development of the industrial sector – Case study about electrification, fuel switching, and CCS in the USA. *Computers & Chemical Engineering*, 133, 106602. <https://doi.org/10.1016/J.COMPCHEMENG.2019.106602>
- [169] Ünlü, O. (2009). Sanayide Enerji Tasarrufu Çalışmalarının Önemi ve Buhar Sistemleri İle İlgili Uygulama Örnekleri. *TMMOB Makina Mühendisleri Odası*. <https://mmo.org.tr/tesisat-muhendisligi-111/makale/sanayide-enerji-tasarrufu-calismalarinin-onemi-ve-buhar-sistemleri>
- [170] Amran, M., Makul, N., Fediuk, R., Lee, Y. H., Vatin, N. I., Lee, Y. Y., & Mohammed, K. (2022). Global carbon recoverability experiences from the cement industry. *Case Studies in Construction Materials*, 17, e01439. <https://doi.org/10.1016/J.CSCM.2022.E01439>
- [171] Belaïd, F. (2022). How does concrete and cement industry transformation contribute to mitigating climate change challenges? *Resources, Conservation & Recycling Advances*, 15, 200084. <https://doi.org/10.1016/J.RCRADV.2022.200084>
- [172] Miller, S. A., Habert, G., Myers, R. J., & Harvey, J. T. (2021). Achieving net zero greenhouse gas emissions in the cement industry via value chain mitigation strategies. *One Earth*, 4(10), 1398–1411. <https://doi.org/10.1016/J.ONEEAR.2021.09.011>
- [173] Cao, Z., Myers, R. J., Lupton, R. C., Duan, H., Sacchi, R., Zhou, N., ... Liu, G. (2020). The sponge effect and carbon emission mitigation potentials of the global cement cycle. *Nature Communications* 2020 11:1, 11(1), 1–9. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-17583-w>
- [174] Van Ruijven, B. J., Van Vuuren, D. P., Boskaljon, W., Neelis, M. L., Saygin, D., & Patel, M. K. (2016). Long-term model-based projections of energy use and CO₂ emissions from the global steel and cement industries. *Resources, Conservation and Recycling*, 112, 15–36. <https://doi.org/10.1016/J.RESCONREC.2016.04.016>
- [175] National Bureau of Statistics. (2021). *China Environment Statistics Yearbook*. China Statistics Press. Beijing. <http://www.stats.gov.cn/sj/ndsj/2021/indexeh.htm>
- [176] Tavman, İ. (2016). Türkiye’nin Elektrik Üretimi ve Tüketimi, Çimento Sanayinde Enerji Geri Kazanımı. In *Enerji Stratejileri: İzmir Sempozyumu*. Buca: Dokuz Eylül University. https://www.researchgate.net/publication/303033772_Turkiye'nin_Elektrik_Uretimi_ve_Tuketimi_-_Cimento_Sanayinde_Enerji_Geri_Kazanimi
- [177] Leeson, D., Mac Dowell, N., Shah, N., Petit, C., & Fennell, P. S. (2017). A Techno-economic analysis and systematic review of carbon capture and storage (CCS) applied to the iron and steel, cement, oil refining and pulp and paper industries, as well as other high purity sources. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 61, 71–84. <https://doi.org/10.1016/J.IJGGC.2017.03.020>
- [178] Psarras, P. C., Comello, S., Bains, P., Charoensawadpong, P., Reichelstein, S., & Wilcox, J. (2017). Carbon Capture and Utilization in the Industrial Sector. *Environmental Science and Technology*, 51(19), 11440–11449. https://doi.org/10.1021/ACS.EST.7B01723/SUPPL_FILE/ES7B01723_SI_006.XLSX
- [179] Tomatis, M., Jeswani, H. K., Stamford, L., & Azapagic, A. (2020). Assessing the environmental sustainability of an emerging energy technology: Solar thermal calcination for cement production. *Science of The Total*

- Environment*, 742, 140510.
<https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2020.140510>
- [180] Bundela, P. S., & Chawla, V. (2010). Sustainable Development through Waste Heat Recovery. *American Journal of Environmental Sciences*, 6(1), 83–89.
<https://doi.org/10.3844/AJESSP.2010.83.89>
- [181] Wang, J., Dai, Y., & Gao, L. (2009). Exergy analyses and parametric optimizations for different cogeneration power plants in cement industry. *Applied Energy*, 86(6), 941–948.
<https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2008.09.001>
- [182] Thirugnanasambandam, M., Hasanuzzaman, M., Saidur, R., Ali, M. B., Rajakarunakaran, S., Devaraj, D., & Rahim, N. A. (2011). Analysis of electrical motors load factors and energy savings in an Indian cement industry. *Energy*, 36(7), 4307–4314.
<https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2011.04.011>
- [183] Polat, B., Seval Bayram, N., Polat, A., Üniversitesi, M., Meslek Yüksekokulu, T., Teknolojisi Programı, İ., ... Mühendisliği Bölümü, İ. (2017). Güneydoğu Anadolu Bölgesi için İnşaat Sektöründeki İş Güvenliği Koşullarının İncelenmesi. *International Journal of Pure and Applied Sciences*, 3(2), 68–78.
<https://doi.org/10.29132/IJPAS.341909>
- [184] Mezinska, I., & Strode, S. (2015). Emerging Horizons of Environmental Management in Food Sector Companies. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 213, 527–532.
<https://doi.org/10.1016/J.SBSPRO.2015.11.445>
- [185] Corsini, A., Bonacina, F., Feudo, S., Lucchetta, F., & Marchegiani, A. (2016). Multivariate KPI for Energy Management of Cooling Systems in Food Industry. *Energy Procedia*, 101, 297–304.
<https://doi.org/10.1016/J.EGYPRO.2016.11.038>
- [186] Jovanović, B., Filipović, J., & Bakić, V. (2017). Energy management system implementation in Serbian manufacturing – Plan-Do-Check-Act cycle approach. *Journal of Cleaner Production*, 162, 1144–1156.
<https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2017.06.140>
- [187] Pradella, A. M., de Freitas Rocha Loures, E., da Costa, S. E. G., & de Lima, E. P. (2019). Energy Efficiency in the Food Industry: A Systematic Literature Review. *Brazilian Archives of Biology and Technology*, 62(specialissue), e19190002.
<https://doi.org/10.1590/1678-4324-SMART-2019190002>
- [188] Jagtap, S., Rahimifard, S., & Duong, L. N. K. (2022). Real-time data collection to improve energy efficiency: A case study of food manufacturer. *Journal of Food Processing and Preservation*, 46(8), e14338.
<https://doi.org/10.1111/JFPP.14338>
- [189] Rüßen, S. E., & Çevik, M. S. (2020). Bir Gıda Fabrikasında Enerji Verimliliğinin İyileştirilmesi. *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 24(3), 539–552.
<https://doi.org/10.19113/SDUFENBED.498966>
- [190] Bahattin Kıyılmaz, M., Keçebaş, A., Ertürk, M., Sıtkı Koçman Üniversitesi, M., Bilimleri Enstitüsü, F., Sistemleri Mühendisliği, E., ... Mühendisliği Bölümü, M. (2021). Sanayide Enerji Yönetimi Sistemi için Bir Gıda Tesisinin Enerji Verimliliğinin İyileştirilmesi. *International Journal of Pure and Applied Sciences*, 7(1), 51–62.
<https://doi.org/10.29132/IJPAS.815077>
- [191] Kaya, M. (2012). *Sanayide Enerji Verimliliği Potansiyeli ve Basınçlı Hava Sistemlerinde Verimlilik*. İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
<https://polen.itu.edu.tr/items/e19c0c7e-1a95-40f2-a756-5dcdc65acbe9>
- [192] AKBAŞ, B., KAYA, D., & EYİDOĞAN, M. (2018). Bir Otomobil Montaj Fabrikasının Enerji Tüketim Analizi ve Enerji Tasarrufu Potansiyelinin Değerlendirilmesi. *Mühendis ve Makina*, 59(691), 85–100.
<https://dergipark.org.tr/tr/pub/muhendismakina/issue/48796/621082>
- [193] Rivera, J. L., & Reyes-Carrillo, T. (2014). A Framework for Environmental and Energy Analysis of the Automobile Painting Process. *Procedia CIRP*, 15, 171–175.
<https://doi.org/10.1016/J.PROCIR.2014.06.022>
- [194] Çanka Kiliç, F., Eyidoğan, M., & Sapmaz, S. (2018). Bir otomobil montaj işletmesinde enerji verimliliği artırıcı çözümlerin irdelenmesi. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 6(1), 149–162.
<https://doi.org/10.29109/HTTP-GUJSC-GAZI-EDU-TR.331104>
- [195] Uylukçuoğlu, Ö. E. (2017). *Otomotiv Sanayinde Enerji Verimliliği Ve Enerji Tasarruf Olanaklarının Belirlenmesi*. İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
<http://hdl.handle.net/11527/12789>
- [196] Capehart, B. L. (Barney L.), Turner, W. C., & Kennedy, W. J. (2016). *Guide to Energy Management*. The Fairmont Press, Inc.

- <https://www.routledge.com/Guide-to-Energy-Management-Eighth-Edition/Capehart-PhD-CEM-Turner-PhD-PE-CEM-Kennedy-PhD-PE/p/book/9781498759335>
- [197] Uzun, A., & Değirmen, M. (2018). Endüstriyel İşletmelerde Enerji Verimliliği ve Enerji Yönetimi. *Uluslararası Ekonomik Araştırmalar Dergisi*, 4(2), 83–97. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/ead/issue/48247/610769>
- [198] Prashanth, M. S., Eshwar, R., Patel, V. K., Selvaraj, J., Rohit, R., Rahul, R., & Menon, G. K. (2014). A multi faceted approach to energy conservation in foundries. *Procedia Engineering*, 97, 1815–1824. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.12.335>
- [199] Lee, S. K., Teng, M. C., Fan, K. S., Yang, K. H., & Horng, R. S. (2011). Application of an energy management system in combination with FMCS to high energy consuming IT industries of Taiwan. *Energy Conversion and Management*, 52(8–9), 3060–3070. <https://doi.org/10.1016/J.ENCONMAN.2010.12.031>
- [200] Moya, D., Torres, R., & Stegen, S. (2016). Analysis of the Ecuadorian energy audit practices: A review of energy efficiency promotion. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 62, 289–296. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2016.04.052>
- [201] Bunse, K., Vodicka, M., Schönsleben, P., Brühlhart, M., & Ernst, F. O. (2011). Integrating energy efficiency performance in production management – gap analysis between industrial needs and scientific literature. *Journal of Cleaner Production*, 19(6–7), 667–679. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2010.11.011>
- [202] Schulze, M., Nehler, H., Ottosson, M., & Thollander, P. (2016). Energy management in industry – a systematic review of previous findings and an integrative conceptual framework. *Journal of Cleaner Production*, 112, 3692–3708. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2015.06.060>
- [203] McLaughlin, E., Choi, J. K., & Kissock, K. (2022). Techno-Economic Impact Assessments of Energy Efficiency Improvements in the Industrial Combustion Systems. *Journal of Energy Resources Technology, Transactions of the ASME*, 144(8). <https://doi.org/10.1115/1.4053137/1128944>
- [204] Cagno, E., Franzò, S., Storoni, E., & Trianni, A. (2022). A characterisation framework of energy services offered by energy service companies. *Applied Energy*, 324, 119674. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2022.119674>
- [205] Thollander, P., & Palm, J. (2015). Industrial Energy Management Decision Making for Improved Energy Efficiency—Strategic System Perspectives and Situated Action in Combination. *Energies* 2015, Vol. 8, Pages 5694-5703, 8(6), 5694–5703. <https://doi.org/10.3390/EN8065694>
- [206] Bertoldi P, Diluiso F, Castellazzi L, N., L., & T., S. (2018). Energy Consumption and Energy Efficiency Trends in the EU-28 2000-2015. European Commission, JRC Science for Policy Report. https://ec.europa.eu/jrc%0Ahttps://ec.europa.eu/jrc%0Ahttp://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC110326/efficiency_trends_2017_final_lr.pdf
- [207] Andrei, M., Thollander, P., Pierre, I., Gindroz, B., & Rohdin, P. (2021). Decarbonization of industry: Guidelines towards a harmonized energy efficiency policy program impact evaluation methodology. *Energy Reports*, 7, 1385–1395. <https://doi.org/10.1016/J.EGYR.2021.02.067>
- [208] Backlund, S., & Thollander, P. (2015). Impact after three years of the Swedish energy audit program. *Energy*, 82, 54–60. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2014.12.068>
- [209] Andersson, E., Arfwidsson, O., Bergstrand, V., & Thollander, P. (2017). A study of the comparability of energy audit program evaluations. *Journal of Cleaner Production*, 142, 2133–2139. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2016.11.070>
- [210] Abdel-Hadi, A., Salem, A. R., Abbas, A. I., Qandil, M., & Amano, R. S. (2021). Study of energy saving analysis for different industries. *Journal of Energy Resources Technology, Transactions of the ASME*, 143(5). <https://doi.org/10.1115/1.4048249/1086572>
- [211] Kluczek, A., & Olszewski, P. (2017). Energy audits in industrial processes. *Journal of Cleaner Production*, 142, 3437–3453. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2016.10.123>
- [212] Worrell, E., Laitner, J. A., Ruth, M., & Finman, H. (2003). Productivity benefits of industrial energy efficiency measures. *Energy*, 28(11), 1081–1098. [https://doi.org/10.1016/S0360-5442\(03\)00091-4](https://doi.org/10.1016/S0360-5442(03)00091-4)
- [213] Pye, M., & McKane, A. (2000). Making a stronger case for industrial energy efficiency by

- quantifying non-energy benefits. *Resources, Conservation and Recycling*, 28(3–4), 171–183. [https://doi.org/10.1016/S0921-3449\(99\)00042-7](https://doi.org/10.1016/S0921-3449(99)00042-7)
- [214] Nehler, T., & Rasmussen, J. (2016). How do firms consider non-energy benefits? Empirical findings on energy-efficiency investments in Swedish industry. *Journal of Cleaner Production*, 113, 472–482. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2015.11.070>
- [215] Zuberi, M. J. S., Tijdink, A., & Patel, M. K. (2017). Techno-economic analysis of energy efficiency improvement in electric motor driven systems in Swiss industry. *Applied Energy*, 205, 85–104. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2017.07.121>
- [216] Kapp, S., Choi, J. K., & Kissock, K. (2022). Toward energy-efficient industrial thermal systems for regional manufacturing facilities. *Energy Reports*, 8, 1377–1387. <https://doi.org/10.1016/J.EGYR.2021.12.060>
- [217] Bosu, I., Mahmoud, H., & Hassan, H. (2023). Energy audit and management of an industrial site based on energy efficiency, economic, and environmental analysis. *Applied Energy*, 333, 120619. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2022.12.0619>
- [218] Martin, R., Muûls, M., De Preux, L. B., & Wagner, U. J. (2012). Anatomy of a paradox: Management practices, organizational structure and energy efficiency. *Journal of Environmental Economics and Management*, 63(2), 208–223. <https://doi.org/10.1016/J.JEEM.2011.08.003>
- [219] Tiller, S. R. (2011). Organizational Structure and Management Systems. *Leadership and Management in Engineering*, 12(1), 20–23. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)LM.1943-5630.0000160](https://doi.org/10.1061/(ASCE)LM.1943-5630.0000160)
- [220] Sola, A. V. H., & Mota, C. M. M. (2020). Influencing factors on energy management in industries. *Journal of Cleaner Production*, 248, 119263. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2019.119263>
- [221] Otsuka, A. (2023). Industrial electricity consumption efficiency and energy policy in Japan. *Utilities Policy*, 81, 101519. <https://doi.org/10.1016/J.JUP.2023.101519>
- [222] Neves, F. de O., Salgado, E. G., & Beijo, L. A. (2017). Analysis of the Environmental Management System based on ISO 14001 on the American continent. *Journal of environmental management*, 199, 251–262. <https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2017.05.049>
- [223] Marimon, F., & Casadesús, M. (2017). Reasons to Adopt ISO 50001 Energy Management System. *Sustainability 2017*, Vol. 9, Page 1740, 9(10), 1740. <https://doi.org/10.3390/SU9101740>
- [224] Ferland, K., Brown, J., Meffert, B., Hake, D., Krawczyk, M., Mazza, M., & Waz, P. (2009). *Results from the Texas Pilot Project on Manufacturing Plant Energy Efficiency Certification*. https://www.ecee.org/library/conference_proceedings/ACEEE_industry/2009/Panel_3/3.59/
- [225] Zhou, X., Zhang, H., Rong, Y., Song, J., Fang, S., Xu, Z., ... Markides, C. N. (2022). Comparative study for air compression heat recovery based on organic Rankine cycle (ORC) in cryogenic air separation units. *Energy*, 255, 124514. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2022.124514>
- [226] Song, J., Li, X., Wang, K., & Markides, C. N. (2020). Parametric optimisation of a combined supercritical CO₂ (S-CO₂) cycle and organic Rankine cycle (ORC) system for internal combustion engine (ICE) waste-heat recovery. *Energy Conversion and Management*, 218, 112999. <https://doi.org/10.1016/J.ENCONMAN.2020.112999>
- [227] Markides, C. N. (2013). The role of pumped and waste heat technologies in a high-efficiency sustainable energy future for the UK. *Applied Thermal Engineering*, 53(2), 197–209. <https://doi.org/10.1016/J.APPLTHERMALEN.2012.02.037>
- [228] Gangar, N., Macchietto, S., & Markides, C. N. (2020). Recovery and Utilization of Low-Grade Waste Heat in the Oil-Refining Industry Using Heat Engines and Heat Pumps: An International Technoeconomic Comparison. *Energies 2020*, Vol. 13, Page 2560, 13(10), 2560. <https://doi.org/10.3390/EN13102560>
- [229] European Commission. (2016). *EU Strategy on Heating and Cooling*. <https://www.europarl.europa.eu/legislative-train/package-energy-efficiency/file-eu-strategy-on-heating-and-cooling>
- [230] Jouhara, H., & Olabi, A. G. (2018). Editorial: Industrial waste heat recovery. *Energy*, 160, 1–2. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2018.07.013>
- [231] Jouhara, H., Chauhan, A., Nannou, T., Almahmoud, S., Delpech, B., & Wrobel, L. C.

- (2017). Heat pipe based systems - Advances and applications. *Energy*, 128, 729–754. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2017.04.028>
- [232] Cura, Ö., & Ögüt, E. (2022). Bir İşletmeye Ait Yardımcı Tesislerin Enerji Tüketimi ve Verimliliğinin İncelenmesi. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 10(4), 1910–1925. <https://doi.org/10.29130/DUBITED.878810>
- [233] Fitó, J., Hodencq, S., Ramousse, J., Wurtz, F., Stutz, B., Debray, F., & Vincent, B. (2020). Energy- and exergy-based optimal designs of a low-temperature industrial waste heat recovery system in district heating. *Energy Conversion and Management*, 211, 112753. <https://doi.org/10.1016/J.ENCONMAN.2020.112753>
- [234] Maouris, G., Sarabia Escriva, E. J., Acha, S., Shah, N., & Markides, C. N. (2020). CO₂ refrigeration system heat recovery and thermal storage modelling for space heating provision in supermarkets: An integrated approach. *Applied Energy*, 264, 114722. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2020.114722>
- [235] Liang, Y., Yu, Z., & Li, W. (2019). A Waste Heat-Driven Cooling System Based on Combined Organic Rankine and Vapour Compression Refrigeration Cycles. *Applied Sciences 2019, Vol. 9, Page 4242*, 9(20), 4242. <https://doi.org/10.3390/APP9204242>
- [236] Lecompte, S., Oyewunmi, O. A., Markides, C. N., Lazova, M., Kaya, A., Van Den Broek, M., & De Paepe, M. (2017). Case Study of an Organic Rankine Cycle (ORC) for Waste Heat Recovery from an Electric Arc Furnace (EAF). *Energies 2017, Vol. 10, Page 649*, 10(5), 649. <https://doi.org/10.3390/EN10050649>
- [237] Fatigati, F., Vittorini, D., Wang, Y., Song, J., Markides, C. N., & Cipollone, R. (2020). Design and Operational Control Strategy for Optimum Off-Design Performance of an ORC Plant for Low-Grade Waste Heat Recovery. *Energies 2020, Vol. 13, Page 5846*, 13(21), 5846. <https://doi.org/10.3390/EN13215846>
- [238] Ishaq, H., Dincer, I., & Naterer, G. F. (2018). New trigeneration system integrated with desalination and industrial waste heat recovery for hydrogen production. *Applied Thermal Engineering*, 142, 767–778. <https://doi.org/10.1016/J.APPLTHERMALEN.2018.07.019>
- [239] Wang, F., Wang, L., Zhang, H., Xia, L., Miao, H., & Yuan, J. (2021). Design and optimization of hydrogen production by solid oxide electrolyzer with marine engine waste heat recovery and ORC cycle. *Energy Conversion and Management*, 229, 113775. <https://doi.org/10.1016/J.ENCONMAN.2020.113775>
- [240] Bühler, F., Petrović, S., Holm, F. M., Karlsson, K., & Elmegaard, B. (2018). Spatiotemporal and economic analysis of industrial excess heat as a resource for district heating. *Energy*, 151, 715–728. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2018.03.059>
- [241] Pettersson, K., Axelsson, E., Eriksson, L., Svensson, E., Berntsson, T., & Harvey, S. (2020). Holistic methodological framework for assessing the benefits of delivering industrial excess heat to a district heating network. *International Journal of Energy Research*, 44(4), 2634–2651. <https://doi.org/10.1002/ER.5005>
- [242] Rastegarpour, S., Mariotti, A., Ferrarini, L., & Aminyavari, M. (2023). Energy efficiency improvement for industrial boilers through a flue-gas condensing heat recovery system with nonlinear MPC approach. *Applied Thermal Engineering*, 229, 120554. <https://doi.org/10.1016/J.APPLTHERMALEN.2023.120554>
- [243] Johnson, I., Choate, W. T., & Davidson, A. (2008). Waste Heat Recovery. Technology and Opportunities in U.S. Industry. <https://doi.org/10.2172/1218716>
- [244] Firth, A., Zhang, B., & Yang, A. (2019). Quantification of global waste heat and its environmental effects. *Applied Energy*, 235, 1314–1334. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2018.10.102>
- [245] Forman, C., Muritala, I. K., Pardemann, R., & Meyer, B. (2016). Estimating the global waste heat potential. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 57, 1568–1579. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2015.12.192>
- [246] Jouhara, H., Khordeghah, N., Almahmoud, S., Delpech, B., Chauhan, A., & Tassou, S. A. (2018). Waste heat recovery technologies and applications. *Thermal Science and Engineering Progress*, 6, 268–289. <https://doi.org/10.1016/J.TSEP.2018.04.017>
- [247] Christodoulides, P., Agathokleous, R., Aresti, L., Kalogirou, S. A., Tassou, S. A., & Florides, G. A. (2022). Waste Heat Recovery Technologies Revisited with Emphasis on New Solutions, Including Heat Pipes, and Case Studies. *Energies 2022, Vol. 15, Page 384*, 15(1), 384. <https://doi.org/10.3390/EN15010384>
- [248] Yan, S. R., Fazilati, M. A., Samani, N., Ghasemi, H., Toghraie, D., Nguyen, Q., &

- Karimipour, A. (2020). Energy efficiency optimization of the waste heat recovery system with embedded phase change materials in greenhouses: A thermo-economic-environmental study. *Journal of Energy Storage*, 30, 101445. <https://doi.org/10.1016/J.EST.2020.101445>
- [249] Remeli, M. F., Tan, L., Date, A., Singh, B., & Akbarzadeh, A. (2015). Simultaneous power generation and heat recovery using a heat pipe assisted thermoelectric generator system. *Energy Conversion and Management*, 91, 110–119. <https://doi.org/10.1016/J.ENCONMAN.2014.12.001>
- [250] Jouhara, H., Almahmoud, S., Chauhan, A., Delpech, B., Bianchi, G., Tassou, S. A., ... Arribas, J. J. (2017). Experimental and theoretical investigation of a flat heat pipe heat exchanger for waste heat recovery in the steel industry. *Energy*, 141, 1928–1939. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2017.10.142>
- [251] Oğulata, R. T., Doba, F., & Yilmaz, T. (1999). Second-law and experimental analysis of a cross-flow heat exchanger. *HEAT TRANSFER ENGINEERING*, 20(2), 20–27. <https://doi.org/10.1080/014576399271547>
- [252] Farshi, L. G., Khalili, S., & Mosaffa, A. H. (2018). Thermodynamic analysis of a cascaded compression – Absorption heat pump and comparison with three classes of conventional heat pumps for the waste heat recovery. *Applied Thermal Engineering*, 128, 282–296. <https://doi.org/10.1016/J.APPLTHERMALENG.2017.09.032>
- [253] Gibbs, B. M. (1987). Boiler fuel savings by heat recovery and reduced standby losses. *Heat Recovery Systems and CHP*, 7(2), 151–157. [https://doi.org/10.1016/0890-4332\(87\)90079-2](https://doi.org/10.1016/0890-4332(87)90079-2)
- [254] Butcher, T. A., & Litzke, W. (1994). Condensing economizers for small coal-fired boilers and furnaces. <https://doi.org/10.2172/296650>
- [255] Wang, C., He, B., Yan, L., Pei, X., & Chen, S. (2014). Thermodynamic analysis of a low-pressure economizer based waste heat recovery system for a coal-fired power plant. *Energy*, 65, 80–90. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2013.11.084>
- [256] Willems, D. (2018). Advanced System Controls and Energy Savings for Industrial Boilers. *ASME 2006 Citrus Engineering Conference, CEC 2006*, 11–22. <https://doi.org/10.1115/CEC2006-5202>
- [257] Wang, D., Bao, A., Kunc, W., & Liss, W. (2012). Coal power plant flue gas waste heat and water recovery. *Applied Energy*, 91(1), 341–348. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2011.10.003>
- [258] Peris, B., Navarro-Esbri, J., Molés, F., & Mota-Babiloni, A. (2015). Experimental study of an ORC (organic Rankine cycle) for low grade waste heat recovery in a ceramic industry. *Energy*, 85, 534–542. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2015.03.065>
- [259] Ramirez, M., Epelde, M., De Arteché, M. G., Panizza, A., Hammerschmid, A., Baresi, M., & Monti, N. (2017). Performance evaluation of an ORC unit integrated to a waste heat recovery system in a steel mill. *Energy Procedia*, 129, 535–542. <https://doi.org/10.1016/J.EGYPRO.2017.09.183>
- [260] Cao, S. J., Kong, X. R., Deng, Y., Zhang, W., Yang, L., & Ye, Z. P. (2017). Investigation on thermal performance of steel heat exchanger for ground source heat pump systems using full-scale experiments and numerical simulations. *Applied Thermal Engineering*, 115, 91–98. <https://doi.org/10.1016/J.APPLTHERMALENG.2016.12.098>
- [261] Jouhara, H., Almahmoud, S., Chauhan, A., Delpech, B., Nannou, T., Tassou, S. A., ... Arribas, J. J. (2017). Experimental investigation on a flat heat pipe heat exchanger for waste heat recovery in steel industry. *Energy Procedia*, 123, 329–334. <https://doi.org/10.1016/J.EGYPRO.2017.07.262>
- [262] Qin, S., & Chang, S. (2017). Modeling, thermodynamic and techno-economic analysis of coke production process with waste heat recovery. *Energy*, 141, 435–450. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2017.09.105>
- [263] Naeimi, A., Bidi, M., Ahmadi, M. H., Kumar, R., Sadeghzadeh, M., & Alhuyi Nazari, M. (2019). Design and exergy analysis of waste heat recovery system and gas engine for power generation in Tehran cement factory. *Thermal Science and Engineering Progress*, 9, 299–307. <https://doi.org/10.1016/J.TSEP.2018.12.007>
- [264] Rüstem Çalapkulu, S. (2020). Kojenerasyon Sistemleri ve Trijenerasyon Sistemleri. *Mühendis ve Makine*, 5. https://www.mmo.org.tr/sites/default/files/14_9.pdf
- [265] Öztürk, H., & Kaya, D. (2012). *Biyoyakıt Üretimi ve Kullanımı*. Ankara: TMMOB

- Makina Mühendisleri Odası.
<https://kitap.mmo.org.tr/biyoyakit-uretimi-ve-kullanimi>
- [266] Elektrikport. (2015, April 28). Kojenerasyon Sistemi. 2023, <https://www.elektrikport.com/universite/kojen-erasyon-sistemi/4286#ad-image-0>
- [267] Ritchie, H. (2020). *Sector by sector: where do global greenhouse gas emissions come from?* <https://ourworldindata.org/ghg-emissions-by-sector>
- [268] Turgut, O., Bjerketvedt, V. S., Tomsgard, A., & Roussanaly, S. (2021). An integrated analysis of carbon capture and storage strategies for power and industry in Europe. *Journal of Cleaner Production*, 329, 129427. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2021.129427>
- [269] IC Change. (2014). *Mitigation of climate change.* [kneamazon.net. https://kneamazon.net/Documents/Publication/s/Virtual-Library/Impacto/157.pdf](https://kneamazon.net/Documents/Publication/s/Virtual-Library/Impacto/157.pdf)
- [270] Knopf, B., Chen, Y. H. H., De Cian, E., Förster, H., Kanudia, A., Karkatsouli, I., ... Van Vuuren, D. P. (2013). Beyond 2020-Strategies and Costs for Transforming The European Energy System. *Climate Change Economics*, 4(supp01). <https://doi.org/10.1142/S2010007813400010>
- [271] Vangkilde-Pedersen, T., Anthonsen, K. L., Smith, N., Kirk, K., neele, F., van der Meer, B., ... Peter Christensen, N. (2009). Assessing European capacity for geological storage of carbon dioxide—the EU GeoCapacity project. *Energy Procedia*, 1(1), 2663–2670. <https://doi.org/10.1016/J.EGYPRO.2009.02.034>
- [272] Mirza, N., & Kearns, D. . (2022). *State Of The Art: Ccs Technologies 2022*. Global CSS Institute.
- [273] Mostafa, M., Antonicelli, C., Varela, C., Barletta, D., & Zondervan, E. (2022). Capturing CO2 from the atmosphere: Design and analysis of a large-scale DAC facility. *Carbon Capture Science & Technology*, 4, 100060. <https://doi.org/10.1016/J.CCST.2022.100060>
- [274] Arning, K., Offermann-van Heek, J., Linzenich, A., Kaetelhoen, A., Sternberg, A., Bardow, A., & Ziefle, M. (2019). Same or different? Insights on public perception and acceptance of carbon capture and storage or utilization in Germany. *Energy Policy*, 125, 235–249. <https://doi.org/10.1016/J.ENPOL.2018.10.039>
- [275] Ahmed, M., Bashar, I., Alam, S. T., Wasi, A. I., Jerin, I., Khatun, S., & Rahman, M. (2021). An overview of Asian cement industry: Environmental impacts, research methodologies and mitigation measures. *Sustainable Production and Consumption*, 28, 1018–1039. <https://doi.org/10.1016/J.SPC.2021.07.024>
- [276] Fennell, P. S., Davis, S. J., & Mohammed, A. (2021). Decarbonizing cement production. *Joule*, 5(6), 1305–1311. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2021.04.011>
- [277] Tapia, J. F. D., Lee, J. Y., Ooi, R. E. H., Foo, D. C. Y., & Tan, R. R. (2018). A review of optimization and decision-making models for the planning of CO2 capture, utilization and storage (CCUS) systems. *Sustainable Production and Consumption*, 13, 1–15. <https://doi.org/10.1016/J.SPC.2017.10.001>
- [278] Anthony, E. J., & Clough, P. T. (2019). Post-Combustion Carbon Capture and Storage in Industry. *Energy, Environment, and Sustainability*, 39–53. https://doi.org/10.1007/978-981-13-3296-8_4/COVER
- [279] Bataille, C., Åhman, M., Neuhoff, K., Nilsson, L. J., Fishedick, M., Lechtenböhrer, S., ... Rahbar, S. (2018). A review of technology and policy deep decarbonization pathway options for making energy-intensive industry production consistent with the Paris Agreement. *Journal of Cleaner Production*, 187, 960–973. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2018.03.107>
- [280] Roussanaly, S., Berghout, N., Fout, T., Garcia, M., Gardarsdottir, S., Nazir, S. M., ... Rubin, E. S. (2021). Towards improved cost evaluation of Carbon Capture and Storage from industry. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 106, 103263. <https://doi.org/10.1016/J.IJGGC.2021.103263>
- [281] Anika, O. C., Nnabuife, S. G., Bello, A., Okoroafor, E. R., Kuang, B., & Villa, R. (2022). Prospects of low and zero-carbon renewable fuels in 1.5-degree net zero emission actualisation by 2050: A critical review. *Carbon Capture Science & Technology*, 5, 100072. <https://doi.org/10.1016/J.CCST.2022.100072>
- [282] IEA. (2020). *Global Energy Review 2020*. <https://www.iea.org/reports/global-energy-review-2020>
- [283] IPCC. (2022). *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change*. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/>
- [284] Cachola, C. da S., Ciotta, M., Azevedo dos Santos, A., & Peyerl, D. (2023). Deploying of the carbon capture technologies for CO2 emission mitigation in the industrial sectors. *Carbon Capture Science &*

- Technology, 7, 100102. <https://doi.org/10.1016/J.CCST.2023.100102>
- [285] Gough, C., & Mander, S. (2019). Beyond Social Acceptability: Applying Lessons from CCS Social Science to Support Deployment of BECCS. *Current Sustainable/Renewable Energy Reports*, 6(4), 116–123. <https://doi.org/10.1007/S40518-019-00137-0/METRICS>
- [286] Roussanaly, S., Jakobsen, J. P., Hognes, E. H., & Brunsvold, A. L. (2013). Benchmarking of CO2 transport technologies: Part I—Onshore pipeline and shipping between two onshore areas. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 19, 584–594. <https://doi.org/10.1016/J.IJGGC.2013.05.031>
- [287] Roussanaly, S., Brunsvold, A. L., & Hognes, E. S. (2014). Benchmarking of CO2 transport technologies: Part II – Offshore pipeline and shipping to an offshore site. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 28, 283–299. <https://doi.org/10.1016/J.IJGGC.2014.06.019>
- [288] Global CCS Institute. (2023). *Global Status of CCS 2023*. <https://status23.globalccsinstitute.com/>
- [289] Shaw, R., & Mukherjee, S. (2022). The development of carbon capture and storage (CCS) in India: A critical review. *Carbon Capture Science & Technology*, 2, 100036. <https://doi.org/10.1016/J.CCST.2022.100036>
- [290] Cormos, A. M., Dragan, S., Petrescu, L., Chisalita, D. A., Szima, S., Sandu, V. C., & Cormos, C. C. (2019). Reducing Carbon Footprint of Energy-Intensive Applications by CO₂ Capture Technologies: An Integrated Technical and Environmental Assessment. *Chemical Engineering Transactions*, 76, 1033–1038. <https://doi.org/10.3303/CET1976173>
- [291] Hanak, D. P., Erans, M., Nabavi, S. A., Jeremias, M., Romeo, L. M., & Manovic, V. (2018). Technical and economic feasibility evaluation of calcium looping with no CO₂ recirculation. *Chemical Engineering Journal*, 335, 763–773. <https://doi.org/10.1016/J.CEJ.2017.11.022>
- [292] Alshammari, Y. M. (2021). Scenario analysis for energy transition in the chemical industry: An industrial case study in Saudi Arabia. *Energy Policy*, 150, 112128. <https://doi.org/10.1016/J.ENPOL.2020.112128>
- [293] Griffin, P. W., Hammond, G. P., & Norman, J. B. (2018). Industrial energy use and carbon emissions reduction in the chemicals sector: A UK perspective. *Applied Energy*, 227, 587–602. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2017.08.010>
- [294] Koşaroğlu, Ş. M., & Şengönül, A. (2018). Elektrik Tüketimi ve Ekonomik Büyüme Arasındaki İlişki: BRICS Ülkeleri İçin Bir Uygulama. *Cumhuriyet Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi*, 19(2), 431–447. <http://esjournal.cumhuriyet.edu.tr/tr/pub/cumui/bf/issue/40744/455123>
- [295] Ergül, M., & Soylu, Ö. B. (2022). Türkiye’de Ticari Açıklık Ve Sanayide Enerji Tüketimi İlişkisi. *Dicle Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 12(24), 34–48. <https://doi.org/10.53092/DUIIBFD.1125920>
- [296] EİGM. (2022). *Türkiye Ulusal Enerji Planı*. https://enerji.gov.tr//Media/Dizin/EİGM/tr/Raporlar/TUEP/Türkiye_Ulusal_Enerji_Planı.pdf
- [297] EPDK. (2023). *2022 Yılı Elektrik Piyasası Gelişim Raporu*. <https://epdk.gov.tr/detay/icerik/3-0-0-102/yillik-rapor-elektrik-piyasasi-gelisim-raporlari>
- [298] ETKB. (2023, March 16). Elektrik . T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. 2023, <https://enerji.gov.tr/bilgi-merkezi-enerji-elektrik>
- [299] ETKB. (2022). *2021 Ulusal Enerji Denge Tablosu - Orijinal Birimler / Bin TEP*. <https://enerji.gov.tr/eigm-raporlari>
- [300] IICEC. (2020). *Turkey Energy Outlook 2020*. <https://iicec.sabanciuniv.edu/tr/teo>
- [301] TÜİK. (2023). *Sera Gazı Emisyon İstatistikleri, 1990-2021*. <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Sera-Gazi-Emisyon-Istatistikleri-1990-2021-49672>
- [302] Subramanian, S., Bastian, H., Hoffmeister, A., Jennings, B., Tolentino, C., Vaidyanathan, S., & Nadel, S. (2022). *2022 International Energy Efficiency Scorecard*. Washington. <https://www.aceee.org/research-report/i2201>
- [303] TMMOB Makina Mühendisleri Odası. (2012). *Dünya’da ve Türkiye’de Enerji Verimliliği*. <https://www.mmo.org.tr/kitaplar/dunyada-ve-turkiyede-enerji-verimlilik-0>
- [304] ETKB. (2022). *Ulusal Enerji Verimliliği Eylem Planı 2022 Gelişim Raporu*. <https://enerji.gov.tr/evced-enerji-verimlilik-uevep>
- [305] TÜİK. (2024). *Adrese Dayalı Nüfus Kayıt Sistemi Sonuçları, 2023*. <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Adrese-Dayali-Nufus-Kayit-Sistemi-Sonuclari-2023-49684>
- [306] TÜİK. (2023). *Sektör Bilançoları, 2022*. <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Sektor-Bilancolari-2022-49677>
- [307] TÜİK. (2023). *Yıllık Sanayi ve Hizmet İstatistikleri, 2022*.



- <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Yillik-Sanayi-ve-Hizmet-Istatistikleri-2022-49569>
- [308] TÜİK. (2024). *Ücretli Çalışan İstatistikleri, Aralık 2023*. <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Paid-Employee-Statistics-December-2023-49368>
- [309] IEA. (2023). *World Energy Statistics and Balances*. <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-product/world-energy-statistics-and-balances>
- [310] Köse, Z. (2016). Türkiye Ekonomisinde 2003-2014 Döneminde Ekonomik Büyüme İşsizlik ve Enflasyon İlişkisi. *Türk Sosyal Bilimler Araştırmaları Dergisi*, 1(1), 54–71. <http://tursbad.hku.edu.tr/tr/pub/tursbad/issue/31330/341770>
- [311] Greenaway, D., Morgan, W., & Wright, P. (1997). Trade liberalization and growth in developing countries: Some new evidence. *World Development*, 25(11), 1885–1892. [https://doi.org/10.1016/S0305-750X\(97\)00072-7](https://doi.org/10.1016/S0305-750X(97)00072-7)
- [312] Sadorsky, P. (2012). Energy consumption, output and trade in South America. *Energy Economics*, 34(2), 476–488. <https://doi.org/10.1016/J.ENECO.2011.12.008>
- [313] Aydın, M. (2018). Enerji Tüketimi İle Ekonomik Büyüme Arasındaki İlişki: Düşük ve Orta Gelirli Ülkeler Örneği. *Hacettepe Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 36(1), 1–15. <https://doi.org/10.17065/HUNIIBF.411122>
- [314] Solow, R. (1956). A Contribution to the Theory of Economic Growth. *The Quarterly Journal of Economics*, 70(1), 65–94. <https://doi.org/10.2307/1884513>
- [315] Swan, T. W. (1956). Economic Growth and Capital Accumulation. *Economic Record*, 32(2), 334–361. <https://doi.org/10.1111/J.1475-4932.1956.TB00434.X>
- [316] Romer, P. (1986). Increasing Returns and Long-run Growth. *Journal of Political Economy*, 94(5), 1002–37. <https://doi.org/10.1086/261420>
- [317] Paul, S., & Bhattacharya, R. N. (2004). Causality between energy consumption and economic growth in India: a note on conflicting results. *Energy Economics*, 26(6), 977–983. <https://doi.org/10.1016/J.ENECO.2004.07.002>
- [318] Akinlo, A. E. (2008). Energy consumption and economic growth: Evidence from 11 Sub-Saharan African countries. *Energy Economics*, 30(5), 2391–2400. <https://doi.org/10.1016/J.ENECO.2008.01.008>
- [319] Wolde-Rufael, Y. (2009). Energy consumption and economic growth: The experience of African countries revisited. *Energy Economics*, 31(2), 217–224. <https://doi.org/10.1016/J.ENECO.2008.11.005>
- [320] Wang, S. S., Zhou, D. Q., Zhou, P., & Wang, Q. W. (2011). CO2 emissions, energy consumption and economic growth in China: A panel data analysis. *Energy Policy*, 39(9), 4870–4875. <https://doi.org/10.1016/J.ENPOL.2011.06.032>
- [321] Belke, A., Dobnik, F., & Dreger, C. (2011). Energy consumption and economic growth: New insights into the cointegration relationship. *Energy Economics*, 33(5), 782–789. <https://doi.org/10.1016/J.ENECO.2011.02.005>
- [322] Kraft, J., & Kraft, A. (1978). On the Relationship Between Energy and GNP. *The Journal of Energy and Development*, 3(2), 401–403.
- [323] Yu, E. S. H., & Choi, J.-Y. (1985). Causal relationship between energy and GNP. *The Journal of Energy and Development*, 10(2), 249–272. <https://www.jstor.org/stable/24807818>
- [324] Masih, A. M. M., & Masih, R. (1996). Energy consumption, real income and temporal causality: results from a multi-country study based on cointegration and error-correction modelling techniques. *Energy Economics*, 18(3), 165–183. [https://doi.org/10.1016/0140-9883\(96\)00009-6](https://doi.org/10.1016/0140-9883(96)00009-6)
- [325] Mehrara, M. (2007). Energy consumption and economic growth: The case of oil exporting countries. *Energy Policy*, 35(5), 2939–2945. <https://doi.org/10.1016/J.ENPOL.2006.10.018>
- [326] Karadaş, H. A., Koşaroğlu, Ş. M., & Salihoğlu, E. (2017). Enerji Tüketimi ve Ekonomik Büyüme. *Cumhuriyet Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi*, 18(1), 129–141. <http://esjournal.cumhuriyet.edu.tr/tr/pub/cumuiibf/issue/32216/357734>
- [327] Altınar, A. (2019). MINT Ülkelerinde Enerji Tüketimi ve Ekonomik Büyüme İlişkisi: Panel Nedensellik Analizi. *Gümüşhane Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 10(2), 369–378. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/gumus/issue/47286/454031>
- [328] Terzi, H. (1998). Türkiye’de Elektrik Tüketimi Ve Ekonomik Büyüme İlişkisi: Sektörel Bir Karşılaştırma. *İktisat İşletme ve Finans*, 13(144), 62–71. <https://doi.org/10.3848/İIF.1998.144.4020>
- [329] Mucuk, M., & Uysal, D. (2009). Türkiye ekonomisinde enerji tüketimi ve ekonomik büyüme. *Maliye Dergisi*, 0(157), 105–115. <http://search/yayin/detay/97762>

- [330] Başar, S., Tosun, B., & Bartık, A. (2020). Türkiye’de Büyüme ve Sektörel Bazda Elektrik Tüketimi Arasındaki İlişki. *Atatürk Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi*, 34(3), 1089–1109. <https://doi.org/10.16951/ATAUNIIIIBD.724638>
- [331] Öznur, A., & Özet, Ü. *. (2016). Türkiye’de Ticari Açıklık, Finansal Açıklık ve Ekonomik Büyüme Arasındaki İlişkiler: Sınır Testi Yaklaşımı. *Niğde Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 9(1), 255–272. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/niguiibfd/issue/19761/211636>
- [332] İlter, Ş., & Burtan Doğan, B. (2018). Ticari ve Finansal Dışa Açıklık Oranı İle Ekonomik Büyüme Arasındaki Nedensellik İlişkisi: Türkiye Örneği. *Dicle Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 8(15), 89–115. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/duiibfd/issue/37998/438742>
- [333] Güngör, B. (2022). Türkiye’de Ticari Açıklık ve Doğrudan Yabancı Yatırım İlişkisi. *Artuklu Kaime Uluslararası İktisadi ve İdari Araştırmalar Dergisi*, 1–15. <https://doi.org/10.55119/ARTUKLU.1056193>
- [334] Korkmaz, Ö. (2018). Enerji Tüketimi İle Finansal Açıklık, Ticari Açıklık Ve Finansal Gelişme Arasındaki İlişkinin Karşılaştırmalı Analizi: Türkiye ve İtalya Örneği. *Uluslararası İktisadi ve İdari İncelemeler Dergisi*, 83–100. <https://doi.org/10.18092/ULIKIDINCE.441281>
- [335] Özyıldız, T., & Diner, , Eda. (2022). Finansal Dışa Açıklık Ve Ekonomik Büyüme Arasındaki İlişki: Gelişmekte Olan Ülkeler İçin Bir Panel Veri Analizi. *EKEV Akademi Dergisi*, (90), 441–458. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/sosekev/issue/71356/1147208>
- [336] Saçık, S. Y. (2009). Büyümenin Bir Kaynağı Olarak Ticari Dışa Açıklık. *Sosyal Ekonomik Araştırmalar Dergisi*, 9(17), 525–548. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/susead/issue/28418/302603>
- [337] Özata, E. (2015). Türkiye’de Enerji Tüketimi ve Ekonomik Büyüme Arasındaki İlişkilerin Ekonometrik İncelemesi. *Dumlupınar Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, (26), 8/65577. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/dpusbe/issue/4768/65577>
- [338] Barut, M. E., & Çelik, E. (2021). Türkiye’de Sanayide Tüketilen Elektrik Enerjisi İle Ekonomik Büyüme Arasındaki İlişki: Granger Nedensellik Analizi. *Nicel Bilimler Dergisi*, 3(1), 43–58. <https://doi.org/10.51541/NICEL.900484>
- [339] Caffal, C. (1995). *Learning from experiences with energy management in industry*. (S. Hodgson, Ed.). Sittard: Centre for Analysis and Dissemination of Demonstrated Energy Technologies (CADDET analyses series, ISSN 0925-0085; no.17).
- [340] Larsen, A., & Jensen, M. (1999). Evaluations of energy audits and the regulator. *Energy Policy*, 27(9), 557–564. [https://doi.org/10.1016/S0301-4215\(99\)00033-6](https://doi.org/10.1016/S0301-4215(99)00033-6)
- [341] Bertoldi, P., & Rezessy, S. (2007). Voluntary Agreements for Energy Efficiency: Review and Results of European Experiences. <http://dx.doi.org/10.1260/095830507780157258>, 18(1), 37–73. <https://doi.org/10.1260/095830507780157258>
- [342] Bjørner, T. B., & Jensen, H. H. (2002). Energy taxes, voluntary agreements and investment subsidies—a micro-panel analysis of the effect on Danish industrial companies’ energy demand. *Resource and Energy Economics*, 24(3), 229–249. [https://doi.org/10.1016/S0928-7655\(01\)00049-5](https://doi.org/10.1016/S0928-7655(01)00049-5)
- [343] Christoffersen, L. B., Larsen, A., & Togeby, M. (2006). Empirical analysis of energy management in Danish industry. *Journal of Cleaner Production*, 14(5), 516–526. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2005.03.017>
- [344] Kaya, D., & Öztürk, H. H. (2014). *Sanayide Enerji Yönetimi ve Enerji Verimliliği: Uygulamalı Örneklerle. Unversytet şlaşki. Kocaeli: Umuttepe Yayınevi.* <https://doi.org/10.2/JQUERY.MIN.JS>
- [345] T.C. Ticaret Bakanlığı İhracat Genel Müdürlüğü. (2022). *Tekstil ve Hammaddeleri Raporu 2022.* <https://ticaret.gov.tr/data/5b87000813b8761450e18d7b/Tekstil%20ve%20Hammaddeleri%20Raporu%202022.pdf>
- [346] Değirmen, D., & Eker Şanlı, G. (2022). BİR TEKSTİL İŞLETMESİNDE ENERJİ VERİMLİLİĞİ VE EMİSYON AZALTIM OLANAKLARININ ARAŞTIRILMASI: HAVLU ÜRETİM TESİSİ. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 27(1), 71–88. <https://doi.org/10.17482/UUMFD.1022661>
- [347] Gelir, B. Ç. (2017). *Tekstil Sektöründe Kullanılan Ramöz Makinelerinde Isı Geri Kazanımı ile Enerji Tasarrufu.* Namık Kemal Üniversitesi.

- <http://acikerisim.nku.edu.tr/xmlui/handle/20.500.11776/2424>
- [348] Tunc, M., Kaplan, K., Sisbot, S., & Camdali, U. (2016). Energy management and optimization: Case study of a textile plant in Istanbul, Turkey. *World Journal of Engineering*, 13(4), 348–355. <https://doi.org/10.1108/WJE-08-2016-046/FULL/XML>
- [349] Pulat, E., Etemoglu, A. B., & Can, M. (2009). Waste-heat recovery potential in Turkish textile industry: Case study for city of Bursa. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(3), 663–672. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2007.10.002>
- [350] Koçlu, A. (2011). Tekstil endüstrisinde plakalı ısı değiştiricilerle atık ısı geri kazanım sistemi ve performansının değerlendirilmesi. <https://acikbilim.yok.gov.tr/handle/20.500.12812/688933>
- [351] Kaşka, Ö. (2014). Energy and exergy analysis of an organic Rankine for power generation from waste heat recovery in steel industry. *Energy Conversion and Management*, 77, 108–117. <https://doi.org/10.1016/J.ENCONMAN.2013.09.026>
- [352] TÜTÜNCÜ, G., & ÖZGENER, Ö. (2016). ÇİMENTO SEKTÖRÜNDE ATIK ISI GERİ KAZANIM SİSTEMİNİN TERMODİNAMİK İNCELEMESİ. *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 18(53), 205–223. <https://doi.org/10.21205/deufmd.20165318382>
- [353] Eyidoğan, M., Kaya, D., Dursun, Ş., & Taylan, O. (2014). Endüstriyel Tav Fırınlarında Enerji Tasarrufu ve Emisyon Azaltım Fırsatları. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 29(4), 735–743. <https://doi.org/10.17341/GUMMFD.76579>
- [354] İbrahim TOPAL, H., Kopaç, M., & Mustafa EYRİBOYUN, ve. (2017). Çatalağzı Termik Elektrik Santrali ile Bölgesel Isıtma Yapılabilirliğinin Enerji Analizi. *Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi*, 37(1), 139–146. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/isibtcd/issue/33976/376112>
- [355] Isı, A., Kazanım, G., Yönelik, S., Araştırması, L., Örnek, S., İncelemesi, V., ... Özgün, Ö. (2019). Atık Isı Geri Kazanım Sistemlerine Yönelik Literatür Araştırması ve Sanayiden Örnek Vaka İncelemesi. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 34(2), 57–72. <https://doi.org/10.21605/CUKUROVAUMMF.D.608955>
- [356] Tokgöz, N., & Özgün, Ö. (2019). Atık Isı Geri Kazanım Sistemlerine Yönelik Literatür Araştırması ve Sanayiden Örnek Vaka İncelemesi. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 34(2), 57–72. <https://doi.org/10.21605/CUKUROVAUMMF.D.608955>
- [357] Akhan, H. (2023). Energy Management Practices for Improving Energy Efficiency in Industries: Furnace, Steam Boiler, HVAC, and Cooling Systems. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 38(1), 195–210. <https://doi.org/10.21605/CUKUROVAUMFD.1273782>
- [358] T.C. Ticaret Bakanlığı İhracat Genel Müdürlüğü. (2022). *Otomotiv Sektör Raporu 2022*. <https://ticaret.gov.tr/data/5b87000813b8761450e18d7b/OTOMOTIV%20SEKTÖR%20RAPORU.pdf>
- [359] SİPAHİ, B. (2019). *Otomotiv sanayinde potansiyel enerji verimliliği projeleri*. Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli. https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/tezDetay.jsp?id=sEsy_Ef8v6QhfewgfYilXg&no=RpCvuO52LGsXsIs2novr-g
- [360] Ediz, S. B. (2023, July 26). *Otomotiv yan sanayisinde parça üretim faaliyetlerinden kaynaklanan karbon emisyonları, karbon ayak izi hesaplamaları ve enerji verimliliği uygulama önerileri*. Uludağ Üniversitesi, Bursa. <http://hdl.handle.net/11452/33953>
- [361] Arif Göçer, D., & Yiğit, Ö. (2020). Hava Kompresörü Verimliliğine Basınç Yükseltici Kullanımının Etkisinin İncelenmesi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 136–141. <https://doi.org/10.31590/EJOSAT.801905>
- [362] SAPMAZ, S., & KAYA, D. (2017). Basınçlı Hava Sistemlerinde Enerji Verimliliği ve Emisyon Azaltım Fırsatlarının İncelenmesi. *Mühendis ve Makina*, 58(689), 23–36. <https://dergipark.org.tr/en/pub/muhendismakin/a/issue/48819/621632>
- [363] DEĞİRMEN, D., HASDEMİR, I., & ŞANLI, G. E. (2023). OTOMOTİV VE GIDA SEKTÖRLERİNDE ENERJİ VERİMLİLİĞİ VE KARBON EMİSYONUNUN AZALTIMI İLE İLGİLİ BİR ÇALIŞMA. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 28(3), 937–956. <https://doi.org/10.17482/UUMFD.1340246>
- [364] Ener Ruşen, S. (2019). Elektrik Motorlarının Verimlilik ve CO2 Emisyon Analizi; Bir Gıda Fabrikası Örneği. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (17), 564–569. <https://doi.org/10.31590/EJOSAT.622573>

- [365] Dubnička, R., Lipnický, L., Barčík, M., & Gašparovský, D. (2016). Comprehensive view of LED products in luminaires. *Proceedings of International Conference DEMISEE 2016: Diagnostic of Electrical Machines and Insulating Systems in Electrical Engineering*, 66–70. <https://doi.org/10.1109/DEMISEE.2016.7530467>
- [366] PERDAHÇI, C. (2018). Metal İşleme Tesis Aydınlatmasında Led Lamba Ve Floresan Lamba Karşılaştırılması. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 30(3), 105–113. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/fumbd/issue/39229/461985>
- [367] YILDIZ, C., & AKGÜL, A. (2023). Türkiye'nin Akdeniz kıyılarında açık deniz güneş ve rüzgâr enerjisi üretiminin verim bazlı karşılaştırılması. *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 25(1), 122–136. <https://doi.org/10.25092/BAUNFBED.1149532>
- [368] YILDIZ, C. (2020, September). *Offshore Solar Plants: A Design Study*. Graduate School of Natural and Applied Sciences, İSTANBUL. https://www.researchgate.net/publication/361536147_Offshore_Solar_Plants_A_Design_Study
- [369] Alshammari, Y. M. (2021). Scenario analysis for energy transition in the chemical industry: An industrial case study in Saudi Arabia. *Energy Policy*, 150, 112128. <https://doi.org/10.1016/J.ENPOL.2020.112128>
- [370] An, Y., Zhou, D., Yu, J., Shi, X., & Wang, Q. (2021). Carbon emission reduction characteristics for China's manufacturing firms: Implications for formulating carbon policies. *Journal of Environmental Management*, 284, 112055. <https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2021.112055>
- [371] TÜİK. (2024). *Dış Ticaret İstatistikleri, Aralık 2023*. <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Dis-Ticaret-Istatistikleri-Aralik-2023-49630>
- [372] Su, Y. W. (2023). The drivers and barriers of energy efficiency. *Energy Policy*, 178, 113598. <https://doi.org/10.1016/J.ENPOL.2023.113598>
- [373] Saçık, S. Y. (2009). Büyümenin Bir Kaynağı Olarak Ticari Dışa Açıklık. *Sosyal Ekonomik Araştırmalar Dergisi*, 9(17), 525–548. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/susead/issue/28418/302603>

Eklemlı İmalat Teknolojilerinin Havacılık Sektöründe Enerji Verimliliğini Artırma ve Emisyon Azaltma Potansiyeli

Nedim SUNAY^{1*}  Enis Turhan TURGUT¹ 

¹ Eskisehir Technical University, Department of Airframe and Powerplant Maintenance, Eskisehir, Turkey

Article Info

Research article
Received: 15/02/2024
Revision: 15/04/2024
Accepted: 24/04/2024

Keywords

Additive Manufacturing
Aerospace
Environmental Impacts
Energy Consumption
Material Consumption

Makale Bilgisi

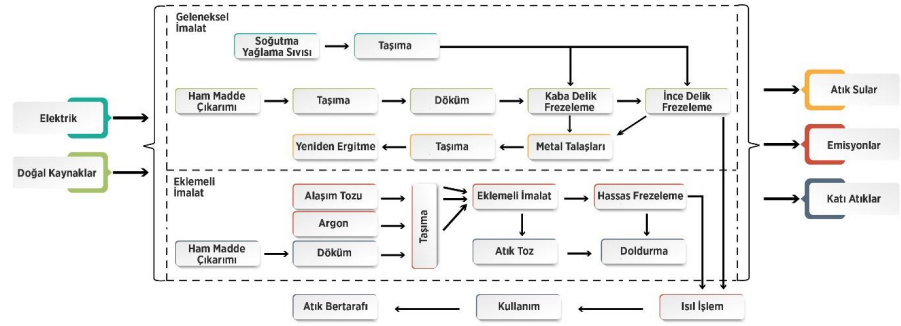
Araştırma makalesi
Başvuru: 15/02/2024
Düzeltilme: 15/04/2024
Kabul: 24/04/2024

Anahtar Kelimeler

Eklemlı İmalat
Havacılık ve Uzay
Çevresel Etkiler
Enerji Tüketimi
Malzeme Tüketimi

Grafik Özet (Graphical/Tabular Abstract)

Bu çalışmada havacılık sektöründe, eklemlı imalat (Eİ) teknolojilerinin enerji verimliliği ve emisyonları azaltma potansiyeli incelenmiştir. Eİ ile üretilen hafif ve uygun tasarımı ürünler sayesinde enerji tüketiminin ve havacılık emisyonlarının düşürülebileceğini böylece hava araçlarının çevresel etkilerinin azaltılmasına katkı sağlanabileceğini göstermektedir. /This study examines the potential of additive manufacturing technologies to improve energy efficiency and reduce emissions in the aviation sector. The research demonstrates that through the production of lightweight and well-designed products using AM, energy consumption and aviation emissions can be reduced, thereby contributing to mitigating the environmental impact of aircraft.



Şekil A: Türbin impeller parçasının Gİ ve Eİ yöntemleriyle üretim sürecinin LCA analizi. / Figure A: Life cycle assessment analysis of the production process of turbine impeller component using conventional and additive manufacturing methods

Önemli Noktalar (Highlights)

- Eİ'nin uzun vadeli ekonomik sürdürülebilirlik üzerine sınırlı ancak umut vadeden çalışmalar bulunmaktadır. /There are limited but promising studies on the long-term economic sustainability of AM.
- Eİ'nin bazı sınırlamaları bulunmakla birlikte, endüstrinin bu engelleri aşmak için yoğun bir çaba sarf ettiği gözlemlenmektedir. /Despite some limitations, there is observed intensive effort in the industry to overcome these barriers.
- Havacılık endüstrisindeki Eİ uygulamaları, uzun vadeli olarak karbon emisyonlarını azaltma hedeflerine katkıda bulunabilir ve enerji tüketimini optimize ederek sürdürülebilirlik sağlayabilir. /Applications of AM in the aviation industry can contribute to long-term reduction of carbon emissions and sustainability by optimizing energy consumption.

Amaç (Aim): Bu çalışmanın amacı, havacılık sektöründe, Eİ teknolojilerinin enerji verimliliğini ve emisyonları azaltma potansiyelini incelemektir. / The aim of this study is to examine the energy efficiency and emission reduction potential of AM technologies in the aviation sector.

Özgünlük (Originality): Çalışmanın özgünlüğü, havacılık endüstrisinde Eİ teknolojisinin ekonomik ve çevresel sürdürülebilirlik açısından değerlendirilmesidir. / The originality of the study lies in the evaluation of AM technology in the aviation industry in terms of economic and environmental sustainability.

Bulgular (Results): Bulgular, Eİ'nin havacılık endüstrisinde kullanımının arttığını ve potansiyel çevresel etkilerini göstermektedir. / The findings indicate an increasing usage of AM in the aviation industry and highlight its potential environmental impacts.

Sonuç (Conclusion): Havacılık endüstrisinde Eİ'nin kullanımının sürdürülebilirlik hedeflerine katkı sağlayabileceği ve daha fazla araştırmaya ihtiyaç duyulduğu sonucuna varılmıştır. / In conclusion, it is concluded that the usage of AM in the aviation industry can contribute to sustainability goals and further research is needed.



Eklemlerli İmalat Teknolojilerinin Havacılık Sektöründe Enerji Verimliliğini Artırma ve Emisyon Azaltma Potansiyeli

Nedim SUNAY^{1*} Enis Turhan TURGUT¹

¹ Eskisehir Technical University, Department of Airframe and Powerplant Maintenance, Eskisehir, Turkey

Article Info

Research article
Received: 15/02/2024
Revision: 15/04/2024
Accepted: 24/04/2024

Keywords

Additive Manufacturing
Aerospace
Environmental Impacts
Energy Consumption
Material Consumption

Öz

Havacılık sektörü, 2050 net sıfır emisyon hedeflerine ulaşmada kendi alanına düşen sorumluluklar doğrultusunda havacılığı ve hava araçlarını ilgilendiren tüm alanlarda iklim ve diğer çevresel etkileri azaltıcı tedbirler anlamında sürdürülebilir, verimli ve döngüsel ekonomi modellerine uygun bir yapıya dönüşüme odaklanmaktadır. Bu makalenin amacı, bu yapı üzerinde büyük öneme sahip malzeme bilimi çerçevesinde, eklemeli imalat (Eİ) teknolojilerinin havacılık sektöründeki enerji verimliliği ve emisyonlar üzerindeki potansiyel etkilerini incelemektir. Uçak parçalarının üretiminde geleneksel üretim yöntemlerinin, enerji tüketimi ve malzeme atığı konusunda sınırlamaları mevcuttur. Eklemlerli imalatın hafif uçak parçaları, motor parçaları ve diğer kritik bileşenlerin üretiminde uygulama potansiyeli ele alınmıştır. Ayrıca, eklemeli imalatın sürdürülebilir malzeme kullanımı ve üretim sürecinin optimize edilmesi konularındaki katkıları vurgulanmıştır. Bu durumun, malzeme kaynaklarının verimli kullanılmasını teşvik ederken, enerji tüketiminin de azaltılmasına yardımcı olacağı değerlendirilmiştir.

Bu çalışmada enerji verimliliğinin artırılması ve emisyon azaltılmasına odaklanarak havacılık sektörü için Eİ süreçlerine ilişkin sistematik bir literatür taraması yapılmıştır. Böylece havacılık sektöründe emisyonları azaltma ve enerji verimliliğini artırma konularında geline son aşamalar hakkında bilgiler sunulmuştur. Araştırma, Eİ ile üretilen hafif ve uygun tasarımı ürünler sayesinde enerji tüketiminin ve havacılık emisyonlarının düşürülebileceğini böylece hava araçlarının çevresel etkilerinin azaltılmasına katkı sağlanabileceğini göstermektedir.

The Potential of Additive Manufacturing Technologies to Increase Energy Efficiency and Reduce Emissions in the Aviation Sector

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 15/02/2024
Düzeltilme: 15/04/2024
Kabul: 24/04/2024

Anahtar Kelimeler

Eklemlerli İmalat
Havacılık ve Uzay
Çevresel Etkiler
Enerji Tüketimi
Malzeme Tüketimi

Abstract

The aviation sector is focusing on transitioning towards sustainable, efficient, and circular economy models in all areas related to aviation and aircraft, in line with its responsibilities towards achieving the 2050 net-zero emission goals. This article aims to examine the potential impact of additive manufacturing (AM) technologies on energy efficiency and emissions in the aviation sector within the framework of material science, which holds significant importance in this structure. Traditional manufacturing methods have limitations regarding energy consumption and material waste in aircraft parts production. The application potential of additive manufacturing in producing lightweight aircraft parts, engine components, and other critical elements has been addressed. Additionally, the contributions of additive manufacturing to sustainable material usage and optimization of the production process have been emphasized. It is evaluated that this situation will promote efficient utilization of material resources while also reducing energy consumption. This study systematically reviews the literature on AM processes for the aviation sector with a focus on enhancing energy efficiency and reducing emissions. Thus, it provides insights into the latest developments in reducing emissions and increasing energy efficiency in the aviation sector. The research demonstrates that through the production of lightweight and well-designed products using AM, energy consumption and aviation emissions can be reduced, thereby contributing to mitigating the environmental impact of aircraft.

1. Giriş (Introduction)

Eklemlerli İmalat (Eİ), geleneksel imalat (Gİ) yöntemlerinin sınırlarını aşan ve karmaşık geometrik yapıdaki parçaların üretimini mümkün

kılan bir üretim teknolojisidir [1]. Gİ yöntemlerinde, malzemelerin çıkarılması veya biçimlendirilmesi yoluyla parça üretilirken, Eİ yöntemlerinde, malzemelerin eklenmesi yoluyla tasarımın gerçekleştirilmesine imkan tanır [2, 3].

Bu fark, malzemelerin verimli kullanılmasını ve atıkların önemli ölçüde azaltılmasını sağlar. Böylece Eİ yöntemleri özellikle havacılık ve uzay endüstrileri gibi enerji verimliliğinin önemli olduğu sektörlerde yüksek talep görmektedir [4, 5].

Havacılık ve uzay endüstrilerinde, Eİ ile karmaşık parçaların üretiminin Gİ ile karşılaştırıldığında, daha hafif, sağlam ve etkili tasarımlar elde edilebildiği literatürde belirtilmiştir [6-8]. Ayrıca, “nihai ürünün kütlesi başına gereken hammadde kütlesi” olarak tanımlanan parçaların “buy-to-fly” (BtF) oranının azaltılması, bu sektörlerde malzeme satın alma maliyetlerini, enerjiyi ve yakıt tüketimini azaltmak için oldukça arzu edilen bir hedefi temsil eder [4]. Ancak Eİ büyük potansiyele sahip yeni bir teknoloji olmasına rağmen, endüstrilerin bu teknolojiyi benimsemesi için sürdürülebilirlik, güvenilirlik, verimlilik, sağlamlık, malzeme sınırlamaları ve kalite açısından hala bazı sınırlamalar bulunmaktadır [9, 10].

Havacılık ve uzay endüstrileri, enerji verimliliğini artırmanın yanı sıra emisyon oranlarını azaltmak için de yoğun bir şekilde çalışmaktadır. Özellikle havacılık sektöründe son yıllarda yaklaşık %4,3'lük büyüme [11], artan uçak sayısı ve uçuş sayıları hava kirliliğinin önemli bir nedeni haline gelmiştir. Ayrıca, hava taşımacılığı talebinin gelecek 20 yıl boyunca yılda ortalama %4,3 artacağı Uluslararası Sivil Havacılık Örgütü (ICAO) tarafından tahmin edilmektedir [12].

Uçaklar, uçuşları sırasında atmosfere zararlı kirleticiler salarlar ve aynı zamanda yüksek miktarda yakıt tüketirler, bu da büyük miktarlarda emisyon oluşturur. En bilinen emisyon türü karbondioksit (CO₂) olsa da, uçaklar atmosfere azot oksit (NO_x), karbon monoksit (CO), kükürt oksit (SO_x) gibi diğer gazlar ve partiküller de salarlar. Bu emisyonlar, havacılık sektörünün doğrudan ve dolaylı çevresel etkilerini belirleyen önemli faktörlerden biridir. Bu nedenle, havacılık endüstrisi, enerji verimliliğini artırmak ve bu zararlı emisyonları azaltmak amacıyla sürekli olarak çözüm arayışındadır [13].

Havacılık sektörü, ulaşım sektörü içerisinde küresel sera gazı emisyonlarının yaklaşık %9'unu oluşturarak ulaşımın çevresel etkilerinde önemli bir rol oynamaktadır. Ek olarak, bu sektörün önümüzdeki yıllarda hızla büyümesi beklenmektedir ve tahminlere göre yakıt tüketimi 2050 yılına kadar üç katına çıkacaktır [4, 14]. Bu nedenle, yakıt verimliliğinin artırılması, havacılığın çevresel etkisini azaltma çabalarında önemli bir rol oynamaktadır. Bu çerçevede karbon nötr hedefe

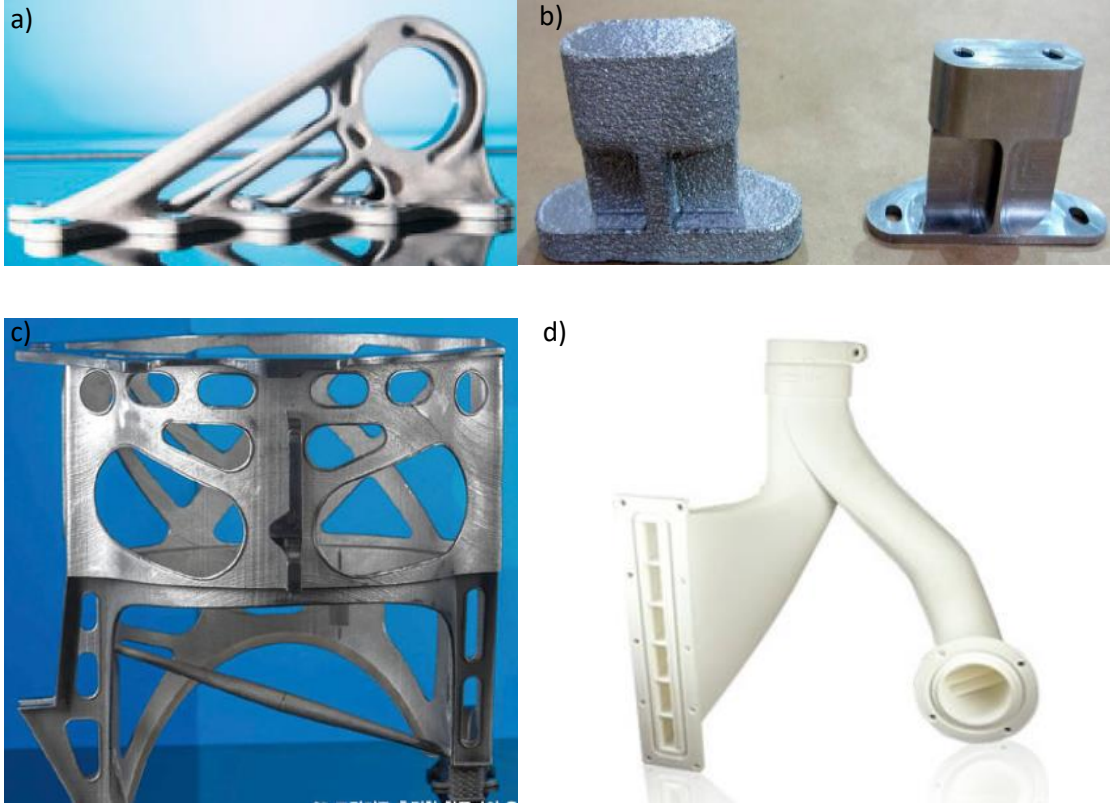
ulaşmak ve havacılığın çevresel etkilerini azaltmak için Eİ teknolojilerinin kullanımında kaynak verimliliğine (malzeme ve enerji) odaklanmanın önemli bir strateji olacağı değerlendirilmektedir.

Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde, geniş çaplı Eİ süreçlerinin avantajlarına, sınırlamalarına ve potansiyel sürdürülebilirliğine yoğunlaştığı görülmektedir [15, 16]. Buna ek olarak Eİ'nin malzeme ve enerji tüketimi, sürdürülebilirliği ve çevresel etkileri genel olarak ele alan çalışmalara rastlamak mümkündür [17-19]. Ancak spesifik olarak Eİ teknolojilerinin havacılıkta kullanımıyla ilgili kapsamlı derleme çalışmaların sınırlı olduğu görülmüştür [20]. Sadece Helena ve ark.'nın [21] metal eklemeli imalatın havacılıkta enerji ve malzeme verimliliğine yönelik kapsamlı bir çalışma yaptığı görülmektedir. Ancak Eİ teknolojilerinin tamamının ele alındığı ve havacılıkta enerji verimliliği ile emisyon etkilerine yer verildiği kapsamlı bir derleme çalışması bilindiği kadarıyla mevcut değildir.

Bu çalışmada, Eİ'nin havacılık sektöründeki potansiyel uygulama alanları ele alınmış, özellikle hafif uçak parçaları, motor bileşenleri ve diğer kritik unsurların üretimi üzerinde odaklanılarak, havacılık endüstrisinde emisyon azaltma ve enerji verimliliğini artırma amacıyla gerçekleştirilen çalışmalar kapsamlı bir şekilde sunulmuştur.

2. Eklemeli İmalat ve Havacılık (Additive Manufacturing and Aviation)

Eİ'nin havacılık endüstrisinde, özellikle çeşitli uçak parçalarının üretiminde kullanımı giderek artmaktadır. Havacılık ve uzay üretim raporlarına göre [22], küresel Eİ pazarının 2026 yılına kadar 23,33 milyar ABD Dolarına ulaşması beklenmektedir. Bu eğilimin ana nedenlerinden biri, parçaların talep üzerine yeniden tasarlanabilmesi ve üretilmesiyle mekanik özelliklerden ödün vermeden önemli derecede malzeme ve maliyet açısından tasarruf sağlama olanağıdır [14, 23, 24]. Ayrıca, Eİ teknolojileri, tane yapısı, doku ve topoloji gibi mikroyapısal özelliklerin, imalat aşaması sırasında proses parametrelerinin değiştirilmesi yoluyla kontrol edilmesine olanak tanır [25, 26]. Böylece Eİ, yalnızca geleneksel imalat işlemleriyle işlenmesi veya üretilmesi zor olan karmaşık geometri parçaların oluşturulmasına izin vermekle kalmaz, aynı zamanda genellikle yüksek sıcaklıklar, sert hava koşulları gibi zorlu koşullar altında çalışan yüksek performanslı hava aracı parçalarının yapımında kritik önem taşıyan mikroyapıların düzenlenmesine olanak tanır [27].



Şekil 1. Eİ teknolojileriyle üretilen havacılık parçaları; a) Ti6Al4V'den eklemeli olarak üretilmiş A350 braketleri [30], b) uzay aracında kullanılan dalga kılavuzu braketi [31], c) Eİ ile tek bir parça şeklinde üretilen hidrolik depo tankı [5], d) poliamid 12 (PA 2200)'den yapılmış laminer akış için hava kanalları [33]. (Aviation components manufactured with additive manufacturing (AM) technologies; a) Additively manufactured Ti6Al4V A350 brackets [30], b) waveguide bracket used in spacecraft [31], c) hydraulic reservoir tank produced as a single part with AM [5], d) air channels for laminar flow made from polyamide 12 (PA 2200) [33].)

Eİ teknolojileri, havacılık endüstrisinde hafif parça üretimine ağırlık vermektedir. Geleneksel imalat yöntemleriyle üretilen havacılık parçalarının yüksek üretim maliyetine neden olan önemli unsurlardan biri, giriş malzemesi ile nihai ürün arasındaki kütle oranı olarak tanımlanan "buy-to-fly" oranıdır. Havacılık endüstrisi için özellikle bu oran, 10:1 ile 15–20:1 arasında dalgalanmakta ve giderek karmaşık parçalar için 40:1'e kadar çıkabilmektedir [5, 20]. Eİ, neredeyse net şekilli ürünler üretme avantajı sunduğundan, "buy-to-fly" oranı önemli ölçüde azaltılabilir ve hatta 1:1'e yaklaştırılabilir [15]. İç mikroyapıların iyileştirilmesi, daha yüksek giriş malzemesi kullanımı, daha az malzeme israfı ve daha hızlı işleme süresi ile birlikte, Eİ teknolojisi artık sadece bir prototip seçeneği olarak değil, yüksek kaliteli neredeyse net şekilli ürünler üretebilen doğrudan bir üretim yöntemi olarak görülmektedir [15]. Ayrıca, Eİ'nin havacılık sektöründe başarılı bir şekilde adapte edilmesi, gelecekte sürdürülebilirlik ve ilişkili tedarik zinciri yapıları konusunda daha fazla fırsat sunmaktadır.

Eİ hala gelişen bir teknoloji olarak kabul edilmektedir. Eİ tarafından üretilen parçalar için belirlenmiş ilgili standartların ve sertifikasyonun bulunmamasından dolayı mevcut Eİ kullanımının çoğunluğu, havacılık endüstrisindeki kritik olmayan uygulamalarla sınırlı kalmıştır [28]. Ancak metal Eİ'nin havacılık endüstrisinde uygulanması bağlamında birkaç standart ve yeterlilik oluşturulmuştur. Örnekler arasında lazer toz yataklı füzyon (L-PBF) metal Eİ süreçleriyle üretilen uzay uçuşu donanımına ilişkin MSFC-STD-3716 ve havacılık, uzay ve savunma kuruluşlarındaki kalite yönetim sistemleri gereksinimlerine ilişkin SAE AS9100 yer almaktadır [29]. Bu nedenle, metal Eİ standartlarını tam olarak entegre etmek ve özellikle şu anda Ulusal Havacılık ve Uzay Dairesi'nin (NASA) öncülüğünü yaptığı havacılık ve uzay uygulamalarının gerekliliklerini karşılamak için hâlâ önemli çabalara ihtiyaç vardır.

Son yıllarda Eİ parçalarının uçakların hem yapısal hem de tahrik sistemlerine yerleştirilmesi için önemli çabalar sarf edilmiştir. Airbus, 2014 yılında ticari bir uçağın iç kısmında kullanılan ilk Eİ parçaları olan Ti6Al4V'den A350 braketlerini

üretmek için Eİ'yi kullanmıştır (Şekil 1a). Topoloji açısından optimize edilmiş bileşen, Gİ ile frezelenmiş bir braketten %30 daha hafiftir ve malzeme atığında %95'ten %5'e kadar önemli bir azalma sağlama potansiyeline sahiptir [30]. Eİ'nin bir uzay aracındaki ilk kullanımı ise, elektron ışınıyla ergitme (EBM) kullanılarak üretilen dalga kılavuzu braketleridir (Şekil 1b)[31]. GE Aviation, geleneksel üretim yöntemleri kullanılarak üretilen 855 parçayı, Eİ ile sadece bir düzine parçaya indirgeyerek üretmeyi başarmıştır. Basitleştirilmiş tasarımla, ağırlık azaltılarak yakıt verimliliği %20'ye kadar artmış ve %10 daha fazla güç elde edilmiştir. Ayrıca, 20 parçalı bir nozül, tek bir Eİ ünitesinde birleştirilmiş ve ağırlığı %25 azaltılmıştır [32]. Benzer şekilde, Airbus, 126 parçalı hidrolik bir depo tankını tek bir Eİ parçasına indirmiştir (Şekil 1.c) [5]. Metal parçalara ek olarak Eİ ile üretilen plastik malzemelerin de havacılıkta kullanıldığı uygulamalar mevcuttur. Motor bölmelerinde ısı direnci gerektiren parçaların seçici lazer sinterleme (SLS) ile üretiminde cam dolgulu naylon kullanılmaktadır. Esneklik gerektiren parçalarda Nylon 12 tercih edilmekte olup, hava akışı için kullanılan kanallar gibi uygulamalar literatürde mevcuttur (Şekil 1d) [33].

Genel Electric (GE), Boeing ve Airbus gibi büyük havacılık şirketleri, Eİ teknolojilerinin sunduğu fırsatları değerlendiren geniş araştırma programları yürütmektedir [5]. Havacılık alanında bilinen bir Eİ örneği, GE LEAP motoru için üretilen yakıt lülesi (fuel nozzle) ve bu lüle, Nisan 2016'da Airbus A320neo üzerinde test edilmiştir. Bu parçanın üretimi, piyasaya sürülmesinden itibaren 2 yıl içinde 3,000 adede ulaşmıştır. Airbus, 2020'de 120,000'den fazla Eİ parçasını kullanmayı planlamıştır [34].

Siemens şirketi tarafından gerçek çalışma sıcaklığı (700 °C) ve 13,000 devir/dakika hızında tam yük motor testleri için lazer tabanlı toz yataklı birleştirme (LB-PBF) yöntemiyle üretilen nikel alaşımlarının türbin paleleri için kullanılabilirliği incelenmiştir. Bu proje, Eİ kullanıldığında, iş süresinin geleneksel bilgisayarlı sayısal kontrol (CNC) frezeleme ve torna sistemlerine kıyasla önemli ölçüde azaltılabileceğini göstermiştir [35].

Genel olarak literatürde yapılan çalışmalar göz önüne alındığında Eİ süreci parametrelerini anlamak ve kontrol etmek, sertifikalı havacılık parçalarının öngörülebilir ve tutarlı kalitede makul bir maliyetle üretilmesini sağlayan önemli bir gerekliliktir. Havacılıkta Eİ ile üretilen parçalar için temel zorluk, tamamen yoğun parçaların üretilmesi

ile ilgilidir. Bu, süreç parametrelerinin optimize edilmesi ve ardından ikincil işlemler uygulanması ile çözülebilir.

3. Enerji Verimliliği Artırma ve Emisyon

Azaltma (Increasing Energy Efficiency and Reducing Emissions)

Eİ, Gİ yöntemleri kullanılarak üretilmesi zor veya imkansız olan tasarımların üretilmesini mümkün kılar [36], böylece parçaların mühendislik performansı artırılabilir. Ayrıca Eİ, Gİ yöntemleri ile ilişkilendirilen araçlar, kalıplar ve malzeme atıklarından kaçınarak parça üretiminin "beşikten mezara" çevresel ayak izlerini azaltabilir [37]. Bunlara ek olarak, Eİ teknolojileri tarafından üretilmesi mümkün kılınan yeni geometriler, parçanın ürün uygulamasında performans ve çevresel avantajları da beraberinde getirmektedir [38]. Örneğin, literatürdeki çalışmalarda havacılık endüstrisinde, uçak kütlelerini azaltmak amacıyla farklı Eİ yöntemleriyle üretilen parçaların, uçakların yakıt verimliliğini arttırdığını bildirilmiştir[39, 40].

Uçak ağırlığının azaltılması, toplumsal enerji kullanımını ve sera gazı emisyonlarını azaltma açısından kritik bir öneme sahiptir. Havacılık, şu anda küresel taşımacılıkta kullanılan yakıtların ikinci büyük tüketicisidir [41]. Dünya genelindeki uçaklar, küresel taşıma sektörü enerji kullanımının %12'sini ve sera gazı emisyonlarının %9'unu oluşturmaktadır[42, 43]. Ayrıca, küresel uçak yakıt kullanımının 2050'ye kadar hızlı ekonomik büyüme ve artan küreselleşme nedeniyle üç katına çıkması beklenmektedir [44].

Eİ parçaların "beşikten mezara" malzeme kütle ihtiyaçları, Gİ süreçlerinininkinden 12:1 ila 25:1 arasında oranda çok daha düşüktür [45]. Bu yüksek oranlar Gİ yöntemlerinde, "beşikten mezara" üretim sisteminde önemli miktarda malzeme atığına neden olur [46], bu durum da yüksek üretim maliyetlerine, enerji ve çevresel emisyonlara yol açar. Bu nedenlerden dolayı, Airbus, Boeing ve General Electric gibi birçok uçak endüstrisi şirketi, Eİ parçalarını geliştirmeye, test etmeye ve kullanmaya başlamışlardır [39, 47-50]. Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde sera gazı emisyonu ve enerji tüketimi açısından Eİ yöntemlerinin daha olumlu olduğu net bir şekilde görülmektedir. Havacılık sektöründe farklı Eİ uygulamalarının, enerji tüketimi ve sera gazı emisyonları üzerindeki etkilerini inceleyen birçok çalışma mevcuttur ve Tablo 1'de özet olarak listelenmiştir.

Tablo 1. Eİ'nin, havacılık ve uzay sektöründe enerji tüketimi ve sera gazı emisyonları üzerindeki etkileri inceleyen çalışmaların özeti (Summary of studies investigating the effects of additive manufacturing on energy consumption and greenhouse gas emissions in the aerospace sector)

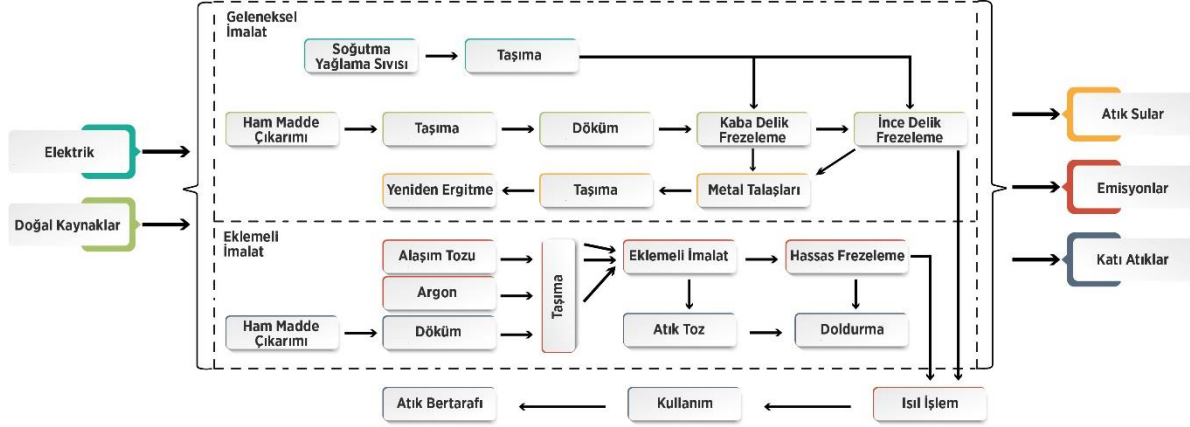
Uygulama	Üretim Yöntemi	Eİ'nin sera gazı salınımına etkisi	Eİ'nin Enerji Tüketimine Etkisi	Ref.
Uçak motoru braketi	Bağlayıcı püskürtme yöntemi	-%24	-%58	[51]
Havacılık ve uzay ve tıbbi parçalar	Stereolitografi (SLA), seçici lazer sinterleme (SLS), dijital ışık işleme (DLP), kaynaşık biriktirme modelleme (FDM), seçici lazer ergitme (SLM) ve elektron ışınıyla ergitme (EBM)	-%8 ~-%19	-2,54 ~ -9,30 EJ	[52]
Braket		-%89~-%94		
Biyonik braket		-%82~-%90		
Motor kapağı kapı menteşesi	SLM, SLM ve EBM	-%76~-%84	-1,2~-2,8 GJ	[42]
Emniyet kemeri tokası		-%26~-%92		
Çatal bağlantı parçası		-%23~-%86		
Uçak motoru braketi	Lazer ışını ile ergitme (LBM), EBM, Tel arkı ile eklemeli imalat (WAAM), Lazer ile metal biriktirme (LMD)	-%65~-%77	-%87	[53]
Türbin parçası	SLS	-	-9,36~-12,49 GJ	[54]
Türbin disk	EBM	-%5~-%78	-	[55]
Türbin impeller parçası	Doğrudan enerji biriktirme (DED)	-%62	-	[56]
Türbin pale profili	Lazer ile doğrudan biriktirme (LDD)	-%45	-%36	[57]
Dişli parçası	DED	+%250 (100 yıl)	-	[58]
Brülör	LBM	-	-%30	[59]

Son yıllarda, üretim yöntemlerinin çevresel ve ekonomik etkilerini değerlendirmek amacıyla çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Titanyum uçak parçalarının Eİ ve geleneksel çelik döküm süreci ile üretiminin karşılaştırıldığı bir çalışmada, Eİ ile üretilen hafif titanyum parçasının çevresel etkisinin %48 ve enerji tüketiminin %67 daha düşük olduğu bildirilmiştir [34]. Bir başka çalışmada Gİ yöntemlerinden enjeksiyon kalıplama (EK) yerine kullanılabilecek seçici lazer sinterleme (SLS)

işleminde üretim süresinin daha uzun olduğunu (10 ila 100 kat daha uzun), ancak EK'ya kıyasla çok daha düşük güç kullanıldığını (kilowatt [kW] cinsinden 1 ila 10 kat) bildirmişlerdir [60]. Kellens ve ark., SLS ve seçici lazer ergitme (SLM) yöntemlerini üretim süresi, güç ve malzeme tüketimi açısından analiz etmişler ve sonuç olarak, çevresel etkilerin başlıca nedenlerinin elektrik tüketimi ve inert gaz tüketimi olduğunu ortaya koymuşlardır [61]. Peng ve ark. [56] türbin impeller parçasının Eİ ve Gİ üretim yöntemleriyle

üretiminin çevresel etkilerini yaşam döngüsü analizi (LCA) kullanarak karşılaştırmışlardır. Tablo 2. 'de sunulan sonuçlar doğrultusunda Eİ ile yeniden imalatın çevresel etkiler bakımından en uygun seçenek olduğu bildirilmiştir. Ancak sadece Eİ yönteminin kullanılması çok fazla toz ve enerji tüketimi sağlayacağından impeller parçasının alt katmanı için hassas döküm veya dövme Gİ

yöntemlerinin kullanılması; kısacası Eİ ve Gİ yöntemlerinin ortak kullanımıyla çevresel etkilerin ve enerji tüketiminin minimize edilebileceği vurgulanmıştır. Ayrıca bu çalışmada değinilen en önemli nokta tedarik zincirini de içeren "beşikten mezara" LCA yöntemiyle analiz doğrultusunda (Şekil 2), Eİ yöntemleriyle üretimin çevresel etkileri en aza indireceğidir.



Şekil 2. Türbin impeller parçasının Gİ ve Eİ yöntemleriyle üretim sürecinin LCA analizi. (Life cycle assessment analysis of the production process of turbine impeller component using conventional and additive manufacturing methods)

Tablo 2. Türbin impeller parçasının farklı imalat yöntemleriyle üretimi sonucu enerji tüketimi ve emisyon verileri [56]. (Energy consumption and emission data resulting from the production of turbine impeller component using different manufacturing methods)

Kirlilik türü	Kaynaklar/emisyonlar	Geleneksel imalat	Eklemeli İmalat
Kaynak tüketimi (kg)	Kömür	339,21	124,01
	Doğal gaz	0,249	0,187
	Ham petrol	0,89	0,461
Su emisyonu (kg)	Amonyum nitrojen	$1,69 \times 10^{-3}$	$1,30 \times 10^{-3}$
	Nitrat	$4,98 \times 10^{-5}$	$8,84 \times 10^{-5}$
	Fosfat	$1,28 \times 10^{-4}$	$2,31 \times 10^{-4}$
Atmosfer emisyonu (kg)	CO ₂	520,58	197,88
	CH ₄	1,495	0,55
	HCL	0,136	0,041
	HF	0,017	0,005
	NO ₂	$9,37 \times 10^{-3}$	$1,11 \times 10^{-2}$
	SO ₂	1,493	0,498
	H ₂ S	$6,50 \times 10^{-3}$	$6,03 \times 10^{-3}$
	NO _x	1,391	0,435
	Partiküller PM2.5	$1,34 \times 10^{-4}$	$2,42 \times 10^{-4}$
	Solunabilir partiküller	$4,34 \times 10^{-2}$	$8,75 \times 10^{-2}$

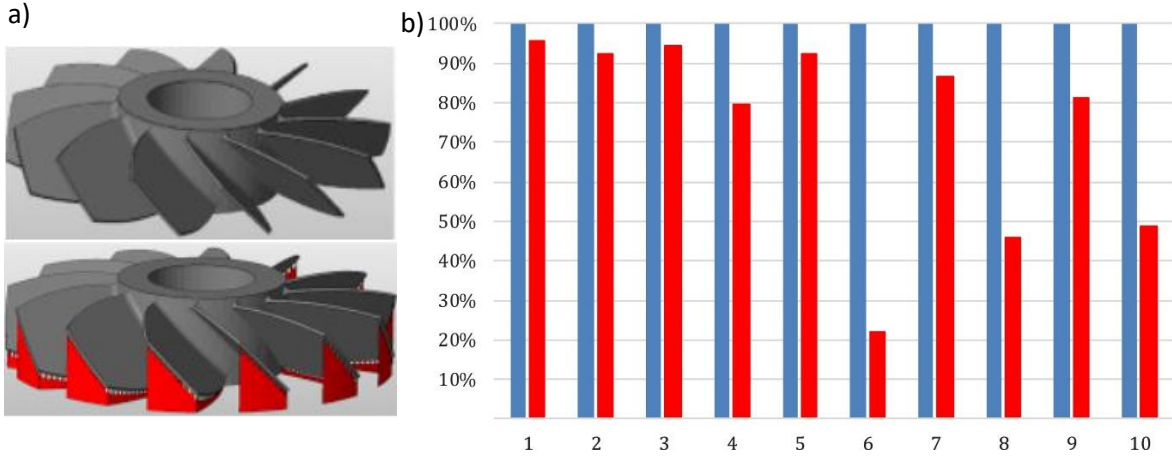
Eİ ile Gİ yöntemlerinin çevresel etkilerinin kıyaslandığı bir diğer çalışmada, EBM (Elektron Işınlı Erime) ve frezeleme üretim yöntemlerinin, seçilmiş 10 çevresel etki üzerinden karşılaştırılması yapılmıştır. EBM işleminin her zaman frezelemeden daha az çevresel etki oluşturduğu

görülmektedir (Şekil 3). Ancak EBM, malzeme kaldırma işlemi gerektiren yüksek karmaşıklıkta parçalar için daha çevre dostu ve iyi bir üretim seçeneğidir. Diğer yandan, beş eksen frezeleme işlemi için karmaşıklığı kabul edilebilir seviyede olan parçalar için frezeleme işlemi ile daha düşük

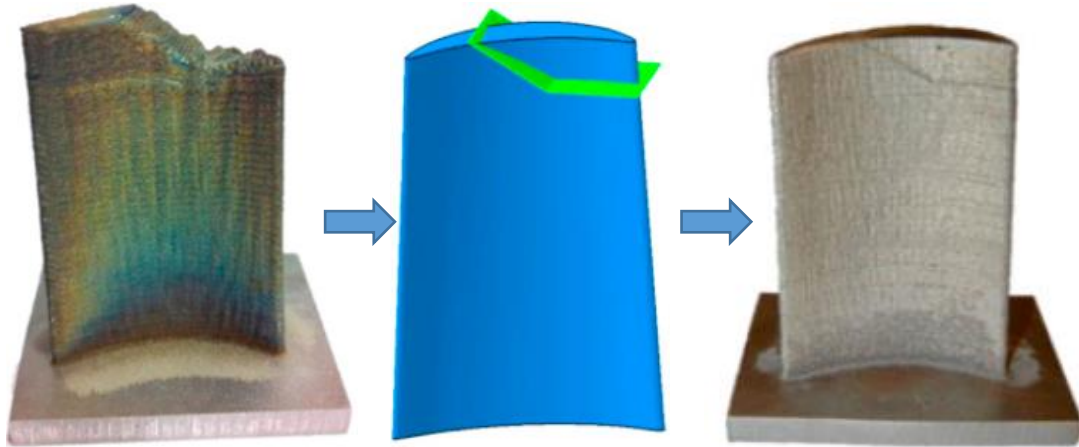
bir çevresel etki yaratacağı sonucuna varılmıştır[55].

Eİ işlemlerinin Gİ yöntemlerine kıyasla daha olumlu sonuçlar elde edildiği açıkça görülmektedir ancak bu çalışmalarda Eİ yöntemlerinin üretim parametrelerinin optimize edildiği unutulmamalıdır. Örneğin Mami ve ark. yaptıkları çalışmada, Eİ'nin optimize edilmiş senaryosunun (3DO), geleneksel işleme senaryosuna (CMA) göre yaklaşık %12'lik bir maliyet azalması ve daha düşük ağırlık sayesinde düşük yakıt tüketimi ve çevresel etki azalması gösterdiğini belirtmişlerdir [62]. Eİ yöntemleri sadece üretim aşamasında değil aynı zamanda parçaların onarılması veya başlangıç

boyutlarına yeniden getirilmesi amacıyla kullanılabilir [63]. Literatürde; türbin palelerin [64, 65], yakıt nozulların [66], blisk parçasının [67], kompresör parçaların [68], gaz türbini motor dış gövde parçaların [69] ve daha bir çok havacılık parçasının Eİ teknolojileri ile onarımının başarıyla gerçekleştiği çalışmalar mevcuttur. Eİ teknolojileriyle parçaların onarımını çevresel etki bakımından değerlendiren Wilson ve ark. ise türbin palesini LDD yöntemiyle başarılı bir şekilde onarmayı başarmışlar ve toplam enerji açısından %36 tasarruf sağlandığını, böylece karbon ayak izinde %45'lik bir iyileşme elde ettiklerini bildirmişlerdir (Şekil 4) [57].



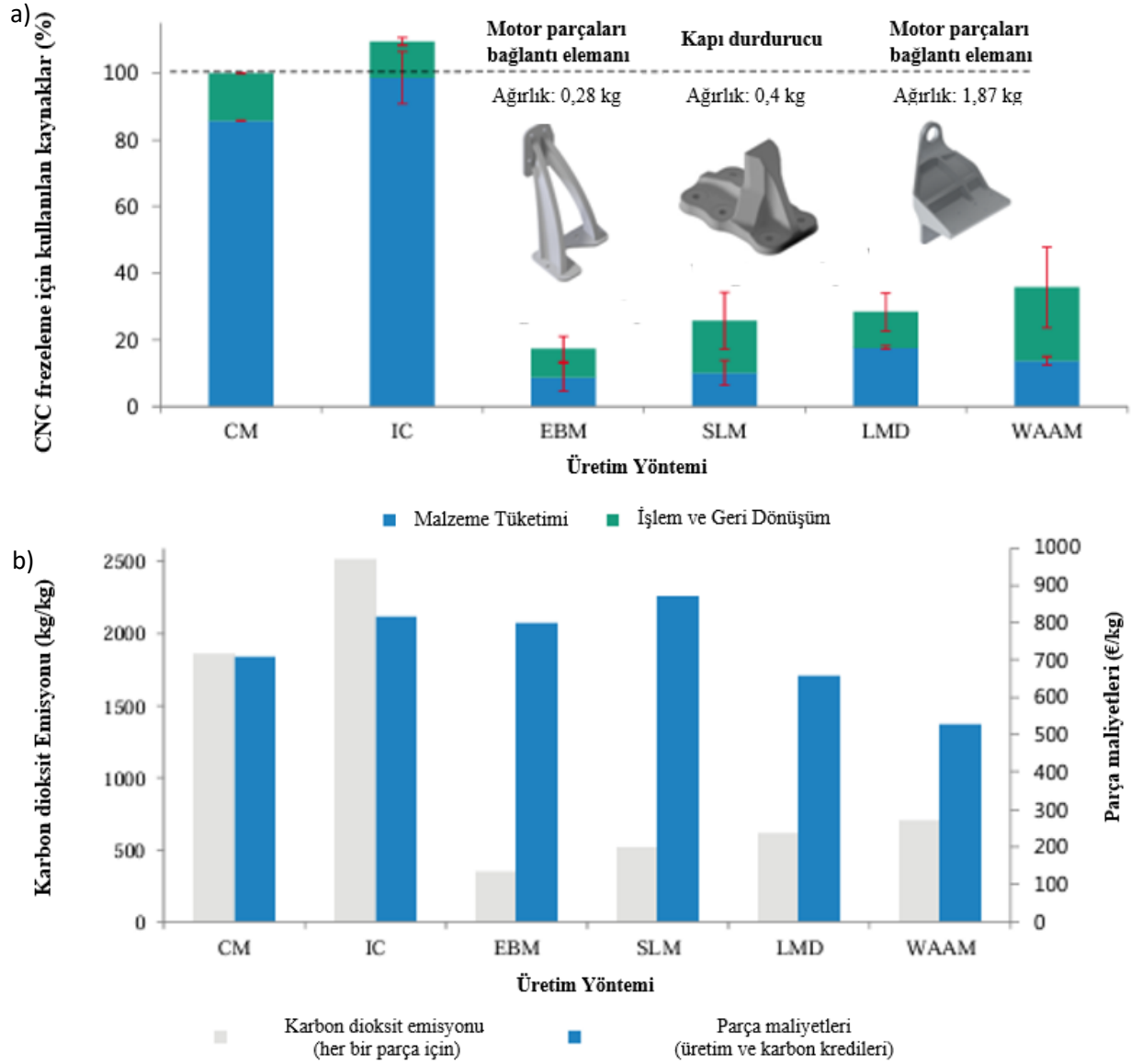
Şekil 3. a) Eİ işleminden sonra optimize edilmiş destekli türbin parçası, b) EBM (kırmızı) ve frezelemenin (mavi) çevresel etkileri; abiyotik tükenme (1), asitlenme (2), küresel ısınma (3), tatlı sudaki sucul ekotoksosite (4), denizdeki sucul ekotoksosite (5), karasal ekotoksosite (6), yenilenemez fosil (7), yenilenemez nükleer (8), yenilenebilir enerji potansiyeli (9) ve yenilenebilir su (10) [55]. [(a) Optimized support-assisted turbine component after AM process, b) Environmental impacts of EBM (red) and milling (blue); abiotic depletion (1), acidification (2), global warming (3), freshwater aquatic ecotoxicity (4), marine aquatic ecotoxicity (5), terrestrial ecotoxicity (6), non-renewable fossil (7), non-renewable nuclear (8), renewable energy potential (9), and renewable water (10)]



Şekil 4. Türbin kanatçık (vane) parçasının LDD yöntemiyle onarılma işlemi [57]. (Repair process of turbine blade component using LDD method)

Başka bir çalışmada, özellikle toz tabanlı Eİ süreçlerinin malzeme kullanımını etkili bir şekilde kullanmasıyla Gİ yöntemlerine göre çevresel açıdan daha sürdürülebilir olduğu gösterilmiştir [53]. Şekil 5'te görülen sonuçlara göre, destek elemanı ve kapı durdurucu parçalarının Eİ yöntemleri ile üretimi parçalarda hem kaynak tüketiminin önemli ölçüde daha küçük olduğu gösterilmiş hem de önemli bir CO₂ tasarruf potansiyeli ve ekolojik avantaj

sergilemiştir. Ancak Eİ yöntemlerinin SEC'si (spesifik enerji tüketimi), Gİ yöntemlerinininkinin neredeyse iki katıdır. Eİ yöntemlerinin çevresel etki ve enerji tüketimi açısından daha verimli olduğu çalışmaların aksine Tablo 1'de de dikkat çeken Liu ve ark.'nın yaptıkları çalışmada, DED işleminin Gİ yöntemine göre daha yüksek enerji tükettiği dolayısıyla çevresel etkisinin çok daha olumsuz olduğu ortaya koyulmuştur [58].



Şekil 5. a) Gİ yöntemlerine kıyasla Eİ yöntemlerinde kaynak tüketimi, b) Parçaların üretim yöntemlerine göre karbon ayak izi ve ekolojik maliyet potansiyeli [53]. (CM: Geleneksel imalat, IC: Hassas döküm, EBM: Elektron ışınıyla ergitme, SLM: Seçici lazer ergitme, LMD: Lazer metal biriktirme, WAAM: Tel arkı ile eklemeli imalat) (Türkçeye çevrilmiştir.) [a) Resource consumption in AM methods compared to conventional manufacturing resources, b) Carbon footprint and ecological cost potential of parts according to production resources [53]. (CM: Conventional Manufacturing, IC: Investment Casting, EBM: Electron Beam Melting, SLM: Selective Laser Melting, LMD: Laser Metal Deposition, WAAM: Wire Arc Additive Manufacturing]

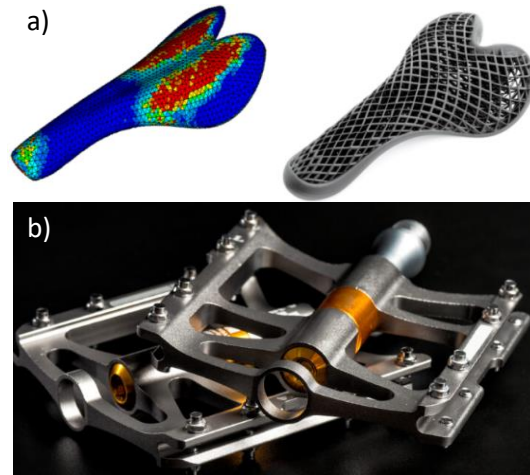
4. Tasarım Esnekliği ve Hafifleme Avantajları

(Design Flexibility and Lightweighting Advantages)

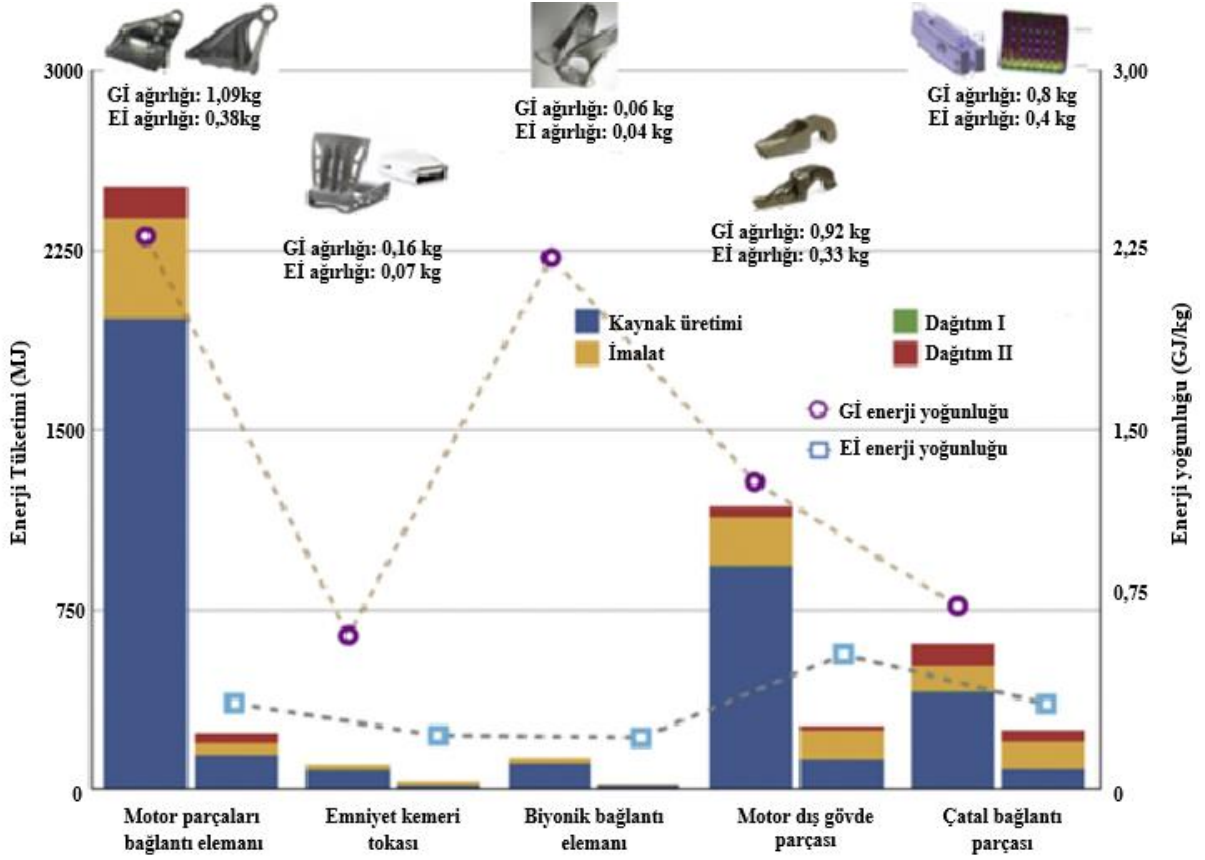
Çevresel kaygılar tüketiciler için giderek daha önemli hale geldikçe, birçok sektör daha fazla enerji bilincine ve sürdürülebilirliğe doğru kaymaktadır. Yenilenebilir enerji kaynakları, elektrikli araçlar ve sürdürülebilir malzemeler gibi çözümler araştırmacıların büyük ilgisini çekerken, hafiflik gibi uygulamalar, daha az görünür olsa da, enerji verimliliğinde daha fazla kilit rol oynamaktadır [70]. Eİ, özellikle tasarım esnekliği ve hafifleme konularında havacılık endüstrisinde bir dizi avantaj sunmaktadır. Bu avantajlar arasında esnek tasarımlı hafif parçaların oluşturulması, malzeme kaybının azaltılması ve parçaların talep üzerine hızlı bir şekilde üretilme yeteneği bulunmaktadır [71]. Eİ ayrıca, geleneksel imalat yöntemleri ile elde edilemeyen karmaşık ve hafif tasarımların üretilmesine olanak tanıyarak, uçak tasarımında aerodinamik, ağırlık/dayanıklılık oranları ve fonksiyonel entegrasyonun geliştirilmesine katkıda bulunmaktadır. Ayrıca, havacılık bileşenlerinde Eİ kullanımı, tedarik süresinde azalmaya, ilişkili maliyetlerin düşmesine ve tedarik zinciri verimliliğinin artmasını sağlamaktadır. Genel olarak, havacılık endüstrisinde Eİ uygulaması, tasarım esnekliği ve hafifleme açısından önemli avantajlar sunarak, maliyetlerin düşürülmesinin, performansın ve sürdürülebilirliğin artmasına katkıda bulunmaktadır. Hafifliği stratejik tasarım seçenekleriyle eşleştirmek, parça performansının iyileştirilmesine yardımcı olabilir. Örneğin, hafifletme için kafes yapılarının kullanılması, hem ağırlığı azaltma avantajına sahip olabilir hem de darbe emme davranışını iyileştirme ve ayarlama yeteneği kazandırabilmektedir (Şekil 6.a.) [70]. Parçanın geometrisi de üretken tasarımla beraber parçaların daha hafif ve kullanışlı olmasına olanak tanıyabilmektedir (Şekil 6.b.). Ancak hafifletilen parçaların yüzey alanı/hacim oranını önemli ölçüde artırdığını ve parçaların paslanmaz çelikler gibi hızla oksitlenen malzemelerle çalışması durumunda parçanın ömrünü veya dayanıklılığını etkileyebileceğini göz önünde bulundurmak gereklidir [70].

Eİ ile üretilen parçalarda elde edilen kütle azaltımı, uçuş için gereken yakıtın azalması, dolayısıyla emisyonların azalması anlamına gelmektedir. Gisario ve ark. [4] 326 g ağırlığındaki havacılık aparatını topoloji optimizasyonu yaparak, Gİ ile üretilmiş parçaya kıyasla %64 ağırlık azalması (malzeme değişikliği nedeniyle %32 ve tasarım nedeniyle %32) elde etmiştir. Zhang ve ark. [72], önerdikleri Eİ ürün tasarım modeli ile daha hafif parçalar elde ederek, malzeme atığını azaltmış ve

aynı zamanda maliyeti düşürmüşlerdir. Uçakların yakıt tüketimi doğrudan ağırlıkla ilişkilidir, bu nedenle havacılık parçalarının ağırlıklarını azaltmak, operasyonel maliyetleri ve CO₂ emisyonlarını düşürmek için önem verilen konuların başında gelmektedir. Eİ ile ağırlığı 100 kg azaltılmış uçağın 30 yıllık bir ömür boyunca 13,4–20 TJ tasarruf sağlayabileceği literatürde bildirilmiştir [21, 73]. Bu azalma filo düzeyinde değerlendirildiğinde çevresel açıdan sağlanacak fayda çok daha önemli bir seviyeye gelecektir. Huang ve ark. [42], Eİ ile üretilen parçalar sayesinde, 2050 yılında tüketilen enerjinin yılda 70–173 milyon GJ azaltılabileceğini ve 1.2–2.8 milyar GJ kümülatif tasarrufa ulaşabileceğini göstermiştir. Ayrıca, binlerce ton malzeme kaynağının (Ti, nikel, alüminyum alaşımları) tasarruf edilebileceği tahmin edilmektedir. Bu çalışmadan alınan sonuçlar (Şekil 6) incelendiğinde, Eİ teknolojilerinin Gİ teknolojilerine kıyasla enerji tasarrufu sağladığı ve enerji tüketimi farklarının (emniyet kemeri bağlantı parçası için) yaklaşık 70 MJ ile (motor parçaları bağlantı elemanı için) 2 GJ değerleri arasında değiştiği görülmektedir. Bu enerji tasarrufları, Eİ yöntemlerinin düşük satın alma oranlarına ve Eİ parçalarının gelişmiş hafif geometrilerine bağlı olarak enerji kullanımında meydana gelen azalmalardan kaynaklanmaktadır. Eİ teknolojileri, malzeme üretimi için kullanılan enerji miktarını düşürmeleri ve Şekil 7’de görüldüğü üzere hafif geometrileri nedeniyle azalan kütleyle sahip olmaları, bu enerji tasarruflarına önemli katkı sağlamaktadır.



Şekil 6. a) Kafes yapılarıyla tasarlanan parçalar, **b)** Tasarımcıların geleneksel emsallerine göre daha az malzeme kullanarak, daha hafif ve yapısal olarak sağlam oluşturdukları parçalar [70]. [(a) Parts designed with lattice structures, b) parts designed by designers to be lighter and structurally stronger with less material compared to traditional counterparts]



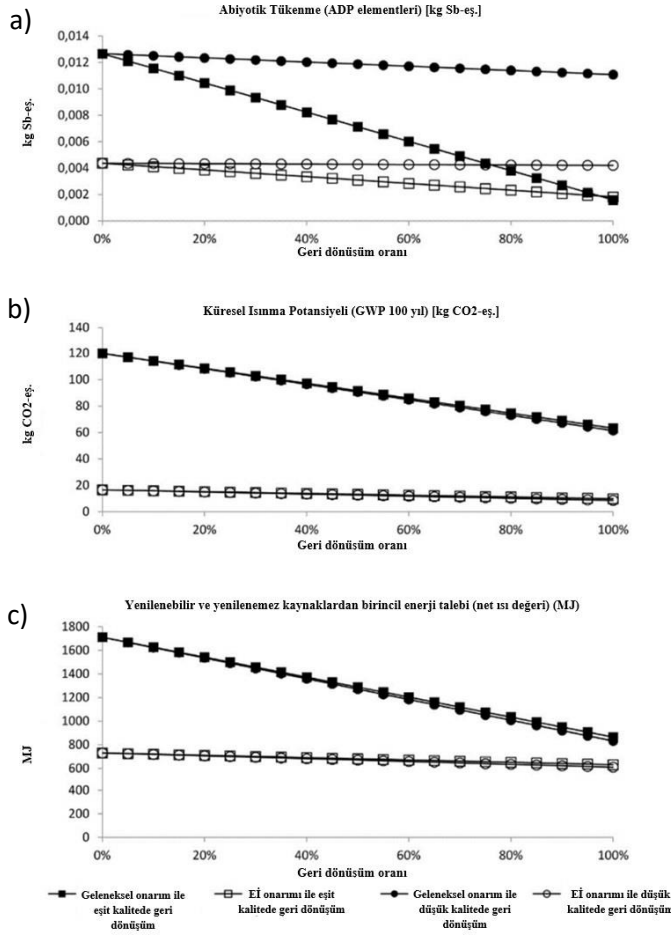
Şekil 7. Eİ ve Gİ ile üretilen parçaların beşikten mezara tüketilen enerji miktarları (Türkçeye çevrilmiştir.) [42]. (The amount of energy consumed from cradle to grave for parts produced with AM and conventional manufacturing.)

5. Sürdürülebilir Malzeme Kullanımı ve Üretim Sürecinin Optimizasyonu (Sustainable Material Usage and Optimization of the Production Process)

Sürdürülebilirlik, kaynakların tükenmeden ve çevreye olumsuz etki bırakmadan kullanılması anlamına gelir. Üretim süreçlerindeki önemli sürdürülebilirlik zorlukları arasında enerji kullanımı, atık oluşumu, su kullanımı ve üretilen ürünün çevresel etkisi bulunmaktadır. Sürdürülebilirlik, küresel ekolojik koşullarla (çevre), ekonomik kalkınma ile (teknoloji) ve toplumsal eşitlikle ilgilidir. Mühendislik prosedürleri genellikle ekonomik ilerleme ile ilişkilendirilir. Eİ, tasarımların hızlı prototiplenmesine ve yinelenmesine olanak tanımaktadır. İşlevsel prototipleri hızlı bir şekilde üretme yeteneği, mühendislerin ve tasarımcıların farklı tasarım yinelenmelerini çok daha kısa bir zaman diliminde değerlendirmesine ve test etmesine olanak tanımaktadır. Böylece ürün geliştirme süreci hızlanmaktadır. Eİ, parçaların ihtiyaç duyuldukça üretilmesine olanak tanıyarak envanter maliyetlerini ve kapsamlı depolama ihtiyacını azaltmakta ve bu isteğe bağlı üretim

yaklaşımı aynı zamanda tedarik zinciri gecikmelerini de en aza indirmektedir.

Bazı araştırmacılar, Eİ'nin, her işlem için yalnızca gerekli miktarda malzeme kullanarak ve dolayısıyla sınıra yakın atıkla ürünleri, parçaları ve montajları oluşturabilmesi nedeniyle sürdürülebilir bir çözüm olduğuna inanmaktadır [74]. Gİ yöntemleri ise özellikle malzeme çıkarma işlemi yapılan yöntemlerde, blok parçaların, ölçüleri ve ağırlıkları genellikle üretilmeye çalışılan parçadan önemli ölçüde (19:1'e varan oranlarda) büyüktür [75]. Diğer taraftan Eİ, nakliye ihtiyaçlarını ve paketlemeyi azaltarak bu kategorideki çevresel etkileri de azaltabilir, böylece hava ve plastik kirliliğini azaltmaya katkı sağlayabilir [76]. Eİ yöntemlerinin özgül enerji tüketiminin, geleneksel üretim süreçlerine kıyasla yaklaşık olarak 100 kat daha yüksek olduğu rapor edilmiştir [77]. Bir başka çalışmada Siemens endüstriyel gaz türbininde bir yanma odasının onarım prosedürü uygulanmış ve elde edilen sonuçlar, malzeme ve birincil enerji kullanımını önemli ölçüde azaltan bir Eİ tabanlı onarım prosedürünün etkili olduğunu göstermiştir (Şekil 8) [59].



Şekil 8. (a) Abiyotik tükenme potansiyeli (ADP elementleri), (b) küresel ısınma potansiyeli ve (c) birincil enerji talebi, (kg Sb-eş. = kilogram antimon eşdeğeri; kg CO₂-eş. = kilogram karbon dioksit eşdeğeri; net kal. değeri = net ısı değeri), (d) Yanma odasını değiştirmek için kullanılan Eİ onarım süreci, (e) Gaz türbinli motor (Türkçeye çevrilmiştir.) [59]. ((a) Abiotic Depletion Potential (ADP Elements), (b) Global Warming Potential, and (c) Primary Energy Demand (kg Sb-eq. = kilogram antimony equivalent; kg CO₂-eq. = kilogram carbon dioxide equivalent; net cal. value = net calorific value), (d) AM repair process used to change the combustion chamber, (e) Gas turbine engine)

Despeisse ve ark. Eİ'nin endüstrileşmesinin sürdürülebilirlik etkilerini incelemişlerdir ve metal tozunun malzeme kayıpları, destek yapıları nedeniyle bozulması dolayısıyla geri dönüşüm döngülerinin sınırlamaları göz önüne alındığında, potansiyel olarak %95 ila %98 ağırlığında geri dönüştürülebileceğini tahmin etmişlerdir [78].

Girdwood ve ark. [79], en verimli Eİ Ti havacılık parçası imalatı için üretim sürecinde yeni bir tasarım ve planlama modeli önermişlerdir. Bu çalışmada, kalite kontrolü (geometrik hassasiyet, yüzey kalitesi, vb.), enerji tüketimi, zaman (kurulum, bekleme ve programlama), malzeme atığı ve maliyeti analizleri yapılmıştır. Malzeme tasarrufları ölçülmüştür ve üretim parametreleri ve üretim makinesi kapasitesinin daha iyi tasarlanması ve planlanması durumunda ciddi iyileştirmeler sağlanabileceğini vurgulamışlardır.

6. Uygulama Alanları ve Gelecek Perspektifleri (Applications and Future Perspectives)

1990'ların başında sadece prototipleme amacıyla kullanılan Eİ, zaman içinde olgunlaşmaya başlamıştır. Günümüzde birçok havacılık şirketi, üretim hatlarına Eİ 'yi entegre etmektedir. Son eğilimler, havacılık üreticileri ile Eİ sağlayıcıları arasında artan iş birliği ve ortaklık, aynı zamanda Eİ sağlayıcılarının ana havacılık şirketleri tarafından satın alınması veya bünyelerine katılması yönündedir. 2014 ile 2016 arasında, metal Eİ makineleri ve ilgili ekipman sağlayan Eİ işletmelerinin sayısı 49'dan 97'ye çıkmıştır [80]. 2017'de havacılık endüstrisi, toplam Eİ pazarının %18,2'sini oluşturmuş ve gelecekte Eİ kullanımı için en umut verici endüstri olarak kabul edilmiştir [81].

Eİ ile ilgili uzun vadeli ekonomik sürdürülebilirlik konusunda sınırlı literatür bulunsa da, üreticiler son zamanlarda bir Eİ ürününün tam yaşam döngüsünün malzeme ve enerji tüketimi açısından etkilerini incelemek için yaşam döngüsü değerlendirmelerini (LCA) kullanmaya başlamışlardır [82]. Dünya çapında tüm imalat endüstrilerini içeren son LCA'lar, çeşitli bileşenlerin Eİ ile üretiminde önemli maliyet tasarrufları sağlama potansiyelini ortaya koymuştur [83].

Artan kullanımına rağmen, Eİ'nin şu anda birçok ürüne uygulanmasını engelleyen bazı sınırlamaları vardır. Eİ süreçlerinin verimliliği şu anda düşüktür, dolayısıyla Eİ teknolojilerini yüksek hacimli üretime uygun değildir [84]. Geometrik tekrarlanabilirlik, kalıntı gerilmeler ve yüksek yüzey pürüzlülüğü gibi sorunlar, yüksek boyutsal hassasiyet, yüzey kalitesi ve yorgunluk direnci gerektiren uygulamalarda engeller oluşturur [36, 38, 85]. Bununla birlikte, endüstride Eİ teknolojilerini geliştirmeye yönelik yoğun bir odaklanma göz önüne alındığında, bu engellerin gelecek 20 yıl içinde aşılması öngörülmektedir [86].

Airbus, kabin askıları ve hava kanalları gibi parçaların üretiminde Eİ'yi kullanmaktadır. Airbus ayrıca, Eİ yazılım ve hizmet sağlayıcısı olan Materialise ile iş birliği yaparak, Eİ parçalarının tasarımını ve üretimini optimize eden bir yazılım geliştirmiştir. Boeing, Eİ'yi prototip üretimi ve düşük hacimli üretim parçalarına odaklanarak üretim süreçlerine entegre etmiştir. Birçok çevresel kontrol sistem kanalı, yapısal parça ve takım ekipmanı artık Eİ ile üretilmektedir. Boeing ayrıca, uçakları için titanyum yapısal parçaların Eİ üretim sürecini geliştirmek amacıyla Norsk Titanium ile iş birliği yapmıştır. GE Aviation, uçak motorlarında Eİ'yi geniş ölçüde kullanmaktadır. Eklemeli imalat teknikleri kullanarak geliştirdikleri ileri düzey yakıt nozzle'ları, motor performansını ve yakıt verimliliğini artırmıştır. GE Aviation aynı zamanda, havacılıktaki Eİ'nin potansiyelini daha fazla keşfetmek için araştırma ve geliştirme merkezlerine yatırım yapmıştır. Rolls-Royce, türbin kanatçıkları ve yakıt nozzle'ları gibi parçaları Eİ ile üretmektedir. Ayrıca, National Additive Manufacturing Innovation Institute ile iş birliği yaparak havacılıktaki eklemeli imalatın kullanımını ilerletmeyi amaçlamaktadır. Lockheed Martin, prototip üretimi, takım yapımı ve bileşenlerinde Eİ'yi kullanmaktadır. Lockheed Martin ayrıca, gelecekte Eİ'den daha fazla fayda elde etmek amacıyla araştırma ve geliştirme projelerine yatırım yapmıştır. Prodways Technologies, Boeing ve Safran'ın ortak girişimi olup, havacılık uygulamaları için Eİ üretim sürecini geliştirmeye

odaklanmaktadır. Endüstri sınıfı 3D yazıcılar kullanarak yüksek performanslı polimerlerle büyük ölçekli yapısal uçak parçalarını üretebilen bu teknolojiyi geliştirmeyi amaçlamaktadır[34].

Havacılık endüstrisinin önde gelen şirketlerin Eİ'yi kullanımını zaman geçtikçe artmakta ve Eİ'nin, uçak tasarımı, üretimi ve bakımı üzerinde önemli bir devrime sahip olması beklenmektedir. Hava aracı parçaları tasarlayan ve üreten firmaların yeni teknolojileri güvenli bir şekilde uygulamalarını sağlamak amacıyla kuruluşlara EASA Part21 yetkisi verilerek belirli standartlar oluşturulmuştur. EASA Part21 yetkisi ve Eİ arasındaki ilişki, havacılık endüstrisinde yeni teknolojilerin güvenli ve uygun bir şekilde benimsenmesini teşvik etmeye yönelik önemli bir mekanizmayı temsil etmektedir. Havacılık ürünlerinin tasarım ve üretiminde kullanılan her teknolojinin, emniyet ve uygunluk gereksinimlerini karşılamak üzere sıkı bir şekilde denetlenmesi önem arz etmektedir.

Eİ teknolojilerinin havacılık sektöründe ilgi görmesi ve kullanımının hızla artmasıyla beraber, EASA ve FAA önemli havacılık firmalarının katılımıyla, havacılıktaki Eİ kullanımıyla ilgili düzenli olarak çalıştay düzenlemektedir. 2023 yılında yapılan son çalıştayda sunulan raporlara göre; Eİ teknolojilerinin havacılıktaki kullanım yerlerinin hassas motor parçalarına kadar uzandığı ancak üretilen parçaların mekanik performans olarak bazı noktalarda sınırlı kaldığı ve ikincil işlemlere ihtiyacın olduğu anlaşılmaktadır. Ancak genel olarak Eİ teknolojilerinin umut vadettiği ve Eİ teknolojileriyle ilgili çalışmaların artmasıyla birlikte dezavantajlarının elemine edilerek kullanımının yaygınlaşacağı açık bir şekilde görülmektedir [87].

Doğası gereği, uçak tasarımı yenilikçiliği teşvik etmektedir. Eİ, mühendislerin yeni kavramları keşfetmelerine, uçak parçalarının aerodinamikleri iyileştirmelerine ve performanslarını artırmalarına olanak tanımaktadır. Ayrıca, üretim süreçlerini optimize ederek, malzeme israfını azaltarak ve talep üzerine üretimi mümkün kılarak, artan verimlilik ve maliyet azaltma potansiyeli sunar. Enerji verimliliğindeki bu artış sayesinde havacılığın olumsuz çevresel etkilerinin minimize edilebilmesine önemli seviyede katkı sağlanacağı öngörülmektedir.

7. Sonuçlar ve Tartışma (Results and Discussion)

Bu derleme çalışması, Eİ uygulamalarının havacılık endüstrisindeki enerji verimliliğini artırma ve emisyon azaltma potansiyelini kapsamlı bir şekilde

sunmayı amaçlanmıştır. Eİ'nin başlangıcında, genellikle sınırlı servis uygulamasına sahip bir prototip seçeneği olarak görülmekteydi. Ancak yıllar içinde, teknolojik kapasitelerdeki ilerlemeler ile birlikte parçaların Eİ ile nihai ürün elde edilmesi sağlanabilmiştir. Ancak üretilen Eİ parçaların mekanik özelliklerinin tekrarlanabilirliği ve tutarlılığı henüz tam anlaşılamadığından, standartlar, sertifikasyonlar ve muayene protokollerine yönelik gelişmeler açısından daha fazla gelişme gerekmektedir.

Şu anki durumuyla Eİ, Gİ yöntemlerinin tamamen yerine geçemez, ancak Gİ yöntemleri ile paralel olarak çalışır durumdadır. Bu durumda Eİ, düşük hacimli üretim serileri için genellikle daha kârlıdır. Yüksek hacimli üretim serileri için mevcut Gİ altyapısı, Eİ'ye kıyasla önemli ölçüde daha yüksek verimlilikle toplu üretimlere izin verir. Ancak, genellikle havacılık endüstrisinin yalnızca düşük ve orta hacimli bileşen üretimi gerektirmesi nedeniyle Eİ için şimdilik sorun teşkil etmemektedir.

Eİ, diğer üretim yöntemlerine kıyasla yüksek malzeme kullanımı ve düşük malzeme atığı avantajına sahiptir. Özellikle CNC işleme gibi geleneksel üretim yöntemleriyle karşılaştırıldığında, Eİ yöntemleri malzeme kullanımını optimize edebilir ve atık miktarını minimize edebilir. Bununla birlikte, mevcut durumda Eİ yöntemlerinde birim başına enerji tüketimi daha yüksek olsa da Eİ üreticileri istenilen parça sayısını tam olarak veya tek bir makine işlemi içinde birden çok parça üretebilir, bu da performans verimliliğini artırabilmektedir. Bu performans verimliliği doğrudan çevresel etkileri olumlu yönde etkilemektedir.

Küresel iklim değişikliğiyle mücadelede, hükümetler ve havacılık kuruluşları, karbon emisyonlarını azaltma hedeflerini belirlemişlerdir. Uluslararası Hava Taşımacılığı Birliği (IATA) gibi kuruluşlar, üye ülkeler için bu hedeflere ulaşma konusunda rehber niteliğinde olan kilometre taşlarını açıklamışlardır. 2020'den itibaren net havacılık CO₂ emisyonlarının sınırlandırılması ve 2050'ye kadar havacılık CO₂ emisyonlarında %50'lik bir azalma bulunmaktadır [20, 88, 89]. Bu hedeflere ulaşılmasında Eİ ile üretilen parça sayısının artırılmasının önemli bir paya sahip olacağı düşünülmektedir. Enerji tüketimi açısından, literatürdeki çalışmalar genellikle Eİ'nin Gİ'den daha fazla enerji tükettiğini belirtse de, Eİ ile üretilen parçaların hizmette kullanılmasıyla büyük enerji tasarrufları elde edildiğini sonuçlanmaktadır. Bu tasarruflar, Eİ'nin, mekanik özelliklerini değiştirmeden optimize etme ve hafifletme yoluyla

parçanın kütlesini azaltma yeteneğinden kaynaklanmaktadır. Parçaların hizmet ömrü boyunca, bu optimizasyonun, azaltılmış yakıt tüketimi sayesinde CO₂ emisyonlarında önemli miktarda azalmalara katkıda bulunması beklenmektedir.

Çevresel etkilerin minimize edilmesinin yanında Eİ'nin sürdürülebilirlik açısından bakıldığında insan sağlığına olan etkisi önemle dikkate alınmalıdır. Eİ işlemlerinin iş sağlığına olası zararları, ultra ince metallerin ve nanopartiküllerin solunması veya teması sonucu ortaya çıkabilir ve bu da ciddi sağlık sorunlarına yol açabilir. Emniyet riskleri arasında elektrostatik deşarj ve kıvılcım nedeniyle yangın veya patlamalar bulunmaktadır. Bu riskler, vakum altında veya inert bir atmosferde işlem yapma, temizleme sistemleri kullanma ve solunum cihazları kullanma gibi önlemlerle azaltılabilir.

Öte yandan, Eİ yöntemlerinin neredeyse net şekilli bileşenler üretebilme kapasitesi sayesinde, atık oranlarını ve gerekli girdi malzemeyi önemli ölçüde azalttığı için genel üretim verimliliğini artırma potansiyeli bulunmaktadır. Bu, atık oranlarını ve girdi malzeme ihtiyacını azaltarak çevre dostu bir yaklaşım sunar. Ancak, bu avantajlar, daha fazla araştırma ve çevresel etkilerin değerlendirilmesi için daha fazla yaşam döngüsü analizi çalışması gerektirir.

Enerji tüketiminin azaltılarak çevre emisyonların en düşük seviyeye indirilmesi hedeflerine ulaşmak için havacılık şirketleri, Eİ teknolojisinden faydalanarak malzeme hafifletme, yakıt tüketimini azaltma ve ürün performans verimliliğini artırmak için parça yeniden tasarımı ve birleştirmeye odaklanması gerekmektedir.

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)

Nedim SUNAY: Literatür taraması, araştırma, düzenleme ve yazma sürecini yürütmüştür.

He conducted the literature review, research, editing and writing process.

Enis Turhan TURGUT: Literatür taraması, araştırma ve danışmanlık yapmıştır.

He conducted the literature review, research and consultancy.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

There is no conflict of interest in this study.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Gökhan, Ö. 2020. Eklemeli üretim teknolojileri üzerine bir derleme, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 9(1), p 606-621.
2. Pereira, T., Kennedy, J.V.Potgieter, J. 2019. A comparison of traditional manufacturing vs additive manufacturing, the best method for the job, Procedia Manufacturing, 30 11-18. DOI: 10.1016/j.promfg.2019.02.003
3. Achilles, C., Tzetzis, D.Raimondo, M.O. 2017. Alternative production strategies based on the comparison of additive and traditional manufacturing technologies, International Journal of Production Research, 55(12), p 3497-3509. DOI: 10.1080/00207543.2017.1282645
4. Gisario, A., Kazarian, M., Martina, F.Mehrpouya, M. 2019. Metal additive manufacturing in the commercial aviation industry: A review, Journal of Manufacturing Systems, 53 124-149. DOI: 10.1016/j.jmsy.2019.08.005
5. Najmon, J.C., Raeisi, S.Tovar, A. 2019. Review of additive manufacturing technologies and applications in the aerospace industry, Additive manufacturing for the aerospace industry, 7-31. DOI: 10.1016/B978-0-12-814062-8.00002-9
6. Gibson, I., Rosen, D., Stucker, B., Khorasani, M., Gibson, I., Rosen, D., Stucker, B.Khorasani, M. 2021. Design for additive manufacturing, Additive manufacturing technologies, 555-607. DOI: 10.1007/978-3-030-56127-7_19
7. Additive Applications. <https://www.ge.com/additive/industry-overview> (Erişim tarihi 29.01.2024).
8. Additive Manufacturing Applications. <https://optomec.com/additive-manufacturing/> (Erişim tarihi 29.01.2024).
9. 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. DOI: 10.1016/j.compositesb.2018.02.012
10. Rejeski, D., Zhao, F.Huang, Y. 2018. Research needs and recommendations on environmental implications of additive manufacturing, Additive Manufacturing, 19 21-28. DOI: 10.1016/j.addma.2017.10.019
11. Airbus-Commercial-Aircraft <https://www.airbus.com/sites/g/files/jlcbta136/files/2021-07/GMF-2019-2038-Airbus-Commercial-Aircraft-book> (Erişim tarihi 29.01.2024).
12. Future Of Aviation. <https://www.icao.int/Meetings/FutureOfAviation/Pages/default.aspx> (Erişim tarihi 19.01.2024).
13. Fan, W., Sun, Y., Zhu, T.Wen, Y. 2012. Emissions of HC, CO, NOx, CO2, and SO2 from civil aviation in China in 2010, Atmospheric Environment, 56 52-57. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2012.03.052
14. Nickels, L. 2015. AM and aerospace: an ideal combination, Metal Powder Report, 70(6), p 300-303. DOI: 10.1016/j.mprp.2015.06.005
15. Ford, S.Despeisse, M. 2016. Additive manufacturing and sustainability: an exploratory study of the advantages and challenges, Journal of cleaner Production, 137 1573-1587. DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.04.150
16. Sürmen, H.K. 2019. Eklemeli İmalat (3b Baskı): Teknolojiler Ve Uygulamalar, Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, 24(2), p 373-392.

17. Liu, Z., Li, C., Fang, X.Guo, Y. 2018. Energy consumption in additive manufacturing of metal parts, *Procedia Manufacturing*, 26 834-845. DOI: 10.1016/j.promfg.2018.07.104
18. Garcia, F.L., Moris, V.A.d.S., Nunes, A.O.Silva, D.A.L. 2018. Environmental performance of additive manufacturing process—an overview, *Rapid Prototyping Journal*, 24(7), p 1166-1177. DOI: 10.1108/RPJ-05-2017-0108
19. Agrawal, R. 2019. State of art review on sustainable additive manufacturing, *Rapid Prototyping Journal*, 25(6), p 1045-1060. DOI: 10.1108/RPJ-04-2018-0085
20. Mohd Yusuf, S., Cutler, S.Gao, N. 2019. The impact of metal additive manufacturing on the aerospace industry, *Metals*, 9(12), p 1286. DOI: 10.3390/met9121286
21. Monteiro, H., Carmona-Aparicio, G., Lei, I.Despeisse, M. 2022. Energy and material efficiency strategies enabled by metal additive manufacturing—A review for the aeronautic and aerospace sectors, *Energy Reports*, 8 298-305. DOI: 10.1016/j.egyr.2022.01.035
22. Data, R. 2019. Additive Manufacturing Market to Reach USD 23.33 Billion by 2026.
23. Oliveira, J., Santos, T.Miranda, R. 2020. Revisiting fundamental welding concepts to improve additive manufacturing: From theory to practice, *Progress in Materials Science*, 107 100590. DOI: 10.1016/j.pmatsci.2019.100590
24. Sames, W.J., List, F., Pannala, S., Dehoff, R.R.Babu, S.S. 2016. The metallurgy and processing science of metal additive manufacturing, *International materials reviews*, 61(5), p 315-360. DOI: 10.1080/09506608.2015.1116649
25. DebRoy, T., Mukherjee, T., Milewski, J., Elmer, J., Ribic, B., Blecher, J.Zhang, W. 2019. Scientific, technological and economic issues in metal printing and their solutions, *Nature materials*, 18(10), p 1026-1032. DOI: 10.1038/s41563-019-0408-2
26. Çelik, K.Özkan, A. 2017. Eklemeli imalat yöntemleri ile üretim ve onarım uygulamaları, *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 5(1), p 107-121.
27. Liu, R., Wang, Z., Sparks, T., Liou, F.Newkirk, J. 2017. Aerospace applications of laser additive manufacturing, in *Laser additive manufacturing*, Elsevier, p. 351-371. DOI: 10.1016/B978-0-08-100433-3.00013-0
28. M., O'Brien, 2018. Existing standards as the framework to qualify additive manufacturing of metals, *IEEE Aerospace Conference of Conference.:* IEEE.
29. George, C. 2017. Marshall Space Flight Center. Standard for Additively Manufactured Spaceflight Hardware by Laser Powder Bed Fusion in Metals. NASA Marshall Space Flight Center Huntsville, AL, USA.
30. Kumar, L.J.Krishnadas Nair, C. 2017. Current trends of additive manufacturing in the aerospace industry, *Advances in 3D printing & additive manufacturing technologies*, 39-54. DOI: 10.1007/978-981-10-0812-2_4
31. Jupiter Orbit Insertion 2016.—Press Kit, J.P.L.N.P., CA, USA.
32. Kellner, T. 2017. An epiphany of disruption: GE additive chief explains how 3D printing will upend manufacturing, *GE Reports*, 13
33. Najmon, J.C., Raeisi, S.Tovar, A. 2019. 2.1 Aerospace requirements and opportunities for additive manufacturing, *Additive Manufacturing for the Aerospace Industry*, 7. DOI: 10.1016/B978-0-12-814062-8.00002-9
34. Xometry T., 2023. 6 Main Advantages of 3D Printing in the Aircraft Industry. <https://www.xometry.com/resources/3d-printing/advantages-of-3d-printing-in-the-aircraft-industry/>(Erişim tarihi 24.01.2024).
35. Manufacturing, A., 2018. Siemens Uses Innovative Technology to Produce Gas Turbines., Press—Siemens Global Website. Munich.

36. Horn, T.J.Harrysson, O.L. 2012. Overview of current additive manufacturing technologies and selected applications, *Science progress*, 95(3), p 255-282. DOI: 10.3184/003685012X13420984463047
37. Morrow, W., Qi, H., Kim, I., Mazumder, J.Skerlos, S. 2007. Environmental aspects of laser-based and conventional tool and die manufacturing, *Journal of Cleaner Production*, 15(10), p 932-943. DOI: 10.1016/j.jclepro.2005.11.030
38. Huang, S.H., Liu, P., Mokasdar, A.Hou, L. 2013. Additive manufacturing and its societal impact: a literature review, *The International journal of advanced manufacturing technology*, 67 1191-1203. DOI: 10.1007/s00170-012-4558-5
39. Munsch, M., Wycisk, E., Kranz, J., Seyda, V.Claus, E. 2012. Functional products through laser additive manufacturing of TiAl6V4, in *Workshop LAM Laser Additive Manufacturing.of Conference*.
40. Daisy C. 2013. Jet engine makers get lift from 3-D printing technology <https://edition.cnn.com/travel/article/leap-engine-3-d-printing/index.html>. (Erişim tarihi 30.01.2024).
41. IEA World energy outlook 2022. Conference.: IEA Paris, France.
42. Huang, R., Riddle, M., Graziano, D., Warren, J., Das, S., Nimbalkar, S., Cresko, J.Masanet, E. 2016. Energy and emissions saving potential of additive manufacturing: the case of lightweight aircraft components, *Journal of cleaner production*, 135 1559-1570. DOI: 10.1016/j.jclepro.2015.04.109
43. 2023. Use of energy explained. <https://www.eia.gov/outlooks/ieo/pdf/transportation>. (Erişim tarihi 28.01.2024).
44. Façanha, C., Blumberg, K.Miller, J. 2012. Global transportation energy and climate roadmap, *International Council on Clean Transportation*.
45. Dornfeld, D. 2010. *Green Manufacturing: Degrees of Perfection*.
46. Allwood, J.M., Ashby, M.F., Gutowski, T.G.Worrell, E. 2011. Material efficiency: A white paper, *Resources, conservation and recycling*, 55(3), p 362-381. DOI: 10.1016/j.resconrec.2010.11.002
47. Kaufmann, M. 2008. *Cost/weight optimization of aircraft structures (Doctoral dissertation, KTH)*.
48. Cole, W. 2004. Boeing engineers and technologists are constantly developing better ways to design and make products, *Boeing Frontiers*.
49. Herzog, D., Seyda, V., Wycisk, E.Emmelmann, C. 2016. Additive manufacturing of metals, *Acta Materialia*, 117 371-392. DOI: 10.1016/j.actamat.2016.07.019
50. Little, M. 2010. Redefining What's Possible, *Proceedings of the American Philosophical Society*, 154(2), p 192-200.
51. Tang, Y., Mak, K.Zhao, Y.F. 2016. A framework to reduce product environmental impact through design optimization for additive manufacturing, *Journal of Cleaner Production*, 137 1560-1572. DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.06.037
52. Gebler, M., Uiterkamp, A.J.S.Visser, C. 2014. A global sustainability perspective on 3D printing technologies, *Energy policy*, 74 158-167. DOI: 10.1016/j.enpol.2014.08.033
53. Möller, M., Vykhatar, B., Emmelmann, C., Li, Z., Huang, J. 2019. Sustainable Production of Aircraft Systems: Carbon Footprint and Cost Potential of Additive Manufacturing in Aircraft Systems. In *8th international Workshop on Aircraft System Technology (AST), Hamburg*.
54. Hettesheimer, T., Hirzel, S.Roß, H.B. 2018. Energy savings through additive manufacturing: an analysis of selective laser sintering for automotive and aircraft components, *Energy Efficiency*, 11 1227-1245. DOI: /10.1007/s12053-018-9620-1
55. Paris, H., Mokhtarian, H., Coatanéa, E., Museau, M.Ituarte, I.F. 2016. Comparative environmental impacts of additive and subtractive manufacturing technologies, *CIRP Annals*, 65(1), p 29-32. DOI: 10.1016/j.cirp.2016.04.036

56. Peng, S., Li, T., Wang, X., Dong, M., Liu, Z., Shi, J.Zhang, H. 2017. Toward a sustainable impeller production: Environmental impact comparison of different impeller manufacturing methods, *Journal of Industrial Ecology*, 21(S1), p S216-S229. DOI: 10.1111/jiec.12628
57. Wilson, J.M., Piya, C., Shin, Y.C., Zhao, F.Ramani, K. 2014. Remanufacturing of turbine blades by laser direct deposition with its energy and environmental impact analysis, *Journal of Cleaner Production*, 80 170-178. DOI: 10.1016/j.jclepro.2014.05.084
58. Liu, Z., Jiang, Q., Cong, W., Li, T.Zhang, H.-C. 2018. Comparative study for environmental performances of traditional manufacturing and directed energy deposition processes, *International Journal of Environmental Science and Technology*, 15 2273-2282. DOI: 10.1007/s13762-017-1622-6
59. Walachowicz, F., Bernsdorf, I., Papenfuss, U., Zeller, C., Graichen, A., Navrotsky, V., Rajvanshi, N.Kiener, C. 2017. Comparative energy, resource and recycling lifecycle analysis of the industrial repair process of gas turbine burners using conventional machining and additive manufacturing, *Journal of Industrial Ecology*, 21(S1), p S203-S215. DOI: 10.1111/jiec.12637
60. Chen, D., Heyer, S., Ibbotson, S., Salonitis, K., Steingrimsson, J.G.Thiede, S. 2015. Direct digital manufacturing: definition, evolution, and sustainability implications, *Journal of Cleaner Production*, 107 615-625. DOI: 10.1016/j.jclepro.2015.05.009
61. Kellens, K., Yasa, E., Dewulf, W., Kruth, J.Duflou, J. (Year) Energy and resource efficiency of SLS/SLM processes. in 2011 International Solid Freeform Fabrication Symposium.of Conference.: University of Texas at Austin. DOI: 10.26153/tsw/15272
62. Mami, F., Revéret, J.P., Fallaha, S.Margni, M. 2017. Evaluating eco-efficiency of 3D printing in the aeronautic industry, *Journal of Industrial Ecology*, 21(S1), p S37-S48. DOI: 10.1111/jiec.12693
63. Östlin, J., Sundin, E.Björkman, M. 2009. Product life-cycle implications for remanufacturing strategies, *Journal of cleaner production*, 17(11), p 999-1009. DOI: 10.1016/j.jclepro.2009.02.021
64. Bi, G.Gasser, A. 2011. Restoration of nickel-base turbine blade knife-edges with controlled laser aided additive manufacturing, *Physics Procedia*, 12 402-409. DOI: 10.1016/j.phpro.2011.03.051
65. Kaierle, S., Overmeyer, L., Alfred, I., Rottwinkel, B., Hermsdorf, J., Wesling, V.Weidlich, N. 2017. Single-crystal turbine blade tip repair by laser cladding and remelting, *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 19 196-199. DOI: 10.1016/j.cirpj.2017.04.001
66. Xue, L., Donovan, M., Li, Y., Chen, J., Wang, S.Campbell, G. (Year) Integrated rapid 3D mapping and laser additive repair of gas turbine engine components. in International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics.of Conference.: AIP Publishing. DOI: 10.2351/1.5062894
67. Kelbassa, I., Gasser, A., Wissenbach, K. 2004. Laser cladding as a repair technique for BLISKS out of titanium and nickel base alloys used in aero engines. In Pacific International Conference on Applications of Lasers and Optics. Laser Institute of America.
68. Richter, K. H., Orban, S., Nowotny, S. 2004. Laser cladding of the titanium alloy Ti6242 to restore damaged blades. In International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics. Laser Institute of America.
69. Lin, C.-M., Chandra, A., Morales-Rivas, L., Huang, S.-Y., Wu, H.-C., Wu, Y.-E.Tsai, H.-L. 2014. Repair welding of ductile cast iron by laser cladding process: microstructure and mechanical properties, *International journal of cast metals research*, 27(6), p 378-383. DOI: 10.1179/1743133614Y.0000000126
70. Technologies, S. 2020. 4 Benefits of Lightweighting. <https://sybridge.com/lightweighting-benefits/>.(Erişim tarihi 30.01.2024).
71. 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), p 102516. DOI: 10.1016/j.asej.2023.102516
72. Zhang, H., Nagel, J.K., Al-Qas, A., Gibbons, E.Lee, J.J.-Y. 2018. Additive manufacturing with bioinspired sustainable product design: a conceptual model, *Procedia Manufacturing*, 26 880-891. DOI: 10.1016/j.promfg.2018.07.113
73. Yusuf, S., Cutler, S.Gao, N., Review: The impact of metal additive manufacturing on the aerospace industry. *Metals* 9 (12): 1286. 2019. DOI: 10.3390/met9121286
74. Campbell, T., Williams, C., Ivanova, O.Garrett, B. 2011. Could 3D printing change the world, *Technologies, Potential, and Implications of Additive Manufacturing*, Atlantic Council, Washington, DC, 3 1-16.
75. Reeves, P. 2009. Additive Manufacturing–A supply chain wide response to economic uncertainty and environmental sustainability, *Econolyst Limited, The Silversmiths, Crown Yard, Wirksworth, Derbyshire, DE4 4ET, UK.*
76. Kate, D. 2015. Can We 3D Print our Way to Sustainability?. <http://www.earthisland.org>, (Erişim tarihi 30.01.2024).
77. Yoon, H.-S., Lee, J.-Y., Kim, H.-S., Kim, M.-S., Kim, E.-S., Shin, Y.-J., Chu, W.-S.Ahn, S.-H. 2014. A comparison of energy consumption in bulk forming, subtractive, and additive processes: Review and case study, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 1 261-279. DOI: 10.1007/s40684-014-0033-0
78. Umeda, S., Nakano, M., Mizuyama, H., Hibino, N., Kiritsis, D., Von Cieminski, G. 2015. *Advances in Production Management Systems: Innovative Production Management Towards Sustainable Growth: IFIP WG 5.7 International Conference, APMS 2015, Proceedings, Part I Tokyo, Japan*, 459.
79. Girdwood, R., Bezuidenhout, M., Hugo, P., Conradie, P., Oosthuizen, G.Dimitrov, D. 2017. Investigating components affecting the resource efficiency of incorporating metal additive manufacturing in process chains, *Procedia Manufacturing*, 8 52-58. DOI: 10.1016/j.promfg.2017.02.006
80. Kianian, B. 2017. *Wohlers report 2017: 3d printing and additive manufacturing state of the industry, annual worldwide progress report: Chapters titles: The middle east, and other countries.*
81. Wohler, T. 2016. *Executive summary of the Wohlers Report 2016*, Wohlers Associates, Fort Collins, Colorado.
82. Rebitzer, G., Ekvall, T., Frischknecht, R., Hunkeler, D., Norris, G., Rydberg, T., Schmidt, W.-P., Suh, S., Weidema, B.P.Pennington, D.W. 2004. Life cycle assessment: Part 1: Framework, goal and scope definition, inventory analysis, and applications, *Environment international*, 30(5), p 701-720. DOI: 10.1016/j.envint.2003.11.005
83. Villamil, C., Nylander, J., Hallstedt, S. I., Schulte, J., Watz, M. 2018. Additive manufacturing from a strategic sustainability perspective. In *DS 92: Proceedings of the DESIGN 2018 15th International Design Conference* (pp. 1381-1392).
84. Wohlers, T. 2013. *State of additive manufacturing, US Manufacturing Competitiveness Initiative Dialogue*, 16.
85. Frazier, W.E. 2014. Metal additive manufacturing: a review, *Journal of Materials Engineering and performance*, 23 1917-1928. DOI: 10.1007/s11665-014-0958-z
86. Gausemeier, J., Echterhoff, N.Wall, M. 2013. *Thinking ahead the Future of Additive Manufacturing–Innovation Roadmapping of Required Advancements*, University of Paderborn.
87. *Joint EASA-FAA Additive Manufacturing Workshop 2023* [https://www.easa.europa.eu/en/newsroom-and-events/events/joint-easa-faa-additive-](https://www.easa.europa.eu/en/newsroom-and-events/events/joint-easa-faa-additive)

manufacturing-workshop-2023. (Erişim tarihi 30.01.2024).

88. Jones, C. P., Robertson, E. H., Koelbl, M. B., Singer, C. 2016. Additive manufacturing a liquid hydrogen rocket engine (No. M16-5225).
89. Waller, J. M. 2018. Nondestructive testing of additive manufactured metal parts used in aerospace applications (No. JSC-E-DAA-TN49270).

Finite Element Analysis of the Influences of Feed Rate on Cutting Force and Chip Morphology in Orthogonal Turning of Ti6Al4V Alloy

Mehmet AYDIN^{1*} 

¹Bilecik Şeyh Edebali University, Faculty of Fine Arts and Design, Department of Industrial Design, Bilecik, Turkey

Article Info

Research article
Received: 15/01/2024
Revision: 26/02/2024
Accepted: 13/03/2024

Keywords

Orthogonal Turning
Feed Rate
Finite Element
Simulation
Ti6Al4V Alloy

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 15/01/2024
Düzeltilme: 26/02/2024
Kabul: 13/03/2024

Anahtar Kelimeler

Ortogonal Tornalama
İlerleme Hızı
Sonlu Elemanlar
Simülasyonu
Ti6Al4V Alaşımı

Graphical/Tabular Abstract (Grafik Özet)

This study deals with the finite element (FE) analysis of the influences of feed rate on cutting force and chip morphology in orthogonal turning of Ti6Al4V alloy. / Bu çalışma, Ti6Al4V alaşımının ortogonal tornalanmasında ilerleme hızının kesme kuvveti ve talaş morfolojisi üzerindeki etkilerinin sonlu elemanlar (SE) analizini ele almaktadır.

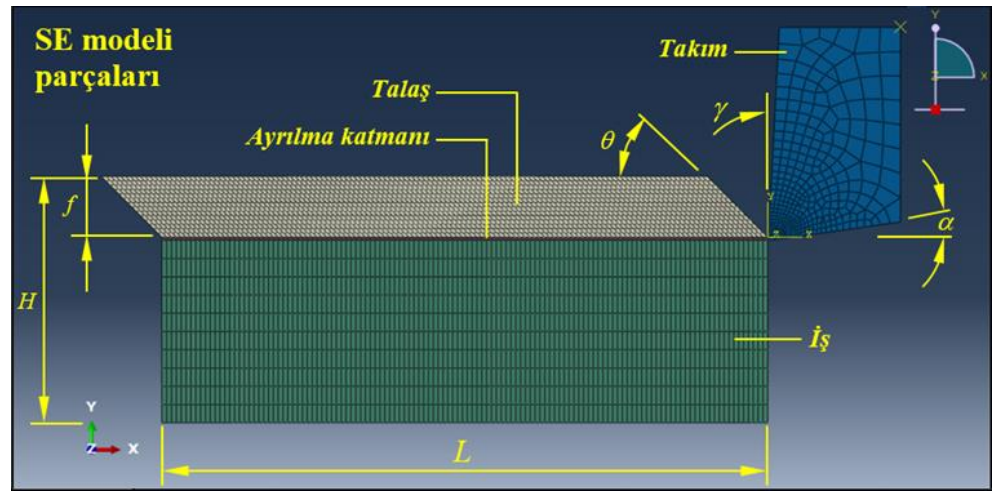


Figure A: Orthogonal turning setup in FE software / Şekil A: SE yazılımındaki ortogonal tornalama düzeneği

Highlights (Önemli noktalar)

- Ti6Al4V alaşımının ortogonal tornalanmasında ilerleme hızının etkileri / Influences of feed rate in orthogonal turning of Ti6Al4V alloy
- Ortogonal tornalama için enerjiye dayalı hasar kriterine sahip çok parçalı SE modeli / Multi-part FE model with energy-based failure criterion for orthogonal turning
- Kesme kuvveti ve talaş morfolojisinin SE analizi / FE analysis of cutting force and chip morphology

Aim (Amaç): This work aims to present a FE analysis of the influences of feed rate on cutting force and chip morphology in orthogonal turning of Ti6Al4V alloy. / Bu çalışma, Ti6Al4V alaşımının ortogonal tornalanmasında ilerleme hızının kesme kuvveti ve talaş morfolojisi üzerindeki etkilerinin SE analizini sunmayı amaçlamaktadır.

Originality (Özgünlük): The influences of feed rate on cutting force and chip morphology are investigated using the multi-part FE model with energy-based failure criterion for orthogonal turning process of Ti6Al4V alloy. / Ti6Al4V alaşımının ortogonal tornalama işlemi için enerjiye dayalı hasar kriterine sahip çok parçalı SE modeli kullanılarak ilerleme hızının kesme kuvveti ve talaş morfolojisi üzerindeki etkileri incelenmiştir.

Results (Bulgular): The feed rate significantly changes the cutting force and the chip morphology observed in serrated chip shape in orthogonal turning of Ti6Al4V alloy. / Ti6Al4V alaşımının ortogonal tornalanmasında ilerleme hızı kesme kuvvetini ve testere dişli talaş şeklinde gözlenen talaş morfolojisini önemli ölçüde değiştirmektedir.

Conclusion (Sonuç): An increase in the feed rate increases the cutting force. Besides, the higher the feed rate, the more prominent chip segmentation. / İlerleme hızındaki bir artış kesme kuvvetini artırmaktadır. Ayrıca, ilerleme hızı ne kadar yüksek olursa talaş segmentasyonu da o kadar belirgin olmaktadır.



Ti6Al4V Alaşımının Ortogonal Tornalanmasında İlerleme Hızının Kesme Kuvveti ve Talaş Morfolojisi Üzerindeki Etkilerinin Sonlu Elemanlar Analizi

Mehmet AYDIN^{1*}

¹Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Güzel Sanatlar ve Tasarım Fakültesi, Endüstriyel Tasarım Bölümü, Bilecik, Türkiye

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 15/01/2024
Düzeltilme: 26/02/2024
Kabul: 13/03/2024

Anahtar Kelimeler

Ortogonal Tornalama
İlerleme Hızı
Sonlu Elemanlar
Simülasyonu
Ti6Al4V Alaşımı

Öz

Bu çalışmada, Ti6Al4V alaşımının ortogonal tornalama işleminde ilerleme hızının kesme kuvveti ve talaş morfolojisi üzerindeki etkilerinin sonlu elemanlar (SE) analizi gerçekleştirilmiştir. Ortogonal tornalama işlemi sırasında malzeme özelliklerini ve temas koşullarını optimize etmek için çok parçalı SE modeli oluşturulmuştur. Ayrıca, ağ bağımlılığını azaltmak için karakteristik uzunlukla kontrol edilen enerjiye dayalı sünek hasar kriteri kullanılmıştır. Tornalama simülasyonları üç parametre kullanılarak gerçekleştirilmiştir: kesme hızı (170, 250 m/dak), ilerleme hızı (100, 120, 150 µm/dev) ve kesme derinliği (2.03 mm). Tahmin edilen kesme kuvvetleri yayımlanmış deneysel bulgularla karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, deneysel ve tahmin edilen kesme kuvvetleri arasındaki farkın %13'e kadar azaldığını göstermektedir. İlerleme hızı 120'den 150 µm/dev'e çıkarıldığında ortalama kesme kuvvetinde yaklaşık %20'lik bir artış gözlemlenmiştir. Kesme kuvvetinin yanı sıra talaşın geometrik değerleri de incelenmiştir. İlerleme hızının 120'den 150 µm/dev'e çıkarılması, testere dişli talaşın adım değerinde yaklaşık %40'lık bir artışa neden olmaktadır. 150 µm/dev ilerleme hızında tahmin edilen tepe ve vadi değerleri, 120 µm/dev ilerleme hızında bulunanlardan sırasıyla %30 ve %17 daha yüksektir.

Finite Element Analysis of the Influences of Feed Rate on Cutting Force and Chip Morphology in Orthogonal Turning of Ti6Al4V Alloy

Article Info

Research article
Received: 15/01/2024
Revision: 26/02/2024
Accepted: 13/03/2024

Keywords

Orthogonal Turning
Feed Rate
Finite Element Simulation
Ti6Al4V Alloy

Abstract

In this research, a finite element (FE) analysis of the influences of feed rate on cutting force and chip morphology in orthogonal turning process of Ti6Al4V alloy is carried out. A multi-part FE model is established to optimize material properties and contact conditions during the orthogonal turning process. Besides, an energy-based ductile failure criterion controlled by a characteristic length is employed to reduce the mesh dependency. The turning simulations are performed by using three parameters: the cutting speed (170, 250 m/min), feed rate (100, 120, 150 µm/rev) and depth of cut (2.03 mm). The predicted cutting forces are compared with published experimental findings. The results show that the difference between experimental and predicted cutting forces decreases up to 13%. An increase of about 20% in the average cutting force is observed when the feed rate is increased from 120 to 150 µm/rev. In addition to the cutting force, the geometrical values of chip are investigated. The increase in the feed rate from 120 to 150 µm/rev results in an increase of approximately 40% in the pitch value of serrated chip. The predicted peak and valley values at a feed rate of 150 µm/rev are 30% and 17% higher, respectively, than those found at a feed rate of 120 µm/rev.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Titanyum alaşımları yüksek mukavemetleri, mükemmel kırılma ve korozyon dayanımları nedeniyle uzay, havacılık, otomotiv ve biyomedikal endüstrilerinde kullanılmaktadır [1]. Ancak, neredeyse tüm titanyum alaşımlarının, düşük ısı iletkenliği ve yüksek kimyasal aktivite nedeniyle

işlenmesi zordur. Titanyum alaşımlarının bu özellikleri, işleme süreçlerinde yüksek sıcaklığa ve hızlı takım aşınmasına neden olur [2, 3]. Ayrıca, uygun kesme parametrelerinin kullanılmamasından dolayı, yüzey kalitesinin kötüleşmesi, işleme maliyetlerinin artması ve verimliliğin azalması görülmektedir [4].

Ti6Al4V alaşımı, işlenmesi zor olan bir tür titanyum alaşımıdır. Titanyum alaşımının yüksek hızda işlenmesi, yüksek gerinim, yüksek sıcaklık ve yüksek şekil değiştirme hızını içeren karmaşık bir süreçtir. İşlenebilirliğinin iyice araştırılması gereklidir. Bu bağlamda, talaş kaldırma işlemi sırasında oluşan kesme kuvvetini [5], momenti [6], güç tüketimini [7, 8] ve kesme sıcaklığını [9] tahmin etmek için SE yöntemiyle simülasyonlar yürütülmüştür. Bu simülasyonları gerçekleştirmek için Deform [10], ThirdWave Advantedge [11] ve Abaqus [12] gibi yazılım paketleri kullanılmıştır. İlk çalışmalar, sürekli talaş oluşumunu modelleyen Eulerian analizine dayalıdır [13]. Gerçekçi bir hasar kriteri gerektiren Lagrangian hesaplamaları da talaş kaldırma işlemlerini modellemek için kullanılmıştır. Yaşar ve ark. [14] Lagrangian ağ yapısına dayalı SE modeli ile tormalama işleminde oluşan kesme kuvvetlerinin analizini yapmışlardır. Benzer şekilde, Aydın [15, 16] ortogonal kesme sırasında oluşan kalıntı gerilmelerin ve kesme kuvvetlerinin analizi için Lagrangian formülasyonunu benimsemiştir. Diğer bir araştırmada, Aydın [17] Ti6Al4V alaşımının ortogonal kesme simülasyonu için eleman silme yönteminin kullanıldığı bir SE modeli sunmuştur.

Gelişigüzel Lagrangian–Eulerian (ALE) ağ oluşturma yaklaşımı, hem Eulerian hem de Lagrangian formülasyonlarının avantajlarını birleştirmektedir ve sürekli talaş tipini modellenmektedir [18, 19]. Arrazola ve ark. [20] ortogonal kesme simülasyonu sırasında iş parçasının sık sık yeniden elemanlara ayrılmasını azaltmak için ALE formülasyonunu kullanmışlardır. Ancak, ALE yöntemi başlangıç talaş geometrisine ilişkin bazı varsayımlara ihtiyaç duymaktadır. Son zamanlarda ALE'nin dezavantajlarının üstesinden gelmek için Birleşik Eulerian-Lagrangian (CEL) yöntemi gittikçe daha fazla uygulanmaktadır. Ducobu ve ark. [21] Ti6Al4V alaşımının ortogonal kesme işlemi için Eulerian ağlarla modellenen iş parçası ve Lagrangian ağlarla modellenen kesici takımdan oluşan bir CEL modeli sunmuşlardır. Zhuang ve ark. [22] CEL yöntemini ve J-C yapısal malzeme yasasını içeren bir SE modeli önermişlerdir. Ancak, bu modeller, uzun bir hesaplama süresi gerektiren üç boyutlu bir ortam gerektirmektedir.

Tormalama işleminde ilerleme hızı, kesme kuvveti ve talaş morfolojisi üzerinde dinamik bir rol oynamaktadır. Bu çalışmada, titanyum alaşımı Ti6Al4V'nin ortogonal tormalama simülasyonu sırasında ilerleme hızının kesme kuvveti ve talaş morfolojisi üzerindeki etkileri kapsamlı bir şekilde araştırılmıştır. Ayrıca, ortogonal tormalama işlemi

sırasında malzeme özelliklerini ve temas koşullarını optimize etmek için çok parçalı SE modeli önerilmiştir. Ağ bağımlılığını azaltmak için karakteristik eleman uzunluğuna dayalı hasar kriteri uygulanmıştır. Uygun ağ boyutunun belirlenebilmesi için tahmin edilen kesme kuvvetleri literatürden elde edilen deneysel kuvvetle karşılaştırılmıştır.

2. ORTOGONAL TORNALAMA İŞLEMİNİN SE ANALİZİ (FE ANALYSIS OF ORTHOGONAL TURNING PROCESS)

2.1. Ortogonal Tormalamanın Modellenmesi (Modelling of Orthogonal Turning)

Ti6Al4V alaşımının ortogonal tormalanmasında ilerleme hızının kesme kuvveti ve talaş morfolojisi üzerindeki etkilerini incelemek için Abaqus/ExplicitTM SE yazılımı kullanılarak iki boyutlu (2B) SE modeli geliştirilmiştir. İş parçası; talaş, ayrılma katmanı ve iş olmak üzere üç bölüme ayrılmıştır. İş parçasının üç farklı bölüme ayrılması, farklı malzeme özelliklerinin, temas koşullarının ve hasar yasalarının tanımlanmasını sağlamıştır. Böylece, talaş katmanında farklı hasar enerjisine sahip J-C hasar modeli ve temas koşulları uygulanmıştır. Üç parçanın montajı, Abaqus'te mevcut olan standart birleştirme kısıtlaması uygulanarak yapılmıştır. Şekil 1 model geometrisi ve sınır koşullarını şematik olarak göstermektedir.

SE modeli, birleşik termo-mekanik analiz için kullanılan dörtgen düzlemsel gerinim elemanları (CPE4RT) kullanılarak yeniden ağ oluşturma tekniği uygulanmadan oluşturulmuştur. Talaş katmanı ağı, hesaplamaların başlangıcındaki distorsiyon problemlerini önlemek için 45°'lik bir eğim açısı (θ) ile karakterize edilirken, ayrılma katmanı ve iş düzgün paralel elemanlarla modellenmiştir.

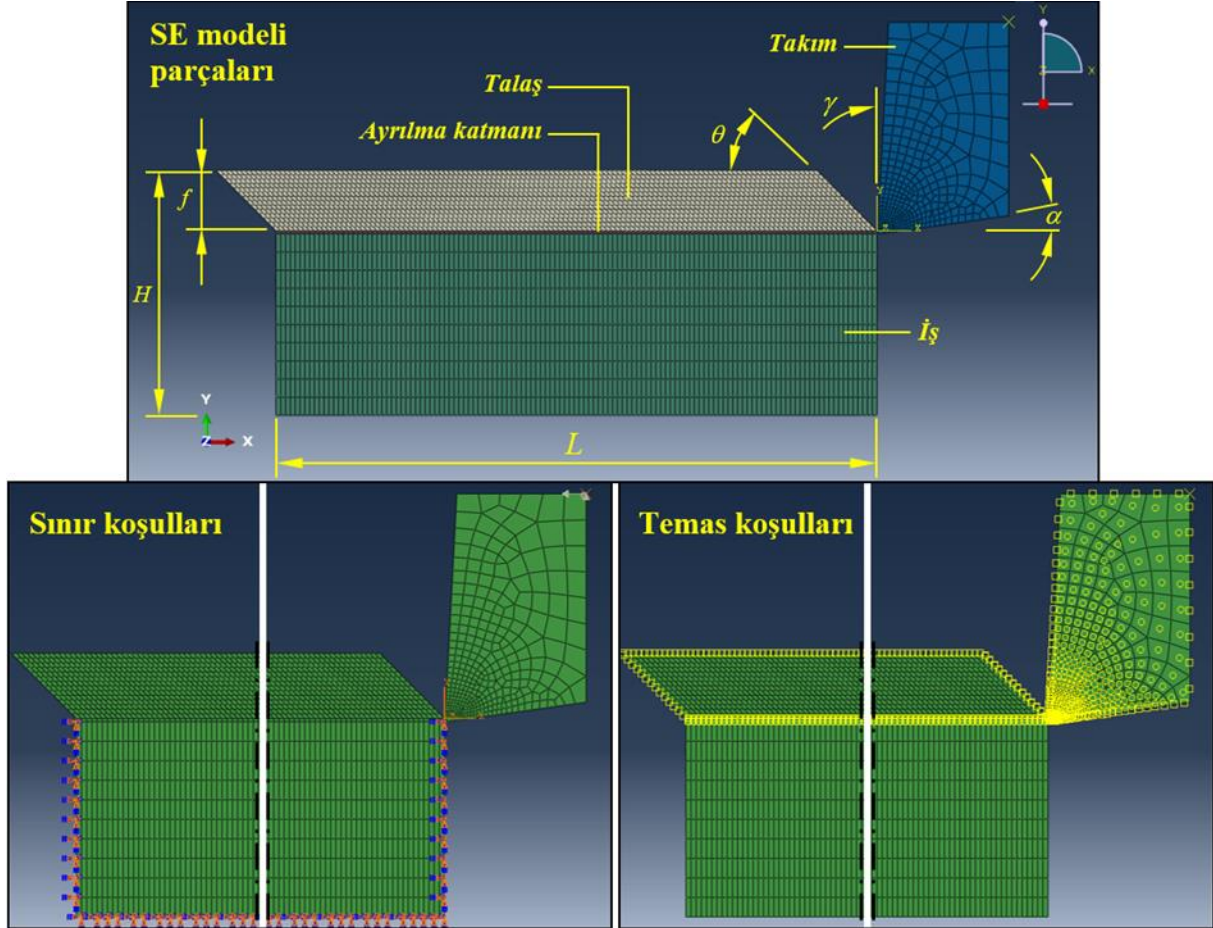
İş parçası boyutu, hasar enerjisi yoğunluğunun sabit kalmasını sağlamak için ilerleme hızı (f) cinsinden tanımlanmıştır. f 'nin H 'ye oranı $1/4$ 'tür ve f 'nin L 'ye oranı $1/10$ 'dur. Ayrıca, talaşın alt kısmına yerleştirilen ayrılma katmanının kalınlığı kesici kenar yarıçapına eşittir. Bu çalışmada, benimsenen tüm kesme parametreleri, Chen ve ark. [23] tarafından kullanılan parametrelere benzer şekilde alınmıştır. Kesici takım, talaş (γ) ve boşluk (α) açıları sırasıyla 3° ve 8° olan ve 5 μ m kesici kenar yarıçapına (r) sahip rijit bir gövde olarak modellenmiştir. Kuru kesme koşulunda gerçekleştirilen simülasyonlarda kesme hızı kesici takıma uygulanırken iş katmanının alt, ön ve arka

kenarlarındaki düğümler sabitlenmiştir. Ortam sıcaklığı 293 °K dir.

$$\tau_f = \begin{cases} \mu\sigma_n < \tau_{\max} & \text{ise } \mu\sigma_n \\ \mu\sigma_n \geq \tau_{\max} & \text{ise } \tau_{\max} \end{cases} \quad (1)$$

Takım ve iş parçası arasındaki temas davranışı, normal gerilme (σ_n) ile sürtünme gerilmesini (τ_f), Denklem (1)'de verildiği gibi, ilişkilendiren Coulomb sürtünme modeli [24] kullanılarak tanımlanabilir:

burada τ_{\max} kayma gerilmesi limitidir ve μ sürtünme katsayısıdır. Bu çalışmada μ , Calamaz ve arkadaşları [25] tarafından sunulduğu gibi, 0.05 olarak seçilmiştir.



Şekil 1. Ortogonal tornalama için 2B SE modeli (2D FE model for orthogonal turning)

Takım ve iş parçası arasındaki temas alanı boyunca sürtünme, Denklem (2)'de tanımlandığı gibi, bir ısı akışı üretmektedir.

$$\Phi_f = \eta_f \tau_f \mathcal{K} \quad (2)$$

burada η_f sürtünme işinin ısıya dönüşen kısmı ve \mathcal{K} kayma gerinimi hızıdır. Tüm sürtünme işinin ısıya dönüştüğü varsayılarak η_f 1 olarak alınır [26]. Sürtünme ısı, Denklem (3)'te belirtildiği gibi, talaş ve takım yüzeyleri arasında paylaşılır.

$$\Phi_A = f_f \Phi_f \quad \text{ve} \quad \Phi_B = (1 - f_f) \Phi_f \quad (3)$$

burada Φ_A ve Φ_B sırasıyla talaşa ve takıma akan ısı akışıdır ve f_f talaşa iletilen sürtünme ısıdır. Mevcut model için f_f 0.5 olarak alınmıştır [26].

Takım ve iş parçası arasında ısı transferine izin verilmiştir ve kararlı duruma hızla ulaşmak için yüksek bir termal temas iletkenliği katsayısı tanımlanmıştır ($h_{im} = 10^4$ kW/m²K) [27].

2.2. Enerjiye Dayalı Sünek Hasar Malzeme

Modeli (Energy-based Ductile Failure Material Model)

Yüksek hızlı talaş kaldırma işlemi, son derece yüksek deformasyonlar ve kısıtlanmamış plastik akış içermektedir. Yüksek derecede elastik olmayan deformasyonlar nedeniyle termal yumuşama oluşur ve sıcaklık değişikliklerine yol açar. Bu nedenle, gerinim hızı ve sıcaklığın etkilerini dikkate alan bir

malzeme modelinin kullanılması gereklidir. Bu çalışmada, Ti6Al4V alaşımının tornalama simülasyonu için J-C malzeme modeli [28] benimsenmiştir. Akış gerilmesi ($\bar{\sigma}$), Denklem (4)'te verildiği gibi, ifade edilebilir:

$$\bar{\sigma} = [A + B \times (\bar{\epsilon}^{pl})^n] \left[1 + C \times \ln \left(\frac{\dot{\bar{\epsilon}}^{pl}}{\dot{\bar{\epsilon}}_0} \right) \right] \left[1 - \left(\frac{T - T_r}{T_m - T_r} \right)^m \right] \quad (4)$$

Tablo 1. J-C malzeme modeli için Ti6Al4V alaşımı parametreleri (Ti6Al4V alloy parameters for J-C material model) [29, 30]

A (MPa)	B (MPa)	n	C	m	$\dot{\bar{\epsilon}}_0$ (s ⁻¹)	T _r (°K)	T _m (°K)
862	331	0.34	0.012	0.8	1.0	293	1878

Kesici takım malzemesi doğrusal elastik modelle tanımlanan tungsten karbürdür. Tablo 2 Ti6Al4V alaşımının ve karbür kesici takımın malzeme özelliklerini göstermektedir.

Talaş oluşumu sürecini modellemek için hasar davranışı, hasar başlama parametresi ve hasar gelişimi yasası kullanılarak karakterize edilmiştir. Hasar başlama parametresi Denklem 5'te sunulan kümülatif ilişki ile modellenebilir.

$$w = \sum \frac{\Delta \bar{\epsilon}^{pl}}{\bar{\epsilon}_f^{pl}} \quad 0 \leq w \leq 1 \quad (5)$$

burada $\Delta \bar{\epsilon}^{pl}$ plastik gerinim artışı ve $\bar{\epsilon}_f^{pl}$ hasar anındaki plastik gerinimdir. Hasar parametresi (w) 1'i aştığında hasar başlatılır. J-C hasar gerinimi [29] Denklem (6) ile tanımlanabilir:

$$\bar{\epsilon}_f^{pl} = [d_1 + d_2 e^{(d_3(p/\bar{\sigma}))}] [1 + d_4 \ln \dot{\bar{\epsilon}}] [1 + d_5 T^*] \quad (6)$$

burada p hidrostatik basınç ve $p/\bar{\sigma}$ gerilme üç eksenliliğidir. d_1-d_5 mekanik deneylerle elde edilebilen hasar parametreleridir. Ti6Al4V alaşımı için J-C hasar modeli parametreleri Tablo 3'te verilmiştir.

Bu çalışmada, malzemenin hasar gelişim davranışını temsil etmek için enerjiye dayalı hasar kriteri uygulanmıştır [31]. Bu model, karakteristik uzunluk (L_c) ile ilişkili hasar enerjisini (G_f) kullanmaktadır. Hasar başlangıcından sonra gerilme-yer değiştirme tepkisini dikkate alarak iş parçası malzemesinin zayıflamasını yönetmektedir, dolayısıyla ağ bağımlılığı azaltılmaktadır. Hillerborg hasar enerjisi olarak da adlandırılan hasar enerjisi (G_f) Denklem (7) ile ifade edilebilir:

burada A , B , n , C ve m Hopkinson çubuk testlerinden elde edilen ve gerilme-gerinim eğrilerinden belirlenen malzeme parametreleridir. $\bar{\epsilon}^{pl}$ ve $\dot{\bar{\epsilon}}^{pl}$ sırasıyla plastik gerinim ve gerinim hızıdır. $\dot{\bar{\epsilon}}_0$ referans gerinim hızıdır. T , T_r ve T_m sırasıyla iş parçası sıcaklığı, oda sıcaklığı ve malzeme ergime sıcaklığıdır. Ti6Al4V alaşımı için J-C malzeme modeli parametreleri Tablo 1'de verilmiştir.

$$G_f = \int_{\bar{\epsilon}_0^{pl}}^{\bar{\epsilon}_f^{pl}} L_c \sigma_y d\bar{\epsilon}^{pl} = \int_0^{\bar{u}_f^{pl}} \sigma_y d\bar{u}^{pl} \quad (7)$$

burada $\bar{\epsilon}_0^{pl}$ sifira eşit plastik şekil değiştirmedir. \bar{u}^{pl} hasar başlangıcından sonraki plastik yer değiştirmedir. \bar{u}_f^{pl} hasar anında plastik yer değiştirmedir.

Ayrılma katmanı için doğrusal gelişimli hasar değişkeni (D) Denklem (8) ile belirlenebilir:

$$D = \frac{2G_f L_c \bar{\epsilon}^{pl}}{\bar{\sigma}} \quad (8)$$

Talaş için üstel gelişimli hasar değişkeni (D) Denklem (9) ile belirlenebilir:

$$D = 1 - \exp \left(- \int_0^{\bar{u}^{pl}} \frac{\bar{\sigma}}{G_f} d\bar{u}^{pl} \right) \quad (9)$$

Hasar değişkeni (D) 1 olduğunda ilgili elemanlar uzaklaştırılır ve çatlak oluşur. Talaş oluşumunu modellemek için hasar enerjisi (G_f) [32], Denklem (9)'da sunulduğu gibi de tanımlanabilir:

$$(G_f)_{I,II} = ((1 - \nu)^2 / E) (K_C^2)_{I,II} \quad (10)$$

burada ν Poisson oranıdır. K_C kırılma tokluğudur ve I ve II alt simgeleri sırasıyla çekme ve kesme koşullarını göstermektedir.

Yüksek hızlı kesme sırasında mekanik davranış sıcaklıktan etkilendiği için plastik deformasyon sıcaklığın artmasına neden olan bir ısı akışı üretmektedir ve plastik deformasyon ısı akışı Denklem (11) ile belirlenebilir:

$$\phi_p = \eta_p \bar{\sigma} : \bar{\varepsilon}^p \quad (11) \quad \text{burada } \eta_p \text{ ısıya dönüştürülen plastik işin yüzdesidir ve \%90'a eşit olarak alınmıştır.}$$

Tablo 2. Ti6Al4V alaşımı ve karbür kesici takımın malzeme özellikleri (Material properties of Ti6Al4V alloy and carbide cutting tool) [23, 30]

Parametre	Ti6Al4V alaşımı	Karbür kesici takım
Yoğunluk (kg/m ³)	4430	11900
Elastikiyet modülü (GPa)	109 (323°K) 91 (523°K) 75 (723°K)	534
Poisson oranı	0.34	0.22
Isıl genleşme (1/°K)	9 × 10 ⁻⁶	
Isıl iletkenlik (W/m°K)	6.8 (293°K) 7.4 (373°K) 9.8 (573°K) 11.8 (773°K)	50
Özgül ısı (J/kg°K)	611 (293°K) 624 (373°K) 674 (573°K) 703 (773°K)	400

Tablo 3. J-C hasar modeli için Ti6Al4V alaşımı parametreleri (Ti6Al4V alloy parameters for J-C failure model) [29]

d_1	d_2	d_3	d_4	d_5
-0.09	0.25	-0.5	0.014	3.87

3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

Tornalama simülasyonunda, sünek metallerin malzeme deformasyon süreci genellikle gerilme-gerinim eğrisi ile karakterize edilir. Hasar gelişimi aşamasında, gerilme-gerinim ilişkisini doğru bir şekilde yakalamak için enerji esaslı hasar kriteri kullanılabilir ve hasar enerjisi yoğunluğu (G_ε) [23] Denklem (12) ile hesaplanabilir:

$$G_\varepsilon = \frac{G_f}{L_c} = \int_{\bar{\varepsilon}_{0i}^{pl}}^{\bar{\varepsilon}_f^{pl}} \sigma_y d\bar{\varepsilon}^{pl} \quad (12)$$

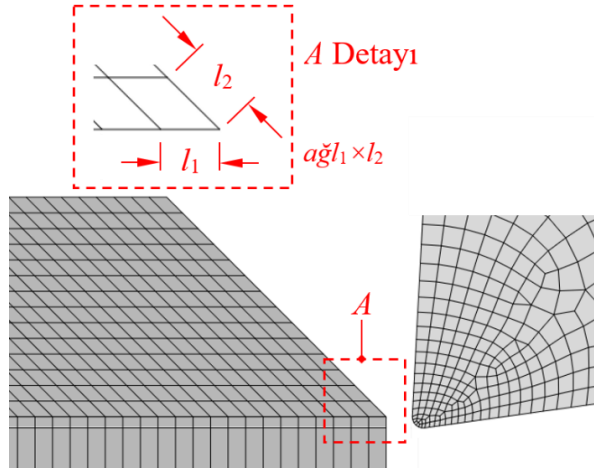
L_{c1} ve L_{c2} farklı karakteristik uzunlukları için hasar enerjisi yoğunluğunu sabit tutmak amacıyla hasar enerjisi (G_f), Denklem (13)'te gösterildiği gibi, değiştirilmelidir:

$$\frac{G_{f1}}{L_{c2}} = \frac{L_{c1}}{L_{c2}} \quad (13)$$

SE ağının kesme kuvveti üzerindeki etkisini incelemek için talaş katmanı uzun kenarları kesme hızı yönüne göre 45° eğik dikdörtgen elemanlar ile modellenmiştir. Şekil 2 detaylı olarak talaş katmanındaki eleman şeklini göstermektedir. $a\bar{g}l_1 \times l_2$ tanımında l_1 ve l_2 sırasıyla eleman kısa ve uzun kenar uzunluklarıdır.

Talaş kaldırma sırasında özellikle testere dişli talaş oluşumunda büyük deformasyon yaygın bir olgudur. Deformasyon büyüklüğü de önemli ölçüde SE ağı için benimsenen eleman boyutuna bağlıdır [26]. Sonuç olarak, ağ bağımlılığını azaltmak için uygun eleman boyutu belirlenmelidir. Tablo 4 talaş katmanı için analiz edilen ağ modellerini göstermektedir. Tabloda görüldüğü gibi, Ti6Al4V alaşımının yüksek hızlı ortogonal tornalama işleminde ağ parametrelerinin kesme kuvveti üzerindeki etkisini incelemek için talaş katmanında aynı enerji hasar kriteri (hasar enerjisi veya hasar enerjisi yoğunluğu) uygulanmıştır. Burada kesme

hızı (V) 250 m/dak ve ilerleme hızı (f) 100 $\mu\text{m}/\text{dev}$ ve kesme derinliği (d) 2.03 mm'ye ayarlanmıştır.



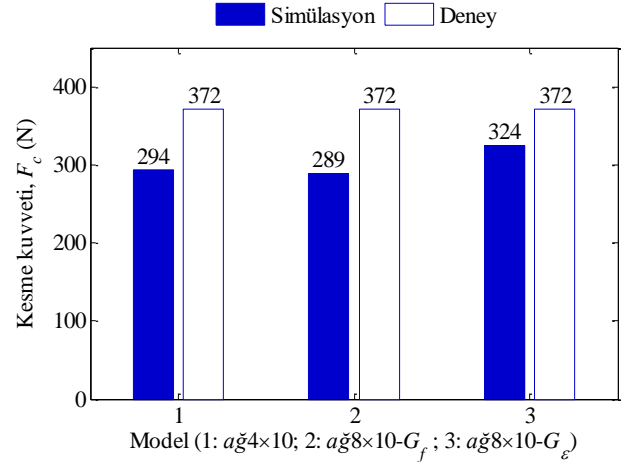
Şekil 2. Talaş katmanındaki eleman şekli (Element shape in the chip layer)

Table 4. Talaş katmanı için aynı hasar sabitine sahip ağ modelleri (Mesh models with the same failure constant for the chip layer)

Model	Hasar enerjisi, G_f (10^3 J/m^2)	Hasar enerjisi yoğunluğu, G_ε (10^9 J/m^3)
$a\check{g}4\times 10$	16.4	6.2
	19.7	7.4
	23.9	8.9
$a\check{g}8\times 10-G_f$	16.4	4.4
	19.7	5.2
	23.9	6.3
$a\check{g}8\times 10-G_\varepsilon$	23.3	6.2
	27.9	7.4
	33.8	8.9

Aynı hasar enerjisi ve hasar enerjisi yoğunluğu koşulları altında SE ağ modellerini incelemek için sayısal olarak tahmin edilen ortalama kuvvetler aynı kesme koşulunda literatürde mevcut olan deneysel ortalama kesme kuvveti [23] ile karşılaştırılmıştır. Şekil 3'te gösterildiği gibi, Ti6Al4V alaşımının ortogonal tornalama işleminden tahmin edilen kesme kuvvetleri (F_c) genel olarak deneysel kuvvet büyüklüğünden düşüktür. Kesme kuvvetleri için benzer bir değişim, Wang ve ark. [30] tarafından gerçekleştirilen çalışmada da görülmüştür. Bu sonuç, J-C malzeme modeli ile düşük olarak tahmin edilen iş parçası malzemesinin işleme sertleşmesine bağlanabilir. SE yöntemiyle $a\check{g}4\times 10$ 'dan tahmin

edilen kesme kuvveti ölçülen değerden yaklaşık %20 daha düşüktür. $a\check{g}8\times 10-G_f$ modelinden, tahmin edilen kuvvet, artan ağ boyutuyla birlikte biraz azalma eğilimi göstermiş ve kesme kuvvetinin yüzde hatası 22.3 olarak bulunmuştur. Tahmin edilen kesme kuvveti $a\check{g}8\times 10-G_\varepsilon$ koşulu altında artmış ve kuvvetler arasındaki bağıl hata %13'e kadar azalmıştır. Yukarıdaki tartışmadan hasar enerjisi yoğunluğuna dayalı $a\check{g}8\times 10-G_\varepsilon$ modelinin kesme kuvvetini daha iyi bir doğrulukla tahmin edilmesini sağladığı sonucu çıkarılabilir.



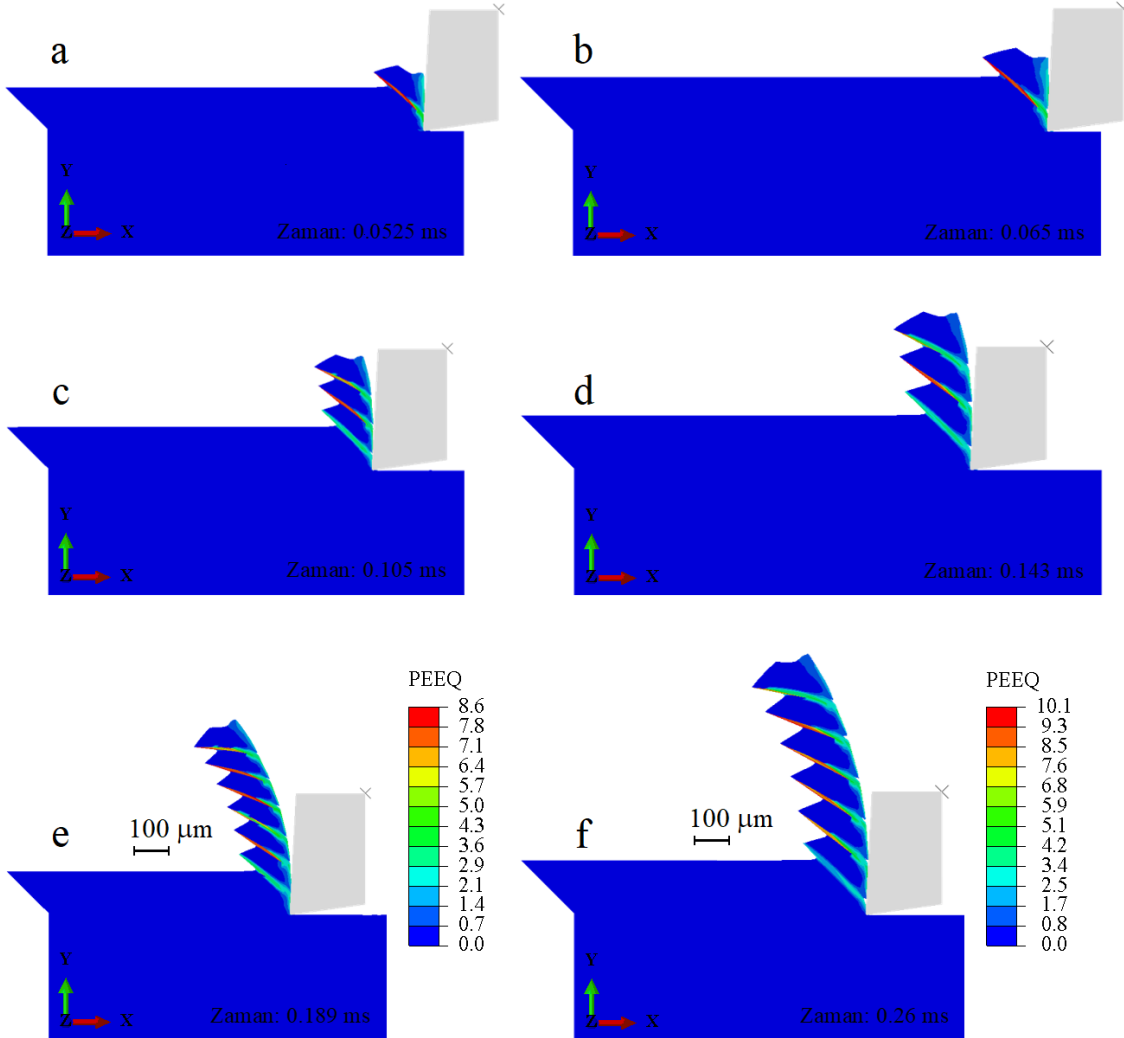
Şekil 3. Simüle edilen ve ölçülen [23] kesme kuvvetlerinin ortalama değerleri (The average values of simulated and measured cutting forces)

Ağ modelleri üzerindeki çalışma, talaş katmanı alt kenar ve eğik kenar ağ gözü sayıları sırasıyla 125 ve 14 olarak tanımlanarak elde edilen $8\times 10 \mu\text{m}$ boyutunda dikdörtgen elemanların tercih edilmesi gerektiğini göstermiştir. Simülasyon süreçlerinde, iş parçası geometrisinin tüm boyutu, ilerleme hızı (f) ile aynı oranda değiştirilmiş ve farklı ilerleme hızları için ağ gözü sayıları sabit tutulmuştur. Ayrıntılı olarak, Denklem 13'te gösterildiği gibi, farklı karakteristik uzunluk L_c oranına göre hasar enerjisi yoğunluğunu korumak için farklı ilerleme hızları koşullarında hasar enerjisi (G_f) değiştirilmiştir.

İlerleme hızının talaş morfolojisi üzerindeki etkisini incelemek için 120 ve 150 $\mu\text{m}/\text{dev}$ ilerleme hızları seçilmiştir. Yüksek hızlı ortogonal tornalama simülasyonları 170 m/dak kesme hızı ve 2.03 mm kesme derinliğinde gerçekleştirilmiştir. Ti6Al4V alaşımı için tahmin edilen talaş morfolojileri ve eşdeğer plastik gerinim (PEEQ) dağılımları Şekil 4'te gösterilmiştir. Seçilen süreç parametreleriyle tornalama işlemleri sırasında birincil kayma bölgesi ve takım-talaş arayüzü boyunca yoğunlaşan adyabatik kayma bantlarından (termo-plastik kararsızlık) dolayı Ti6Al4V alaşımının kesme işlemi sırasında testere dişli talaşlar oluşmuştur.

Diğer bir ifadeyle, $a\tilde{g}8 \times 10^{-G_\varepsilon}$ koşulu talaş oluşumu sırasında kayma lokalizasyonunun iyi bir şekilde elde edilmesini sağlamıştır. İlerleme hızı 120'den 150 $\mu\text{m}/\text{dev}$ 'e arttırıldığında, talaştaki ısı koşulları daha büyük ilerleme hızıyla daha adyabatik olma eğiliminde olduğundan talaş segmentasyonunun

daha belirgin olduğu gözlenebilir. Bu nedenle, ilerleme hızı ne kadar yüksek olursa, Şekil 4e ve f'de gösterildiği gibi, kayma bantlarındaki plastik gerinim gradyanı da o kadar yüksektir. Başka bir deyişle, ilerleme hızı 120'den 150 $\mu\text{m}/\text{dev}$ 'e arttırıldığında en yüksek plastik şekil değiştirme 8.6'dan 10.1'e değişmiştir.



Şekil 4. Farklı ilerleme hızlarında talaş oluşumu ve gerinim alanı gelişimi (Chip formation and strain field development under different feed rates): (a) (c) (e) $f = 120 \mu\text{m}/\text{dev}$; (b) (d) (f) $f = 150 \mu\text{m}/\text{dev}$

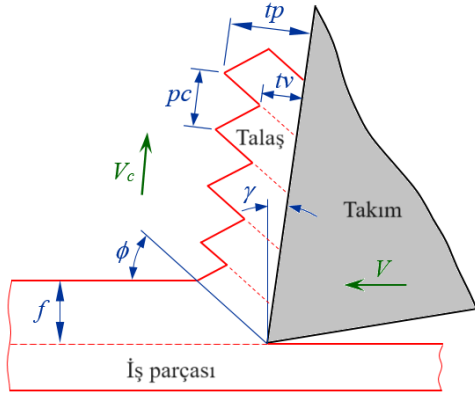
Şekil 5'de gösterildiği gibi, testere dişli talaş morfolojisi, adım (p_c), vadi (t_v) ve tepe (t_p) olmak üzere üç parametre kullanılarak tanımlanır. Adım (p_c) ve talaş kayma hızı (V_c) biliniyorsa, kesme kuvvetlerinin frekansı (f_c) [33] Denklem (14) kullanılarak tahmin edilebilir:

$$f_c(\text{kHz}) = \frac{V_c(\text{m/s})}{p_c(\text{mm})} \quad (14)$$

İki farklı ilerleme hızı için sayısal olarak elde edilen testere dişli talaşın geometrik parametrelerinin ortalama değerleri Tablo 5'te sunulmuştur. Bu sonuçlar, her bir parametre değeri için talaş boyunca en az üç kez ölçüm yapılarak elde edilmiştir.

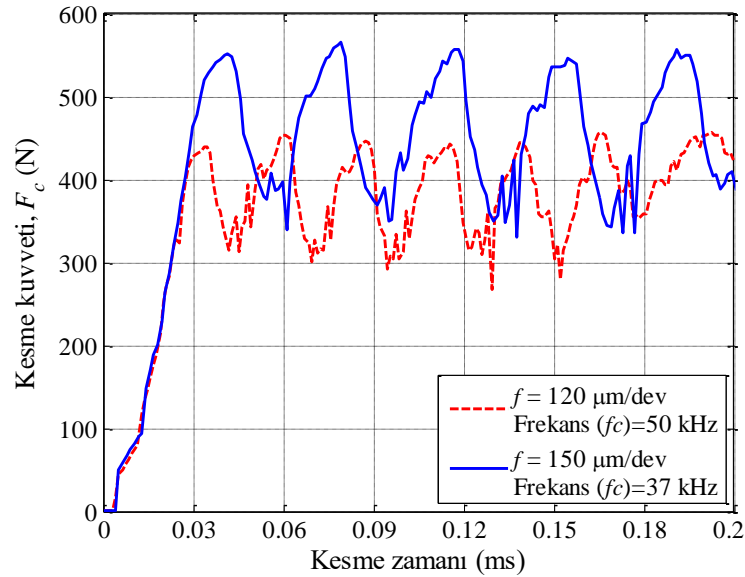
Tablodan, yüksek kesme hızı altında ilerleme hızı 120'den 150 $\mu\text{m}/\text{dev}$ 'e değiştirildiğinde adım boyutunun yaklaşık %40 arttığı çıkarılabilir. Benzer bir eğilim tepe ve vadi değerlerinde de görülmüştür. 150 $\mu\text{m}/\text{dev}$ ilerleme hızında tahmin edilen tepe ve vadi değerleri 120 $\mu\text{m}/\text{dev}$ ilerleme hızında bulunanlardan sırasıyla %30 ve %17 daha yüksektir. Ayrıca, tabloda iki farklı ilerleme hızı için kesme kuvvetlerinin ortalama değerleri verilmiştir. 150 $\mu\text{m}/\text{dev}$ ilerleme hızında elde edilen kesme kuvveti, 120 $\mu\text{m}/\text{dev}$ ilerleme hızında elde edilen kesme kuvvetinden yaklaşık %20 daha büyüktür. Dolayısıyla, daha yüksek kuvvet büyüklüğü nedeniyle 150 $\mu\text{m}/\text{dev}$ ilerleme hızında

birincil kesme bölgesinde yapılan plastik iş daha fazladır.



Şekil 5. Testere dişli talaşın geometrik özellikleri
(Geometrical characteristics of serrated chip)

Şekil 6 120 ve 150 $\mu\text{m}/\text{dev}$ ilerleme hızları için simüle edilen kesme kuvvetlerinin (F_c) zamana göre değişimini göstermektedir. 0.03 ile 0.06 ms aralığında kararlı duruma ulaşılmıştır. Wang ve ark. [30] tarafından sunulan çalışmada da gösterildiği gibi, testere dişli talaşlardaki adyabatik kayma bantlarının periyodik oluşumundan dolayı kesme



Şekil 6. 120 ve 150 $\mu\text{m}/\text{dev}$ ilerleme hızları altında simüle edilen kesme kuvvetlerinin değişimi (Variation of simulated cutting forces under feed rates of 120 and 150 $\mu\text{m}/\text{rev}$)

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada, Ti6Al4V alaşımının ortogonal tornalama işleminde ilerleme hızının kesme kuvveti ve talaş morfolojisi üzerindeki etkileri detaylı olarak incelenmiştir. Ayrıca, ortogonal tornalama işlemi sırasında malzeme özelliklerini ve temas koşullarını optimize etmek için çok parçalı 2B SE modeli önerilmiş ve ağ bağımlılığını azaltmak için enerjiye dayalı hasar kriteri uygulanmıştır. Aşağıdaki bulgular çıkarılabilir:

kuvvetlerinin periyodik dalgalanmalarla değiştiği gözlenmiştir. Kesme kuvvetlerinin frekansları (f_c), yüksek kesme hızı altındaki ilerleme hızları için farklıdır. İlerleme hızının 120'den 150 $\mu\text{m}/\text{dev}$ 'e çıkarılmasıyla, kesme kuvvetinin genlikleri yaklaşık 75'den 100 N'a artarken, dalgalanma frekansı (f_c) 50'den 37 kHz'e azalmıştır. Başka bir deyişle, kesme kuvveti büyüklükleri ilerleme hızına önemli ölçüde bağlıdır. Kesme kuvveti değerlerinde gözlenen farklılıklar da eşdeğer plastik gerinim değerlerindeki değişimlerle açıklanabilir.

Table 5. Farklı ilerleme hızları altında ortalama simüle edilen kesme kuvvetlerinin ve talaş özelliklerinin karşılaştırılması (Comparison of average simulated cutting forces and chip characteristics under different feed rates)

İlerleme hızı ($\mu\text{m}/\text{dev}$)	F_c (N)	Talaş morfolojisi		
		tp (μm)	tv (μm)	pc (μm)
120	385	150	94	71
150	469	195	110	99

1. Karakteristik eleman uzunluğu ile kontrol edilen hasar enerjisi yoğunluğuna dayalı çok parçalı ortogonal tornalama SE modeliyle tahmin edilen kesme kuvveti deneysel sonuç ile uyum içerisinde bulunmuştur. Bu SE modeli farklı ilerleme hızlarında ağ bağımlılığının etkisini azaltabilir.
2. Takım ucunda başlayan ve talaş serbest yüzeyine yayılan adyabatik kayma kararsızlığı nedeniyle, Ti6Al4V alaşımının yüksek hızda tornalanmasında testere dişli talaşlar gözlenmiştir.

3. Enerjiye dayalı hasar kriterli çok parçalı SE modeli ile Ti6Al4V alaşımının yüksek kesme hızında ortogonal tornalama simülasyonu kesme kuvvetlerinin periyodik değişimine yol açmıştır.
4. Yüksek kesme hızında, ilerleme hızı ne kadar yüksek olursa, talaş segmentasyonu da o kadar belirgin olmaktadır. Ayrıca, daha büyük ilerleme hızı, daha yüksek kesme kuvveti meydana getirmektedir ve frekansı azaltmaktadır.
5. Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar, tornalama işleminin temel bilgisini sağlamaktadır ve verilen kesici takım ve iş parçası malzemeleri için kesme kuvveti açısından ilerleme hızının optimize edilmesine yardımcı olabilir. Ayrıca, gelecekteki çalışmalarda J-C malzeme ve hasar denklemlerindeki parametrelerin tornalama simülasyon sonuçları üzerindeki etkisi araştırılabilir.

ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazarı çalışmada kullandığı 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 he use in his work do not require ethical committee approval and/or legal-specific permission.

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

Mehmet AYDIN: Simülasyonları yapmış, sonuçlarını analiz etmiş ve maklenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

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

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Çelik, Y.H. ve Kılıçkap, E. (2018). Titanyum alaşımlarından Ti-6Al-4V'nın işlenmesinde karşılaşılan zorluklar: Derleme. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, Part C: Tasarım ve Teknoloji, 6(1), 163–175.
- [2] Safari, H., Sharif, S., Izman, S. and Jafari, H. (2014). Kurniawan, D. Cutting force and surface roughness characterization in cryogenic high-speed end milling of Ti-6Al-4V ELI.

- Materials and Manufacturing Processes, 29 (3), 350–356.
- [3] Jianwei, M., Zhenyuan, J., Fuji, W. and Fuda, N. (2014). Spindle speed selection for high-speed milling of titanium alloy curved surface. Materials and Manufacturing Processes, 29, 364–369.
- [4] Kara, F., Aslantas, K. and Çiçek, A. (2015). ANN and multiple regression method-based modelling of cutting forces in orthogonal machining of AISI 316L stainless steel. Neural Computing and Applications, 26, 237–250.
- [5] Binali, R. (2023). Parametric optimization of cutting force and temperature in finite element milling of AISI P20 steel. Journal of Materials and Mechatronics: A, 4(1), 244–256.
- [6] Binali, R., Yıldız, S. ve Neşeli, S. (2021). S960QL yapı çeliğinin işlenebilirliğinin sonlu elemanlar yöntemi ile incelenmesi. Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, 31(1), 85–91.
- [7] Korkmaz, M.E. and Günay, M. (2018). Finite element modelling of cutting forces and power consumption in turning of AISI 420 martensitic stainless steel. Arabian Journal for Science and Engineering, 43, 4863–4870.
- [8] Binali, R., Coşkun, M. ve Neşeli, S. (2022). An Investigation of Power Consumption in Milling AISI P20 Plastic Mold Steel by Finite Elements Method. Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, 34, 513–518.
- [9] Gupta, M.K., Korkmaz, M.E., Sarıkaya, M., Krolczyk, G.M. and Günay, M. (2022). In-process detection of cutting forces and cutting temperature signals in cryogenic assisted turning of titanium alloys: An analytical approach and experimental study. Mechanical Systems and Signal Processing, 169, 108772.
- [10] Kara, F., Aslantas, K. and Çiçek, A. (2016). Prediction of cutting temperature in orthogonal machining of AISI316L using artificial neural network. Applied Soft Computing, 38, 64–74.
- [11] Korkmaz, M.E., Çakıroğlu, R., Yaşar, N., Özmen, R. ve Günay, M. (2019). Al2014 Alüminyum alaşımının delinmesinde itme kuvvetinin sonlu elemanlar yöntemi ile analizi. El-Cezerî Fen ve Mühendislik Dergisi, 6(1), 193–199.
- [12] Aydın, M. and Köklü, U. (2020). Analysis of flat-end milling forces considering chip formation process in high-speed cutting of Ti6Al4V titanium alloy. Simulation Modelling Practice and Theory, 100, 102039.
- [13] Calamaz, M., Coupard, D. and Girot F. (2010). Numerical simulation of titanium alloy dry machining with a strain softening constitutive law. Machining Science and Technology, 14 (2), 244–257.

- [14] Yaşar, N., Yurtkuran H. ve Günay M. (2018). Sertleştirilmiş X40CrMoV5-1 Çeliğinin Tornalanmasında Kesme Kuvvetinin Deneysel ve Nümerik Olarak İncelenmesi. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, Part C: Tasarım ve Teknoloji, 6(4), 765–773.
- [15] Aydın, M. (2016). Dik kesme işleminde kalıcı gerilmelerin sonlu elemanlar yöntemiyle modellenmesi. Politeknik Dergisi, 19(3), 297–304.
- [16] Aydın, M. and Köklü, U. (2018). A study of ball-end milling forces by finite element model with Lagrangian boundary of orthogonal cutting operation. Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 33(2), 517–527.
- [17] Aydın, M. (2022). Titanyum alaşımının yüksek-hızlı işleme süreci: Kapsamlı sonlu eleman modelleme. Politeknik Dergisi, 25(2), 813–826.
- [18] Aydın, M. and Köklü, U. (2017). Identification and modeling of cutting forces in ball-end milling based on two different finite element models with Arbitrary Lagrangian Eulerian technique. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 92, 1465–1480.
- [19] Aydın, M. (2017). Prediction of cutting speed interval of diamond-coated tools with residual stress. Materials and Manufacturing Processes, 32, 145–150.
- [20] Arrazola, P.J., Villar, A., Ugarte, D. and Marya, S. (2007). Serrated chip prediction in finite element modeling of the chip formation process. Machining Science and Technology, 11, 367–390.
- [21] Ducobu, F., Rivière-Lorphèvre, E. and Filippi, E. (2017). Finite element modelling of 3D orthogonal cutting experimental tests with the Coupled Eulerian-Lagrangian (CEL) formulation. Finite Elements in Analysis and Design, 134, 27–40.
- [22] Zhuang, K., Zhou, S., Zou, L., Lin, L., Liu, Y., Weng, J. and Gao, J. (2022). Numerical investigation of sequential cuts residual stress considering tool edge radius in machining of AISI 304 stainless steel. Simulation Modelling Practice and Theory, 118, 102525.
- [23] Chen, G., Ren, C.Z., Yang, X.Y., Jin, X.M. and Guo, T. (2011). Finite element simulation of high-speed machining of titanium alloy (Ti-6Al-4V) based on ductile failure model. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 56(9-12), 1027–1038.
- [24] Zorev, N.N. (1963). Inter-relationship between shear processes occurring along tool face and shear plane in metal cutting. International Research in Production Engineering, 42–49.
- [25] Calamaz, M., Coupard, D. and Girod, F. (2008). A new material model for 2D numerical simulation of serrated chip formation when machining titanium alloy Ti-6Al-4V. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 48, 275–288.
- [26] Zhang, Y.C., Mabrouki, T., Nelias, D. and Gong, Y.D. (2011). Chip formation in orthogonal cutting considering interface limiting shear stress and damage evolution based on fracture energy approach. Finite Elements in Analysis and Design, 47, 850–863.
- [27] Thepsonthi, T. and Özel, T. (2015). 3-D finite element process simulation of micro-end milling Ti-6Al-4V titanium alloy: experimental validations on chip flow and tool wear. Journal of Materials Processing Technology, 221, 128–145.
- [28] Johnson, G.R. and Cook, W.H. (1983). A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures. In: Proceedings of the seventh international symposium on ballistics, The Hague, Netherlands, 541–547.
- [29] Johnson, G.R. and Holmquist, T.J. (1989). Test data and computational strengthen and fracture model constants for materials subjected to large strain, high-strain rates, and high temperatures, LA-11463-MS, Los Alamos National laboratory.
- [30] Wang, B. and Zhanqiang, L. (2014). Investigations on the chip formation mechanism and shear localization sensitivity of high-speed machining Ti6Al4V. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 75, 1065–1076.
- [31] Hillerborg, A., Modéer, M. and Petersson, PE. (1976). Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements. Cement and Concrete Research, 6, 773–781.
- [32] Chen, G., Ren, C., Zhang, P., Cui, K. and Li, Y. (2013). Measurement and finite element simulation of micro-cutting temperatures of tool tip and workpiece. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 75, 16–26.
- [33] Vyas, A. and Shaw, M.C. (1999). Mechanics of saw-tooth chip formation in metal cutting. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 121, 163–172.

Examination of Urban Transformation Implementation Legislation: Elazığ Example

Belkis ELYIGIT^{1*}  Cevdet Emin EKINCI² 

¹Firat University, Graduate School of Natural and Applied Sciences, Elazığ, Türkiye

²Firat University, Faculty of Technology, Department of Civil Engineering, Elazığ, Türkiye

Article Info

Research article
Received: 18/05/2023
Revision: 17/12/2023
Accepted: 25/03/2024

Keywords

Urban Transformation
Urban Transformation
Models
Legislation
Urbanization
Elazığ

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 18/05/2023
Düzeltilme: 17/12/2023
Kabul: 25/03/2024

Anahtar Kelimeler

Kentsel Dönüşüm
Kentsel Dönüşüm Modelleri
Mevzuat
Kentleşme
Elazığ

Graphical/Tabular Abstract (Grafik Özet)

In this study, it was aimed to examine and reveal the general results of the models applied in urban transformation works in Elazığ province after the 6.8 Mw Sivrice earthquake on January 24, 2020. In addition, a general evaluation of the legislations implemented in the urban transformation process were made and suggestions were made. / Bu çalışmada 24 Ocak 2020 yılında 6.8 Mw büyüklüğündeki Sivrice depremi sonrası Elazığ ilindeki kentsel dönüşüm çalışmalarında uygulanan modellerin genel sonuçlarının incelenmesi ve ortaya konulması amaçlanmıştır. Ayrıca kentsel dönüşüm sürecinde uygulanan mevzuatların genel değerlendirilmesi yapılmış ve önerilerde bulunulmuştur.

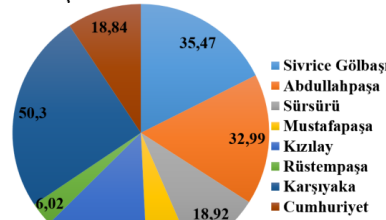


Figure A : Project Area Distribution of Neighborhoods (ha) / Şekil A: Mahallelerin Proje Alan Dağılımı (ha)

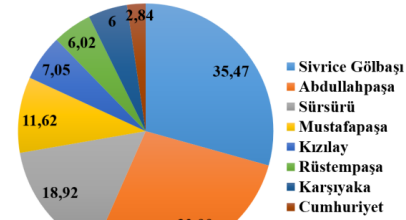


Figure B. Distribution of Application Area of Neighborhoods (ha) / Şekil B: Mahallelerin Uygulama Alan Dağılımı (ha)

Highlights (Önemli noktalar)

- Examining the legislation applied in the urban transformation process. / Kentsel dönüşüm sürecinde uygulanan mevzuatların incelenmesi.
- Examining the models applied in public urban transformation projects. / Kamusal kentsel dönüşüm projelerinde uygulanan modellerin incelenmesi.
- Evaluation of after earthquake urban transformation practices and process. / Deprem sonrası kentsel dönüşüm uygulamaları ve sürecinin değerlendirilmesi.

Aim (Amaç): In this study, it was aimed to examine and reveal the general results of the models applied in urban transformation works in Elazığ province after the 6.8 Mw Sivrice earthquake on January 24, 2020. / Bu çalışmada 24 Ocak 2020 yılında 6.8 Mw büyüklüğündeki Sivrice depremi sonrası Elazığ ilindeki kentsel dönüşüm çalışmalarında uygulanan modellerin genel sonuçlarının incelenmesi ve ortaya konulması amaçlanmıştır.

Originality (Özgünlük): Comparative analysis results of models and legislation affecting the success of urban transformation and making recommendations for future transformation practices. / Kentsel dönüşümün başarısını etkileyen model ve mevzuatların karşılaştırmalı analiz sonuçları ve gelecekte yapılacak dönüşüm uygulamalarına önerilerde bulunulması.

Results (Bulgular): Comparative analysis results of models and legislation affecting the success of urban transformation. / Kentsel dönüşümün başarısını etkileyen model ve mevzuatların karşılaştırılması analiz sonuçları.

Conclusion (Sonuç): The model to be chosen in the urban transformation process is an important parameter in the success of the application and reaching the desired goal. In choosing these parameters, choices should be made by examining each city individually. Because the places within the scope of transformation have their cultural characteristics, economic conditions, and natural disaster risk situations. For this reason, the model to be chosen should be selected and implemented by considering these features. / Kentsel dönüşüm sürecinde seçilecek model, uygulamanın başarısını ve istenen hedefe ulaşmasında önemli parametredir. Bu parametrelerin seçiminde özellikle her kenti kendi özelinde inceleyerek tercihler yapılmalıdır. Çünkü dönüşüm kapsamındaki yerlerin kendine özgü kültürel özellikleri, ekonomik şartları ve doğal afet risk durumları bulunmaktadır. Bu nedenle seçilecek model bu özellikler dikkate alınarak seçilmeli ve uygulamalar yapılmalıdır.



Examination of Urban Transformation Implementation Legislation: Elazığ Example

Belkis ELYIGIT^{1*} Cevdet Emin EKINCI²

¹Firat University, Graduate School of Natural and Applied Sciences, Elazığ, Türkiye

²Firat University, Faculty of Technology, Department of Civil Engineering, Elazığ, Türkiye

Article Info

Research article
Received: 18/05/2023
Revision: 17/12/2023
Accepted: 25/03/2024

Keywords

Urban Transformation
Urban Transformation
Models
Legislation
Urbanization
Elazığ

Abstract

In this study, it was aimed to examine and reveal the general results of the models applied in urban transformation works in Elazığ province after the 6.8 Mw Sivrice earthquake on January 24, 2020. The population of the research, Elazığ province sample, is Karşıyaka, Cumhuriyet, Abdullahpaşa, Mustafapaşa, Rüstempaşa, Sürsürü, Kızılay and Sivrice Country Gölbaşı Neighborhoods. The study is qualitative research in the form of a field study in terms of revealing the results of urban transformation implementation at the sample points. In this context, observation technique, interview technique, and documentary scanning technique were used in the descriptive analysis. General physical-structural characteristics of buildings in the observation technique; in the interview technique, 100 building owners and users' opinions about the buildings; in the documentary scanning technique, the reflections of literature information in practice are interpreted as a whole. In comparing the literature information, project technical documents obtained from the Ministry of Environment, Urbanization and Climate Change and Elazığ Municipality were used. As a result, the model to be chosen in the urban transformation process is an important parameter in the success of the application and reaching the desired goal. More qualified urban transformation applications will be achieved by reducing the problems that arise in public transformation projects, especially in determining the legislation, and by choosing the appropriate model for comprehensive transformation.

Kentsel Dönüşüm Uygulama Mevzuatlarının İncelenmesi: Elazığ Örneği

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 18/05/2023
Düzeltilme: 17/12/2023
Kabul: 25/03/2024

Anahtar Kelimeler

Kentsel Dönüşüm
Kentsel Dönüşüm Modelleri
Mevzuat
Kentleşme
Elazığ

Öz

Bu çalışmada 24 Ocak 2020 yılında 6.8 Mw büyüklüğündeki Sivrice depremi sonrası Elazığ ilindeki kentsel dönüşüm çalışmalarında uygulanan modellerin genel sonuçlarının incelenmesi ve ortaya konulması amaçlanmıştır. Araştırmanın evreni Elazığ ili örnekleme ise Karşıyaka, Cumhuriyet, Abdullahpaşa, Mustafapaşa, Rüstempaşa, Sürsürü, Kızılay ve Sivrice İlçesi Gölbaşı mahalleleridir. Çalışma, örneklem noktalarındaki kentsel dönüşüm uygulama sonuçlarının ortaya konulması bakımından, alan incelemesi niteliğinde bir nitel araştırmadır. Bu bağlamda betimsel incelemede gözlem yapma tekniği, mülakat tekniği ve belgesel tarama tekniği kullanılmıştır. Gözlem yapma tekniğinde binaların genel fiziki-yapısal özellikleri; mülakat tekniğinde 100 bina hak sahibi ve kullanıcıların binalar hakkındaki görüşleri; belgesel tarama tekniğinde ise literatür bilgilerin uygulamalardaki yansımaları bir bütün dahilinde yorumlanmıştır. Literatür bilgilerinin karşılaştırılmasında ise Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı ve Elazığ Belediyesi'nden temin edilmiş olan proje teknik dokümanlarından yararlanılmıştır. Sonuç olarak, kentsel dönüşüm sürecinde seçilecek model, uygulamanın başarısı ve istenen hedefe ulaşmasında önemli parametredir. Kamusal dönüşüm projelerinde özellikle mevzuatların belirlenmesinde ortaya çıkan sorunların azaltılması ve kapsamlı dönüşümünde uygun model seçimi ile daha nitelikli kentsel dönüşüm uygulamaları elde edilmiş olacaktır.

1. INTRODUCTION (GİRİŞ)

Cities are transformed due to reasons such as industrialization and migration specific to the urban development process, as well as natural disasters, human-induced positive or negative actions, and

war. This transformation often destroys urban areas. In this context, areas subject to urban transformation are areas that have become obsolete or are outside the zoning plan [1]. In addition, areas in need of urban transformation may arise as a result of natural

disasters such as earthquakes, floods, and fires; urban transformation practices are carried out to eliminate the deterioration that occurs after a natural disaster or to minimize the damage that may occur before a natural disaster [2]. After the building demolitions and loss of life in the Düzce and Gölcük earthquakes in 1999, the issue of urban transformation came to the fore and became one of the most discussed topics. After this date, urban transformation projects began to be developed and implemented to minimize natural disaster risks, transforming unplanned urbanization areas and building safe structures against a possible natural disaster again [3]. Urban transformation practices carried out in the area after the earthquake that occurred in Düzce in 1999 can be given as an example of these applications. It is seen that the first application example of urban transformation in Elazığ started in Süsrü neighborhood in 2013. After the Sivrice earthquake in 2020, priority was given to urban transformation in the city, and approximately 80% of the buildings were transformed and renewed at many points until 2023. In this context, the 6 February 2023 Pazarcık and Elbistan earthquakes were prevented from encountering more severe consequences as a result of the renewal of the building stock in Elazığ province with the transformation works. The urban transformation models that have been and are being implemented in our country do not have similar qualities. There is diversity in terms of transformation techniques, application models, and economic and social dimensions. This diversity among urban transformation models is related to clear indicators of what causes the problem, the types of policies adopted to solve the problem, the aims and level of the intervention to be implemented, and the field of application of the model. Many models have been implemented in urban transformation projects in our country, especially through the public sector. These models are: Between 1950 and 2004, models aimed only at meeting the housing needs of the public and sheltering, the application model within the framework of Law No. 5104, the urban transformation and development project area application model with the 73rd article of the Municipality Law No. 5393, and the conservation area within the scope of Law No. 5366 were declared. renewal area application model in areas where there is a risk, risky area, and reserve building area application model with Law No. 6306, and TOKİ model [4]. Since the urban transformation process is multidimensional, separate model suggestions have been made for each dimension. Şahin [5] considers the urban transformation process as a continuity starting from the definition

of constitutional rights and ending with the planning of daily life and evaluation of environmental impacts. Gün, Pak, and Demir [6] critically mapped and discussed urban transformation processes in Istanbul by following how transformation practices took place on the ground and taking into account the different perspectives of stakeholder groups. Kandaloğlu [7] developed a feasible distribution model proposal by examining the problems regarding the sharing of rent arising from urban transformation practices and the legal dimension of the practices in our country. Yıldız, Kıvrak, and Arslan [8] surveyed 323 participants experienced in the field of urban transformation and evaluated the determination of possible built environment design elements that can be applied in urban renewal projects using factor analysis. Körlü [9] argued that urban transformation practices that do not cover the entire area and do not ensure sustainability and pluralistic participation will be insufficient in the process. Covelli [10] argues that mixed land use is a factor that affects the level of transportation-oriented development of the urban area. In this context, the main purpose of the mixed land use principle is defined as more vibrant, interconnected, and sustainable urban textures. Settlements with a high percentage of mixed land use argue that they provide citizens with sufficient services within walking distance and reduce car dependency. Zinoski and Dimitrievski [11] defined the urban transformation process as a multi-stakeholder process. They argue that citizens should be included in decision-making processes regarding the renewal of their neighborhoods, especially since they pay taxes into the state budget. Chang, Yoshida, Castro-Lacouture, and Yamagata [12] state in their studies that buildings in cities consume high amounts of energy to provide physical comfort, and that some environmental problems arise due to the increasing energy need. In this regard, they proposed a building transformation strategy for energy efficiency and thermal comfort by using a Bayesian multilevel modeling approach to ensure the energy efficiency of buildings and meet the increasing energy demand. Sabeeh Lafta and his colleagues [13] argue that to preserve urban identities and keep cultural heritage alive, it is necessary to raise public awareness of urban transformation practices and the restoration of historical buildings should be carried out within the framework of legislation and by the technique. Wheeler and Beatley [14] evaluated the concept of sustainable urban development from various dimensions. Among the topics discussed in the evaluation of these dimensions: are transportation, land use, social and environmental justice, urban design, restoration, economic development, energy and material use, ecological

planning, and green architecture. Dalla Longa [15] argues that urban transformation model selection focuses on the relationship between the state and the market, especially in metropolitan cities. Lehmann [16] argues that the urban transformation process is still an ongoing problem in industrially developed countries. Wolfram [17] argues that urban design will be more effective and efficient in experimentally restructuring social-ecological-technological systems to eliminate dominant development paradigms in sustainable urban transformation.

In this study, it was aimed to examine and reveal the general results of the models applied in urban transformation works in Elazığ province after the 6.8 Mw Sivrice earthquake on January 24, 2020. The model to be chosen in the urban transformation process is an important parameter in the success of the application and reaching the desired goal. More qualified urban transformation applications will be achieved by reducing the problems that arise in public transformation projects, especially in determining the legislation, and by choosing the appropriate model for comprehensive transformation.

2. MATERIALS AND METHODS (MATERİYAL VE METOD)

The population of the research is Elazığ province, and the sample is Karşıyaka, Cumhuriyet, Abdullahpaşa, Mustafapaşa, Rüstempaşa, Sürsürü, Kızılay and Sivrice Country Gölbaşı Neighborhood (Figure 1). The study is qualitative research in the form of a field study in terms of revealing the results of urban transformation implementation at the sample points. In this context, a general examination of the urban transformation studies implemented in risky areas in Elazığ province was made with a descriptive approach. In the descriptive analysis, observation technique, interview technique, and documentary scanning technique were used. General physical-structural characteristics of buildings in the observation technique; Opinions of 100 building rights holders and users regarding the buildings through interview technique; In the documentary scanning technique, the practical reflections of literature information are interpreted as a whole. In comparing the literature information, project technical documents obtained from the Ministry of Environment, Urbanization and Climate Change and Elazığ Municipality were used.

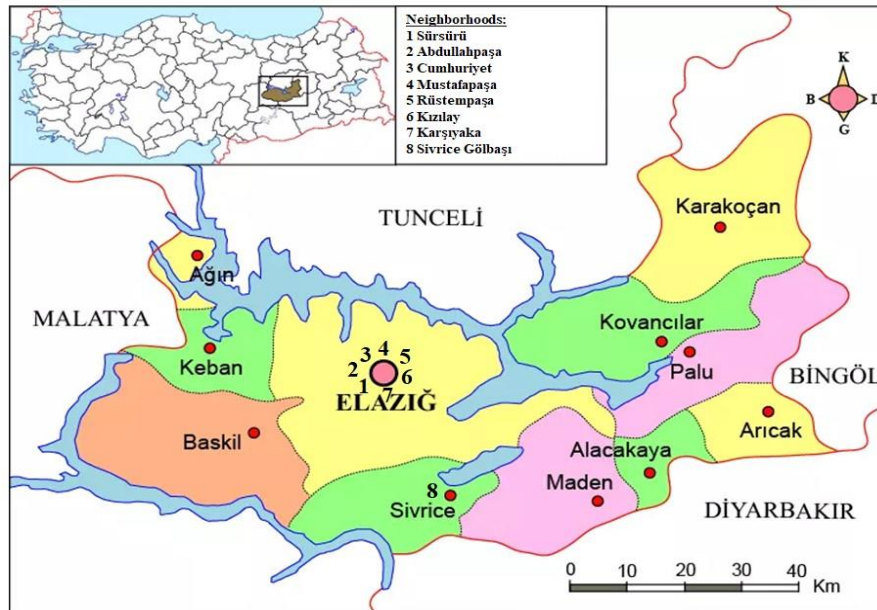


Figure 1. Distribution of Sampling Points of Implementation Projects on the Elazığ Map (Elazığ Haritası Üzerinde Uygulama Projelerinin Örneklem Noktalarının Dağılımı)

3. RESULTS (BULGULAR)

The 6.8 Mw Sivrice earthquake that occurred in Elazığ on January 24, 2020, caused severe damage to buildings built before 2006. Both unplanned construction and urbanization and the earthquake accelerated the urban transformation process

throughout Elazığ province. Urban transformation practices implemented in Elazığ have been an effective solution, especially in reducing the number of earthquake-resistant buildings and increasing the earthquake-resistant building stock. This result is confirmed by applications at 67 different points throughout the province. According to the damage assessment studies carried out after

the earthquake, it was observed that out of approximately 52000 buildings in the city center, 37400 were undamaged or slightly damaged, 1600 were moderately damaged, 6800 were heavily damaged and 6200 were not damaged [18]. In the field research, the project area distribution information of the neighborhoods is given in Figure 1 and the application area distribution information is given in Figure 2. It is seen that the values of the area on a hectare basis and the application hectare areas where urban transformation projects are declared in Abdullahpaşa, Mustafapaşa,

Rüstempaşa, Sürsürü, and Sivrice Country Gölbaşı Neighborhood are the same. While the area of Karşıyaka neighborhood declared as an urban transformation project is 50.3 hectares, the implementation area is 6 hectares. The area declared in the urban transformation project in Kızılay neighborhood is 26.96 hectares and the application area is 7.05 hectares. While the urban transformation project declared the area of the Cumhuriyet neighborhood is 18.8 hectares, the implementation area is 2.84 hectares.

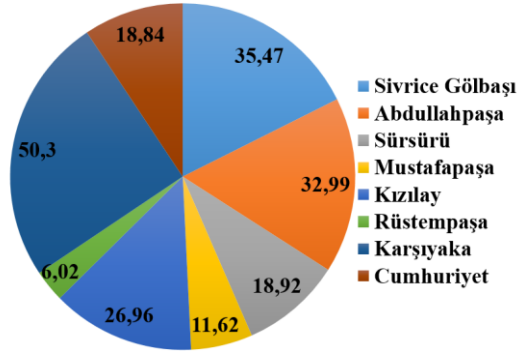


Figure 1. Project Area Distribution of Neighborhoods (ha) (Mahallelerin Proje Alan Dağılımı (ha))

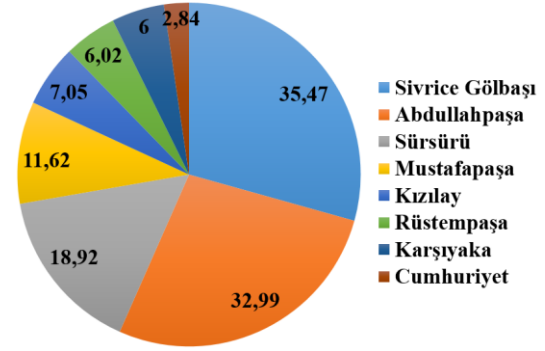


Figure 2. Distribution of Application Area of Neighborhoods (ha) (Mahallelerin Uygulama Alan Dağılımı (ha))

Satellite images of urban transformation projects implemented at the neighborhood scale are given in Figure 3. The master development plans of the urban transformation projects implemented at the neighborhood scale are presented in Figure 4.

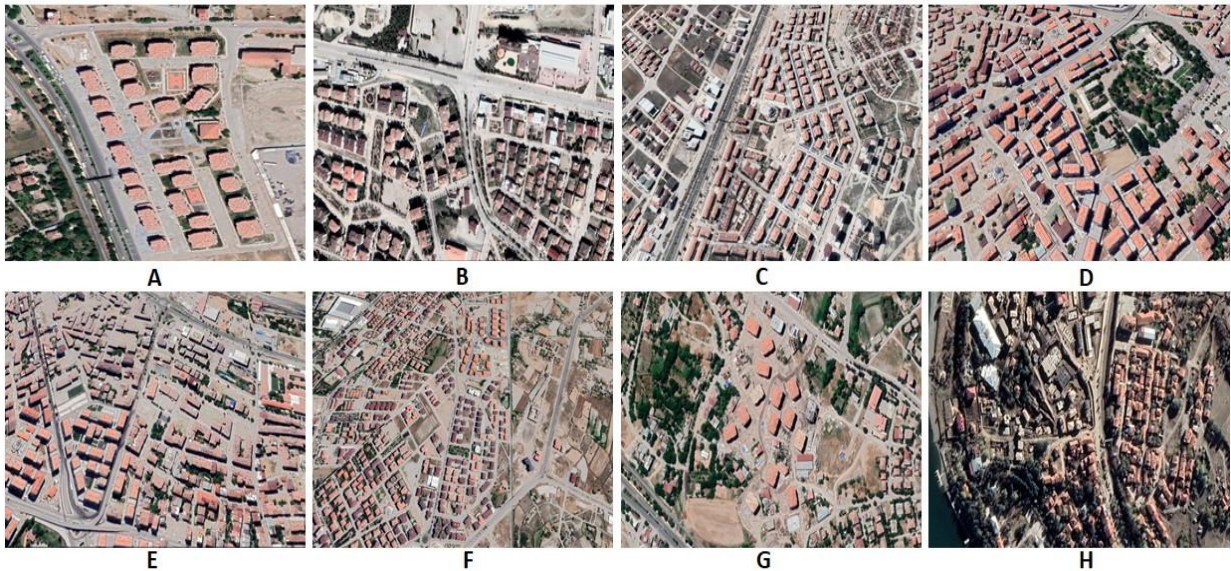


Figure 3. (A) Karşıyaka Neighborhood Satellite Image, (B) Cumhuriyet Neighborhood Satellite Image, (C) Abdullahpaşa Neighborhood Satellite Image, (D) Mustafapaşa Neighborhood Satellite Image, (E) Rüstempaşa Neighborhood Satellite Image, (F) Sürsürü Neighborhood Satellite Image, (G) Kızılay Neighborhood Satellite Image, (H) Sivrice Gölbaşı Neighborhood Satellite Image [19] ((A) Karşıyaka Mahallesi Uydu Görüntüsü, (B) Cumhuriyet Mahallesi Uydu Görüntüsü, (C) Abdullahpaşa Mahallesi Uydu Görüntüsü, (D) Mustafapaşa Mahallesi Uydu Görüntüsü, (E) Rüstempaşa Mahallesi Uydu Görüntüsü, (F) Sürsürü Mahallesi Uydu Görüntüsü, (G) Kızılay Mahallesi Uydu Görüntüsü, (H) Sivrice Gölbaşı Mahallesi Uydu Görüntüsü)

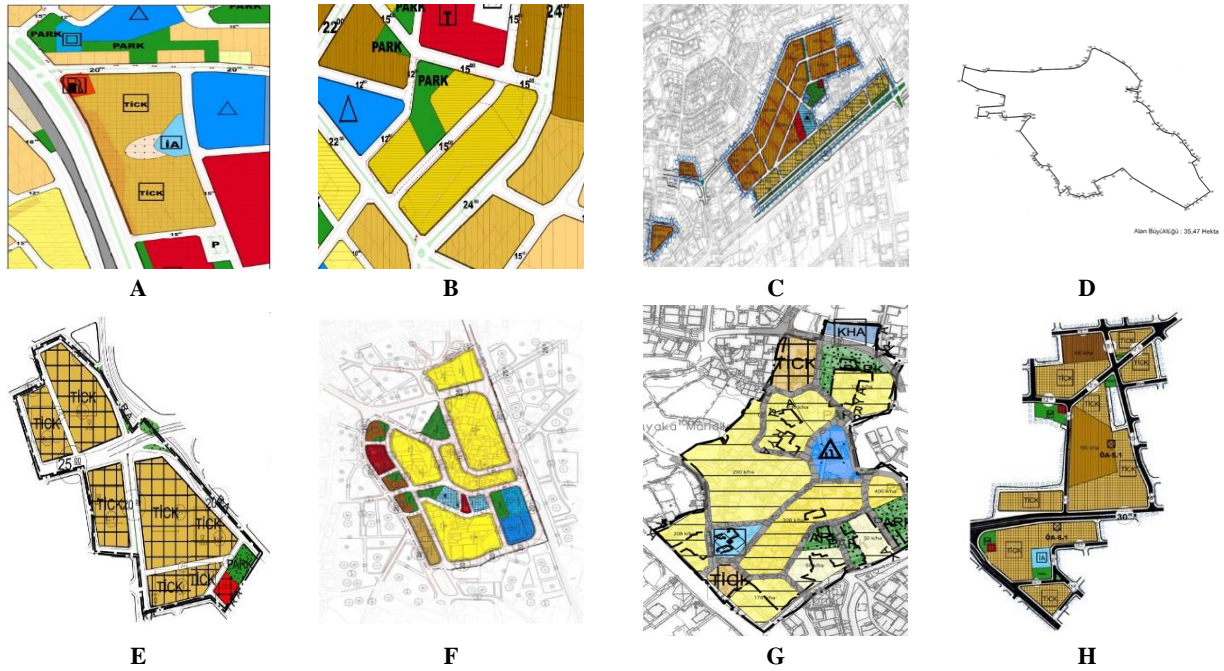


Figure 4. (A) Karşıyaka Neighborhood Master Development Plan, (B) Cumhuriyet Neighborhood Master Development Plan, (C) Abdullahpaşa Neighborhood Master Development Plan, (D) Sivrice Gölbaşı Neighborhood Boundary Sketch Plan, (E) Rüstempaşa Neighborhood Master Development Plan, (F) Sürsürü Neighborhood Master Development Plan, (G) Kızılay Neighborhood Master Development Plan, (H) Mustafapaşa Neighborhood Master Development Plan (Ministry of Environment, Urbanization and Climate Change, 2022; Elazığ Municipality, 2022) [20, 21] ((A) Karşıyaka Mahallesi Nazım İmar Planı, (B) Cumhuriyet Mahallesi Nazım İmar Planı, (C) Abdullahpaşa Mahallesi Nazım İmar Planı, (D) Sivrice Gölbaşı Mahallesi Sınır Krokisi Planı, (E) Rüstempaşa Mahallesi Nazım İmar Planı, (F) Sürsürü Mahallesi Nazım İmar Planı, (G) Kızılay Mahallesi Nazım İmar Planı, (H) Mustafapaşa Mahallesi Nazım İmar Planı (Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, 2022; Elazığ Belediyesi, 2022))

The project implementation in Karşıyaka Neighborhood was carried out between 2014 and 2020. The legislations implemented in the field are Law No. 5393 and Law No. 6306. Models applied in the field; urban transformation and development project area model, reserve building area model, and TOKİ models. The project implementation in the Cumhuriyet Neighborhood was carried out between 2014 and 2020. The legislations implemented in the field are Law No. 5393 and Law No. 6306. Models applied in the field; urban transformation and development project area model, renewal area model, risky area model, reserve building area model, risky building model, and TOKİ model. The project implementation in the Abdullahpaşa Neighborhood was carried out between 2020 and 2022. The legislation implemented in the field is Law No. 7269 and Law No. 6306. Models applied in the field; risky area model, risky building model, and TOKİ model. The project implementation in the Mustafapaşa Neighborhood was carried out between 2020 and 2022. The legislation implemented in the field was Law No. 6306. Models applied in the field; risky area model, risky building model, TOKİ, and AFAD model.

The project implementation in the Rüstempaşa Neighborhood was carried out between 2020 and 2022. The legislation implemented in the field is Law No. 7269 and Law No. 6306. Models applied in the field; risky area model, risky building model, TOKİ, and AFAD model. The project implementation in the Sürsürü Neighborhood was carried out as Stage 1 and Stage 2 between 2020 and 2022. The legislation implemented in the field was Law No. 6306. Models applied in the field; risky area model, risky building model, and TOKİ model. The project implementation in the Kızılay Neighborhood was carried out between 2015 and 2022. The legislation implemented in the field is Law No. 5393 and Law No. 6306. Models applied in the field; urban transformation and development project area model, renewal area model, risky area model, reserve building area model, and risky building model. The project implementation in the Sivrice Country Gölbaşı Neighborhood was carried out between 2020 and 2022. The legislation implemented in the field was Law No. 6306. Models applied in the field; renewal area model, risky area model, risky building model, and TOKİ model (Table 1 and Table 2).

Table 1. Project Information [20, 21] (Peoje bilgileri)

Neighbourhoods	Project Implementation Date Range	Applied Laws	Project Area (ha)	Application Area (ha)	Applied Model
Karşıyaka	2014-2020	5393 and 6306	50.30	6.00	UTDPAM, RBAM, TOKİ
Cumhuriyet	2014-2020	5393 and 6306	18.84	2.84	UTDPAM, RAM, RBAM, RBM, TOKİ
Abdullahpaşa	2020-2022	6306	32.99	32.99	RAM, RBM, TOKİ
Mustafapaşa	2020-2022	6306 and 7269	11.62	11.62	RAM, RBM, TOKİ, AFAD
Rüstempaşa	2020-2022	6306 and 7269	6.02	6.02	RAM, RBM, TOKİ, AFAD
Sürsürü	2013-2022	6306	18.92	18.92	RAM, RBM, TOKİ
Kızılay	2015-2022	5393 and 6306	26.96	7.05	UTDPAM, RAM, RBAM, RBM, TOKİ
Sivrice Gölbaşı	2020-2022	6306	35.47	35.47	RAM, RBM, TOKİ
AFAD : AFAD Model TOKİ : TOKİ Model RAM : Risky Area Model RBAM : Reserve Building Area Model RBM : Risky Building Model UTDPAM : Urban Transformation and Development Project Area Model 5393 : Municipal Law [22] 6306 : Law on Transformation of Areas Under Disaster Risk [23] 7269 : Law on Measures to be Taken and Assistance to be Provided Due to Disasters Affecting Public Life [24]					

Table 2. Comparison of Application Models (Uygulama modellerinin karşılaştırılması)

Neighbourhoods	Urban Transformation and Development Project Area Model	Regeneration Area Model	Risky Area Model	Reserve Building Area Model	Risky Building Model	TOKİ Model	AFAD Model
Karşıyaka	+			+		+	
Cumhuriyet	+	+	+	+	+	+	
Abdullahpaşa			+		+	+	
Mustafapaşa			+		+	+	+
Rüstempaşa			+		+	+	+
Sürsürü			+		+	+	
Kızılay	+	+	+	+	+		
Sivrice Gölbaşı		+	+		+	+	

4. CONCLUSIONS (SONUÇLAR)

In Elazığ, the urban transformation process started with Sürsürü District in 2013, and the transformation works of Karşıyaka, Cumhuriyet, and Kızılay neighborhoods continued between 2014-2015, and after the Sivrice earthquake in 2020, it was observed that Abdullahpaşa, Rüstempaşa, Mustafapaşa, and Sivrice Country Gölbaşı neighborhood were also included in the transformation works. During this entire process, the 6.8 Mw earthquake that occurred in Sivrice in 2020 seriously brought urban transformation projects to the agenda and accelerated the projects. It has been observed that urban transformation

models progress slowly through the urban transformation and development project area model and risky area model, but after the earthquake, transformation works accelerate and the risky building model is also included in the process due to the earthquake. In addition, it was seen that the province was not ready for the earthquake and its consequences, and this situation also affected the choice of model in urban transformation applications. Some of the situations resulting from the reflections of these effects in the field are summarized below;

- Urban transformation and development project area model, risky building model, and TOKİ

- model were implemented in the Karşıyaka Neighborhood with Municipality Law No. 5393.
- The Cumhuriyet Neighborhood was declared an urban transformation and development project area within the scope of Municipality Law No. 5393 in 2014, but after the earthquake in 2020, the area was also declared as a disaster risk area. In addition, the buildings in the area have been declared as risky buildings due to the structures damaged after the earthquake. It has been observed that the urban transformation and development project area model, renewal area model, risky area model, reserve building area model, risky building model, and TOKİ model are applied in the Cumhuriyet neighborhood. Since there was no on-site transformation in the reserve building area model, it appeared as a model that did not meet the definition of urban transformation.
 - The Abdullahpaşa Neighborhood was declared a Risky Area by Law No. 6306. The risky area model, risky building model, and TOKİ model have been applied in the area. It was observed that 63 beneficiaries in Sivrice district were settled in buildings built in this area.
 - The Mustafapaşa Neighborhood was declared a Risky Area by Law No. 6306. It was also implemented in the field under Law No. 7269. The risky area model, risky building model, TOKİ, and AFAD model have been applied in the area.
 - The Rüstempaşa Neighborhood was declared a risky area by Law No. 6306. It was also implemented in the field under Law No. 7269. The risky area model, risky building model, TOKİ model, and AFAD model have been applied in the area.
 - The 2nd Stage in the Sürsürü Neighborhood was declared a risky area in 2013 and the risky area model and TOKİ model were applied in the area, after the earthquake, it was seen that the risky building model was added to these two model applications. In the 1st stage, after the earthquake in 2020, the risky area, risky building model, and TOKİ model were applied. In addition, as can be seen from the 2nd Stage studies, the process of completing the risky area model, which started in 2013, in 2022, which is the maximum period of nine years and one month specified in Annex 7 of the strategy document, has almost been completed.
 - Urban transformation and development project area model and risky area model were applied in the Kızılay Neighborhood in 2015. As a result of not being able to reach an agreement with some rights holders in the area, the reserve building area model, the risky building model after the earthquake, and the renovation area model were also included in the process due to the church dating back to the Roman period that came to light during the transformation works in the area.
 - The Sivrice Country Gölbaşı Neighborhood has been declared a risky area within the scope of Law No. 6306. The risky area model, risky building model, and TOKİ model have been applied in the area. In addition, the area was declared a Natural Site - Sustainable protection and controlled use area in 2021.

As a result, the model to be chosen in the urban transformation process is an important parameter in the success of the application and reaching the desired goal. In choosing these parameters, choices should be made by examining each city individually. Because the places within the scope of transformation have their cultural characteristics, economic conditions, and natural disaster risk situations. For this reason, the model to be chosen should be selected and implemented by considering these features. In urban transformation projects, general principles can be determined at the upper scale, but it will be useful to determine a model specific to each region as sub-applications progress.

The relocation of the beneficiaries in the transformation areas to other places outside the area has caused households to experience adaptation problems, especially in new settlements. It can be said that most of the transformation application models are determined within the framework of existing legislation. The application of more than one legislation to transformation areas and the overlapping of models have led to the emergence of new problems. During the urban transformation process, the implementation of both the Law No. 6306 on the Transformation of Areas at Disaster Risk and the Law No. 7269 on Measures to be Taken and Assistance to be Provided Due to Disasters Affecting Public Life during the urban transformation process for houses that were demolished after a natural disaster, to be demolished immediately, heavily damaged and moderately damaged, and the decisions taken are reflected on the field. It negatively affected the conflict of legislation and the progress of the process. It can be said that this situation prevents a healthy

transformation from occurring. The fact that the risky building model application is only briefly defined in Law No. 6306, but the way the model is implemented is not clearly explained in the law, has caused a lot of confusion. It would be useful to specify the risky building model more clearly to avoid such problems in future urban transformation works. It will be useful to implement strategic social planning based on the concept of adoption in preventing problems in terms of the social dimension of urban transformation, such as incompatibility in new neighborhood relations of rights holders.

It would be useful to develop new solution proposals with serious and consistent approaches to draw clear boundaries of the legislation to be applied in urban transformation areas and to avoid conflict with other legislation. In addition, more careful preparation and implementation of application transformation models in areas with Natural Protected Areas such as the Sivrice Gölbaşı neighborhood, which become risky areas after a natural disaster, will be beneficial for both the protection of the natural habitat and the sustainability of the environmental ecosystem.

ACKNOWLEDGMENTS (TEŞEKKÜR)

This study is derived from the Doctoral Thesis titled "Bioharmological Investigation of the Engineering Properties of Urban Transformation Buildings Constructed in Risky Areas: Elazığ City Center Sample" conducted by B.Elyiğit under the academic supervision of C.E.Ekinci. Additionally, it was supported within the scope of project number FÜBAP TEKF.23.55.

DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS (ETİK STANDARTLARIN BEYANI)

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

AUTHORS' CONTRIBUTIONS (YAZARLARIN KATKILARI)

Belkıs ELYİĞİT: She collected the data of the study, analyzed the results and wrote the article.

Cevdet Emin EKİNCİ: He analyzed the data of the study, interpreted the results and wrote the article.

CONFLICT OF INTEREST (ÇIKAR ÇATIŞMASI)



There is no conflict of interest in this study.

REFERENCES (KAYNAKLAR)

- [1] Damgacı T. Kentsel Dönüşüm Projeleri ve Kamu Yararı: Meram Belediyesi Kentsel Dönüşüm Projeleri. Üçüncü Sektör Sosyal Ekonomi Dergisi. 2020; 55(4): 2478-2498.
- [2] Aydurmuş B. Kentsel Dönüşüm Alanlarında Uygunluk Analizi: Gümüşhane Örneği. Yüksek Lisans Tezi, Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Gümüşhane, 2017.
- [3] Doğan M. Afet Riski Altındaki Alanların Dönüştürülmesi: Yıldırım Belediyesi Örneği, Dönem Projesi. Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2018.
- [4] Ekinci CE, Elyiğit B. Kentsel Dönüşüm. Ankara: Data Yayınları, Türkiye, 2022.
- [5] Şahin SZ. Türkiye'de Kentsel Dönüşüm İlişkin Alternatif Bir Model Önerisi: Çok Düzlemli Mekânsal Vizyon Dönüşümü. <http://ankaraarsivi.atilim.edu.tr/shares/ankara/files/makaleler/szt.pdf>.
- [6] Gün A, Pak B, Demir Y. Responding to the Urban Transformation Challenges in Turkey: A Participatory Design Model for Istanbul. International Journal of Urban Sustainable Development. 2021; 13(1): 32-55.
- [7] Kandaloğlu N. Kentsel Dönüşüm ve Bir Dağıtım Modeli Önerisi. Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2012.
- [8] Yıldız S, Kıvrak S, Arslan G. Contribution of Built Environment Design Elements to the Sustainability of Urban Renewal Projects: Model Proposal. Journal of Urban Planning and Development. 2019; 145: 1.
- [9] Körlü E. Kentsel Sit Alanlarında Sürdürülebilir Koruma-Geliştirme İçin Bir Model Önerisi: Adana Tepebağ-Kayalıbağ Mevkii. Doktora Tezi, Konya Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Konya, 2020.
- [10] Covelli CI. Transit-Oriented Development as a Tool of Urban Transformation Addressed at Urban Regeneration Processes. Innovating Strategies and Solutions for Urban Performance and Regeneration. 2022; 61-73.
- [11] Zinoski M, Dimitrievski T. Urban transformation of Miroslav Krleza Street, Skopje. Current Aspects of Real Estate Research. 2020; 18-32.
- [12] Chang S, Yoshida T, Castro-Lacouture D, Yamagata Y. Block-Level Building Transformation Strategies for Energy Efficiency, Thermal Comfort, and Visibility Using Bayesian Multilevel Modeling. Journal of Architectural Engineering. 2021; 27: 3.
- [13] Sabeeh Lafta F, Antón García D, Venus Suleiman A, Salah Lafta Z, Khalid Safaa H.

- Factors Influencing the Transformation of Iraqi Holy Cities: The Case of Al-Najaf. *Engineering and Environmental Sciences*. 2021; 30(2): 365–375.
- [14] Wheeler SM. Beatley T. *The Sustainable Urban Development Reader (Third Edition)*. Urban Reader Series, London, Routledge, 2014.
- [15] Dalla Longa R. *Urban Models, In: Urban Models and Public-Private Partnership*. Springer-Verlag, 2011; 7-46.
- [16] Lehmann S. *Introduction: The Complex Process of City Regeneration, Urban Regeneration*. Palgrave Macmillan, Cham, 2019.
- [17] Wolfram M. *Assessing Transformative Capacity for Sustainable Urban Regeneration: A Comparative Study of Three South Korean Cities*. *Ambio (Springer)*. 2019; 48(5): 478–493. doi:10.1007/s13280-018-1111-2.
- [18] Fırat Üniversitesi Yapı ve Beton Uygulama ve Araştırma Merkezi, 24 Ocak 2020 Mw Sivrice Depremi. Elazığ Bölgesi Yapısal Hasarlar İnceleme ve Değerlendirme Raporu. Rapor No: 2020/D001.
- [19] Google Earth. <https://www.google.com.tr/intl/tr/earth/>.
- [20] Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. <https://www.csb.gov.tr/>.
- [21] Elazığ Belediyesi. <https://www.elazig.bel.tr/>.
- [22] 5393 Sayılı Belediye Kanunu. <https://www.mevzuat.gov.tr/mevzuatmetin/1.5.5393.pdf>.
- [23] 6306 Sayılı Afet Riski Altındaki Alanların Dönüştürülmesi Hakkında Kanun. <https://www.mevzuat.gov.tr/mevzuatmetin/1.5.6306.pdf>.
- [24] 7269 Sayılı Umumi Hayata Müessir Afetler Dolayısıyla Alınacak Tedbirlerle Yapılacak Yardımlara Dair Kanun. <https://www.mevzuat.gov.tr/mevzuatmetin/1.3.7269.pdf>.
- [25] Elyiğit B, *Kentsel Dönüşüm Uygulamaları ve Sonuçları: Elazığ Örnekleme*. Doktora Semineri, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, 2022.

Theoretical Analysis of Wireless Communication Systems Assisted by RIS with Power Line Communication

Beren TİDİN¹ , Mehmet BİLİM^{1*} 

¹Nuh Naci Yazgan University, Engineering Faculty, Department of Electrical and Electronics ENgineering, Kayseri, Turkey

Article Info

Research article
Received: 21/02/2024
Revision: 01/04/2024
Accepted: 01/04/2024

Graphical/Tabular Abstract (Grafik Özet)

In this study, a detailed analysis of a wireless communication system model assisted by reconfigurable intelligent surface (RIS) which includes power line communication (PLC) systems is presented. / Bu çalışmada uyarlanabilir akıllı yüzey destekli enerji hattı iletimini içeren bir kablosuz haberleşme sistemini detaylı analizleri sunulmuştur.

Keywords

Power line communication,
Reconfigurable intelligent surfaces,
Error analysis,
Outage analysis

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 21/02/2024
Düzeltilme: 01/04/2024
Kabul: 01/04/2024

Anahtar Kelimeler

Enerji hattı iletimi,
Uyarlanabilir akıllı yüzeyler,
Hata analizi,
Servis-dışı kalma analizi

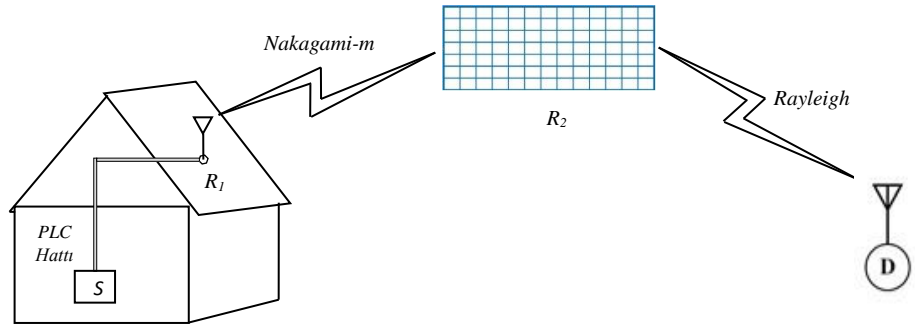


Figure 1: The schematic representation of the system model under consideration / Şekil 1: Ele alınan sistem modelinin şematik gösterimi

Highlights (Önemli noktalar)

- The inter-node transmission links in the system have been considered as Power Line Communications (PLC), Nakagami-m, and Rayleigh. / Sistemdeki düğümler arası iletim hatları PLC, Nakagami-m ve Rayleigh olarak ele alınmıştır.
- A cumulative distribution function (CDF) for the end-to-end instantaneous signal-to-noise ratio (SNR) of the system has been derived. / Sistemin uçtan uca anlık işaret gürlüğü oranına ait birikimli (kümülatif) dağılım fonksiyonu türetilmiştir.
- Furthermore, utilizing the derived CDF, the error probability and outage probability expressions for the investigated system has been derived and theoretically analyzed. / Türetilen CDF'ten faydalanılarak incelenen sistemin hata olasılığı ve servis-dışı kalma olasılığı ifadesi türetilmiş ve kuramsal olarak analizi gerçekleştirilmiştir.

Aim (Amaç): The main objective of this study is to conduct outage probability and error probability analyses of the considered RIS-assisted system containing PLC using a CDF-based approach. / Bu çalışmanın temel amacı, ele alınan PLC içeren RIS destekli sistemin kesinti olasılığı ve hata olasılığı analizlerini bir CDF tabanlı yaklaşım kullanarak yapmaktır.

Originality (Özgünlük): The originality of this study can be emphasized by considering a system with a relay node containing PLC for the first time in the literature, along with an RIS-supported relay node. / Bu çalışmanın özgünlüğü, literatürde ilk kez bir PLC içeren bir röle düğümü ve bir RIS destekli röle düğümünü içeren bir sistem göz önüne alınarak vurgulanabilir.

Results (Bulgular): The results of various scenarios (such as different modulation types, varying numbers of reflective elements, different fading conditions, etc.) were presented using numerical calculations based on the derived outage probability and error probability expressions for the system. / Sistem için elde edilen kesinti olasılığı ve hata olasılığı ifadelerine dayalı olarak, çeşitli senaryoların sonuçları (farklı modülasyon tipleri, değişen yansıtıcı eleman sayıları, farklı zayıflama koşulları vb.) sayısal hesaplamalar kullanılarak sunulmuştur.

Conclusion (Sonuç): The results presented for the considered system model clearly demonstrate that the proposed expressions in this study are consistent with the results of exact simulations and exhibit the expected behaviors. / İncelenen sistem modeli için sunulan sonuçlar, bu çalışmada önerilen ifadelerin tam simülasyon sonuçları ile uyumlu olduğunu ve beklenen davranışları sergilediğini açıkça göstermektedir.



Theoretical Analysis of Wireless Communication Systems Assisted by RIS with Power Line Communication

Beren TİDİN¹ , Mehmet BİLİM^{1*} ¹Nuh Naci Yazgan University, Engineering Faculty, Department of Electrical and Electronics Engineering, Kayseri, Turkey

Article Info

Research article
Received: 21/02/2024
Revision: 01/04/2024
Accepted: 01/04/2024

Keywords

Power line
communication,
Reconfigurable intelligent
surfaces, Error analysis,
Outage analysis

Abstract

This research study presents a detailed analysis of a wireless communication system model assisted by reconfigurable intelligent surface (RIS) which includes power line communication (PLC) systems. The transmission lines between nodes in the system are evaluated as PLC, considering Nakagami-m and Rayleigh channels. The cumulative distribution function (CDF) of the considered system is derived, and outage probability and error probability analyses are presented based on this derived CDF expression. The accuracy of the obtained expressions is demonstrated through comparative exact simulations with various scenarios.

PLC İçeren RIS Destekli Kablosuz İletişim Sistemlerinin Kuramsal Analizi

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 21/02/2024
Düzeltilme: 01/04/2024
Kabul: 01/04/2024

Anahtar Kelimeler

Enerji hattı iletişimi,
Uyarlanabilir akıllı
yüzeyler,
Hata analizi,
Servis-dışı kalma analizi

Öz

Bu araştırma çalışması, enerji hattı iletişim (power line communications, PLC) sistemini içeren uyarlanabilir akıllı yüzey (reconfigurable intelligent surface, RIS) destekli bir kablosuz haberleşme sistem modelinin detaylı analizini sunmaktadır. Çalışmada ele alınan sistemde düğümler arası iletim hatları PLC, Nakagami-m ve Rayleigh olarak değerlendirilmektedir. Sisteme ait kümülatif dağılım fonksiyonun (cumulative distribution function, CDF) türetilmektedir. Türetilen bu CDF ifadesinden yararlanılarak servis-dışı kalma olasılığı ve hata olasılığı analizleri sunulmaktadır. Yapılan analizler sonucunda elde edilen ifadelerin doğruluğu farklı senaryolarla birlikte tam simülasyonlarla kıyaslamalı olarak gösterilmektedir.

1. INTRODUCTION (GİRİŞ)

Günümüzdeki teknolojik gelişmeler gözönüne alındığında kablosuz haberleşme sistemlerinden beklenen gereklilikler artış göstermektedir. Bu gereklilikler için daima kablosuz iletişim sistemlerinde yenilikçi sistem modelleri, araştırmacılar tarafından ortaya atılmaktadır. Son yıllarda bu modellerden bir tanesi oldukça dikkat çekmektedir. Bu sistem modeli, uyarlanabilir akıllı yüzeyler (reconfigurable intelligence surfaces, RIS) olarak adlandırılmaktadır [1]-[5]. RIS sistemlerinde boyut sınırlaması avantajı olup, elektromanyetik bir yapıya sahip düzeni sayesinde birden fazla pasif röle görevi yapan üstünlükler söz konusudur. Bu sebeplerden dolayı son zamanlarda literatür incelemesi yapıldığında oldukça sık çalışıldığı

görülmektedir [6]-[10]. Bu çalışmalar incelendiğinde, RIS ile ilgili farklı bir sistem yapısının ele alındığı ve buna göre bir araştırma faaliyetinin gerçekleştirildiği görülmektedir. RIS'ın sağlamış olduğu avantajların bu çalışmalarda da vurgulandığı görülmektedir.

Öte yandan enerji hattı iletişim (power line communication, PLC) sistem modeli de var olan bina-içi hatların kullanılmasını öneren ve ilave bir maliyet gerektirmeden iletişim sağlayan bir model olarak ortaya çıkmış ve son yirmi yılda üzerine yoğun bir şekilde çalışılmıştır. PLC tekniğinin diğer sistemleri içeren farklı araştırmaları literatürde mevcuttur [11]-[16]. Bina-içi PLC sistemleri, hazırda bulunan hatlardan faydalandığı için akıllı iletişim araştırmalarında kayda değer bir konu

olarak dikkat çekmektedir. Bina-içinde hali hazırda var olan şebeke hatlarını kullanması bu tekniğin en önemli avantajı olarak değerlendirilmektedir. Ek maliyet olmadan iletim hatlarının olması, diğer kablolu sistemlere göre PLC teknolojisini ön plana çıkarmaktadır.

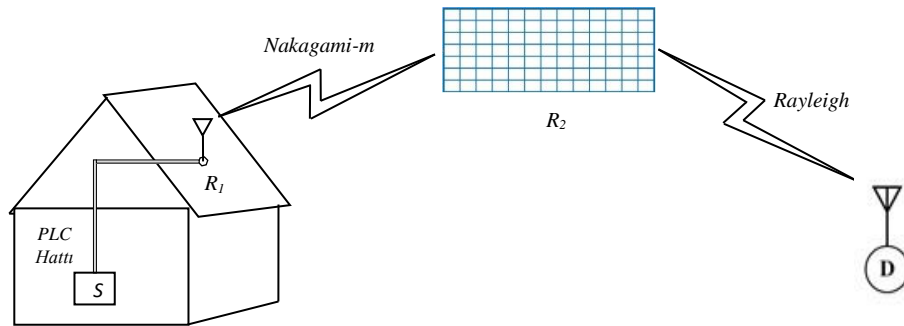
Bütün bu sebeplerden dolayı bu çalışma kapsamında, PLC sistemini içeren RIS destekli bir kablosuz haberleşme sistem modeli ele alınmaktadır. PLC içeren RIS destekli bu özgün kablosuz haberleşme sisteminin hata analizleri detaylıca ele alınmıştır. Çalışmanın ana katkıları şu şekilde özetlenebilir:

- Sistemdeki düğümler arası iletim hatları PLC, Nakagami- m ve Rayleigh olarak ele alınmıştır.
- Röle düğümlerinde çöz-ve-aktar (decode-and-forward) iletim protokolü kullanılmış ve buna uygun analiz metodları uygulanmıştır.
- İlk iki maddedeki özellikleri taşıyan ve çalışmada incelenen sistemin uçtan uca anlık işaret gürültü oranına (instantaneous signal to noise ratio, SNR) ait birikimli (kümülatif) dağılım fonksiyonu (cumulative distribution function, CDF) türetilmiştir.
- Türetilen CDF kullanılarak ele alınan sistemin servis-dışı kalma olasılığının (outage probability, OP) analizi yapılmıştır.
- Yine türetilen CDF'ten faydalanılarak incelenen sistemin hata olasılığı (error probability, P_e) ifadesi türetilmiş ve kuramsal olarak analizi gerçekleştirilmiştir.
- Sistem için türetilen OP ve P_e ifadelerini kullanarak numerik hesaplamalarla farklı senaryolara (modülasyon çeşitleri, farklı yansıtıcı eleman sayısı, farklı sönümlenme koşulları vb. gibi) ait sonuçlar sunulmuştur.

Sunulan bu ana katkılar gözününe alındığında çalışmanın motivasyonu şu şekilde belirtilebilir; yazarların bildiği kadarıyla, literatürde ilk kez PLC içeren ve Nakagami- m sönümlü bir atlamaya sahip RIS destekli sistem modeli bu çalışmada ele alınmıştır. Buna göre yapılan analizler ve sonuçlar da özgün ve önemli katkıları içermektedir.

2. SİSTEM MODELİ (SYSTEM MODEL)

The Bu çalışmada, daha öncede bahsedildiği gibi, PLC sistemini içeren RIS destekli bir kablosuz haberleşme sistem modeli ele alınmaktadır. İncelenen sistemin şematik gösterimi Şekil 1'de sunulmaktadır. Bu çalışma kapsamında ele alınacak olan sistem modelinde iki adet röle (relay, R_1 ve R_2) bir adet kaynak (source, S) ve bir adet hedef (destination, D) noktası bulunmaktadır. S - R_1 arası PLC bağlantılı, R_1 - R_2 arası Nakagami- m sönümlü iken, R_2 ile D arasının Rayleigh sönümlü olduğu kabul edilmektedir. PLC hattı kablolu bağlantı olduğundan R_1 düğümü bu hattan gelen bilgiyi elektromanyetik dalga (RF) dönüşümünü yaparak R_2 düğümüne iletim gerçekleştirebilmektedir. R_1 - R_2 arasının Nakagami- m sönümlü olmasının nedeni ise bu sönümlü kanal modelinin bina-dışı ortamlardaki kanalların temsil kabiliyetinin iyi olması ve m sönümlenme parametresi sayesinde Rayleigh sönümlü kanala dönüşme esnekliğine sahip olması olarak belirtilmektedir. R_2 düğümünde RIS desteği bulunmakta, R_1 'den gelen sinyal D 'ye iletmek üzere, üzerinde bulunan yansıtıcı elemanlar sayesinde transfer edilmektedir. RIS destekli R_2 ile D arasının Rayleigh sönümlü olmasının nedeni ise, direk olmayan görüş hattını (non line of sight, NLoS) iyi bir şekilde temsil etmesidir. Buna göre, bu kanala ait sönümlenme katsayıları Rayleigh dağılımlı olarak ele alınmaktadır. Böylelikle, bu kanal için D 'deki anlık SNR'ye ait PDF ise [17].



Şekil 1. Ele alınan sistem modelinin şematik gösterimi. (The schematic representation of the system model under consideration)

$$f_{\gamma_3}(\gamma) = \frac{\gamma^{N-1} e^{-\frac{\gamma}{B\bar{\gamma}_3}}}{(B\bar{\gamma}_3)^N (N-1)!} \quad (2.1)$$

olarak ifade edilmektedir. Burada N , RIS yapısındaki yansıtıcı eleman sayısı, $B=1+(N-1)(\Gamma(3/2))^2$, $\bar{\gamma}_3$ ise bu hatta ait ortalama SNR ifadesini belirtmektedir. Öte yandan PLC iletişim hattı kullanıldığından PLC iletim hattını modellemede kullanılan PDF ifadesinden faydalanılmaktadır. PLC teknolojisine ait farklı kanal modelleri literatüre bakıldığında görülmektedir [11], [13]-[15]. Bu çalışmada, yeni olan [13]'teki kanal yapısından faydalanılmıştır. [13]'te sunulan PLC kanal yapısı, bina-içinde iletim için uygun bir matematiksel ifade olup, başarılı sonuçlar vermektedir. O zaman, PLC iletimi için alıcısındaki SNR'nin PDF ifadesi şu şekildedir:

$$f_{\gamma_1}(\gamma) = Q_1 \gamma^{m_1-1} e^{-\zeta_1 \gamma} + Q_2 \gamma^{m_2-1} e^{-\zeta_2 \gamma} \quad (2.2)$$

burada

$$Q_1 = (1-PI)U_1 \quad (2.3)$$

$$Q_2 = PIU_2 \quad (2.4)$$

$$U_1 = \frac{(\zeta_1)^{m_1}}{\Gamma(m_1)} \quad (2.5)$$

$$U_2 = \frac{(\zeta_2)^{m_2}}{\Gamma(m_2)} \quad (2.6)$$

$$\zeta_1 = m_1 / \Omega_1 \quad (2.7)$$

$$\zeta_2 = m_2 / \Omega_2 \quad (2.8)$$

şeklinde tanımlanmaktadır. PI dürtüye esas gürültüye (impulsive noise, IN) ait oluşma olasılığı olup $PI = \lambda T$ şeklindedir. λ her saniye için birim oranı, T ise IN 'ye ait zamandır. $\Gamma(\cdot)$ Gamma işlevi, m_1 ile m_2 PLC kanalındaki gölgeleme parametreleri olarak $m_1 = (e^{(\sigma_1)^2} - 1)^{-1}$ ve $m_2 = (e^{(\sigma_2)^2} - 1)^{-1}$ şeklindedir. Ayrıca $\sigma_1 = \sigma_2 = 2\tau$ biçiminde tanımlanırken τ kanala ait katsayı, h , ise ortalama ifadesidir. Ω_1 ve Ω_2 ortalama güce ait terimlerdir ve $\Omega_1 = e^{\tau^2} \sqrt{((1+m_1)/m_1)}$,

$$\Omega_2 = e^{\tau^2} \sqrt{((1+m_2)/m_2)} \quad \text{şeklindedir.}$$

$\tau_1 = 2\tau + \ln \bar{\gamma}_{1,1}$, $\tau_2 = 2\tau + \ln \bar{\gamma}_{1,2}$ olarak tanımlanıp $\bar{\gamma}_{1,1}$ arka-plan gürültüsünde (background noise, BN)

ortalama SNR'dir. $\bar{\gamma}_{1,1} = \frac{E_b}{\sigma_G^2}$ olarak ifade edilir.

Burada E_b işaretin enerjisi ve σ_G^2 ise bütün gürültüye ait varyansı belirtmektedir. $\bar{\gamma}_{1,2}$ ise IN ve BN varken ortalama SNR ifadesi olarak değerlendirilmekte ve $\bar{\gamma}_{1,2} = \frac{E_b}{(o+1)\sigma_G^2}$ olarak

tanımlanır. Burada $o = \frac{\sigma_I^2}{\sigma_G^2}$ olup, σ_I^2 ise IN 'nin

varyansıdır [13]. Bu çalışmada R_1 ve R_2 arasındaki kanalın Nakagami- m olmasından dolayı R_2 'deki anlık SNR'nin PDF ifadesi şu şekildedir:

$$f_{\gamma_2}(\gamma) = \left(\frac{m}{\bar{\gamma}_2}\right)^m \frac{\gamma^{m-1}}{\Gamma(m)} \exp\left(-m \frac{\gamma}{\bar{\gamma}_2}\right) \quad (2.9)$$

Burada m sönümlenme parametresi, $\bar{\gamma}_2$ ise bu hatta ait ortalama SNR ifadesidir.

3. KURAMSAL ANALİZ (THEORETICAL ANALYSIS)

Burada ele alınan sistem için, CDF tabanlı analiz kullanılmaktadır. Bu sebeple, iki atlamalı DF tekniği için bütün sisteme ait CDF ifadesi [18]

$$F_{\gamma_{toplaml}}(\gamma) = F_{\gamma_1}(\gamma) + F_{\gamma_2}(\gamma) - F_{\gamma_1}(\gamma)F_{\gamma_2}(\gamma) \quad (3.1)$$

şeklinde bulunmaktadır. Buradaki $F_{\gamma_1}(\gamma)$ ve

$F_{\gamma_2}(\gamma)$ ifadeleri sırasıyla farklı sönümlü kanallara ait CDF'lerdir. Burada şu husus açıklanmalıdır ki; (3.1)'deki CDF ifadesi iki kez kullanılarak, sisteme ait toplam CDF ifadesi elde edilir. Bu sebeple, Şekil 1'de verilen sistem modeline göre $S-R_1$ arasındaki iletişim hattı PLC olduğuna göre eşitlik (2.2)'de

verilen PDF ifadesi, $F_{\gamma}(\gamma) = \int_{-\infty}^{\gamma} F_{\gamma}(\gamma) d\gamma$ ifadesinde yerine konularak, [19, eşitlik (3.381.1)] yardımıyla

$$F_{\gamma_1}(\gamma) = Q_1 (\zeta_1)^{-m_1} \gamma(m_1, \zeta_1 \gamma) + Q_2 (\zeta_2)^{-m_2} \gamma(m_2, \zeta_2 \gamma) \quad (3.2)$$

şeklinde elde edilir. Burada $\gamma(\cdot, \cdot)$ tamamlanmamış Gama fonksiyonudur. Benzer şekilde Nakagami- m

ve Rayleigh sönümlü hatlar için verilen (2.9) ve (2.1)'deki PDF'ler kullanılarak,

$$F_{\gamma_2}(\gamma) = \frac{1}{\Gamma(m)} \gamma \left(m, \frac{m}{\gamma_2} \gamma \right) \tag{3.3}$$

$$F_{\gamma_3}(\gamma) = \frac{\gamma \left(N, \frac{1}{B\gamma_3} \gamma \right)}{(N-1)!} \tag{3.4}$$

elde edilmektedir. (3.2)-(3.4) arasında verilen CDF ifadeleri (3.1)'de kullanılırsa

$$F_{\gamma_{toplam}}(\gamma) = \left[Q_1(\zeta_1)^{-m_1} \gamma(m_1, \zeta_1 \gamma) + Q_2(\zeta_2)^{-m_2} \gamma(m_2, \zeta_2 \gamma) \right] + \left[\frac{\gamma \left(m, \frac{m}{\gamma_2} \gamma \right)}{\Gamma(m)} - \left[\frac{Q_1(\zeta_1)^{-m_1}}{\Gamma(m)} \gamma(m_1, \zeta_1 \gamma) \gamma \left(m, \frac{m}{\gamma_2} \gamma \right) + \frac{Q_2(\zeta_2)^{-m_2}}{\Gamma(m)} \gamma(m_2, \zeta_2 \gamma) \gamma \left(m, \frac{m}{\gamma_2} \gamma \right) \right] + \left[\frac{\gamma \left(N, \frac{1}{B\gamma_3} \gamma \right)}{(N-1)!} + \frac{Q_1(\zeta_1)^{-m_1}}{(N-1)!} \gamma(m_1, \zeta_1 \gamma) \gamma \left(N, \frac{1}{B\gamma_3} \gamma \right) + \frac{Q_2(\zeta_2)^{-m_2}}{(N-1)!} \gamma(m_2, \zeta_2 \gamma) \gamma \left(N, \frac{1}{B\gamma_3} \gamma \right) + \frac{\gamma \left(m, \frac{m}{\gamma_2} \gamma \right) \gamma \left(N, \frac{1}{B\gamma_3} \gamma \right)}{\Gamma(m)(N-1)!} - \frac{Q_1(\zeta_1)^{-m_1}}{\Gamma(m)(N-1)!} \gamma(m_1, \zeta_1 \gamma) \times \gamma \left(m, \frac{m}{\gamma_2} \gamma \right) \gamma \left(N, \frac{1}{B\gamma_3} \gamma \right) - \frac{Q_2(\zeta_2)^{-m_2}}{\Gamma(m)(N-1)!} \gamma(m_2, \zeta_2 \gamma) \times \gamma \left(m, \frac{m}{\gamma_2} \gamma \right) \gamma \left(N, \frac{1}{B\gamma_3} \gamma \right) \right] \tag{3.5}$$

olarak türetilir. Eşitlik (3.5)'te γ yerine γ_{th} eşik değeri ifadesi yazıldığında sisteme ait OP ifadesi bulunmaktadır. Bilindiği kadarıyla (3.5)'te verilen CDF ifadesi literatürde ilk kez bu çalışma ile sunulmaktadır.

Ayrıca bu çalışmada P_e ifadesi de elde edilmiştir. Bu sebeple, CDF tabanlı hata ifadesi ise [20]

$$P_e = \frac{r^p}{2\Gamma(p)} \int_0^\infty \gamma^{p-1} e^{-r\gamma} F_{\gamma_{toplam}}(\gamma) d\gamma \tag{3.6}$$

olarak tanımlanmaktadır. Buradaki ifadede r ve p modülasyon parametreleridir. Eşitlik (3.5)'te verilen sisteme ait toplam CDF ifadesini (3.6)'da yerine koyduğumuzda

$$P_e = \frac{r^p}{2\Gamma(p)} \left[I_1 + I_2 + I_3 - I_4 - I_5 + I_6 - I_7 - I_8 - I_9 + I_{10} + I_{11} \right] \tag{3.7}$$

ifadesi elde edilir. Burada

$$I_1 = Q_1(\zeta_1)^{-m_1} \int_0^\infty \gamma^{p-1} e^{-r\gamma} \gamma(m_1, \zeta_1 \gamma) d\gamma \tag{3.8}$$

$$I_2 = Q_2(\zeta_2)^{-m_2} \int_0^\infty \gamma^{p-1} e^{-r\gamma} \gamma(m_2, \zeta_2 \gamma) d\gamma \tag{3.9}$$

$$I_3 = \frac{1}{\Gamma(m)} \int_0^\infty \gamma^{p-1} e^{-r\gamma} \gamma \left(m, \frac{m}{\gamma_2} \gamma \right) d\gamma \tag{3.10}$$

$$I_4 = \frac{Q_1(\zeta_1)^{-m_1}}{\Gamma(m)} \int_0^\infty \gamma^{p-1} e^{-r\gamma} \gamma(m_1, \zeta_1 \gamma) \gamma \left(m, \frac{m}{\gamma_2} \gamma \right) d\gamma \tag{3.11}$$

$$I_5 = \frac{Q_2(\zeta_2)^{-m_2}}{\Gamma(m)} \int_0^\infty \gamma^{p-1} e^{-r\gamma} \gamma(m_2, \zeta_2 \gamma) \gamma \left(m, \frac{m}{\gamma_2} \gamma \right) d\gamma \tag{3.12}$$

$$I_6 = \frac{1}{(N-1)!} \int_0^\infty \gamma^{p-1} e^{-r\gamma} \gamma \left(N, \frac{1}{B\gamma_3} \gamma \right) d\gamma \tag{3.13}$$

$$I_7 = \frac{Q_1(\zeta_1)^{-m_1}}{(N-1)!} \int_0^\infty \gamma^{p-1} e^{-r\gamma} \gamma(m_1, \zeta_1 \gamma) \gamma \left(N, \frac{1}{B\gamma_3} \gamma \right) d\gamma \tag{3.14}$$

$$I_8 = \frac{Q_2(\zeta_2)^{-m_2}}{(N-1)!} \int_0^\infty \gamma^{p-1} e^{-r\gamma} \gamma(m_2, \zeta_2 \gamma) \gamma\left(N, \frac{1}{B\bar{\gamma}_3} \gamma\right) d\gamma \quad I_8 \approx \frac{Q_2}{m_2(\bar{\gamma}_3)^N N! B^N} r^{-(p+N+m_2)} \Gamma(p+N+m_2) \quad (3.15) \quad (3.26)$$

$$I_9 = \frac{1}{\Gamma(m)(N-1)!} \int_0^\infty \gamma^{p-1} e^{-r\gamma} \gamma\left(m, \frac{m\gamma}{\bar{\gamma}_2}\right) \gamma\left(N, \frac{\gamma}{B\bar{\gamma}_3}\right) d\gamma \quad I_9 \approx \frac{m^{m-1}}{\Gamma(m)(\bar{\gamma}_2)^m (\bar{\gamma}_3)^N N!} r^{-(p+N+m)} \Gamma(p+N+m) \quad (3.16) \quad (3.27)$$

$$I_{10} = \frac{Q_1(\zeta_1)^{-m_1}}{\Gamma(m)(N-1)!} \int_0^\infty \gamma^{p-1} e^{-r\gamma} \gamma(m_1, \zeta_1 \gamma) \times \gamma\left(m, \frac{m}{\bar{\gamma}_2} \gamma\right) \gamma\left(N, \frac{1}{B\bar{\gamma}_3} \gamma\right) d\gamma \quad I_{10} \approx \frac{Q_1 m^{m-1}}{m_1 \Gamma(m) (\bar{\gamma}_2)^m (\bar{\gamma}_3)^N B^N N!} \times r^{-(p+N+m+m_1)} \Gamma(p+N+m+m_1) \quad (3.17) \quad (3.28)$$

$$I_{11} = \frac{Q_2(\zeta_2)^{-m_2}}{\Gamma(m)(N-1)!} \int_0^\infty \gamma^{p-1} e^{-r\gamma} \gamma(m_2, \zeta_2 \gamma) \times \gamma\left(m, \frac{m}{\bar{\gamma}_2} \gamma\right) \gamma\left(N, \frac{1}{B\bar{\gamma}_3} \gamma\right) d\gamma \quad I_{11} \approx \frac{Q_2 m^{m-1}}{m_2 \Gamma(m) (\bar{\gamma}_2)^m (\bar{\gamma}_3)^N B^N N!} \times r^{-(p+N+m+m_2)} \Gamma(p+N+m+m_2) \quad (3.18) \quad (3.29)$$

şeklidir. (3.8)-(3.18) ile verilen $I_1 - I_{11}$ integrallerini çözmek için tamamlanmamış Gama fonksiyonunun $\gamma(w, \phi) \rightarrow \frac{\phi^w}{w}$ [21] bağıntısından ve [19, eşitlik (3.381.4)] ifadesinden yararlanarak

$$I_1 \approx \frac{Q_1}{m_1} r^{-(p+m_1)} \Gamma(p+m_1) \quad (3.19)$$

$$I_2 \approx \frac{Q_2}{m_2} r^{-(p+m_2)} \Gamma(p+m_2) \quad (3.20)$$

$$I_3 \approx \frac{m^{m-1}}{(\bar{\gamma}_2)^m \Gamma(m)} r^{-(p+m)} \Gamma(p+m) \quad (3.21)$$

$$I_4 \approx \frac{Q_1 m^{m-1}}{m_1 (\bar{\gamma}_2)^m \Gamma(m)} r^{-(p+m+m_1)} \Gamma(p+m+m_1) \quad (3.22)$$

$$I_5 \approx \frac{Q_2 m^{m-1}}{m_2 (\bar{\gamma}_2)^m \Gamma(m)} r^{-(p+m+m_2)} \Gamma(p+m+m_2) \quad (3.23)$$

$$I_6 \approx \frac{1}{(\bar{\gamma}_3)^N N! B^N} r^{-(p+N)} \Gamma(p+N) \quad (3.24)$$

$$I_7 \approx \frac{Q_1}{m_1 (\bar{\gamma}_3)^N N! B^N} r^{-(p+N+m_1)} \Gamma(p+N+m_1) \quad (3.25)$$

Bişiminde yaklaşık olarak türetilir. (3.19)-(3.29) ile verilen $I_1 - I_{11}$ yaklaşık çözümleri eşitlik (3.7)'de yerine konulursa, ele alınan sistemin P_e ifadesi elde edilmiş olunur. Böylelikle CDF tabanlı P_e analizi de tamamlanmıştır.

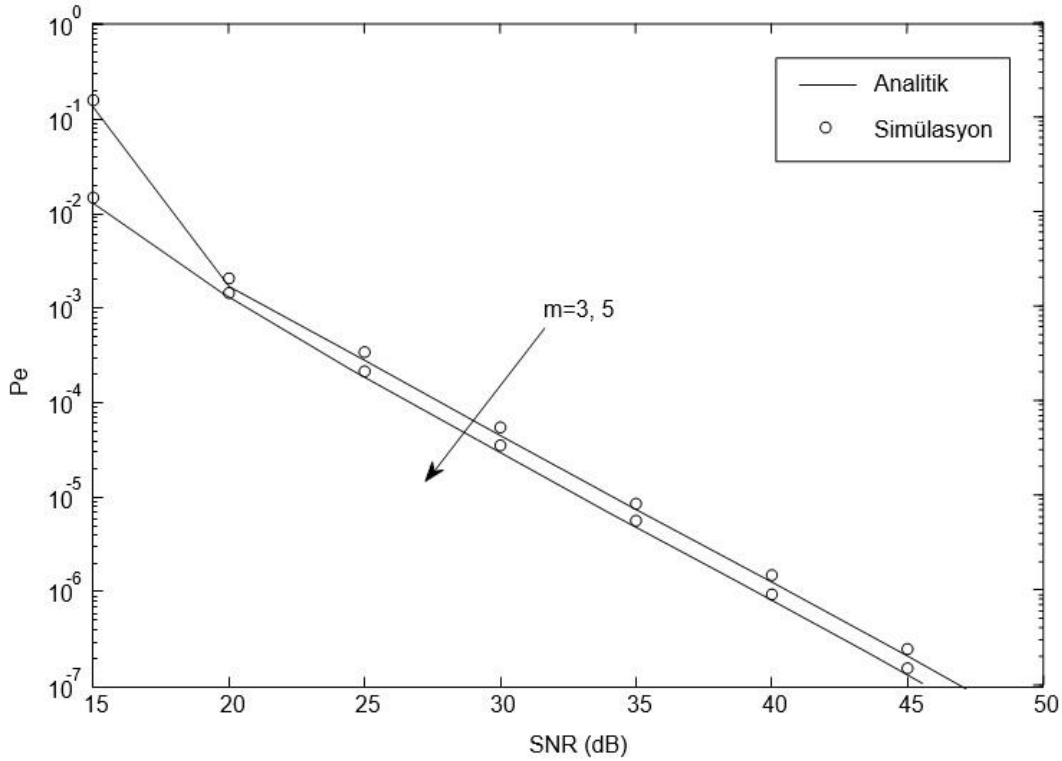
4. NÜMERİK BULGULAR (NUMERICAL RESULTS)

Bu bölümde, (3.19)-(3.29) ile verilen $I_1 - I_{11}$ türetilimleri (3.7)'de kullanılarak ele alınan sisteme ait P_e ifadesinin nümerik sonuçları elde edilmiştir. Burada ikili faz-kaydırmalı anahtarlama (binary phase shift keying, BPSK) kiplemesi için sırasıyla $r=1, p=0.5$ olarak alınmakta iken diferansiyel faz-kaydırmalı anahtarlama (differential phase shift keying, DPSK) için $r=1, p=1$ olarak alınmaktadır. Ayrıca eşitlik (3.5) kullanılarak yine sisteme ait OP nümerik sonuçları da sunulmuştur. Burada her iletim kanalına ait ortalama SNR'ler birbirine eşit ve yatay eksen olan SNR'nin üçte biridir ($\bar{\gamma}_1 = \bar{\gamma}_2 = \bar{\gamma}_3 = \bar{\gamma} / 3$). Türetilen OP ve P_e ifadeleri Mathematica ve Matlab yazılım programlarında kodlaması yapılmış ve analizlere ait sonuçların nümerik hesaplamalar ile grafikleri oluşturulmuştur.

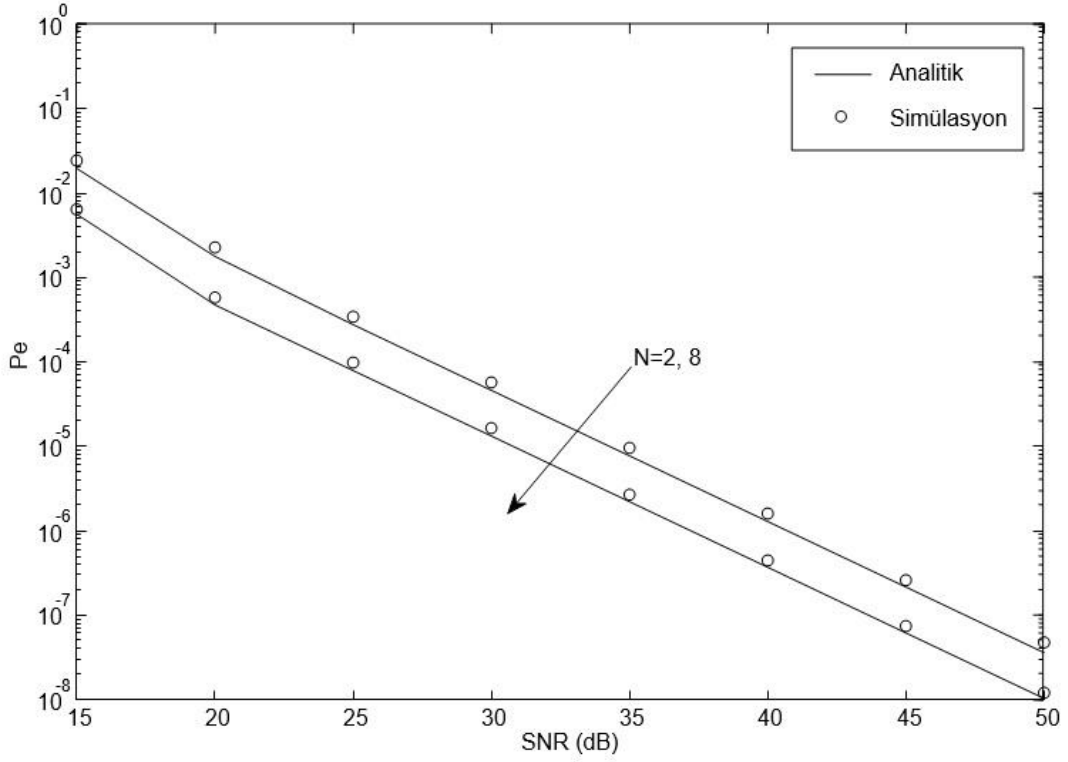
İlk olarak, sistemde $R_1 - R_2$ arasındaki iletim kanalı olan Nakagami- m sönümlenme parametresini farklı değerleri için bir P_e kıyaslaması Şekil 2'de sunulmuştur. Burada sistem için $N=2, r=1, p=1, PI=0.2, m_1=m_2=1.55$ ve $\phi=5$ olarak alınmıştır. $m=3$ ve $m=5$ olarak alındığında, bilindiği üzere, m değeri arttıkça Nakagami- m kanalının yıkıcılığı azalmakta buna bağlı olarak performans artmaktadır. Bu durum, Şekil 2'de de net bir şekilde

gözlemlenmektedir. Bir diğer P_e sonucu Şekil 3'te ise N yansıtıcı yüzey elemanı sayısı değiştirilmiştir. Burada diğer sistem parametreleri: $r=1$, $p=1$, $PI=0.2$, $m_1=m_2=1.55$, $m=5$ ve $\sigma=5$ şeklinde alınmıştır. N sayısı ise 2 ve 8 olarak değerlendirilmiştir. RIS üzerindeki N sayısı arttıkça, D noktasına daha fazla iletim gerçekleştireceğinden sistemin performansının artması beklenmektedir. Buna göre $N=8$ durumuna ait olan P_e sonucu, $N=2$ durumuna ait P_e sonucuna göre daha üstün bir performans sergilemektedir. Şekil 4'te ise, farklı modülasyon türlerinin P_e sonuçları kıyaslanmıştır. Burada sistem için $N=2$, $PI=0.2$, $m_1=m_2=1.55$, $m=2$ ve $\sigma=5$ olarak alınmış, $r=1$, $p=1$ (DPSK durumu) ve $r=1$, $p=0.5$ (BPSK durumu) kıyaslanmıştır. Beklenildiği gibi, şekilden de açıkça görülmektedir ki BPSK durumundaki P_e sonucunun DPSK durumundaki P_e sonucuna göre daha üstündür. Bu

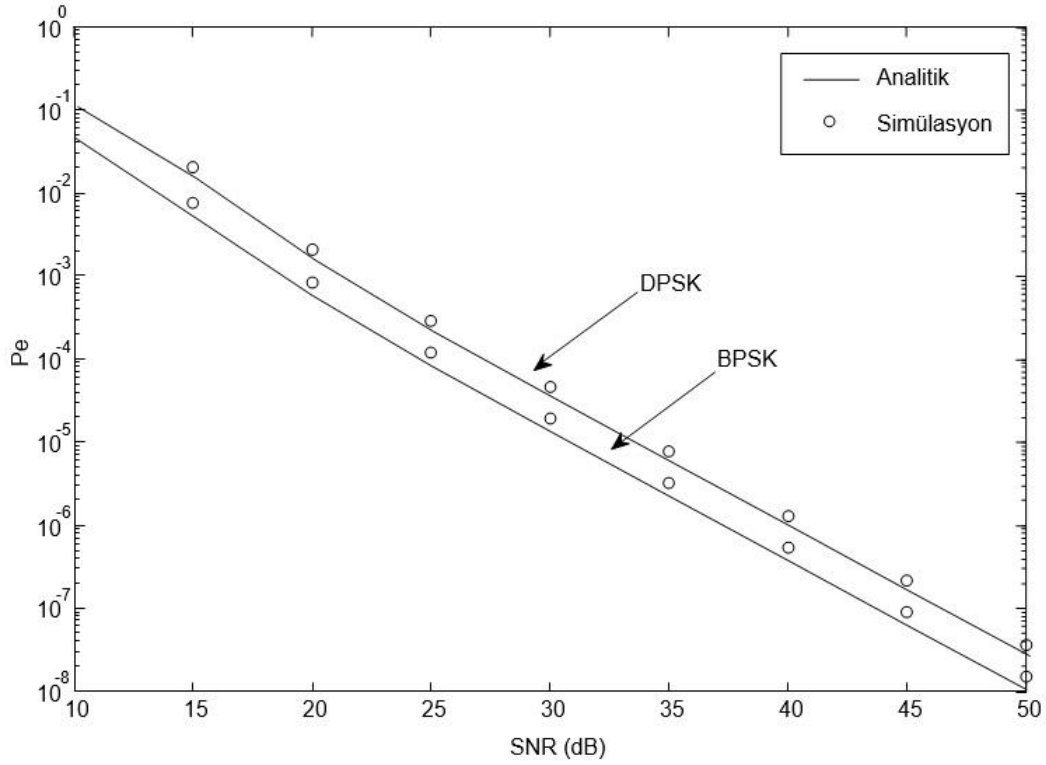
durumda yapılan analizlerin doğruluğu, beklenen durumları sağlayarak gösterilmektedir. Ayrıca önemli bir nokta olarak belirtilmelidir ki, Şekil 2-4'te sunulan sonuçlarda tam simülasyon sonuçları ile analitik sonuçlar birbiri ile aynı trendi göstermektedir. Bu da analitik-simülasyon sonuç çiftlerinin uyum içerisinde olduğunu göstermektedir. Şekil 2-4'te farklı sistem parametreleri için P_e sonuçları sunulduğundan, bir önceki bölümde CDF yaklaşımı P_e analizinde yaklaşıklık ile çözüm yapıldığı için tam simülasyon ile analitik sonuçlar arasında küçük de olsa sapmalar mevcuttur. Bu durum beklenen bir durumdur, çünkü P_e analizinde sonuç ifadesinde yaklaşıklık ile çözümler sunulmuştur. Aslında bu yönden de yapılan analizin doğruluğu bir kez daha görülebilmektedir.



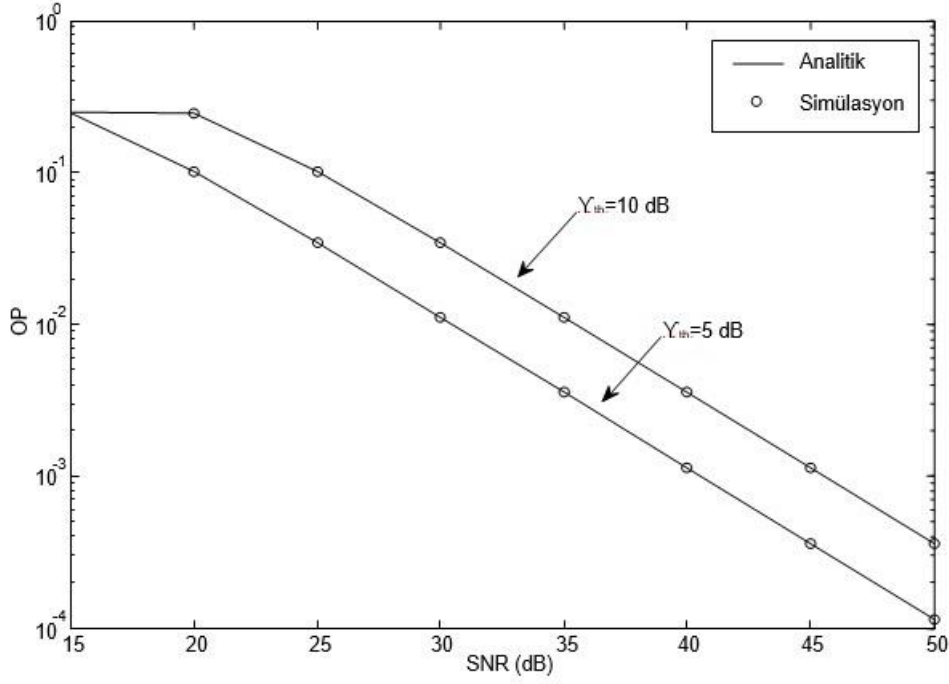
Şekil 2. Farklı Nakagami- m parametresi ile ele alınan sistemin P_e kıyaslaması. (The comparison of the system under consideration with different Nakagami- m parameters in terms of P_e).



Şekil 3. Farklı N için P_e eğrileri kıyaslaması (Comparison of P_e curves for different values of N).



Şekil 4. Farklı modülasyon teknikleri ile P_e kıyaslaması (Comparison of P_e for different modulation techniques).



Şekil 5. Farklı eşik değerler ile OP kıyaslaması (Comparison of OP for different threshold values).

Son olarak, bu çalışmada OP analizine ait eğriler Şekil 5'te sunulmuştur. Burada, $N=4$, $PI=0.2$, $m_1=m_2=1.55$, $\sigma=5$, $m=2$ olarak alınmıştır. Grafikte γ_{th} eşik değeri kıyaslaması sunulmuştur ve $\gamma_{th}=5$ dB ile $\gamma_{th}=10$ dB olarak değerlendirilmiştir. $\gamma_{th}=5$ dB durumu daha iyi bir performansa

5. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışmada, ilk olarak, PLC içeren RIS destekli bir haberleşme sisteminin CDF ifadesi türetilmiş ve daha sonra türetilen bu CDF ifadesinden yararlanılarak OP ve P_e ifadeleri elde edilmiştir. Sisteme ait farklı parametre değişimleri ve modülasyon türleri ile çeşitli sonuç grafikleri sunulmuştur. Sunulan sonuçlardan açık bir şekilde görülmektedir ki, bu çalışmada önerilen ifadelerin tam simülasyon sonuçları ile uyumlu olduğu ve beklenen davranışları sergilediği anlaşılmaktadır. Şekil 2-4'te P_e ifadesindeki yaklaşıklıkta dolayı tam simülasyon sonuçlarına göre küçük de olsa bir sapma göstermektedir. Ancak bu durum Şekil 5 mevcut değildir. Bu çalışmanın devamı olarak gelecek çalışmalarda, röleler arasındaki kanalların farklı sönümlü modeller şeklinde alınması, yüksek dereceden modülasyon tekniklerinin kullanılması, farklı kapasite analizlerinin yapılması ele alınabilir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

Bu çalışma 1919B012300783-2209-A kodlu TÜBİTAK projesi ile desteklenmektedir.

sahiptir. Şekil 5'te tam simülasyon sonuçları ile analitik sonuçlar, P_e sonuçlarındaki gibi herhangi bir yakınsaklık kullanılmadığından mükemmel bir uyum içerisindedir, herhangi bir sapma bulunmamaktadır.

ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

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

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

Beren TİDİN: Makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiş, sonuçları bulmada detaylı araştırmalar yapmıştır.

Mehmet BİLİM: Makalenin yazım işleminde düzeltmeler yapmış, sistem modelini oluşturmuş, sistem analizlerini gerçekleştirmiştir.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] S. Zeng, H. Zhang, B. Di, Z. Han and L. Song, 'Reconfigurable intelligent surface (RIS) assisted wireless coverage extension: RIS orientation and location optimization', *IEEE*

- Communications Letters*, 25:1, (2021), 269-273. doi: 10.1109/LCOMM.2020.3025345
- [2] E. Basar, 'Reconfigurable intelligent surface-based index modulation: a new beyond MIMO paradigm for 6G', *IEEE Transactions on Communications*, 68:5, (2020), 3187-3196. doi: 10.1109/TCOMM.2020.2971486.
- [3] N. S. Perović, L. -N. Tran, M. Di Renzo and M. F. Flanagan, 'Achievable rate optimization for MIMO systems with reconfigurable intelligent surfaces', *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 20:6, (2021), 3865-3882. doi: 10.1109/TWC.2021.3054121.
- [4] R. Long, Y. -C. Liang, Y. Pei and E. G. Larsson, 'Active reconfigurable intelligent surface-aided wireless communications', *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 20:8, (2021), 4962-4975. doi: 10.1109/TWC.2021.3064024.
- [5] E. Basar, M. Di Renzo, J. De Rosny, M. Debbah, M. -S. Alouini and R. Zhang, 'Wireless communications through reconfigurable intelligent surfaces', *IEEE Access*, 7, (2019), 116753-116773, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2935192.
- [6] S. Ma, H. Guo, Y. Zhang, Y. Fang and D. Yuan, 'Joint beamforming and reflecting design in reconfigurable intelligent surface-aided multi-user communication systems', *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 20:5, (2021), 3269-3283. doi: 10.1109/TWC.2020.3048780.
- [7] K. Asmoro, I. N. A. Ramatryana and S. Y. Shin, 'Reconfigurable intelligent surface-assisted NOMA with coordinate reflector interleaving under Rician fading channel', *IEEE Access*, (2024), doi: 10.1109/ACCESS.2024.3380354. (Early Access)
- [8] A. M. Salhab and L. Yang, 'Mixed RF/FSO relay networks: RIS-equipped RF source vs RIS-aided RF source', *IEEE Wireless Communications Letters*, 10:8, (2021), 1712-1716. doi: 10.1109/LWC.2021.3077960
- [9] M Bilim, 'Performance analysis of RIS-Assisted wireless networks in the presence of imperfect phase errors', *AEU-International Journal of Electronics and Communications* 171, (2023), 154923, doi: <https://doi.org/10.1016/j.aeue.2023.154923>.
- [10] J. Du, Y. Cheng, L. Jin, S. Li and F. Gao, 'Nested tensor-based integrated sensing and communication in RIS-assisted THz MIMO systems', *IEEE Transactions on Signal Processing*, 72, (2024), 1141-1157. doi: 10.1109/TSP.2024.3359323.
- [11] A. Tonello, F. Versolatto, and A. Pittolo, 'In-home power line communication channel: statistical characterization', *IEEE Transactions on Communications*, 62:6, (2015), 2096-2106. doi: 10.1109/TCOMM.2014.2317790.
- [12] Y. Kabalci, '5G mobile communication systems: Fundamentals, challenges, and key technologies, in *Smart Grids and Their Communication Systems*', Springer, (2019), 329-359. doi: https://doi.org/10.1007/978-981-13-1768-2_10
- [13] M. Jani, P. Garg, and A. Gupta, 'Performance analysis of a mixed cooperative PLC-VLC system for indoor communication systems', *IEEE Systems Journal*, 14:1, (2020) 469-476. doi: 10.1109/JSYST.2019.2911717.
- [14] S. Galli and T. Banwell, 'A novel approach to the modeling of the indoor power line channel-Part II: transfer function and its properties', *IEEE Transactions on Power Delivery*, 20:3, (2005), 1869-1878. doi: 10.1109/TPWRD.2005.848732.
- [15] F. J. Canete, J. A. Cortés, L. Díez and J. T. Entrambasaguas, 'A channel model proposal for indoor power line communications', *IEEE Communications Magazine*, 49:12, (2011) 166-174. doi: 10.1109/MCOM.2011.6094022.
- [16] M. Bilim, 'Dual-hop communications over PLC/ η - μ and PLC/ λ - μ fading channels', *International Journal of Electronics*, 110:12, (2023), 2317-2339 doi: <https://doi.org/10.1080/00207217.2022.2145502>.
- [17] L. Yang, et al., 'Accurate closed-form approximations to channel distributions of RIS-aided wireless systems', *IEEE Wireless Communications Letters*, 9:11, (2020), 1985-1989. doi: 10.1109/LWC.2020.3010512.
- [18] A. K. Padhan, H. K. Sahu, P. R. Sahu and S. R. Samantaray, 'RIS assisted dual-hop mixed PLC/RF for smart grid applications',

- IEEE Communications Letters*, 25:11, (2021), 3523-3527. doi: 10.1109/LCOMM.2021.3104630.
- [19] I. Gradshtein and I. M. Ryzhik, 'Table of integrals, series, and products Academic press, 2000. doi: <https://doi.org/10.1016/C2010-0-64839-5>.
- [20] I. S. Ansari et al., 'A new formula for the BER of binary modulations with dual-branch selection over generalized- K composite fading channels', *IEEE Trans. Commun.*, 59:10, (2011), 2654–2658. doi: 10.1109/TCOMM.2011.063011.100303A.
- [21] M Bilim, 'A performance study on diversity receivers over κ - μ shadowed fading channels', *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, 112, (2019), 152934. doi: <https://doi.org/10.1016/j.aeue.2019.152934>.

Utilization Of Magnesium Chloride (Mg-Cl) Cycle for Hydrogen Production of Sombrero Fusion Reactor

Gamze ŞENER^{1,*}  Adem ACIR^{1,2} 

¹Gazi University, Graduate School of Natural and Applied Sciences, Department of Nuclear Science, Ankara, 06000, Türkiye

^{1,2}Gazi University, Faculty of Technology, Department of Energy Systems Engineering, Ankara, 06000, Türkiye

Article Info

Research article
Received: 21/05/2024
Revision: 26/05/2024
Accepted: 28/05/2024

Keywords

SOMBRERO fusion reactor
Mg-Cl
Hydrogen
Neutronic
Tritium

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 21/05/2024
Düzeltilme: 26/05/2024
Kabul: 28/05/2024

Anahtar Kelimeler

SOMBRERO füzyon
reaktörü
Mg-Cl
Hidrojen
Nötronik
Tritiyum

Graphical/Tabular Abstract (Grafik Özet)

In this study, neutronic analysis of the sombrero fusion reactor at different fuel ratios was performed and the amount of hydrogen production was analyzed through the Mg-Cl cycle. / Bu çalışmada sombrero füzyon reaktörünün farklı yakıt oranlarında nötronik analizi yapılmış ve hidrojen üretim miktarı Mg-Cl çevrimi yoluyla analiz edilmiştir.

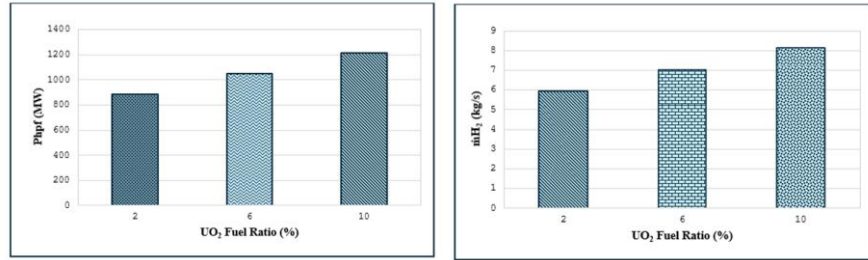


Figure A: The effect of UO₂ fuel rate on thermal power and hydrogen production /Şekil A: UO₂ yakıt oranının termal güce ve hidrojen üretimine etkisi

Highlights (Önemli noktalar)

- Neutronic analysis and hydrogen production analysis in the Sombrero fusion reactor. / Sombrero füzyon reaktöründe nötronik analiz ve hidrojen üretim analizi.
- Hydrogen production via magnesium chloride cycle. / Magnezyum klorür çevrimi aracılığıyla hidrojen üretimi.
- The effect of UO₂ nuclear fuel ratio on the amount of hydrogen production. / UO₂ nükleer yakıt oranının hidrojen üretim miktarına etkisi.

Aim (Amaç): Investigation of the effect of fuel ratio on hydrogen production in Sombrero fusion reactor. / Sombrero füzyon reaktöründe yakıt oranının hidrojen üretimine etkisinin araştırılması.

Originality (Özgünlük): Analyzing the hydrogen production potential at different fuel ratios in the Sombrero fusion reactor. / Sombrero füzyon reaktöründe farklı yakıt oranlarında hidrojen üretim potansiyelinin analiz edilmesi.

Results (Bulgular): The \dot{m}_{H_2} have been computed as 5,92 kg/s for 2% UO₂ fuel ratio whereas; this value has been obtained as 8,13 for 2% UO₂ fuel ratio. / %2 UO₂ yakıt oranı için \dot{m}_{H_2} 5,92103 kg/s olarak hesaplanırken; %2 UO₂ yakıt oranı için bu değer 8,12686 olarak elde edilmiştir.

Conclusion (Sonuç): As the UO₂ fuel ratio increased, the amount of hydrogen production also increased. / UO₂ yakıt oranı arttıkça hidrojen üretim miktarı da artmıştır.



Utilization Of Magnesium Chloride (Mg-Cl) Cycle for Hydrogen Production of Sombrero Fusion Reactor

Gamze Şener^{1,*} Adem Acır^{1,2}

¹Gazi University, Graduate School of Natural and Applied Sciences, Department of Nuclear Science, Ankara, 06000, Türkiye

^{1,2}Gazi University, Faculty of Technology, Department of Energy Systems Engineering, Ankara, 06000, Türkiye

Article Info

Research article

Received: 21/05/2024

Revision: 26/05/2024

Accepted: 28/05/2024

Keywords

SOMBRERO Fusion
reactor
Mg-Cl
Hydrogen
Neutronic
Tritium

Abstract

The aim of this study is to investigate the hydrogen production potential of the magnesium chloride (Mg-Cl) cycle in the SOMBRERO fusion reactor. Three different percentages of UO₂ nuclear fuel, namely 2%, 6% and 10%, have been used while keeping the fuel zone thickness constant. The performance of the SOMBRERO fusion reactor has been considered statically. The neutronic calculations have performed with Monte Carlo neutron transport code. Firstly, it has been determined that the tritium breeding ratio (TBR) and energy multiplication factor (M) values depends on neutronicly. Secondly, the amount of hydrogen production with by using energy multiplication factor (M) have been performed. The highest hydrogen production has been obtained as 8,12687 kg/s for 10% UO₂ fuel ratio.

SOMBRERO Füzyon Reaktörünün Hidrojen Üretiminde Magnezyum Klorür (Mg-Cl) Döngüsünün Kullanımı

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi

Başvuru: 21/05/2024

Düzeltilme: 26/05/2024

Kabul: 28/05/2024

Anahtar Kelimeler

SOMBRERO füzyon
reaktörü
Mg-Cl
Hidrojen
Nötronik
Tritiyum

Öz

Bu çalışmanın amacı SOMBRERO füzyon reaktöründe magnezyum klorür (Mg-Cl) döngüsünün hidrojen üretim potansiyelini incelemektir. Yakıt bölgesi kalınlığı sabit tutularak %2, %6 ve %10 olmak üzere üç farklı UO₂ nükleer yakıt yüzdesi kullanılmıştır. SOMBRERO füzyon reaktörünün performansı statik olarak değerlendirilmiştir. Nötronik hesaplamalar Monte Carlo nötron transport kodu yardımıyla yapılmıştır. Öncelikle trityum üretim oranı (TBR) ve enerji çoğaltım faktörü (M) değerlerinin nötronik olarak hesaplanmıştır. İkinci olarak enerji çoğaltım faktörü (M) kullanılarak hidrojen üretimi miktarı araştırılmıştır. En yüksek hidrojen üretimi %10 UO₂ yakıt oranında 8,12687 kg/s olarak elde edilmiştir

1. INTRODUCTION (GİRİŞ)

With the increasing demand for energy today, the environmental impact of the methods used to generate the necessary energy is also on the rise. The interest in renewable energy has consequently surged. Hydrogen is a clean energy sources in meeting this energy demand [1]. The idea of nuclear hydrogen production, which aims to utilize the heat generated in nuclear reactors more efficiently, has emerged as a result. There are many studies in the literature on this subject. Ghorbani et. al., [2] derived various thermochemical cycles such as Fe-Cl, Cu-

Cl, Co-Cl, Mg-Cl, HyS, V-Cl, Ce-Cl S-I and Zn-S-I cycles as regards thermo-eco-environment. Oruç et al. [3] examined by using various Fe-Cl, Mg-Cl, S-I, HyS, and Cu-Cl, processes in the systems the thermo-eco-environment. Razi et al., [4] performed H₂ generation by using of Cu-Cl, Fe-Cl and Mg-Cl for waste heat for industrial steel plants. Özdemir et al. [5] used Mg-Cl, H₂SO₄ and UT-3 cycles in the solar assisted Brayton and Rankine in terms of energy and exergy. Asal and Acır [6] performed the produced hydrogen amount in the LIFE fusion reactor by using cobalt chloride (Co-Cl) process. Juárez-Martínez et al. [7] investigated production of

hydrogen with by using S-I cycle for various heat exchangers under conditions. Özkaya et al. [8] performed hydrogen production in the PACER fusion concept with Fe-Cl cycle. Asal and Acir [9] examined hydrogen production in LIFE engine with Cu-Cl process under various conditions. Demir [10] applied hydrogen production in the SOMBRERO blanket with SMR method. Acir and Özkaya [11] investigated hydrogen production with Fe-Cl and Mg-Cl cycle in the PACER concept. Genç [12] presented hydrogen production with S-I, SMR and HTE cycles in the APEX. Balta et al. [13] computed exergy and energy efficiency under various conditions for hydrogen production with the Mg-Cl cycle. Asal et al., [14] performed exergy and energy efficiency under various conditions for hydrogen production with the Mg-Cl cycle in the HTR-PM.

In this study, the neutronic performance and hydrogen production with hydrogen unit in

integrated SOMBRERO fusion blanket have been performed. The neutronic calculations have been computed with Monte Carlo calculation method for 2%, 6% and 10% UO_2 fuel ratios. Firstly, the tritium breeding ratio (TBR) and energy multiplication factor (M) have been calculated. Secondly, the hydrogen production with Mg-Cl cycle in the SOMBRERO fusion blanket have been examined and compared.

2. MATERIALS AND METHODS (MATERİYAL VE METOD)

2.1. SOMBRERO Fusion Reactor (Sombrero Füzyon Reaktörü)

Sombrero fusion reactor designed by W. J. Schafer Associates researcher team. The SOMBRERO names described SOLid Moving BREeder ReactOR [15]. The original reactor design has been given in Fig. 1.

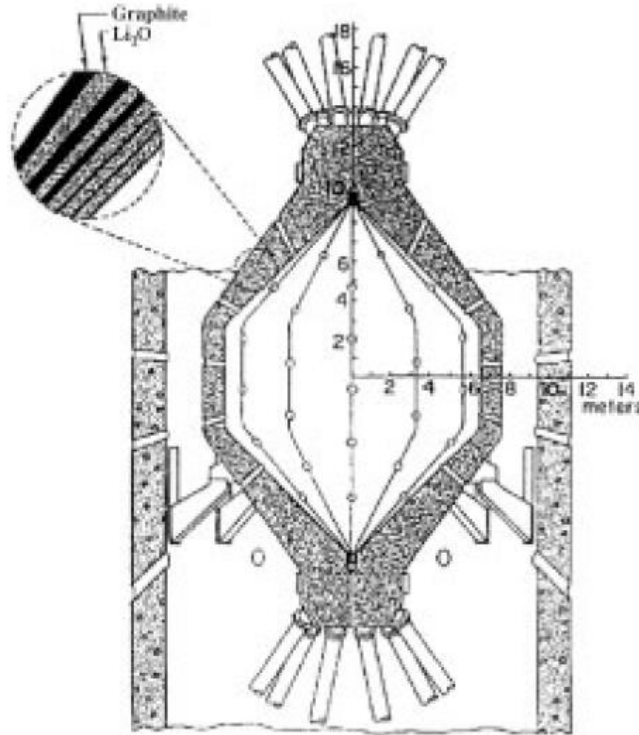


Fig. 1. SOMBRERO fusion blanket section view (SOMBRERO füzyon reaktörü kesit görünüşü)

The conceptual designed of a 1000 MWe KrF laser-driven IFE power plant. The SOMBRERO systematic view used in the calculations has been given in Fig. 2 The first wall (FW) material has been used C/C composite with 1 cm thick. The SOMBRERO blanket consists of three zones various Li enrichment. The first zone consists of 3%

C/C composite and 97% Li_2O solid breeder with 19 cm thickness.

The second zone have 20% C/C composite and 80% Li_2O solid breeder with 40 cm thickness whereas, the third zone is 50% C/C composite and 50% Li_2O solid breeder with 40 cm thickness. The first zone

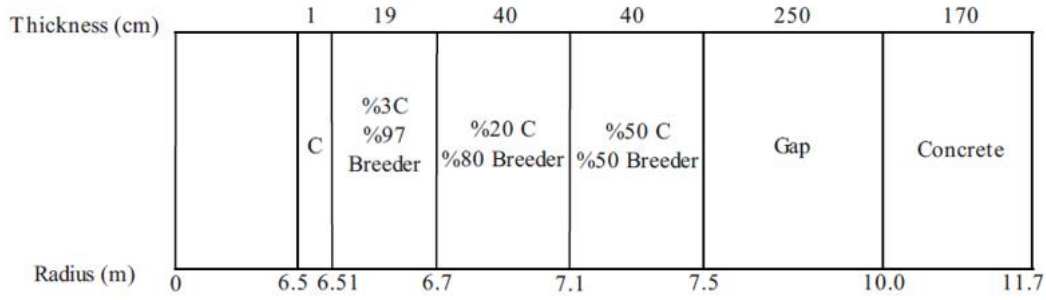


Fig. 2. SOMBRERO blanket structure (SOMBRERO blanket geometrisi)

has $\text{UO}_2 + \text{Li}_2\text{O}$ mixed of the different ratios. These ratios have been selected 10%, 6%, and 2% UO_2 in the LiO_2 . The technical properties have been given in Table 1 [15].

2.2. Magnesium Chloride Cycle (Magnezyum Klorür Döngüsü)

In the calculations have been used the three step

Mg-Cl thermochemical cycle. The reaction steps have been given as below:

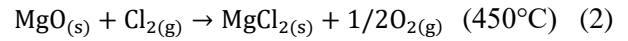
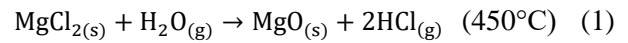


Table 1. Technical Properties of the Sombrero Fusion Reactor (Sombrero Füzyon Reaktörünün Teknik Özellikleri) [15]

Parameter	Value
Fusion Power, P_i	304 MW
Blanket thermal power, P_f	2677 MW
Fusion energy gain, Q	8,806
Alpha particles fraction	0.2
Neutron particles fraction	0.8
Efficiency of intermediate heat exchanger	0.8
Efficiency of driving system	0.5
Efficiency of gas turbine	0.6
Isotope separation system fraction	0.05
Auxiliary system fraction	0.05
Power ratio constant	2,363
Reaction efficiencies	0.9
Required electricity power	289.5 kJ/mol
Total required thermal power	122.5 kJ/mol

The first step is the hydrolysis reaction. The reaction actualized at 450–550°C. The second step at between 450°C and 500°C temperature occurred and called chlorination reaction. The third reaction

is electrolysis reaction which can occur at 70–90°C temperature [16,17]. The Mg-Cl systematic view have been illustrate in Fig 3.

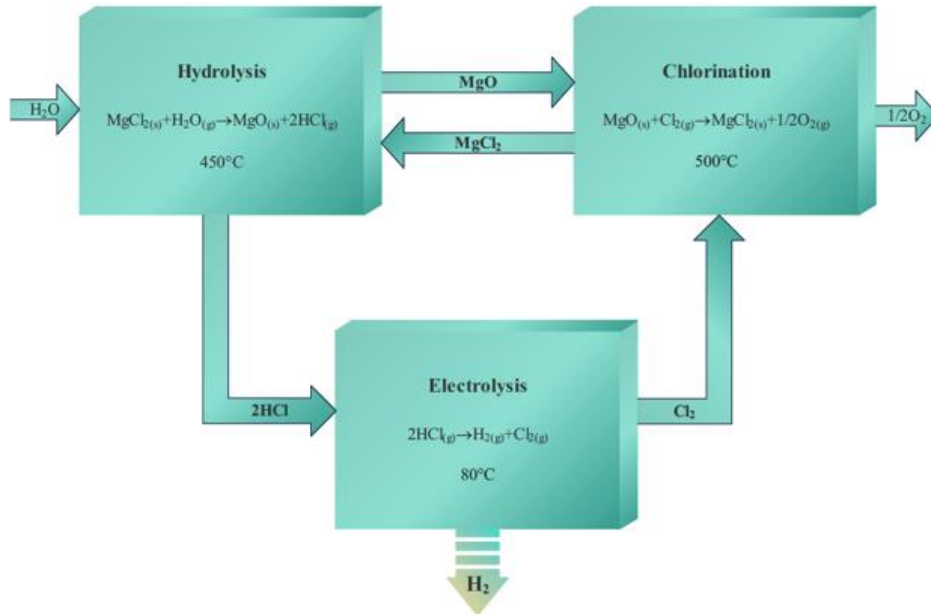


Fig. 3. Mg-Cl thermochemical cycle systematic view (Mg-Cl termokimyasal yöntemin sistematik görünümü)

The heat required (Q, kW) during a process is calculated by Eqs. (14-6) [9,18,19].

$$\dot{Q}_{in} + \dot{W}_{in} + \sum n_{in} H_{in} = \dot{Q}_{out} + \dot{W}_{out} + \sum n_{out} H_{out} \quad (4)$$

$$Q = \sum n_{out} (\bar{h}_f^o + \bar{h} - \bar{h}_0)_{out} - \sum n_{in} (\bar{h}_f^o + \bar{h} - \bar{h}_0)_{in} \quad (5)$$

$$\bar{h}(T) - \bar{h}_0 = AT + B \frac{T^2}{2} + C \frac{T^3}{3} + D \frac{T^4}{4} - \frac{E}{T} + F - H \quad (6)$$

where, \dot{W} is work (kW), h is enthalpy (kJ/kg), \bar{h}_f^o is enthalpy of formation (kJ/mol), \bar{h}_0 is standard enthalpy (kJ/mol), A, B, C, D, E, F, H values in the equation given in Eq. (6) are obtained from the Shomate Table 2 [19]. T is calculated as 1/1000 of the cycle temperature determined in K.

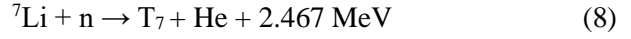
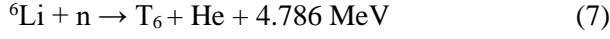
The static performance calculation of the SOMBRERO fusion reactor performed using the MCNP neutron transport code [20]. Three different percentages of UO_2 were used as fuel (2%, 6%, 10%). Li_2O has been chosen as the tritium breeder. With the obtained data, the TBR and M values were calculated. Using the relevant parameters of the reactor and the M values, the $1-\psi$ and P_{hpf} data were calculated.

Table 2. Required Mg- Cl cycle data for Shomate equation

Compounds	\bar{h}_f^o (kJ/mol)	T (K)	A	B	C	D	E	F	H
MgCl2(l)	-641,62	723-773	78,30733	2,435888	6,858873	-1,72897	-0,72991	-667,582	-641,616
H2O(g)	-241,83	723	30,092	6,832514	6,793435	-2,53448	0,082139	-250,881	-241,826
MgO(s)	-601,24	723-773	47,25995	5,681621	-0,87267	0,1043	-1,05396	-619,132	-601,241
HCl(g)	-92,31	723-353	32,12392	-13,4581	19,86852	-6,85394	-0,04967	-101,621	-92,312
Cl2(g)	0	773-353	33,0506	12,2294	-12,0651	4,38533	-0,15949	-10,8348	0
O2(g)	0	773	30,03235	8,772972	-3,98813	0,788313	-0,7416	-11,3247	0
H2(g)	0	353	33,06618	-11,3634	11,43282	-2,77287	-0,15856	-9,9808	0

3. RESULTS AND DISCUSSION (Sonuçlar ve Tartışma)

In order for fusion reactors to be self-sustainable, TBR must be greater than 1.05. Tritium production is produced from liquid and solid fuels containing lithium. In this reactor, the solid fuel containing lithium is Li₂O. As given in Eqs. (7-9), TBR has been calculated by the sum of T₆ and T₇, which include endothermic and exothermic reactions [8,9].



$$\text{TBR} = \text{T}_6 + \text{T}_7 \quad (9)$$

TBR values obtained in the SOMBRERO fusion reactor have been given in Fig. 4. TBR values have been obtained as approximately 1.31 in the fuel range containing 2% and 10% UO₂. It can be seen from the results obtained that the reactor provides self-sustainability.

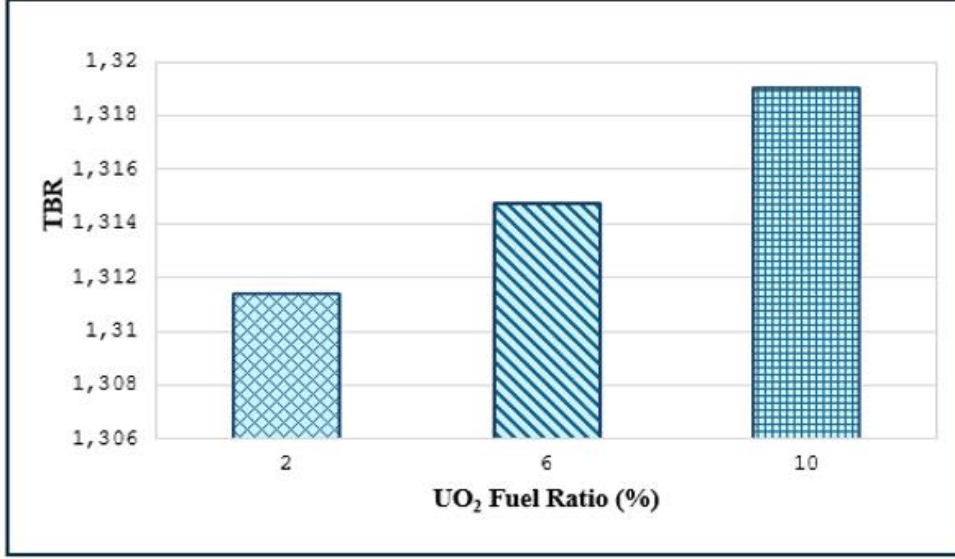


Fig. 4. Variation of tritium breeding (TBR) for various fuel ratio (Farklı yakıt oranı için trityum üretim değışimi)

Energy production occurs as a result of the reactions occurring in the Li₂O and UO₂ fuel mixture located in the first region of the Sombrero fusion blanket structure. The energy generated as a result of the reactions occurring in the fuel region is called the energy multiplication factor, as shown in Eq. (4) [8,9].

$$M = \frac{200 \text{ MeV} \cdot \langle \phi \cdot \Sigma_f \rangle + 4.786 \text{ MeV} \cdot \text{T}_6 - 2.467 \text{ MeV} \cdot \text{T}_7}{17.6 \text{ MeV}} + 1 \quad (10)$$

Fig. 5 shows the change in M depending on the fuel ratio. The M value has been obtained as 1,31322 for 2% UO₂ + 98% Li₂O

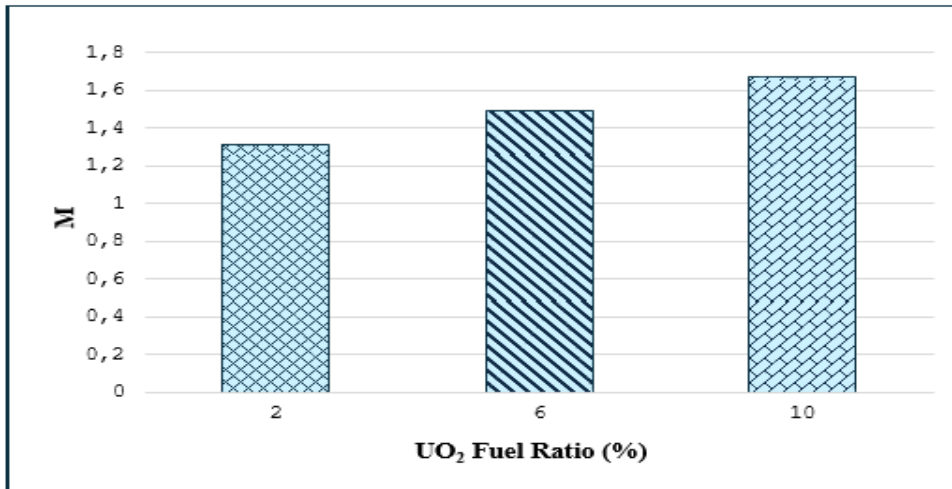


Fig. 5. Variation of energy multiplication factor (M) for various fuel ratio (Farklı yakıt oranı için enerji çoğaltım faktörü değışimi)

While the M value for 6% UO₂ + 94% Li₂O have been obtained as 1,49052, this value have been computed as 1,67014 for 10% UO₂ + 90% Li₂O. As seen in Fig. 5, it has been observed that the M value increased with the increase in fuel ratio. This increase is due to the fission reaction occurring in the fuel region depending on the fuel ratio. In other words, since the fission rate was higher for 10% UO₂ + 90% Li₂O, the M value has been highest in this parameter.

The thermal power ratio and total thermal power used in hydrogen production for the Mg-Cl thermochemical cycle are obtained from the following Eqs (5,6) [6,8,9].

$$1 - \psi = 1 - \frac{1}{\eta_{ihx} * \eta_{as} [Q * (x_a + x_n * M) + 1] [\eta_{gt} + \epsilon]} + \frac{\epsilon}{[\eta_{gt} + \epsilon]} + \frac{x_{aux} + x_{isf}}{\eta_{ihx} + [\eta_{gt} + \epsilon]} \quad (11)$$

$$P_{hpf} = (1 - \psi) * (1 + \epsilon) * \eta_{ihx} * \frac{P_f}{Q} * [Q * (x_a + x_n * M) + 1] \quad (12)$$

The hydrogen mass flow equations for the Mg-Cl thermochemical cycle with the help of the Eqs. (7-15) given below [6,8,9]:

$$\dot{m}_{MgCl_2} = \frac{P_{hpf}}{q_{tot}} \quad (13)$$

$$\dot{m}_{H_2O} = \dot{m}_{MgCl_2} \times \frac{M_{H_2O}}{M_{MgCl_2}} \quad (14)$$

$$\dot{m}_{MgO} = \dot{m}_{MgCl_2} \times \frac{M_{MgO}}{M_{MgCl_2}} \times \eta \quad (15)$$

$$\dot{m}_{HCl} = 2 \times \dot{m}_{MgCl_2} \times \frac{M_{HCl}}{M_{MgCl_2}} \times \eta \quad (16)$$

$$\dot{m}_{Cl_2} = \dot{m}_{MgO} \times \frac{M_{Cl_2}}{M_{MgO}} \quad (17)$$

$$\dot{m}_{MgCl_{2-2}} = \dot{m}_{MgO} \times \frac{M_{MgCl_2}}{M_{MgO}} \times \eta \quad (18)$$

$$\dot{m}_{O_2} = 0,5 \times \dot{m}_{MgO} \times \frac{M_{O_2}}{M_{MgO}} \times \eta \quad (19)$$

$$\dot{m}_{H_2} = 0,5 \times \dot{m}_{HCl} \times \frac{M_{H_2}}{M_{HCl}} \times \eta \quad (20)$$

$$\dot{m}_{Cl_2} = 0,5 \times \dot{m}_{HCl} \times \frac{M_{Cl_2}}{M_{HCl}} \times \eta \quad (21)$$

The thermal power ratio (1 - ψ) and total thermal power (P_{hpf}, MW) required in the SOMBRERO fusion reactor integrated Mg-Cl hydrogen product unit have been given in Fig. 6 and 7. The 1 - ψ and P_{hpf} with increasing UO₂ fuel ratio have been increased.

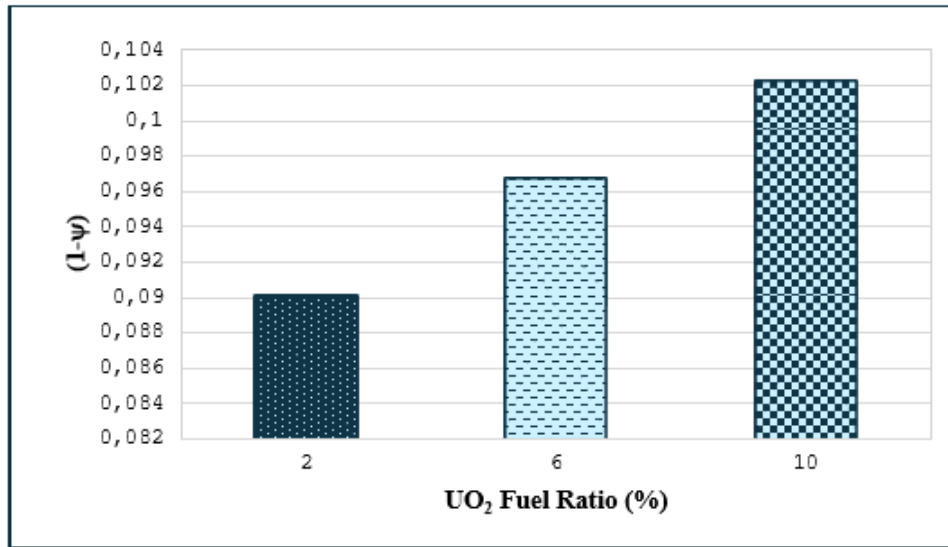


Fig. 6. Variation of thermal power ratio (1 - ψ) for various fuel ratio (Farklı yakıt oranı için termal güç oranı değişimi)

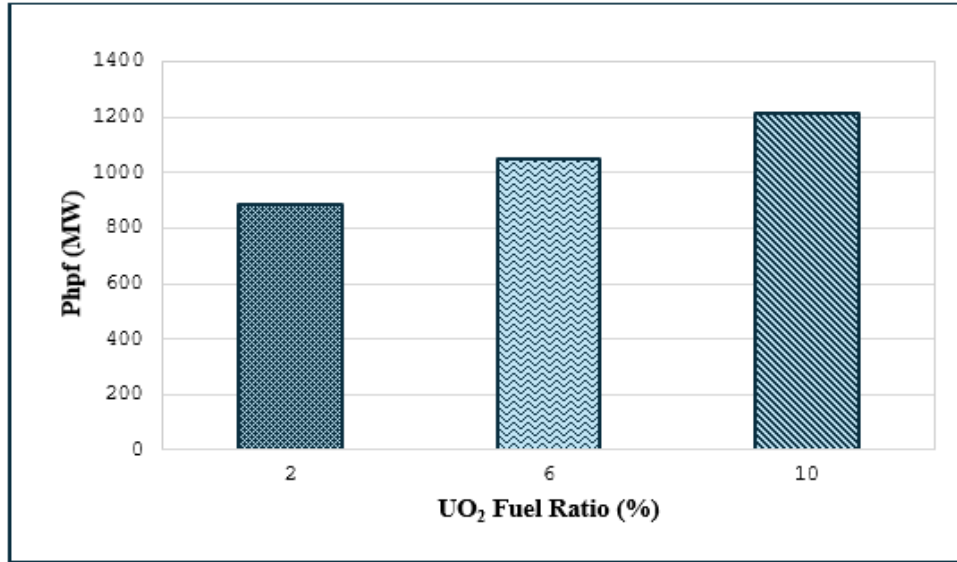


Fig. 7. Variation of total thermal power (P_{hpf} , MW) for various fuel ratio (Farklı yakıt oranı için toplam termal güç değişimi)

The $1 - \psi$ have been obtained as between 0,09006 and 0,10222, the P_{hpf} have been computed as between 884,92461 MW and 1214,59578 for 2% UO₂ and 10% UO₂, respectively.

The hydrogen production (\dot{m}_{H_2}) for various fuel ratios have been illustrated in Fig. 8.

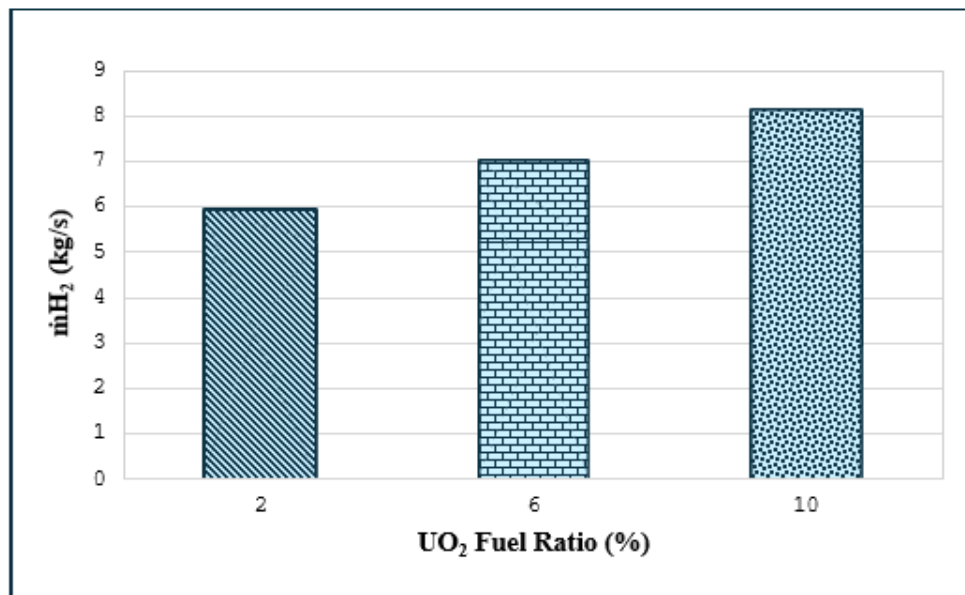


Fig. 8. Variation of hydrogen production (\dot{m}_{H_2}) for various fuel ratio (Farklı yakıt oranı için hidrojen üretimi değişimi)

The hydrogen production depending on the increase in M, which has generated due to fission reaction increasing fuel ratio, value have been increased.

The \dot{m}_{H_2} have been computed as 5,92103 kg/s for 2% UO₂ fuel ratio whereas; this value has been obtained as 8,12686 for 2% UO₂ fuel ratio as shown in Fig. 8.

Table 3. Hydrogen production values various thermochemical process and reactor (Hidrojen üretim değerleri çeşitli termokimyasal proses ve reaktör)

Reference	Type	Cycle	Produced Hydrogen Amount (kg/s) (Initial value)
Present work	SOMBRERO fusion reactor	Mg-Cl	5.92-8.12
Ref. [21]	PACER fusion reactor	Fe-Cl cycle	~13
		Mg-Cl (Option I) Mg-Cl (Option II)	~39 ~26
Ref. [9]	LIFE fusion reactor	Cu-Cl cycle	1.39
Ref. [8]	PACER fusion reactor	Fe-Cl cycle	7.36/10.96
Ref. [10]	SOMBRERO fusion reactor	SMR+WGS	33.00
Ref. [12]	APEX fusion reactor	SMR+WGS+MCS	218
		SMR+WGS	100
		SMR	60
		THE	8.60
		S-I cycle	8.40
Ref. [14]	HTR-PM reactor	Mg-Cl	2.43

The hydrogen production results obtained in this study have been compared with the hydrogen production results obtained for different thermochemical processes and reactors given in the literature in Table 3. Generally, the hydrogen production has been good performance in the compared the hydrogen production in the SOMBRERO fusion reactor with literature results.

4. CONCLUSION (SONUÇLAR)

In this study, the hydrogen production potential of the Mg-Cl (magnesium chloride) cycle in the SOMBRERO fusion reactor have been investigated. The findings obtained as a result of the study are presented below:

- The tritium breeding ratio have been obtained as about 1.31 between %2 UO₂ + %98 Li₂O and %10 UO₂ + %90 Li₂O fuel.
- The energy multiplication factor (M) have been computed as the range of 1.31 and 1.67 between %2 UO₂ + %98 Li₂O and %10 UO₂ + %90 Li₂O fuel. The M have been increased with higher UO₂ fuel.
- The hydrogen production has been calculated as 5.92 kg/s for %2 UO₂ + %98 Li₂O whereas, these value have been computed as 8.12 kg/s for %10 UO₂ + %90 Li₂O.

- The hydrogen production with Mg-Cl has been good exhibited performance in the in the SOMBRERO fusion reactor compared with literature. In future work, the hydrogen production with new types of thermochemical processes will be examined in line with the results obtained by using different reflectors, tritium production materials and different fuels in the SOMBRERO fusion reactor

DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS (ETİK STANDARTLARIN BEYANI)

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

Yazarlar, bu makalede rapor edilen çalışmayı etkileyecek gibi görünen, birbiriyle rekabet halinde olan herhangi bir finansal çıkar veya kişisel ilişkinin bulunmadığını beyan etmektedir.

AUTHORS' CONTRIBUTIONS (YAZARLARIN KATKILARI)

Gamze ŞENER: She carried out the numerical analysis, analyzed the results and wrote the article.

Sayısal analizleri yapmış, sonuçlarını analiz etmiştir ve makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir

Adem ACIR: He performed the writing process and supervising.

Yazım sürecini ve süpervizörlüğü gerçekleştirdi.

CONFLICT OF INTEREST (ÇIKAR ÇATIŞMASI)

There is no conflict of interest in this study.

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

REFERENCES (KAYNAKLAR)

- [1] Veziroğlu T. N. and Şahin S. 21st Century's energy: Hydrogen energy system. *Energy Convers. Manag.* 2008; 49(7):1820–31.
- [2] Ghorbani B, Zendejboudi S, Zhang Y, Zarrin H, Chatzis I. Thermochemical water-splitting structures for hydrogen production: Thermodynamic, economic, and environmental impacts. *Energy Conversion and Management* 2023; 297:1117599.
- [3] Oruc O, Dincer I. Assessing the potential of thermo-chemical water splitting cycles: a bridge towards clean and sustainable hydrogen generation. *Fuel* 2021; 286:119325.
- [4] Razi F, Hewage K, Sadiq R. A comparative assessment of thermodynamic and exergoeconomic performances of three thermochemical water-splitting cycles of chlorine family for hydrogen production. *Energ Conver Manage* 2022;271: 116313.
- [5] Özdemir A, Genç G. A comprehensive comparative energy and exergy analysis in solar based hydrogen production systems. *Int J Hydrogen Energy* 2022;47: 12189–203.
- [6] Asal Ş, Acir A. A study on nuclear hydrogen production using a novel approach cobalt-chlorine thermochemical cycle in a laser driver fission fusion blanket for various molten salt fuels. *Progress in Nuclear Energy* 2022;153:104443.
- [7] Juárez-Martínez L C, Espinosa-Paredes G, Vázquez-Rodríguez A, Romero-Paredes H. Energy optimization of a Sulfur–Iodine thermochemical nuclear hydrogen production cycle. *Nuclear Engineering and Technology* 2021;53:2066-2073.
- [8] Özkaya M, Acir A, Yalçın Ş. Investigation of the hydrogen production of the PACER fusion blanket integrated with Fe–Cl thermochemical water splitting cycle. *Nuclear Engineering and Technology* 2023;55:4287-4294.
- [9] Asal Ş. and Acir A., “Utilization of the Cu–Cl thermochemical cycle for hydrogen production using a laser driver thorium molten salts” *International Journal of Hydrogen Energy* 2021;46:31133-31142.
- [10] Demir N. Hydrogen production via steam-methane reforming in a SOMBRERO fusion breeder with ceramic fuel particles. *International Journal of Hydrogen Energy* 2013;38:853–860.
- [11] Acir A., Özkaya M., Performance evaluation of the Fe–Cl and Mg–Cl cycle for hydrogen production of the minor actinide fuelled PACER fusion blanket, *International Journal of Hydrogen Energy*, 67, 2024, 634-643.
- [12] Genç G. Hydrogen production potential of APEX fusion transmuted minor actinide fluoride. *International Journal of Hydrogen Energy* 2010;35:10190–10201.
- [13] Balta M T, Dincer I, Hepbasli A. Energy and exergy analyses of magnesium-chlorine (Mg-Cl) thermochemical cycle. *International Journal of Hydrogen Energy* 2012;37:4855-4862.
- [14] Asal, Ş., Acir A., Dinçer İ., A study on integrated HTR-PM driven hydrogen production using thermochemical cycles, *Energy Conversion and Management*, 307, 2024, 118336
- [15] S. Reyes, J. F. Latkowski, J. Sanz, and J. Gomez del Rio, Safety Assessment for Inertial Fusion Energy Power Plants: Methodology and Application to the Analysis of the HYLIFE-II and SOMBRERO Conceptual Designs, *Journal of Fusion Energy*, Vol. 20, Nos. 1/2, June 2001
- [16] M. Tolga Balta, Ibrahim Dincer, Arif Hepbasli Performance assessment of solar-driven integrated Mg–Cl cycle for hydrogen production, *International Journal of Hydrogen Energy*, 39 (35), 2014, 20652-20661
- [17] Özcan H, Dincer I. Performance investigation of magnesium–chloride hybrid thermochemical cycle for hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy* 2014;39: 76-85.
- [18] Çengel YA, Boles MA. *Thermodynamics: an engineering approach*. McGraw-Hill; 2011.
- [19] NIST chemistry WebBook. 2018. <http://webbook.nist.gov/chemistry/>.
- [20] Briesmeister JF. A General Monte Carlo N-Particle Transport Code. LA-13709M. Los Alamos National Laboratory: MCNP; 2000
- [21] Acir A., Özkaya M., Performance evaluation of the Fe–Cl and Mg–Cl cycle for hydrogen production of the minor actinide fuelled PACER fusion blanket, *International Journal of Hydrogen Energy*, 67, 2024, 634-643.

Polimer Matrisli Karbon Kompozit Malzemelerin SiC Takviye Oranlarının Mekanik ve Metalurjik Özelliklere Etkileri

Sidem KANER^{1*} 

¹Pamukkale Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Denizli, Türkiye

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 20/12/2023
Düzeltilme: 24/01/2024
Kabul: 04/03/2024

Anahtar Kelimeler

Karbon Kompozit
SiC
Mekanik Dayanım
Sertlik

Article Info

Research article
Received: 20/12/2023
Revision: 24/01/2024
Accepted: 04/03/2024

Keywords

Carbon Composite
SiC
Mechanical Strength
Hardness

Grafik Özet (Graphical Abstract)

Çalışma kapsamında karbon kumaştan vakum infüzyon sistem ile karbon kompozit imalatı yapılmıştır. Karbon kumaşın kompozite dönüşümü sürecinde kullanılan epoksi malzemenin içerisinde farklı oranlarda eklenmiş olan SiC partiküllerin sertlik ve mekanik dayanımındaki değişimler incelenerek, iç yapı analizleri yapılmıştır. / Within the scope of the study, carbon composite was manufactured from carbon fabric with a vacuum infusion system. Internal structure analyzes were carried out by examining the changes in the hardness and mechanical strength of SiC particles added at different rates in the epoxy material used in the process of transforming carbon fabric into composite.



Şekil A: Numune Üretimi ve Deney Sürecinin Şematik Gösterimi / **Figure A:** Schematic Representation of Sample Production and Experimental Process

Önemli noktalar (Highlights)

- Karbon kumaş ile epoksi içerisine SiC takviyesi yapılarak karbon kompozit imalatı yapılmıştır. / Carbon composite was manufactured by reinforcing SiC into epoxy with carbon fabric.
- Farklı SiC oranlarının karbon kompozitteki sertlik ve mekanik dayanım değer değişkenlikleri incelenmiştir. / Hardness and mechanical strength value variations in carbon composites of different SiC ratios were examined.
- Elde edilen numunelerin iç yapılarında SiC yapının dağılımı ve etkileri gözlenmiştir. / The distribution and effects of the SiC structure in the internal structures of the obtained samples were observed.

Amaç (Aim): SiC'ün farklı takviye oranlarında kullanılarak karbon kompozitin sertlik ve mekanik değerlerindeki değişimi incelenmiştir. / The change in hardness and mechanical values of carbon composite was examined by using SiC at different reinforcement ratios.

Özgünlük (Originality): Karbon kompozit içerisinde epoksi matris içerisine yerleşen yapıların ıslanabilirliği birleşim açısından zor bir süreçtir. Farklı oranlarda kullanılan SiC partiküller için optimum oranda birleşim ile istenilen ıslanabilirlik sağlandığı için mekanik dayanım değerlerindeki artış sağlanmıştır. / The wettability of the structures placed in the epoxy matrix in carbon composite is a difficult process in terms of assembly. Since the desired wettability was achieved with the optimum combination of SiC particles used in different ratios, the increase in mechanical strength values was achieved.

Bulgular (Results): SiC oranının artışı ıslanabilirliği olumsuz etkilediği için sertlik ve dayanım değerlerinin azalmasına sebep olmuştur. / The increase in SiC ratio negatively affected wettability and caused a decrease in hardness and strength values.

Sonuç (Conclusion): En yüksek mekanik dayanım değeri ve sertlik değeri %10 SiC takviyeli karbon kompozit numunelerde elde edilmiştir. SiC oranının artışı ıslanabilirliği olumsuz etkilediği için sertlik ve dayanım değerlerinin azalmasına sebep olmaktadır. / The highest mechanical strength value and hardness value were obtained in 10% SiC reinforced carbon composite samples. The increase in the SiC ratio negatively affects wettability and causes a decrease in hardness and strength values.



Polimer Matrisli Karbon Kompozit Malzemelerin SiC Takviye Oranlarının Mekanik ve Metalurjik Özelliklere Etkileri

Sidem KANER^{1*}

¹Pamukkale Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Denizli, Türkiye

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 20/12/2023
Düzeltilme: 24/01/2024
Kabul: 04/03/2024

Anahtar Kelimeler

Karbon Kompozit
SiC
Mekanik Dayanım
Sertlik

Öz

Kompozit malzemeler, yüksek yapısal avantaja sahip farklı malzemelerin mukavemet başta olmak üzere farklı teknik özelliklerini bir araya getirebilen teknolojik malzemelerdir. Kompozitler, uçak ve uzay sanayi başta olmak üzere, enerji üretim sektörü, otomotiv, makine imalat gibi bir çok sektörde yaygın kullanım alanına sahiptir. Bu çalışma kapsamında vakum infüzyon sistemi kullanılarak, 200 gr/cm²lik plain karbon dokuma kumaşa; takviyesiz epoksi ve SiC (%10-%15-%20 takviyeli) takviyeleri yapılmış epoksi ile kompozit numune imalatı yapılmıştır. Üretilen kompozit malzemelerin mekanik değerleri ve sertlik ölçümleri karşılaştırılmıştır. SiC takviyesi ile birlikte mekanik özelliklerin arttığı görülmüştür. Çalışmada en yüksek mekanik dayanım, %10 SiC takviyeli epoksi yapıda görülmüştür. %10 SiC takviyeli kompozit numunede mikroyapı özelliklerinin tespiti ve yapıda ilave edilen takviyelerin dağılım özelliklerinin incelenmesi için FESEM ve EDS analizleri gerçekleştirilmiştir. Epoksiye ilave edilen SiC takviyelerinin kompozit içinde homojen bir şekilde dağıldığı görülmüştür. Bu durum malzemenin mekanik ve metalurjik özelliklerine olumlu katkıda bulunmuştur.

Effects of SiC Reinforcement Rates on Mechanical and Metallurgical Properties of Polymer Matrix Carbon Composite Materials

Article Info

Research article
Received: 20/12/2023
Revision: 24/01/2024
Accepted: 04/03/2024

Keywords

Carbon Composite
SiC
Mechanical Strength
Hardness

Abstract

Composite materials are technological materials that can combine different technical properties, especially strength, of different materials with high structural advantages. Composites are widely used in many sectors such as the aircraft and aerospace industry, energy production sector, automotive and machinery manufacturing. High strength values can be achieved with polymer-based carbon composite materials obtained by adding epoxy. Within the scope of this study, 200 gr/cm² plain carbon woven fabric was applied using a vacuum infusion system; Composite samples were manufactured with unreinforced epoxy and SiC (10%-15%-20% reinforced) reinforced epoxy. Mechanical values and hardness measurements of the produced composite materials were compared. It has been observed that mechanical properties increase with SiC reinforcement. In the study, the highest mechanical strength was seen in the 10% SiC reinforced epoxy structure. FESEM and EDS analyses were carried out to determine the microstructural properties of the 10% SiC reinforced composite sample and to examine the distribution properties of the reinforcements added in the structure. It was observed that the SiC reinforcements added to the epoxy were distributed homogeneously within the composite. This contributed positively to the mechanical and metallurgical properties of the material.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Kompozitler; farklı mekanik, fiziksel ve kimyasal içeriklerin aynı malzeme içinde oluşturabilmesini sağlayan birden fazla ve farklı içerikteki fazların fiziksel bir bütün oluşturduğu malzemeler olarak tanımlanabilir [1]. Kompozit malzemeler, farklı malzeme içeriklerinde ve birbirleri içerisinde çözünmeden yeni bir birleşik malzeme elde

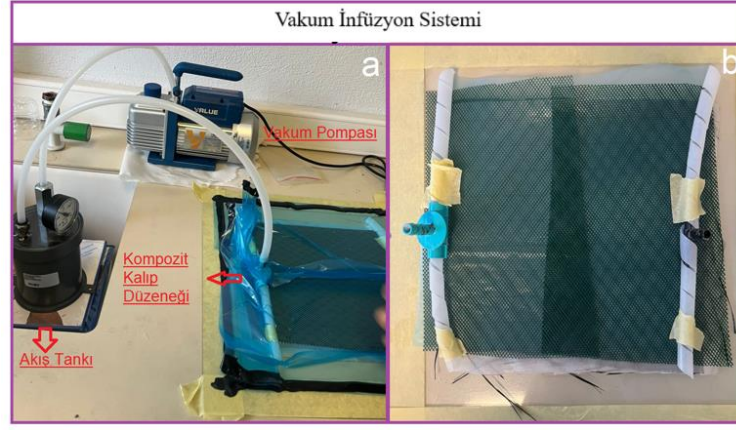
ettiğimiz üstün mekanik özelliklerdeki yapılarıdır [2]. Kompozit imalatı günümüz teknolojilerinde her geçen gün farklılaşan, gelişen bir malzeme üretim alanı haline gelmiştir. Bu kapsamda farklı malzemelerden beklenen özellikleri bir arada oluşturabildiğimiz kompozit malzeme teknolojisi üretilen standart malzemelerin alaşım ve ilave takviyeler ile daha dayanıklı hale getirilebilmesi için geniş bir çalışma alanına sahiptir. Karbon,

doğada farklı formlarda bulunan, iyi mukavemet, termal ve elektrik iletkenliği yüksek, esnek bir materyaldir [3]. Karbon atomunun doğada, fulleren, karbon nanotüp, grafit ve grafen olmak üzere dört farklı allotropu bulunmaktadır [4]. Karbon elyaf lar ağırlıkça ortalama %90 oranlarında C içeren, PAN, rayon ve ziftin kontrollü sentezi sonrasında elyaf olarak elde edilen malzemelerdir [5]. Karbon kumaş olarak kullanılan malzemeler de bu elyaf lar dan elde edilen filamentlerin dokunması veya örülmesiyle birlikte oluşur [6]. Polimer matrisli karbon kompozit malzemelerde çoğunlukla termoset bazlı polimerler kullanılmaktadır. Karbon kompozitler, karbon fiberleri birlikte tutarak, malzemeye gelen yükü fiberlere aktaran yapının dayanıklılığını arttırırken şeklinin de korunmasını sağlamaktadır. Böylece malzeme üzerine gelen yüke bağlı olarak oluşan hata ve hasar hızı düşer [6, 7]. Bu yapıda yüzey kalitesi artarak yüzey enerjisi ve ıslanabilirlik de doğru orantılı olarak artış gösterir [8]. Karbon kumaş ile polimer esaslı bir reçinenin birleşmesiyle elde edilen kompozitlerde karbonun dayanımı ve polimerin esnekliği bir araya getirilir. Bu aşamada malzemedeki dayanımı arttırmak, sertliğin de oransal artışını sağlayıp daha rijit yapıda mamul elde edilmesi için epoksiye eklenecek katkı maddelerinin kullanımı uygun olmaktadır. Epoksi ile birleşimler malzemenin esnek davranışına destek olsa da rijitlik istenilen alanlarda istenilen davranışı sağlayamayabilir. Bunun için karbon ile doğru bağ kurması sağlanacak katkı maddeleri kullanılmalıdır. SiC, bir çok farklı malzeme içinde alaşımlandırma veya takviye halinde kullanıldığında mekanik dayanımı olumlu olarak artırıcı etki sağlayabilmektedir. SiC takviyesinin karbon elyaf kompozit malzeme üzerindeki etkisi incelendiğinde, kopma dayanımını azaltma etkisinin yanında, kopma gerinim değerlerine göre

kompozit malzemeyi daha sert bir ürün haline getirmektedir. SiC'ün malzeme üzerinde mekanik dayanımı arttırırken sertlik ve aşınma dayanımını da arttırdığı görülmüştür [9]. Literatür incelendiğinde, genel itibari ile epoksi içerisine farklı takviyeler yapılmış, ancak takviye malzemelerin mekanik ve metalografik özellikleri aynı anda incelenmemiştir. Çalışma sayesinde takviye edilen farklı oranlarda SiC ile mekanik özelliklerin iyileştirilebildiği anlaşılmaktadır. Çalışmada sertlik testi, çekme dayanımı testi, FESEM ve EDS analizleri yapılarak, literatürde eksik kalan boşluk doldurulmaya çalışılmıştır.

2.MATERYAL VE METOD (MATERIAL AND METHOD)

Bu çalışma kapsamında, 200 gr/cm² Plain dokuma karbon kumaş kullanılmıştır. 3 kat kullanılan karbon fiber kumaşın arasında KP 410 İnfüzyon vakum sistemi ile uyumlu ortoflalik esaslı rekastif polyester reçine kullanılmıştır. Reçine oranı %75 epoksi ve %25 sertleştirici olarak karışım yapılmıştır. 400 µm boyutunda %10, %15 ve % 20 oranında SiC ilavesi reçine içerisine karıştırılmıştır. SiC ilavesiz reçine ile üretilen numuneler de aynı şartlar altında imal edilmiştir. Numune üretimleri, Pamukkale Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği laboratuvarında kurulmuş olan vakum infüzyon sistemi ile gerçekleştirilmiştir. Şekil 1'de vakum infüzyon sistemi ile numune elde sürecine ait laboratuvar üretim süreci görülmektedir.



Şekil 1. a) Vakum infüzyon sistemine ait ekipmanlar, b) Üretilen karbon kompozit numune (a)Equipment for vacuum infusion system, b) Produced carbon composite sample

Çalışma kapsamında 250x250 mm boyutlarında 3 katlı karbon kumaş serimi yapılarak elde edilen plaka imalatı 72 saat kürlenme süresinde oda sıcaklığında tamamlanmıştır. Tüm numuneler ASTM D3039 Standardına uygun olarak 25x250x0,6 mm ölçülerinde kesilmiştir [10]. Takviyesiz ve SiC takviyeli olacak şekilde her numune grubundan 5 adet numunenin çekme deneyleri ve sertlik ölçümleri yapılmıştır. Çekme deneyleri Pamukkale Üniversitesi Metalurji ve

Malzeme Mühendisliği laboratuvarında bulunan 10 ton kapasiteli SHIMADZU HARDWAY çekme deney cihazında gerçekleştirilmiştir (Şekil 2). Sertlik değerlerinin tespiti için Denizli Organize Sanayi Bölgesinde faaliyet gösteren DEBAK A.Ş firmasının Ar-Ge laboratuvarında bulunan Zwick Roell Marka ZHR dokunmatik Universal Rockwell sertlik ölçüm cihazında ISO 2039-2 standardına uygun olacak şekilde 60 kgf yük altında ölçümler yapılmıştır (Şekil 3) [11].



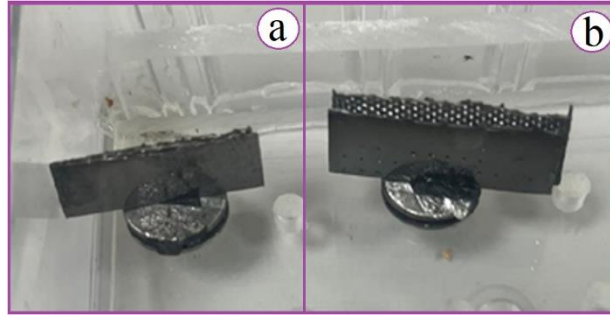
Şekil 2. SHIMADZU HARDWAY çekme deney cihazı (SHIMADZU HARDWAY tensile test device)



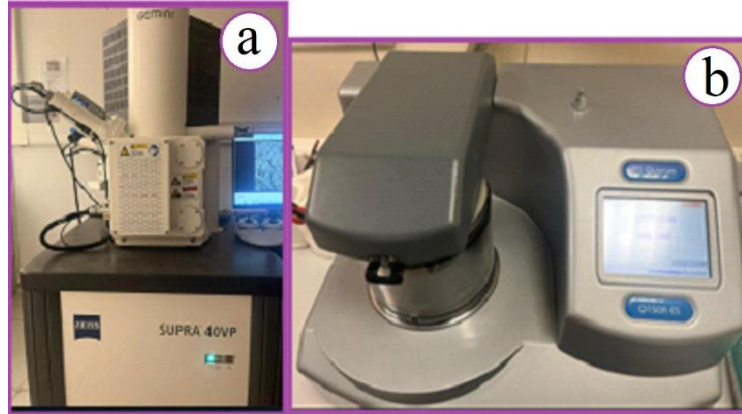
Şekil 3. Zwick Roell rockwell sertlik ölçüm cihazı (Zwick Roell rockwell hardness tester)

Mekanik dayanımın içyapıya bağlı değişiminin gözlemlenebilmesi için Alan Emisyon Taramalı Elektron Mikroskobu (FESEM) görüntüleri ve Element Dağılım Spektrometresi (EDS) değerleri alınmıştır. Çekme deneyinde kullanılan numunelerin kırılma bölgelerinden hazırlanan numune kesit parçaları için Pamukkale Üniversitesi Merkez Laboratuvarlarında bulunan Quorum 150R ES cihazıyla elektrik iletkenliği sağlayabilmek için

öncelikle altın ve paladyum bileşimi ile 30 dakika kaplama işlemi yapılmıştır. Kaplama işleminden sonra görüntüleme süreçlerinde ZEISS marka SUPRA 40VP model FESEM cihazı ve FESEM cihazı üzerinde yer alan yarı kantitatif ölçüm yapan EDS analizleri yapılmıştır. Şekil 4’de çekme deneyi sonrasında kopma bölgesinden alınarak inceleme öncesi Altın Paladyum kaplama yapılmış karbon kompozit numunelere ait örnekler görülmektedir.



Şekil 4. a) %10 SiC Takviyeli, b) Takviyesiz karbon kompozit kesit örneklerinin kaplama sonrası görüntüleri (a)10% SiC Reinforced, b)Post-coating images of unreinforced carbon composite cross-section samples)

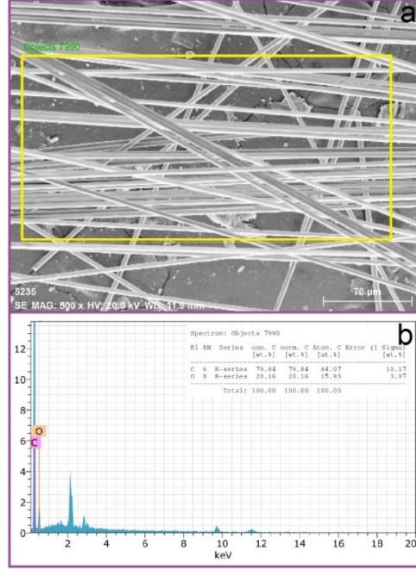


Şekil 5. a) ZEISS SUPRA 40VP FESEM Cihazı b) Quorum 150R ES yüzey kaplama cihazı (a)ZEISS SUPRA 40VP FESEM device, b) Quorum 150R ES surface coating device)

3. BULGULAR (RESULTS)

Şekil 6'da karbon imalatı sürecinde kullanılan dokuma karbon kumaşlarda kullanılan liflere ait FESEM görüntüsü ve görüntü üzerinden alınmış EDS pik ve element dağılımları oranları yer

almaktadır. Şekil 6 incelendiğinde yapıda bulunan element dağılımlarının ağırlıkça C içeriğinin %79.84 ve O içeriğinin ise %20.16 olduğu görülmektedir. Elde edilen analiz sonuçları karbon içeriğine ait olduğunu göstermektedir [12].

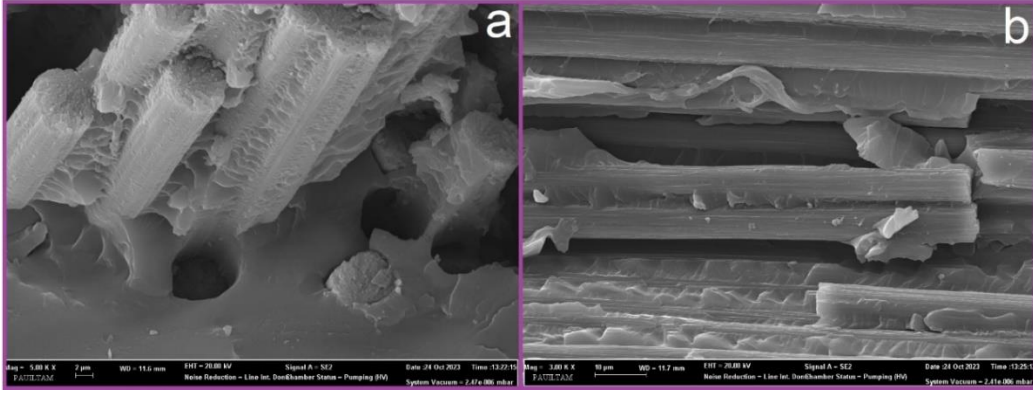


Şekil 6. Karbon elyaf FESEM görüntüsü ve EDS analizi (Carbon fiber FESEM image and EDS analysis)

Şekil 7'de 200g/m² plain dokuma karbon kumaş ile epoksi takviyeli karbon kompozitin çekme deneyi sonrası kopan bölgesinden alınan a) dik eksendeki, b) yatay eksendeki FESEM görüntüleri yer almaktadır. Şekil 7.a incelendiğinde kopan karbon lifler ile epoksinin gerekli ıslanabilirliği sağladığı, karbon lif ile epoksinin tam olarak yeterli homojenlikte birleşim sağladığı görülmüştür. Kopma anında karşı parçada kalan lifler ile epoksi üzerinde görülen dairesel bölgelerde tam olarak bütünleşmiş bir yapı oluştuğunu görülmektedir.

Çekme deneyi sırasında belli liflerdeki kopmalar epoksi yüzeyinde görülmektedir. Şekil 7.b incelendiğinde yatay formdaki lifler ile epoksinin birbiri içerisinde doğru dağılımda olduğu görülmektedir. Bu da epoksi ile lif arasındaki

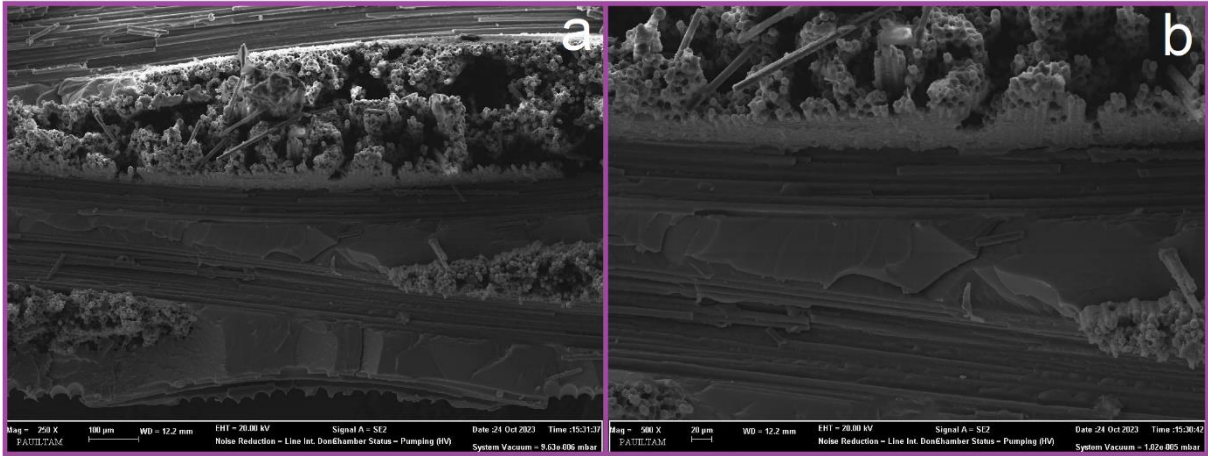
ıslanabilirliğin yeterli olduğunu göstermektedir. Bu aşamada epoksi ile karbon lif arasında yeterli adezyon kuvvetinin oluştuğu söylenebilir. Bu durum yapının çekme mukavemetini olumlu etkilemektedir [13].



Şekil 7. Takviyesiz epoksi ile üretilen karbon kompozit yapının çekme testi sonrası kesit bölgesinin a) Dik FESEM görüntüsü, b) Yatay FESEM görüntüsü (The cross-sectional area of the carbon composite structure produced with unreinforced epoxy after the tensile test a) Vertical FESEM image, b) Horizontal FESEM image)

Şekil 8’de 200g/m^2 plain dokuma karbon kumaş ile SiC takviyeli epoksi ile imal edilmiş karbon kompozitin çekme deneyi sonrası kopan bölgesinden alınan FESEM görüntüleri yer almaktadır. Şekil 8.a incelendiğinde kopan karbon lifler ile epoksinin gerekli ıslanabilirliği sağladığı, karbon lif ile epoksinin tam olarak birleşim sağladığı görülmüştür. Karbon lif bölgesinin hemen alt kısmında yapıya ilave edilen SiC takviyeleri görülebilmektedir. SiC takviyeleri, keskin köşeli olarak görülmekte olup, gerekli takviyelerin incelemesi için Şekil 8’de yer alan FESEM görüntüleri alınmıştır. Görüntülerde SiC’ün sert

keskin yapısının epoksi ve lifler içerisinde homojen dağıldığı ve yeterli ıslanabilirlik sayesinde tam birleşme bölgeleri elde edilebildiği görülmektedir. Bu durum SiC için epoksi ile yeterli kohezyon bağlantısının kurulmasının yanı sıra lif ile epoksi arasında yeterli adezyon kuvvetlerinin oluştuğunu göstermektedir [13].



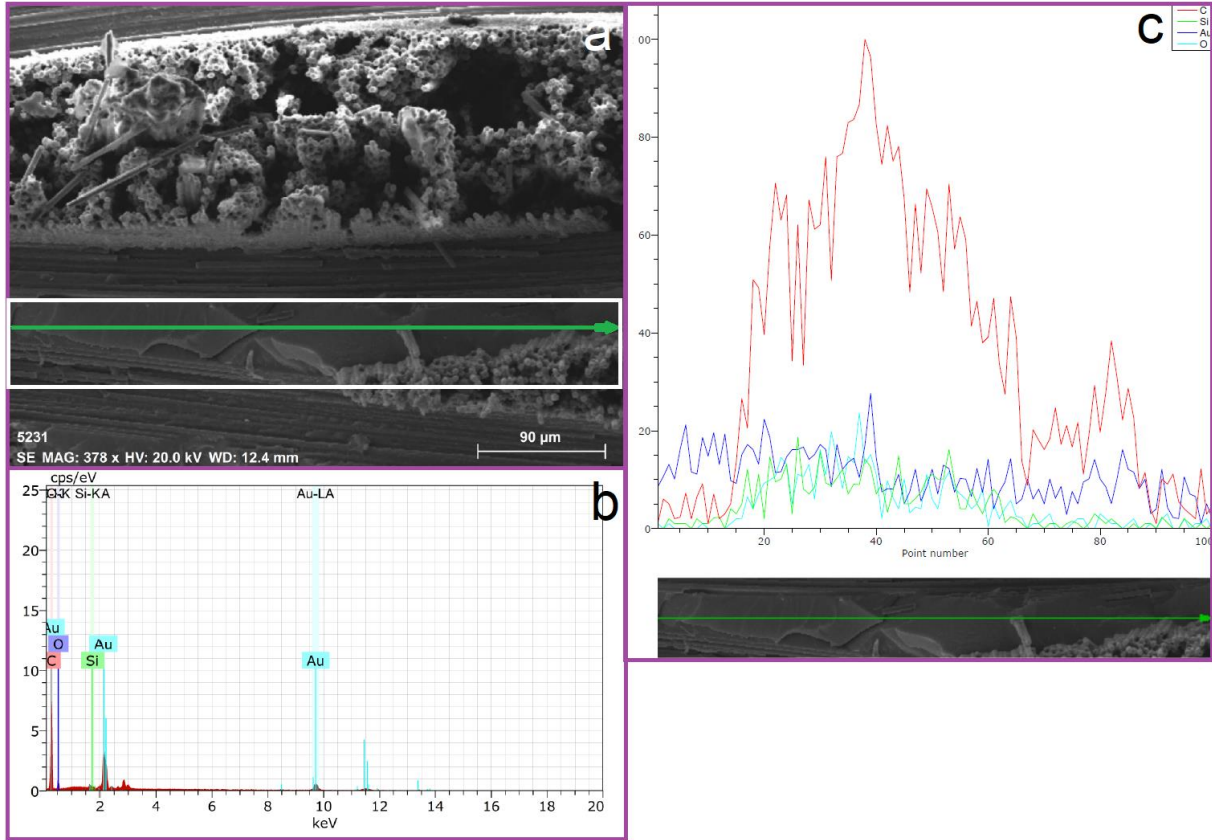
Şekil 8. %10 SiC takviyeli karbon kompozit yapının çekme testi sonrası kopma kesit bölgesine ait a) 250X, b) 500X büyütme FESEM görüntüleri (The fracture section area of the 10% SiC reinforced carbon composite structure a) 250X, b) 500X after the tensile test magnification FESEM images)

Şekil 9’da %10 SiC takviyeli karbon kompozit yapının çekme deneyinden elde edilen kopma kesit bölgesinin detaylı analizi yapılmıştır. Çalışma

kapsamında en iyi mukavemet değerleri %10 SiC takviyeli karbon kompozit numunelerde görüldüğü için ayrıntılı görüntüler bu oranda takviye edilmiş

karbon kompozit kopma numunesine ait örnek üzerinden alınmıştır. Şekil 9.a FESEM görüntüsü ve b FESEM görüntüsü üzerinden alınan (yeşil okun geçtiği bölgeye aittir) element şiddetleri, c’de ise ok ile gösterilen bölgeye ait çizgisel element dağılım şiddetleri yer almaktadır. Şekil 9.b’de yapıya ait pikler incelendiğinde; Au, C, O ve Si elementlerine ait pikler yer almaktadır. Yapıdaki Au, oluşturulan takviye üzerindeki iletim amaçlı kompozit numunelerin yüzeylerinde yer alan altın paladyum kaplamadan gelmektedir. Si ve C yapıda takviye edilen SiC takviyesinden gelmektedir. O elementinin yapıda karbon içeriğinden dolayı doğrudan geldiği bilinmektedir [14]. Şekil 9.c incelendiğinde ise, FESEM görüntüsü üzerinden alınmış ok ile gösterilen (Yeşil ok) bölgeden çizgisel EDS analiz pik şiddetlerini göstermektedir.

Yapıda C, Si, Au ve O pikleri ve element dağılımlarının çizgi boyunca şiddetleri yer almaktadır. Şekil 9’da görüldüğü üzere C içeriğinin yoğunlukta olduğu ve yapıdaki özelliklerin SiC takviyelerinde şiddetinin arttığı görülebilmektedir. Yapı incelendiğinde ilave edilen takviyelerin istenilen ıslanabilirlik ve ara yüzeyleri oluşturduğu söylenebilir. Bu sayede ise yapıdan beklenen gerekli mukavemet ve mekanik özelliklerin elde edildiği anlaşılmaktadır [15]. Karbon kompozit yapıda istenilen takviyelerin, istenilen homojenlikte ve ıslanabilirlikte kompozit yapı içindeki dağılımı sağladığı ve özellikle SiC takviyesi ile kompozit yapılarda istenilen mekanik özelliklerin iyileştirilmesine doğrudan katkı yaptığı söylenebilir [16].



Şekil 9. SiC Takviyeli numuneye ait, çekme sonrası dik kesit görüntüsüne ait a) FESEM görüntüsü, b) FESEM görüntüsüne ait EDS pikleri, c) FESEM görüntüsü çizgisel EDS şiddetleri (a) FESEM image of the vertical section image of the SiC Reinforced sample after tensile, b) EDS peaks of the FESEM image, c) Linear EDS intensities of the FESEM image)

Çalışma kapsamında %10 SiC ilavesiyle elde edilen numuneler sertlik, mekanik dayanım ve iç yapı incelemelerine göre değerlendirildiğinde alıştırdırılan numunelerin daha yüksek dayanım

sergilediği görülmüştür. Burada yapılan değerlendirmede çekme deneyinde elde edilen sonuçlar Tablo 1’de yer almaktadır

Tablo 1. Çekme deneyi sonuçları (Tensile test results)

Çekme Deney Kompozit İçeriği	Numune 1 (MPa)	Numune 2 (MPa)	Numune 3 (MPa)	Numune 4 (MPa)	Numune 5 (MPa)	Ortalama (MPa)
Takviyesiz karbon kompozit	178	189	159	200	183	182
%10 SiC Takviyeli karbon kompozit	268	238	247	272	260	257
%15 SiC Takviyeli karbon kompozit	200	202	190	185	180	191
%20 SiC Takviyeli karbon kompozit	188	105	143	130	147	143

Çekme deneyi yapılan numunelerde Tablo 1’ de belirtilen sıralamayla 5’er adet numune üzerinden sertlik ölçümleri yapılmıştır. Her numunenin 6 farklı bölgesinden alınan sertliğin ortalama değerleri Tablo 2’ de verilmiştir. Çekme deneyinde görülen dayanım artışları ile orantılı olacak şekilde

sertlik artışları da tespit edilmiştir. Sonuçlar kıyaslandığında en iyi sonuçların %10 SiC ilavesi sayesinde lifler ve epoksi arasında oluşan yapısal bağ ile sertlik ve rijitlik açısından bir artış sağlandığı söylenebilir.

Tablo 2. Rockwell sertlik testi sonuçları (Rockwell hardness test results)

Rockwell Sertlik Deneyi Kompozit İçeriği	Numune 1 (Sertlik-Derinlik)	Numune 2 (Sertlik-Derinlik)	Numune 3 (Sertlik-Derinlik)	Numune 4 (Sertlik-Derinlik)	Numune 5 (Sertlik-Derinlik)	Ortalama (Sertlik-Derinlik)
Takviyesiz karbon kompozit	63.2 HRH 135.1 μm	65.2 HRH 131.2 μm	57,4 HRH 144.1 μm	52.8 HRH 155.8 μm	63.4 HRH 134.7 μm	60,4 HRH 140,16 μm
%10 SiC takviyeli karbon kompozit	82.7 HRH 99.2 μm	72.8 HRH 104.3 μm	78.7 HRH 119.8 μm	85.3 HRH 89.7 μm	92.2 HRH 78.2 μm	82,4 HRH 98,24 μm
%15 SiC takviyeli karbon kompozit	75.2 HRH 111.8 μm	78.2 HRH 103.5 μm	65.2 HRH 123.6 μm	68.2 HRH 121.2 μm	75.2 HRH 109.9 μm	78,4 HRH 114 μm
%20 SiC takviyeli karbon kompozit	56.2 HRH 147.1 μm	68.2 HRH 125.5 μm	61.2 HRH 138.3 μm	65.3 HRH 133.2 μm	67.2 HRH 130.2 μm	63,6 HRH 134,86 μm

Malzemenin iç yapı görüntüleri incelendiğinde SiC ilavesinin epoksi içerisinde dağılımları incelenmiş ve karbon fiber ile uyumlu şekilde bir ıslanabilirlik sağladığı gözlenmiştir. Özellikle ilave edilen oranlar arasında karşılaştırma yapıldığında %10 SiC ilavesi yapılan numuneler için ortalama sertlik değerinin %15 ve %20 SiC ilaveleri yapılan numunelere göre daha yüksek olduğu görülmektedir. Karbon fiberin sahip olduğu yüksek dayanımın SiC ilavesi ile hem dayanım artışı hem de sertlik artışı sağladığı söylenebilir. Takviyesiz karbon kompozitte elde edilen ortalama sertlik değeri 60,4 HRH değerinde ölçümlenmiş iken %10

SiC takviyeli epoksi ile üretilmiş olan karbon kompozitler için ortalama sertlik değerinin 82,4 HRH değerine çıktığı görülmüştür. SiC ilavesinin artmasıyla hem dayanım hem sertlik artışının durumunu gözlemlemek için takviye oranı %15 ve %20 oranlarına arttırılarak numune üretimi yapılmıştır. %10 SiC takviyeli epoksi ile üretilmiş karbon kompozit numunelerde çekme dayanımı ve sertlik artışı net olarak görülmüştür. SiC oranı arttırılarak malzemedeki dayanım değerlerinin incelenmesi sağlanmıştır. Bu aşamada SiC oranı % 15’e çıkarıldığında mukavemet kısmen yüksek kalsa da takviye oranı arttıkça çekme dayanımı ve

sertlik değerlerinin önemli oranda azaldığı söylenebilir. Burada epoksi ve SiC partiküllerinde oluşan kimyasal bağ sürecinin epoksi içerisinde SiC'ün oransal artışının, sertlik etkisindeki azalmaya bağlı olarak, takviye malzemenin epoksinin malzeme yapısının ıslanabilirliğini olumsuz yönde etkilediği görülmüştür. Takviye edilen SiC oranındaki artış ile epoksinin yapısal birleştirme özelliğini kaybetmeye başladığı ve kompozit yapının dayanımında genel bir azalma olduğu görülmüştür. Islanabilirliğin tam sağlanamadığı durumda matris ve fiber yapının tam olarak tutunması ve homojen dağılımı istenmeyen bir yapıya dönüşebilmektedir. Bu durum genel olarak mukavemeti azaltır.

Karbon kompozit malzemede epoksi ile birlikte imal edilen kompozitler için epoksinin ömrüne

4. SONUÇLAR (CONCLUSION)

Çalışma kapsamında ilave edilen SiC takviyesi dışında farklı takviyeler ile kompozit yapılarda mukavemet artışları sağlanabildiği bilinmektedir. Bu aşamada SiC gibi kompozitte dayanım artışı sağlayabilecek; B₄C, Al₂O₃ elementlerinin yanında Mg ilavesi ile birlikte kompozit malzemelerin dayanımlarının artırılabilirliği ve daha uzun süreli iyi mukavemet değerleri göstermesi sağlanabilmektedir [18]. Bu amaçla sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenebilir;

- Katkı maddesi ilavesinin matris ve fiber arasında ıslanabilirliğin iyileştirilmesinde etkili olabilmesi için, katı malzeme yüzeyindeki enerjinin artırılması, reçine ile fiber arasında oluşan yüzey geriliminin azaltılabilmesi ve katı ile sıvı ara yüzey enerjisinin azaltılması sağlanmalıdır [19]. Bu çalışma kapsamında kullanılan %10 SiC ilavesiyle bu durumu destekleyebilecek şekilde mukavemet ve sertlik değerlerinde olumlu artışlar görülmüştür.
- Takviyesiz karbon kompozit numunelerin ortalama çekme dayanımları 182 MPa iken %10 SiC takviyeli numunelerde çekme dayanımı ortalama 257 MPa değerine yükselmiştir. Ayrıca bu durum sertlik açısından da polimer matrisin oluşturabildiği sertlik değerlerine olumlu katkı sunmuştur. Polimer matris

bağlı olarak zamanla dayanımda azalma olduğu bilinmektedir. Karbon fiber yapı birçok farklı çevresel koşulda yüksek dayanım sağlıyor olsa da polimer bazlı bir matris ile birleşim sonrasındaki kullanımı ekonomik ömrü içinde mukavemetini olumsuz etkileyebilir. Bu aşamada karbon kompozitin imalatı sürecinde eklenen katkı maddeleri ile epoksinin oluşturması muhtemel dayanım düşüşünü olumlu yönde destekleyebilecek yapıda elementler ile karbon kompozitin ömrünü uzatmak ve dayanıma olumlu katkı yapılması mümkündür [17]. Bu çalışma kapsamında SiC ilavesiyle epoksiye dayanım açısından avantaj sağlayabilmek için yapılan farklı oranlardaki takviyeler içinde %10 SiC ilaveli epoksi matris için öngörülen mukavemet ve sertlik artışı sağlanmıştı

oluşumunda seramik, metal vb. katkıların rolü önemlidir [20].

- Katkısız karbon kompozit numunelerde ortalama sertlik değeri 60,4 HRH değerinde iken %10 SiC takviyeli numunelerde ortalama sertlik değeri 82,4 HRH değerine kadar yükselmiştir.
- Farklı içerikte kullanılacak katkı maddeleri ile kompozit dayanımına olumlu etki yaratabilmek için ilave edilecek katkı maddelerinin parçacık büyüklükleri, parçacıklar arası mesafe ve homojen dağılımın düzenli olması önem arz etmektedir. Böylece katkı maddesinin hem matris yapı hem de takviye elementleri için olumlu birleştirme alanları oluşturması, ara yüzeylerdeki kuvvetler sayesinde boşluksuz ve homojen dağılım oluşturulması sağlanabilir [21].
- Dikkat edilmesi gereken önemli bir nokta da ilave edilen takviyenin kompozit içerisindeki yapılar ile uyumlu bir bütün oluşturmasıdır.

Genel olarak çalışma değerlendirildiğinde; SiC takviyesinin, üretilen kompozit malzeme için mukavemet ve sertlik artışı sağladığı görülmektedir. SiC takviyesi ile kompozit imalatında epoksinin uyum sağlaması önem arz etmektedir. Bu çalışmada ilave edilen takviyenin kompozit içinde özellikle ıslanabilirlik açısından içyapıda yeterli bağlanmayı sağlayabildiği tespit edilmiştir. Takviye SiC oranının %10 ve altında olması

üretmiş olan kompozitlerde ıslanabilirlik ve mukavemet artışı sağlamıştır.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

Çalışma kapsamında numunelerin sertlik ölçümlerini alabilmemiz için Ar-Ge departmanından destek aldığım DEBAK DENİZLİ BAGALİT KALIP SANAYİ VE TİC. A.Ş. firmasına ve Faruk İNCEOĞLU'na teşekkür ederim.

ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

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

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

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

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Chung, Deborah DL. Carbon Fiber Composites. Butterworth/Heinemann. 1994.
- [2] Karol HB, Ürkmez Taşkın N. Farklı takviye malzemeleri ilave edilmiş karbon fiber kompozit malzemelerin mekanik davranışlarının analiz edilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. 2019.
- [3] An JE, Jeon GW ve Jeong YG. Preparation and properties of polypropylene nanocomposites reinforced with exfoliated graphene. *Fibers And Polymers*. 2012; cilt 13, no. 4, 507-514.
- [4] Tiyek İ, Dönmez U, Yıldırım B, Alma MH, Ersoy MS, Karataş Ş, Yazıcı M. Kimyasal yöntem ile indirgenmiş grafen oksit sentezi ve karakterizasyonu. *Young*. 2016, 100000 (13000), 0-56.
- [5] Gülcan E. Karbon dokuma kumaş takviyeli kompozit malzemelerin fiziksel özelliklerinin incelenmesi, Doktora Tezi, Bursa Uludağ Üniversitesi. 2019.
- [6] Campbell Jr, FC. (Ed.). *Manufacturing processes for advanced composites*. Elsevier, 2003.

- [7] İşlek G. Kendi kendini onaran karbon elyaf takviyeli polimer matrisli kompozit geliştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi. 2022.
- [8] Kaya Aİ. Kompozit malzemeler ve özellikleri. *Putech & Composite Poliüretan ve Kompozit Sanayi Dergisi*. 2016; 29.
- [9] Uçak MY. Tabakalı karbon elyaf kompozit malzemelerde nano boyutta SiC, NiO, kil ve karbon tüp partikül katkılarının mekanik özelliklere etkisi. Yüksek Lisans Tezi. 2018.
- [10] ASTM D3039 Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials.
- [11] ISO 2039-2:2020 Plastics Determination of hardness Part 2: Rockwell hardness.
- [12] Buckley JD, Edie DD. Carbon-carbon materials and composites. William Andrew. 1993.
- [13] Stamm M. *Polymer Surfaces and Interfaces*, Ch.1, Springer, 2007.
- [14] Park SJ. *Carbon fibers*. Springer, Holland. 2015.
- [15] Soy U. SiC/B₄C Takviyeli Metal Matriks Kompozit Üretimi ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi. Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi. 2009.
- [16] Güler C. Alüminyum matrisli SiC takviyeli kompozit malzemenin mekanik özelliklerinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. 2012.
- [17] Wei H, Xia J, Zhou W, Zhou L, Hussain G, Li Q, Ostrikov KK. Adhesion and cohesion of epoxy-based industrial composite coatings. *Composites Part B: Engineering*. 2020; 193, 108035.
- [18] Gemci R. Polimer esaslı lif takviyeli kompozit malzemelerin arabirim mukavemeti üzerine farklı kür metotlarının etkisinin incelenmesi. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Dergisi*. 2002; Cilt 7/1.
- [19] Kaner, S. Plastik malzemelerin yapılandırılmasında yüzey işlemleri ve yaşlandırma etkisinin incelenmesi. 2017; 25-40, Doktora Tezi, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [20] Kaplan Y. Role of reinforcement materials on mechanical and tribological properties of PTFE composites. 2020; *폴리머*, 44(4), 436-444.
- [21] Erdoğan UH, Yasemin S, Kılıç GB. Kompozit Liflerde Takviye Malzemesi Dağılım ve Homojenliğinin Floresans Mikroskop ile Kontrolü. 1.Uluslararası Lif ve Polimer Araştırmaları Sempozyumu, 2016; 37.



Türkiye’de Elektrik Üretim Santrallerinin İç İhtiyaç Tüketimlerinin Yenilenebilir Kaynaklardan Karşılanabilmesi ve Emisyona Sağlayabileceği Katkı

İlker İLASLANER^{1,2}, Halil İbrahim VARİYENLİ^{3*}

¹Gazi University, Vocational School of Technical Sciences, Department of Design, Ankara, Turkey

²Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi Genel Müdürlüğü, Ankara, Turkey

³Gazi University, Vocational School of Technical Sciences, Department of Design, Ankara, Turkey

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 04/12/2023
Düzeltilme: 21/02/2024
Kabul: 24/05/2024

Anahtar Kelimeler

Türkiye elektrik kurulu
gücü ve üretimi
Elektrik üretim maliyetleri
Elektrik şebekesi emisyon
faktörü
PV (fotovoltaik)
Yenilenebilir enerji
kaynaklarından elektrik
üretimi

Article Info

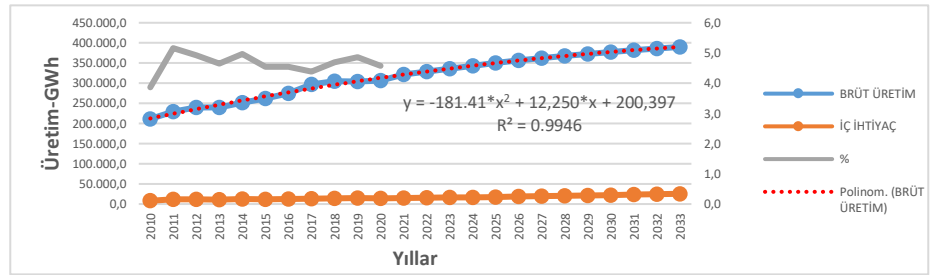
Research article
Received: 04/12/2023
Revision: 21/02/2024
Accepted: 24/05/2024

Keywords

Turkish electricity installed
capacity and generation
Electricity generation costs
Electricity grid emission
factor
PV (Photovoltaic)
Electricity generation from
renewable energy sources

Grafik Özet (Graphical/Tabular Abstract)

2010-2020 yılları arasında Türkiye brüt elektrik üretim bilgileri kullanılarak tespit edilmiş olan eğriye bağlı kalmak kaydı ile ileriye dönük olarak 2033 yılına kadar oluşacak brüt üretim, iç ihtiyaç tüketim değerleri belirlenmiş olup hangi kaynak tipinin maliyet açısından iç ihtiyaca karşılık gelen tüketimi karşılama anlamında uygun olacağı hesaplaması yapılmıştır. / Providing that it adheres to the curve determined using Turkey's gross electricity generation information between 2010 and 2020, the gross generation and internal consumption values that will occur prospectively until 2033 have been determined and it has been calculated which source type will be suitable in terms of cost to meet the consumption corresponding to the internal consumption.



Şekil A: 2010-2033 Brüt üretim ve iç ihtiyaç değişimi / Figure A: 2010-2033 Gross production and internal consumption change

Önemli noktalar (Highlights)

- Elektrik üretim santrallerinde iç ihtiyaç tüketimlerinin karşılanabiliyor olması önemlidir ve bu iç tüketim yenilenebilir üretim kaynakları ile karşılanabilir. / It is important that internal consumption can be provided in electricity generation plants, and this internal consumption can be provided with renewable generation sources.
- Hibrit elektrik üretim uygulamalarına teşvik verimliliğe büyük katkı sağlayabilmektedir. / Encouraging hybrid electricity generation practices can make a great contribution to efficiency.
- Karbon emisyon değerlerinin hesaplanması ve katkısı ülkeler için önemlidir. / Calculation and contribution of carbon emission values are important for countries.

Amaç (Aim): Çalışmanın amacı, elektrik üretim santrallerine ait iç ihtiyacın PV (fotovoltaik) ile daha az maliyetle karşılanabileceğini ve bunun karbon emisyonuna da azaltıcı yönde etki yapacağını gösterebilmektir. / The aim of the study is to show that the internal consumptions of electricity generation plants can be provided at a lower cost with PV (photovoltaic) and that this will have a reducing effect on carbon emissions.

Özgünlük (Originality): Matematiksel model yaklaşımı ile elektrik üretim ve santral iç ihtiyaç tüketim tahmini yapılarak karbon emisyon miktarları belirlenmiştir. / Carbon emission amounts were determined by estimating electricity production and power plant internal consumption with a mathematical model approach.

Bulgular (Results): Çalışma, yenilenebilir elektrik üretim kaynağına göre sistemin kendisini geri ödeme sürelerini ortaya koymaktadır. / The study reveals the payback periods of the system according to the type of renewable electricity generation source.

Sonuç (Conclusion): 2033 yılı için PV (fotovoltaik) ile iç ihtiyaç tüketiminin karşılanması durumunda karbon emisyonuna azaltıcı yönde katkısı 16.55 Mt olacağı bulunmuştur. / It has been found that if domestic consumption is met with PV (photovoltaic) for 2033, its contribution to reducing carbon emissions will be 16.55 Mt.



Türkiye’de Elektrik Üretim Santrallerinin İç İhtiyaç Tüketimlerinin Yenilenebilir Kaynaklardan Karşılanabilmesi ve Emisyona Sağlayabileceği Katkı

İlker İLASLANER^{1,2} , Halil İbrahim VARİYENLİ^{3*} 

¹Gazi University, Vocational School of Technical Sciences, Department of Design, Ankara, Turkey

²Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi Genel Müdürlüğü, Ankara, Turkey

³Gazi University, Vocational School of Technical Sciences, Department of Design, Ankara, Turkey

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 04/12/2023
Düzeltilme: 21/02/2024
Kabul: 24/05/2024

Anahtar Kelimeler

Türkiye elektrik kurulu
gücü ve üretimi
Elektrik üretim maliyetleri
Elektrik şebekesi emisyon
faktörü
PV (fotovoltaik)
Yenilenebilir enerji
kaynaklarından elektrik
üretimi

Öz

Bu çalışma, Türkiye’de elektrik üretimi için santrallerde kullanılan iç ihtiyacın yerli ve yenilenebilir kaynak tipi olan PV (fotovoltaik) ile üretilebileceği ve bu üretimin karbon emisyonuna olacak katkısı incelenmektedir. Bu amaçla Türkiye’de elektrik üretiminde yenilenebilir ve diğer kaynak tipinde kurulu güç değişimi yanında elektrik üretiminin 2010-2020 yılları arasındaki gelişimi incelenmiştir. Bununla birlikte ülke sınırları içindeki tüm elektrik üretim santrallerinin faaliyetinde kullanmış olduğu iç ihtiyaç tüketim miktarlarının yıllara göre değişimi belirlenmiştir. Belirlenen bu iç ihtiyaç tüketimine karşılık gelen karbon emisyon değerleri PV (fotovoltaik), rüzgar ve diğer yenilenebilir kaynak tiplerinde üretilerek karşılandığında emisyonu azaltıcı yönünde ne kadarlık bir katkı sağlayabileceği tespit edilmiştir. Elektrik üretim santrallerinde yıllık iç ihtiyaç tüketim miktarlarına bağlı olarak yenilenebilir kaynak tiplerine göre her yıl için kapasite faktörü ve buna göre karşılayabilecekleri kurulu güç miktarları tespit edilmiştir. 2010-2020 yılları arasında Türkiye brüt elektrik üretim bilgileri kullanılarak tespit edilmiş olan eğriye bağlı kalmak kaydı ile ileriye dönük olarak 2033 yılına kadar oluşacak brüt üretim, iç ihtiyaç tüketim değerleri belirlenmiştir. Ayrıca hangi kaynak tipinin maliyet açısından iç ihtiyaca karşılık gelen tüketimi karşılama anlamında uygun olacağı hesaplaması yapılmıştır. Bu çalışmada PV (fotovoltaik) ile sistemin kendini geri ödeme süresinin daha kısa olduğu sonucuna varılmıştır.

Ability to Afford Internal Consumption of Electricity Generation Power Plants in Turkey from Renewable Resources and Its Possible Contribution to Emissions

Article Info

Research article
Received: 04/12/2023
Revision: 21/02/2024
Accepted: 24/05/2024

Keywords

Turkish electricity
installed capacity and
generation
Electricity generation
costs
Electricity grid emission
factor
PV (Photovoltaic)
Electricity generation
from renewable energy
sources

Abstract

This study examines whether the domestic demand used in power plants for electricity generation in Turkey can be generated with PV (photovoltaic), a domestic and renewable resource type, and the contribution of this generation to carbon emissions. For this purpose, the development of electricity generation between 2010 and 2020 was examined, as well as the change in installed capacity in renewable and other resource types in electricity generation in Turkey. In addition, the change in internal consumption amounts used by all electricity generation plants within the country's borders over the years has been determined. It has been determined how much of a contribution it can make to reducing emissions when the carbon emission values corresponding to this determined domestic need consumption are met by producing PV (photovoltaic), wind and other renewable resource types. Depending on the annual internal consumption amounts in electricity generation plants, the capacity factor for each year according to renewable resource types and the installed power amounts they can meet accordingly have been determined. Prospectively, gross generation and internal consumption values that will occur until 2033 have been determined, provided that they adhere to the curve determined using Turkey's gross electricity generation information between 2010-2020. In addition, a calculation was made as to which resource type would be suitable in terms of cost to meet the consumption corresponding to the internal consumption. In this study, it was concluded that the payback period of the system with PV (photovoltaic) is shorter.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Elektrik enerjisi üretiminde fosil yakıtlı kaynakların (baz yük santrali) tükenme riski, PV (fotovoltaik) kaynak tipi olarak kurulum maliyetlerindeki düşüş ve karbon emisyonun önemli olması sebebiyle Türkiye elektrik santrali kurulu gücü içindeki PV (fotovoltaik) payında ciddi artışlar olduğu tespit edilmektedir [1].

Gelişmiş ülke ekonomilerinde elektrik enerjisi üretim ve tüketim artışı arasında doğrusal bir ilişki bulunmaktadır, aynı zamanda bu elektrik tüketim talebinin karşılanması üretim kaynağı arzının alınabilir kapasitesinin artışı ile mümkün olabilmektedir [2,3]. Özellikle de elektrik sistemlerinde en fazla tüketim seviyesine ulaşılan saatlerde (puant olarak da ifade edilen) talebin arz kaynağı olan yenilenebilir üretim santrallerinden karşılanabilmesi, bunlardan da PV (fotovoltaik) ile sağlanabilmesinin kolay olduğu tespit edilebilmektedir. Bununla birlikte hibrit elektrik üretim uygulamalarına teşvik verimliliğe büyük katkı sağlayabilmektedir [4].

Elektrik enerjisi üretiminde birincil (primer) kaynakların kullanımı ile yapılan üretimler her ne kadar güvenli görünse de elektrik sistemi işletmeciliği uygulamalarında sistem oturması (blackout) durumları her an yaşanabilmektedir. Elektrik sistem işletmecileri her karşılaştıkları sistem oturması için toparlanma eylem planları hazırlarlar ve bu planlar hayata geçirilirken elektrik üretim santral baraları enerjisiz olduğunda bunu yeniden çalışmaya müsait (black start özelliği) olan elektrik santralleri ile yapılabilmektedir. Bu tip santrallerin özellikleri iç ihtiyaç tüketimlerini kendileri sağlayabiliyor olmalarıdır. Fakat bu durum her santral için mümkün olmamaktadır, mümkün olanlarda ise çok uzun çalıştırılmama durumlarında iç ihtiyaç tüketimini sağlayamama risklerini barındırmaktadır.

Bu amaçla arz kaynaklarını temsil eden güç santrallerinde iç ihtiyaç kullanımı esnasında üretilen enerjinin bir kısmını kendi tesisinde sekonder teçhizat (koruma röleleri, diğer elektronik kontrol kumanda unsurları) ve tesisteki mesken tüketim unsurlarını ayakta tutabilmek için gereklidir. İç ihtiyaç olarak adlandırılan, elektrik güç santraline ait öz tüketimin yenilenebilir kaynak türü olan PV (fotovoltaik) ile karşılanabileceği farklı çalışmalarda incelenmiştir [4]. Ayrıca üretim

tesisleri iç ihtiyacı karşılama hususunda elektrik şebeke yönetmeliği kapsamında belirlenen tüm kriterleri ve test kabiliyetlerini de ihtiva etmekle sorumlu tutulurlar [5].

Yapılan çalışmada Türkiye geneli elektrik üretim santralleri iç ihtiyaç tüketim oranı 2010-2020 yılları arası ortalama %4.7 olarak tespit edilmiştir [6]. Tespit edilen bu seviyedeki iç tüketim oranı yenilenebilir kaynak olan PV (fotovoltaik) ile karşılandığında emisyonu azaltıcı yönde katkısının ne olacağı ve maliyetinin ne kadar sürede karşılanabileceği bununla birlikte diğer yenilenebilir kaynak türlerine göre de kıyaslaması yapılmıştır [7].

Elektrik enerjisi üretiminde birincil kaynaklarla faaliyet gösteren santrallerde yüksek kapasite faktörü %40 ve üzeri olanlar baz yük santraller olup termik özellikleri ön planda olanlardır. Bunun yanında orta kademedeki kapasite faktörü %20-%40 arası olanlar hidrolik kaynakların olduğu tesislerdir. Hem baz yük hem de orta kademe olan elektrik üretim tesislerinde iç ihtiyaç tüketimi yoğunluk taşımaktadır. Dolayısı ile %20 ve üzeri kapasite faktörüne sahip santrallerde hibritleşmenin sağlanması uygun görülebilir durumu doğurmaktadır [8]. Üretilen elektriğin bir kısmının kendi tesisinde iç ihtiyaç için tüketilmesi durumunda tüketimin yenilenebilir kaynak ile üretilerek karşılanması verimliliğin desteklenmiş olduğunun da kanıtını oluşturmaktadır.

Nihayetinde; bu çalışma hem baz yük santrallerde hem de diğerlerinde elektrik üretimi yaparken harcanan iç ihtiyaç tüketiminin PV (fotovoltaik) ile daha uygun biçimde karşılanabileceğini göstermektedir. Yani elektrik üretiminin hibrit hale getirilmesinin güç santraline ilişkin üretim verimliliği artışı sağlamada, karbon emisyonunu azaltmakta ve yedek güç kapasitesi oluşturmada ciddi katkılar sağlayacağı sonuç değerlerle ortaya konularak literatüre de bu yönde katkı sağlanmış olacaktır. İleride oluşturulması hedeflenen karbon piyasasında gerçekleşecek olan döngüde çevreye karbon emisyonu yükselişi ile verilen zararın yenilenebilir üretim kaynağı artışı sebebi ile azaltılıyor olması çalışma sonuçlarında da ortaya konabilmiştir.

2. METODOLOJİ (METHODOLOGY)

Yapılan çalışmada istatistiki amaçla kullanılmak üzere veri olarak elektrik enerjisi üretimine dair katkı sunan tüm kaynaklardan faydalanılmıştır. Bu kaynaklar, Resmi İstatistik Programına (RİP) dahilinde yurt içi ve yurt dışı paydaşları olan kurumların 2021 yılı için yayınlamış olduğu 2020 yıl sonu kesinleşmiş olan veriler içerisinden alınmıştır [8]. Mevcutta yapılan bu çalışma, geriye dönük 2010 yılından başlanarak önümüzdeki 2033 yılına kadarki süreci izlemek amacıyla (brüt elektrik üretim tahmini için) kullanılmıştır.

Elektrik enerjisi kurulu güç ve üretim miktarlarının kaynak tiplerine göre 2010-2020 yılları arasında nasıl gerçekleştiğinin kıyaslaması da yapılmıştır. Ayrıca PV (fotovoltaik) ile elektrik üretim faaliyetleri de 2010-2020 yılları için yokluğu ve varlığı arasındaki farkın nasıl gerçekleştiğini gözlemlene açısından uygun bir seçim olmuştur. Santrallerin kapasite faktörleri ise kaynak tipine bağlı kalmak kaydı ile yıl içindeki elektrik üretim değerleri ve kurulu güçlerinin 8,760 saat içinde ne kadar faaliyette bulunduğu üzerine hesaplanarak tablola haline getirilmiştir [8].

Karbon emisyonları hesabında ise Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı'nın birleşik emisyon değerleri dikkate alınmış olup kaynak tipine bağlı olarak düzenli olarak paylaşılmış veriler üzerinden gerçekleştirilmiştir. Emisyona katkı değerlerinin hesaplaması; birleşik emisyon değeri ve yıllık olarak yapılan üretim değerinin çarpımı ile yapılmıştır [9].

Zaman serisi analizinde en sık kullanılan yöntem trend analizi olup bağımsız değişken zaman, bağımlı değişken öngörülmesi istenen değer olarak elektrik üretim miktarıdır. Eğilim fonksiyonu tahmini uygulaması ile geçmiş yıllara ait veriler çerçevesinde ikinci dereceden polinomal fonksiyon

yaklaşımı kullanılmıştır [10]. Polinomal fonksiyon yaklaşımı ile verilerin geriye dönük (elektrik üretim miktarlarının 2010-2020 yılları arası) eğilimi de dikkate alınması sonucu elde edilen eğilim sonucu $y = -181.41 * x^2 + 12,250 * x + 200,397$ denkleminin kullanılmasını gerektirmiştir.

Elektrik üretiminde geriye dönük trend eğilimi dikkate alınarak bu çalışmada oluşturulan fonksiyonel yaklaşımla ileriye dönük yapılan tahminde R^2 değerinin 0.9946 olduğu gözlemlendi. Elektrik üretiminde iç ihtiyaç tüketiminin payını belirlemede son on yılın (2010-2020 yılları arası) ortalaması alınmıştır [11]. 2010-2020 arası ortalaması alınan bu değere ilişkin ileriki yıllara karşılık gelen iç ihtiyaç miktarları 2023 yılına kadar belirlenmiştir. Yenilenebilir kaynak tipine göre kurulu güç karşılıkları (iç ihtiyacı karşılama anlamında); ileriye dönük belirlenmiş olan iç ihtiyaç miktarlarının seviyesine bağlı kalınarak kapasite faktörleri de dikkate alınarak belirlenmiştir.

3. TÜRKİYE'DE ELEKTRİK KURULU GÜCÜNDEKİ VE ÜRETİMİNDEKİ GELİŞİM (DEVELOPMENT IN ELECTRICITY INSTALLED CAPACITY AND PRODUCTION IN TURKEY)

Türkiye elektrik kurulu gücü; 2010-2020 yılları arası için incelendiğinde 2010 yıl sonu 49,524.05 MW'tan 2020 yıl sonu 95,890.57 MW'a yükselmiştir. PV (fotovoltaik) kurulu güç değişimi 2010 yılında hiç yokken 2020 yıl sonu %6.95 seviyelerine yükselmiştir.

Kurulu gücün 2010 yılında en büyük payı %37.19 ile doğal gaz santrallerinde iken 2020 yılında en büyük pay %32.31 ile hidrolik santrallerindedir. Yenilenebilir kurulu gücünde pozitif gelişim olduğu Tablo 1'de ifade edilmektedir.

Tablo 1. 2010-2020 Kurulu güç karşılaştırması [6] (2010-2020 Installed capacity comparison)

Kaynak Tipi	2010 (MW)	%	2020 (MW)	%
Kömür	11,978.20	24.19	19,801.15	20.65
Sıvı Yakıtlar	1,772.66	3.58	372.26	0.39
Doğal Gaz	18,420.39	37.19	26,117.46	27.24
Yenilenebilir Atık+Atık Isı	107.20	0.22	1,502.80	1.57
Hidrolik	15,831.20	31.97	30,983.90	32.31
Jeotermal	94.20	0.19	1,613.20	1.68
Rüzgar	1,320.20	2.67	8,832.40	9.21
PV	-	-	6,667.40	6.95

Toplam	49,524.05	100	95,890.57	100
---------------	-----------	-----	-----------	-----

2010-2020 yılları arasında yenilenebilir enerji kaynaklarının toplam kurulu güç içerisindeki payı %35'ten %51.71 seviyesine ulaşmıştır. Yenilenebilir kurulu güç içerisinde kaynak tipine göre; hidrolik, rüzgar, jeotermal, PV (fotovoltaik), biyokütle bulunmaktadır [8].

Türkiye elektrik enerjisinde üretimi; 2010-2020 yılları arasında incelendiğinde 2010 yılı sonu

211,207.73 GWh'ten 2020 yıl sonu 306,703.09 GWh olarak artış sağlayarak değişmiştir. PV (fotovoltaik) elektrik üretimi 2010 yılında hiç yokken 2020 yıl sonu %3.57 seviyelerine yükselmiştir. 2010-2020 yılları arasında kaynak tipine göre üretim sınıflandırması yaptığımızda PV (fotovoltaik) santralleri üretimi 2020 yılında 10,950.18 GWh olarak gerçekleşmiştir.

Tablo 2. 2010-2020 Elektrik üretim karşılaştırması [6] (2010-2020 Electricity generation comparison)

Kaynak Tipi	2010 (MW)	%	2020 (MW)	%
Kömür	55,046.36	26.06	105,812.00	34.5
Sıvı Yakıtlar	2,180.02	1.03	322.66	0.11
Doğal Gaz	98,143.72	46.47	70,931.33	23.13
Yenilenebilir Atık+Atık Isı	457.51	0.22	5,736.63	1.87
Hidrolik	51,795.48	24.52	78,094.37	25.46
Jeotermal	668.21	0.32	10,027.70	3.27
Rüzgar	2,916.42	1.38	24,828.22	8.1
PV	-	-	10,950.18	3.57
Toplam	211,207.73	100	306,703.09	100

2010-2020 yılları arasında yenilenebilir enerji kaynaklarından üretimin tüm kaynaklar içerisindeki payı 2010 yılında %26.38 olarak tespit edilmiş olup bu değer 2020 yılında %41.85 seviyelerine ulaşmıştır. Yenilenebilir kurulu güç içerisinde kaynak tipine göre; hidrolik, rüzgar, jeotermal, PV (fotovoltaik), biyokütleden oluşan toplam değer dikkate alınmıştır.

Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı stratejik planlarında uzun dönem üretim gelişim değerleri incelendiğinde yenilenebilir enerji kaynakları ile elektrik üretim payı %50 değerinin üzerinde olacağı açık bir şekilde gözlemlenmektedir.

Ayrıca yenilenebilir atık olarak ifade edilen kaynak tipinin içerisinde biogaz, çöp gazı, katı bio, endüstriyel atık, bitkisel atık yağ ve protolitik yağ bulunmaktadır. Atık ısı kaynak türünde ise özellikle çimento ve cam sanayi işleyişi gereği atıkları ısıları değerlendirmek için buhar türbinleri yardımı ile elektrik üretilmektedir.

4. KAPASİTE FAKTÖRÜNÜN VE İÇ İHTİYACA KARŞILIK GELEN KURULU GÜCÜN BELİRLENMESİ (DETERMINATION OF THE CAPACITY FACTOR AND THE INSTALLED POWER CORRESPONDING TO THE INTERNAL CONSUMPTION)

2010-2020 yılları arasında Türkiye elektrik üretiminde faaliyette bulunan güç santrallerine ilişkin olarak ihtiyaç duydukları iç ihtiyaç tüketim miktarları yıllık olarak belirlenmiştir. Her santral kendi tesisine ait olan iç ihtiyaç tüketimini yıllık toplu şekilde ilgili kurumlara (satış sözleşmesi yaptığı birimlere) bildirmektedir. Elde edilen bu değerler yılına ilişkin olarak her kaynak türüne ait belirlenmiş yıl içindeki kapasite faktörü de dikkate alınarak hidrolik, jeotermal, PV (fotovoltaik) ve rüzgar kaynak tipine göre ne kadar kurulu güçle sağlanabileceği oranlanarak hesaplanmıştır [8].

Kapasite faktörü (CF); santralin belirli zaman periyodu (bir yılda 8,760 saat) içerisindeki çalışma saatinde (t) toplam üretmiş olduğu enerji miktarının (E) santral kurulu gücüne (P) oranı şeklinde ifade edilmektedir[8].

$$CF = \frac{E}{t \cdot P} \quad (1)$$

Hesaplanmış bu kurulu güç ve kapasite faktörüne bağlı olarak kaynak tipine göre üretilmesi gereken enerji miktarları hesaplanmıştır. Daha sonra da hesaplanan bu üretim değerine bağlı olarak kaynak tipine göre karbon emisyonuna katkısı hesaplanmıştır [9].

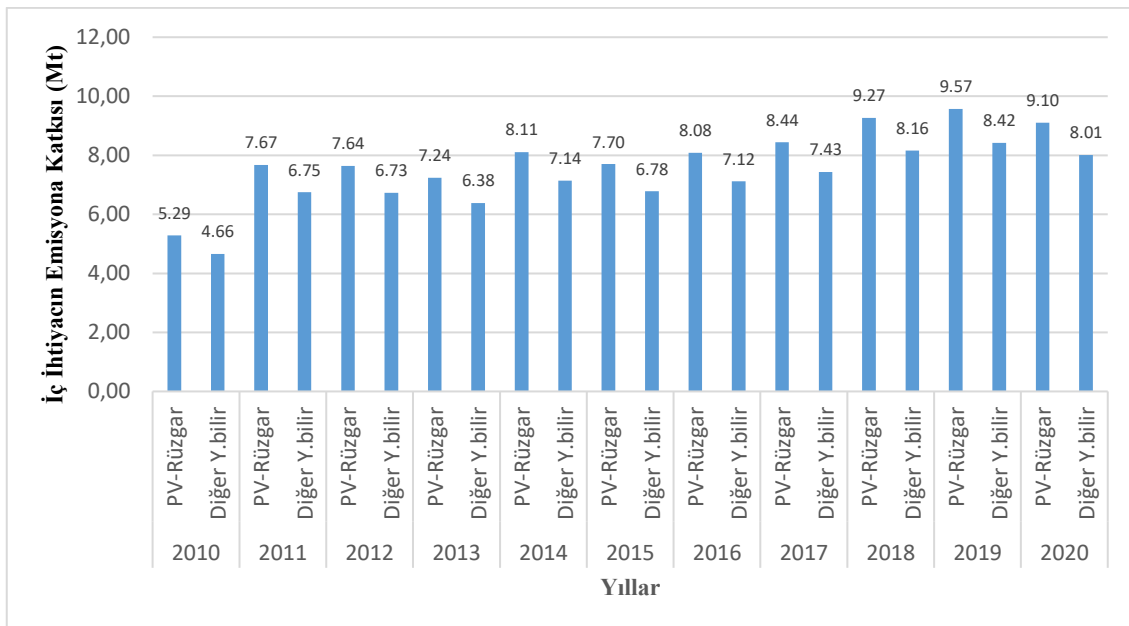
Yıl içerisinde toplam iç ihtiyaç tüketim miktarına bağlı olarak enerji üretiminin kurulu güce oranlanması ile kaynak tipine göre ortalama çalışma saatleri belirlenmiştir. Ortalama çalışma saatleri; Şekil 1’de ifade edilen biçimde olduğu gibi iç ihtiyaç tüketimini sağlayabilecek kadar elektrik üretimi PV (fotovoltaik), rüzgar ve diğer yenilenebilir üretim santralleri ile üretildiğinde emisyonu azaltıcı yönünde ne kadar katkı sağlayabileceği görselleştirilmiştir. Daha sonra da hesaplanan bu üretim değerine bağlı olarak kaynak tipine göre karbon emisyonuna azaltıcı yönde katkısı hesaplanmıştır. Hesaplama da emisyon katkısı katsayısının (Türkiye’de birleşik marj emisyon faktörü olarak) belirlenmiş olması da önem arz etmektedir. Üretim kaynak tipine göre çalışma saati de belirlenerek kapasite faktörü ile ne kadarlık kurulu güç ihtiyacı doğacağı iç ihtiyaç tüketimine karşılık kurulu güç olarak tespit edilip Şekil 2’de gösterilmektedir.

Emisyon değerlerinin hesaplamasında Enerji Tabii Kaynaklar Bakanlığı’nın belirlemiş olduğu; birleşik marj emisyon faktörünün hesaplanmasında mutlak surette faaliyet temelli marj ve gelişim temelli marj emisyon faktörü rakamları kullanılmaktadır. Enerji Tabii Kaynaklar Bakanlığı tarafından hesaplanan faaliyet temelli marj ve gelişim temelli marj kullanılarak PV (fotovoltaik), rüzgâr kaynaklı elektrik üretim santralleri ve diğer yenilenebilir enerji santralleri için iki farklı birleşik marj emisyon faktörü belirlenmiştir [9].

Tablo 3. Birleşik marj emisyon faktörü [9]
(Combined margin emission factor)

Faktör Türü	Yılı	Değeri (tCO ₂ /MWh)
Birleşik marj emisyon faktörü (PV ve rüzgâr)	2020	0.6488
Birleşik marj emisyon faktörü (diğer yenilenebilir)	2020	0.5552

Yenilenebilir enerji kaynaklı elektrik üretimi ile sağlanacak sera gazı salım (SGS) **azaltım hesaplamalarında** kaynak türüne göre hesaplanan **birleşik marj emisyon faktörleri iç ihtiyaç tüketim miktarlarına bağlı olarak yıllara sair belirlenebilmiştir.** Şekil 1’de ise 2010-2020 iç ihtiyaç tüketiminin emisyon katkısı ifade edilmiş olup bu değer; referans değerlere bağlı kalınarak (yılına ait olan iç ihtiyaç tüketiminin birleşik marj emisyon faktörü ile çarpımının sonucunda) hesaplanmıştır.



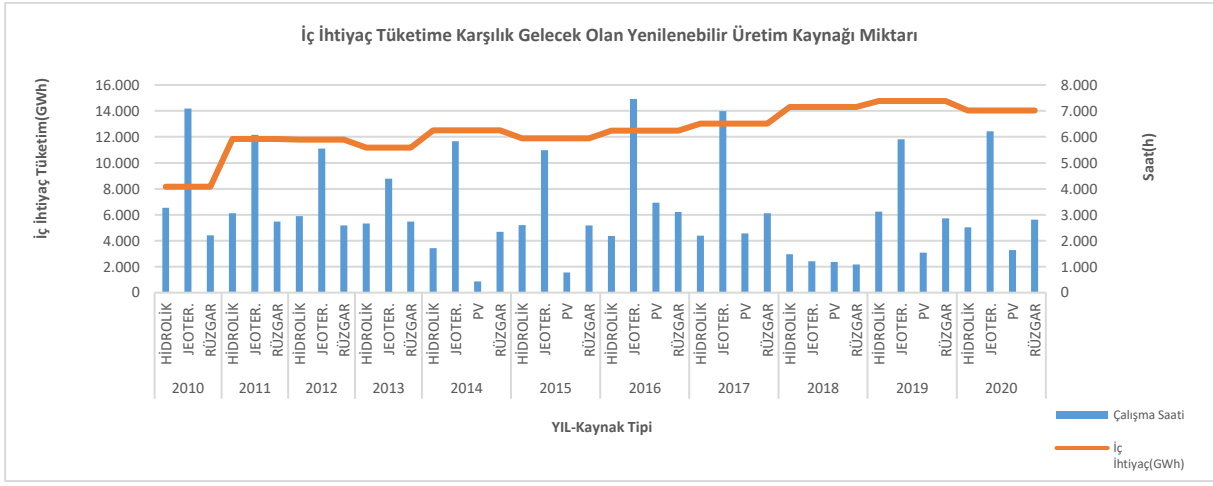
Şekil 1. 2010-2020 İç ihtiyaç tüketiminin yenilenebilir kaynak tipi üretimle karşılanmasında emisyon değerlerine azaltıcı yönde katkısı (Reducing contribution to emission values in meeting 2010-2020 domestic consumption with renewable resource type production)

Şekil 1’de ifade edilen biçimde olduğu gibi iç ihtiyaç tüketimini sağlayabilecek kadar üretimi PV (fotovoltaik), rüzgar ve diğer yenilenebilir üretim santralleri ile üretildiğinde emisyonu azaltıcı yönünde ne kadar katkı sağlayabileceği görselleştirilmiştir.

Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu (EPDK) tarafından yapılan düzenlemelerle hibrit üretime ilişkin teşvik edici uygulamaların da önü açılmıştır.

Bu sebeple elektrik sisteminde kurulu güç dikkate alındığında üretimde hibritleşmeyi 2021 yılı sonunda sağlayan elektrik üretim santrallerinin olduğu saha uygulamalarında gözlemlenmiştir.

Şekil 2’de 2010 ile 2020 yılları arasında bu çalışmada tahmin yapmak amacıyla eğilim değerler ile derlenmiş brüt elektrik üretim miktarı ve üretim santrallerinin iç ihtiyaç miktarında oluşan değişim ortaya konabilmektedir.

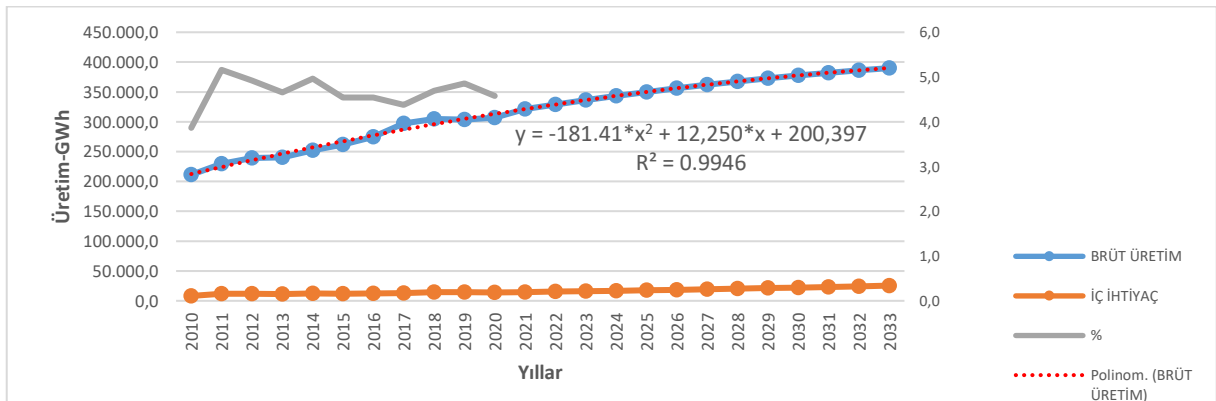


Şekil 2. 2010-2020 İç ihtiyaç tüketim değişimi (2010-2020 internal consumption change)

2010-2020 yılları arasında gerçekleşmiş olan gerçek üretim değerleri veri serisi değişim eğilimi dikkate alınarak polinomal denklem elde edilmiştir. Bu çalışmada, eğilim fonksiyonu tahminlemesi uygulaması ile geçmiş yıllara ait verilere göre ikinci dereceden polinomal fonksiyon yaklaşımı neticesinde elde edilerek kullanılan $y = -181.41 * x^2 + 12,250 * x + 200,397$ denklemdir. Fonksiyonel yaklaşım vasıtası ile ileriye dönük yapmış olduğumuz tahminde $R^2 = 0.9946$ olduğu Şekil 3’teki gibi gözlemlenmiştir.

R^2 “belirleme katsayısı” regresyon denkleminin başarısını ölçme yanında, denklemin “tahmin gücü”nü de yansıtır ve artıkların toplamının ortalamaların toplamına olan oranı ne kadar küçük ise R^2 değeri o kadar yüksek olacaktır ve 1’e yaklaşacaktır [13].

Fonksiyonel yaklaşımda iç ihtiyacın 2010-2020 yılları arasında ortalama olarak % 4.7 ortalama değere sahip olduğu, büyük miktarda sapsmaların olmadığı gözlemlenmiş olup ortalamanın korunacağı öngörülmüştür.



Şekil 3. 2010-2033 Brüt üretim ve iç ihtiyaç değişimi (2010-2033 Gross production and internal consumption change)

PV (fotovoltaik) ve rüzgar türbinlerinin çok modüler doğasına rağmen maliyetler, tipik olarak rüzgar veya PV (fotovoltaik) çiftlikleri inşa sayısındaki artışlarla ciddi oranlarda azalma eğilimini sürdürmektedir. Kullanılan teçhizat arz miktarında oluşan artışlarla birlikte uygulama sahalarının gelişmesini karşılama yönünde pozitif artış sağlayarak kurulum maliyet miktarlarını aşağı çekecektir [14].

Elektrik üretme maliyetlerinin ana etkenleri tipik olarak inşaat, yakıt (CO₂ emisyonları için yapılan harcamalar dahil), işletme ve bakım maliyetleri. Bütün bu faktörler tipik olarak maliyetleri düşüren ölçek ekonomileri ile santral büyüklüğünden etkilenirler [15]. Tablo 4’te Dünya Enerji Konseyi (DEK) yenilenebilir enerji üretim maliyetleri rapor çalışması sonucu elde edilen maliyet değişim tablosu oluşturulmuştur.

Tablo 4. Kaynak tipine göre maliyet değişimleri [15] (Cost variations by source type)

Teknoloji	Net Kapasite (MWe)				Fiyat (USD/kWe)			
	Min	Temel	Orta	Maks	Min	Temel	Orta	Maks
Nükleer	1,000	1,000	1,000	1,000	391	504	497.00	629
Pompa HES	175	458	200	1,000	563	1,962	897	4,426
Solar PV(yüzer)	8	8	8	8	860	860	860	860
Solar PV(kamusal)	0.83	26	20	100	534	995	923	2,006
Solar PV(ticari)	0.05	0.25	0.24	0.50	846	1,065	1,085	1,357
Solar PV(konut)	0.00	0.01	0.01	0.02	719	1,583	1,653	2,597
Solar Termal(CSP)	100	125	125	150	5,238	5,857	5,857	6,475
Rüzgar (Açık deniz)	11.25	186	100	600	1,721	2,876	2,740	4,039
Rüzgar (Karasal ≥1)	1.00	58	40	280	877	1,391	1,439	3,022
Rüzgar (Karasal <1)	0.01	0.19	0.19	0.90	1,782	2,852	2,852	5,539

4.1 Maliyet Analizi (Cost Analysis)

Türkiye’ de elektrik üretim santrallerinin üretim işleyişleri kademelerinde kullanmış olduğu santral iç ihtiyaç tüketimini PV (fotovoltaik), rüzgar ve jeotermal kaynak tipi ile karşılandığında birim 1 MW kurulu güç başına sistemin kendini geri ödeme süresinin kaç yılda sağlanabileceği hesabı [7];

PV (fotovoltaik) kurulum maliyeti ilk durumda; 1 MW için yaklaşık olarak 534,000 USD kurulum maliyeti(BC) çıkmaktadır. 1 MW’lık bir sistem yıllık Dünya Enerji Konseyi (DEK) Türkiye verilerine göre %16 kapasite faktörü(CF) ile ortalama 1,400,000 kWh elektrik enerjisi (E) üretir. Elektrik alış piyasa fiyatını (MC) koşullarına göre 0.09 USD / kWh’den hesaplırsak, yıllık 126,000 USD kazanç (R) sağlar ve bu sistemin kendini geri ödeme süresi (T) ise ;

$$R = MC * 1,000 * CF * 8,760 \quad (2)$$

Kazanç R değeri için eşitlik (2);

$$R = 0.09 * 1,000 * 0.16 * 8,760$$

$$R = 126,144 \text{ (USD)}$$

$$T = \frac{BC}{R} \quad (3)$$

Sistemin kendini geri ödeme süresi T için eşitlik (3);

$$T = \frac{534,000}{126,144} = 4.23 \text{ yıl}$$

Rüzgar(onshore) enerjisi kurulum maliyeti; 1 MW gücünde %35 kapasite faktörü ile 3,066,000 kWh elektrik enerjisi (E) üretebilir bir noktada kurulan rüzgar gülüne göre hesaplamada üretilen elektriğin YEK kapsamında satılması durumunda satış bedeli 0.0713 USD /kWh ayrıca işletme maliyeti 0.01296 USD /kWh olup elektrik alış piyasa fiyatını (MC) koşullarına göre 0,05834 USD / kWh olduğu belirlenerek; kurulum maliyeti 1,750 USD/kW (yatırım bedeli ve lisans bedeli dahildir). Bu bedelin bulunmasında günümüzde 1MW ve üstü rüzgar türbinlerinde yaklaşık türbin fiyatı 1,400 USD/kW’dır. Montaj edeli ve diğer masraflar rüzgar analizi, projelendirme fiyatın %25’i olarak 350 USD/kW (toplam kurulum maliyeti 1,750 USD/kW olarak alınmıştır).

Kazanç R değeri için eşitlik (2);

$$R = 0.05834 * 1,000 * 0.35 * 8,760$$

$$R = 178,870 \text{ (USD)}$$

Sistemin kendini geri ödeme süresi T için eşitlik (3);

$$T = \frac{1,750,000}{178,870} = 9.78 \text{ yıl}$$

Jeotermal enerjisi kurulum maliyeti; ikili çevrim jeotermal santralleri en sık kullanılan türbin türüdür. 1 MW gücünde %85 kadar kapasite faktörü ile yıllık 7,446,000 kWh elektrik enerjisi (E) üretebilir bir noktada kurulan santral için üretilen elektriğin YEK kapsamında satılması durumunda satış bedeli 0.0713 USD / kWh ayrıca işletme maliyetleri 0.0129 USD / kWh olup elektrik alış piyasa fiyatını (MC) koşullarına göre 0,0584 USD / kWh olduğu belirlenerek; kurulum maliyeti 2,500 USD/kW'dır (yatırım bedeli ve lisans bedelleri dahildir.)

Kazanç R değeri için eşitlik (2);

$$R = 0.0584 * 1,000 * 0.85 * 8,760$$

$$R = 434,846 \text{ (USD)}$$

Sistemin kendini geri ödeme süresi T için eşitlik (3);

$$T = \frac{2,500,000}{434,846} = 5.75 \text{ yıl}$$

Tablo 5. Kaynak tipine göre maliyet değişimleri
(Cost variations by source type)

Kaynaklar	Maliyet(USD/MW)	Sistemin Kendini Geri Ödeme Süresi(Yıl)
PV	534,000	4.23
Rüzgar (Karasal)	1,750,000	9.78
Jeotermal	2,500,000	5.75

Yenilenebilir kaynak türleri içerisinde PV (fotovoltaik) ile yapılacak olan sistemin kendini geri ödeme süresi 4.23 yıl kadar iken diğer kaynak tiplerinde süresinin Tablo 5'te de görüldüğü gibi daha uzun olduğu görülebilmektedir.

Yapılan araştırmalarda da PV (fotovoltaik) kaynak tipinde sistemin kendini geri ödeme süresinin diğer

kaynak tiplerine göre daha kısa olduğu tespit edilmiştir [16].

5. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Türkiye elektrik enerjisinde 2010-2020 yılları arasında PV (fotovoltaik) kurulu gücünde ve elektrik üretiminde ciddi artışlar sağlayarak dünya standartlarında işletme koşulları oluşturup faaliyet gösterdiği istatistiksel verilerde açık bir şekilde gözlemlenebilmektedir. Kurulu güçteki artışla birlikte maliyetlerde düşüşün olduğu bunda sonuç olarak elektrik piyasasına yansımış olduğu PV (fotovoltaik) elektrik üretim artışları ile kendini göstermektedir [17].

Türkiye genelinde elektrik üretim santrallerinin iç ihtiyaç miktarları üretim içindeki payı 2010 – 2020 yılları arasında ortalama %4.7 olarak gerçekleşmiştir. Bu miktarı maliyetleri sürekli ucuzlayan PV (fotovoltaik) santralleri ile daha karbonsuz ve daha az maliyetle (534,000 USD/MW kurulum maliyeti) 4.23 yıl gibi kısa sürede (jeotermal santral için 1,750,000 USD/MW kurulum maliyeti ile 5.75 yılda, rüzgar santrali için 2,500,000 USD/MW kurulum maliyeti ile 9.78 yılda) karşılanabilirliği bu çalışmada açıkça ifade edilmiştir. İç ihtiyaç tüketiminin diğer yenilenebilir kaynak tipleri (jeotermal, rüzgar kaynak tipleri) ile karşılanması oldukça uzun süreli sistemin kendini geri ödeme süresinin olması sonucunu doğurmaktadır. Ayrıca hidrolik potansiyelin inşaa süresi uzunluğu da göz önüne alındığında elektrik üretiminde hibrit yapılaşan model projelerde PV (fotovoltaik) uygulamaları; diğer yenilenebilir uygulamalar içerisinde daha pratik hatta sisteme entegrasyonu işletme/bakım maliyetleri açısından ucuz, çevreci model olarak uygulandığı istatistiklerde görülmektedir [18]. İlerde karbon piyasası oluşturulduğunda hibrit yapıları üretimlerin ciddi anlamda emisyon değerlerine azaltıcı yönde pozitif katkı sunacağı bu çalışmada gözlemlenmektedir [19].

Gelişmiş ülkelerde yenilenebilir enerji tüketimi tahmininde lineer eğri uygulamalı gayrisafi milli hasılanın da etkisinin hesaba katıldığı çalışmada R² değerinin 0.792891 olduğu belirtilmektedir [20]. Bununla birlikte elektrik dağıtım bölgesinde tüketim üzerinden yapılan lineer eğri uygulamalı yaklaşımda R² değerinin 0.859 aynı çalışmada polinomal ikinci dereceden denklem yaklaşımında

ise R^2 değerinin 0.864 olduğu tespit edilmektedir [21].

Yapılan bu çalışmada; 2010-2020 yılları arasında Türkiye elektrik üretimindeki veriler kullanılarak ileriye dönük (2033 yılına kadar olacak şekilde) polinomal ikinci dereceden denklem yaklaşımı ile yapılan tahminde R^2 değerinin 0.9946 olduğu gözlemlenmiştir. 2021 yılı için gerçekleşen brüt üretim değeri 321,274.40 GWh (iç ihtiyaç tüketimi 14,698.90 GWh- PV ile üretilseydi emisyonu azaltıcı yönde katkısı 9.54 Mt) tahmin yaklaşımında ise brüt üretim 306,703.1 GWh (iç ihtiyaç tüketimi 14,039 GWh-PV ile üretilseydi emisyonu azaltıcı yönde katkısı 9.11 Mt) olarak ve 2022 yılı için gerçekleşen brüt üretim değeri 328,989.40 GWh (iç ihtiyaç tüketimi 15,389.70 GWh-PV ile üretilseydi emisyonu azaltıcı yönde katkısı 9.98 Mt) tahmin yaklaşımında ise brüt üretim 334,723.10 GWh (iç ihtiyaç tüketimi 15,183.10 GWh-PV ile üretilseydi emisyonu azaltıcı yönde katkısı 9.85 Mt) olarak tespit edilmiştir. İç ihtiyaç tüketim ve brüt üretim tahmini gerçekleşen değerlere oldukça yakın olmuştur arkasında yatan en büyük sebep sadece tüketim değerlerinin değil de aynı zamanda iç ihtiyacın da dikkate alınması olarak belirtilebilir. Elektrik enerjisinde tahmin ve hesaplamalar yapılırken mutlaka kayıp niteliği taşıyan, özellikle iç ihtiyaç tüketim değerinin de göz önünde bulundurulması gerekmektedir.

Nihai olarak; çalışmada 2033 yılı için elektrik üretiminde gerçekleşmesi beklenen brüt üretim değeri 389,909.60 GWh, bunun yanında iç ihtiyaç tüketiminin de üretimin ortalama %4.7'si ile 25,506.10 GWh olacağı tespiti yapılmıştır. Yenilenebilir kaynak türlerinden PV (fotovoltaik) ile diğer yenilenebilir kaynak türlerine kıyasla daha kısa sistemin kendini geri ödeme süresinde (4.23 yılda) karşılanabileceği tespiti yapılabilmektedir. 2033 yılı için PV (fotovoltaik) ile iç ihtiyaç tüketiminin karşılanması durumunda karbon emisyonuna azaltıcı yönde katkısı 16.55 Mt olacağı da sonuç olarak ortaya konulabilmektedir. Elektrik santrali iç ihtiyaç tüketimi enerji miktarının PV (fotovoltaik) ile karşılandığında emisyonu azaltıcı yönde katkısının yüksek olacağı tespit edilebilmektedir.

SEMBOLLER VE KISALTMALAR (SYMBOLS AND ABBREVIATIONS)

BC : Kurulum Maliyeti
CF : Kapasite Faktörü

DEK : Dünya Enerji Konseyi
E : Enerji Miktarı
EPDK : Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu
MC : Piyasa Fiyatı
P : Kurulu Güç
PV : Fotovoltaik
R : Kazanç
SGS : Sera Gazı Salınımı
t : Çalışma Saati
T : Sistemin Kendini Geri Ödeme Süresi

ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

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

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

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

İlker İLASLANER: Literatür araştırması, senaryoların oluşturulması ve analiz edilmesi ile çalışmanın yazımında rol almıştır.

He played a role in the writing of the study by conducting literature research, creating and analyzing scenarios.

Halil İbrahim VARIYENLİ: Çalışmanın kontrolü ve yayınlanma sürecinin takibinde rol almıştır.

He played a role in the control and follow-up of the study's publication 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] Duman, S., Yörükeren, N., & Altaş, İ. H. (2014). Fotovoltaik Enerji Sistemlerinin Modellenmesi, Benzetimi ve Uygulaması. Düzce Üniversitesi İleri Teknoloji Bilimleri Dergisi, 3(1), 9-23.
- [2] Kyzym, M., Khaustova, V., Shpilevskiy, V., Salashenko, T., Hrynkevych, S., & Kruchinina, O. (2023). Consistency of Trends in The Economic and Energy Development of Ukraine: Assessment and Analysis. *International Conference on Sustainable, Circular Management and Environmental*

- Engineering* (s.13)
<https://doi.org/10.1051/e3sconf/202340801018>.
- [3] Berksoy, T., & Akdoğan, D. A. (2018). Yenilenebilir Enerjide Kamu Politikaları ve Türkiye. *Ratingacademy*, 19-42.
- [4] Economic and Social Commission for Asia and the Pasific. (2011). "Hybrid energy system". Bangkok: ESCAP.
- [5] Kurumu, E. P. (2014, 05 28). Elektrik Şebeke Yönetmeliği. *Elektrik Şebeke Yönetmeliği*. Ankara, Ankara, TR: EPDK.
- [6] TEİAŞ (2021). <https://www.teias.gov.tr/turkiye-elektrik-uretim-iletim-istatistikleri>
- [7] Kurt, M. B., & Ertuğrul, Ö. F. (2009). Yenilenebilir Enerji Kaynakları Maliyet Analizi ve Sürdürülebilir YEK Uygulamaları. V. *Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu* (s. 37-41). Diyarbakır: EMO.
- [8] IAEA. (1980). *Expansion Planning for Electrical Generation Systems*. Vienna: IAEA.
- [9] ETKB. (2023). <https://enerji.gov.tr>. ETKB.
- [10] Akgül, I. (1994). Zaman Serisi Analizi Ve Öngörü Modelleri. *Öneri Dergisi*, 1(1), 52-69. <https://doi.org/10.14783/maruoneri>.
- [11] Yüçemen, S. M. (2013). Sismik Tehlikenin Tahmini: Olasılık ve İstatistik Yöntemler. *İstatistik Araştırma Dergisi-Journal of Statistical Research*, 42-27.
- [12] Kaya, M. (2009). Birleşik Isı-Güç Santralının Enerji Üretimi ve Maliyet Açısından İncelenmesi. *C.B. Üniversitesi SMY Teknik Bilimler Dergisi*. www.researchgate.net/publication/344540751.
- [13] Günel, A. (2003). Regresyon Denkleminin Başarısını Ölçmede Kullanılan Belirleme Katsayısı ve Kritiği . *Doğuş Üniversitesi Dergisi*, 133-140.
- [14] Eryılmaz, F. (2022, Mayıs). *Kriter Dergi*. <https://kriterdergi.com/dosya-enerjide-donusum/yuksek-kurulum-maliyetinden-dusuk-kullanim-maliyetine-evrilen-yeni-nis-yenilenebilir-enerji>.
- [15] World Energy Council. (2021). *2020 Yenilenebilir Enerji Üretim Maliyetleri Raporu Özeti*. Dünya Enerji Konseyi Türkiye.
- [16] Güven, A. F. (2017). Bahçelievler Belediye Başkanlık Binasının Enerji İhtiyacının Güneş ve Rüzgar Sistemi ile Karşılanması, Optimizasyonu ve Maliyet Analizi. *Sinop Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 24-36.
- [17] Özbay, H., & Karafil, A. (2019). Bilecik İli için Güneş Enerji Santrali Maliyet Analizi. *BŞEÜ Fen Bilimleri* (Özbay & Karafil, 2019) *Dergisi* , e-ISSN: 2458-7575 (<http://dergipark.gov.tr/bseufbd>).
- [18] Mandi, R. P., & Yaragatti, U. R. (2013). Optimal Hybridization of Renewable Energy Systems to Improve Energy Efficiency. *The Journal of CPRI*, 521-532.
- [19] Ding, J. J., & Buckeridge, J. S. (2000). Design Considerations for a Sustainable Hybrid Energy System. *IPENZ Transactions*, 1-5.
- [20] Hadi, D., & Varedi, S. (2018). Assessment of the contemporaneous impacts of gross domestic product and renewable energy consumption, applying the dynamic panel data: Evidence from developed countries. *International Journal of Energy Economics and Policy*, 159-166.
- [21] Alkan, Ö., Genç, A., Oktay, E., & Çelik, A. K. (2013). Electricity Consumption Analysis Using Spline Regression Models: The Case of a Turkish Province. *Asian Social Science*, 231-240.

A Decision Support System for Detection of Trading Behavior in Energy Markets

Ezgi AVCI^{1*} 

¹TED University, Department of Applied Data Science, Ankara, Turkey

Article Info

Research article
Received: 18/04/2024
Revision: 01/04/2024
Accepted: 02/06/2024

Keywords

Energy Markets
Artificial Intelligence
Behavior Detection
Decision Support System

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 18/04/2024
Düzeltilme: 01/04/2024
Kabul: 02/06/2024

Anahtar Kelimeler

Enerji Piyasaları
Yapay Zeka
Davranış Tespiti
Karar Destek Sistemi

Graphical/Tabular Abstract (Grafik Özet)

Bu çalışmada enerji piyasası katılımcılarının (PK) ticari davranış tespitini yapan bir karar destek sistemi (KDS) geliştirilmiştir. Söz konusu KDS, PK'ların takip etmek istedikleri santral ve/veya santral tipine göre LGBM ile ticari davranış skorlaması yaparak piyasadaki ana oyuncuların ticari davranış tespitini gerçekleştirmektedir. / In this study, a Decision Support System (DSS) has been developed to detect the trading behavior of energy market participants (MP). This DSS scores the trading behavior of MPs based on the power plants and/or types of power plants they plan to monitor, using the LGBM method, and identifies the main players' trading behavior in the market.



Şekil A: KDS uygulaması/ Figure A: DSS application

Önemli noktalar (Highlights):

- Enerji piyasaları için ticari davranış tespiti yapan bir KDS geliştirilmiştir./A DSS has been developed for detecting trading behavior in energy markets.
- LGBM yöntemi kullanılmıştır./The LGBM method has been used.
- PK'ların ticari davranış skorlaması yapılmıştır./Trading behavior scoring of MPs has been performed.

Amaç (Aim): Geliştirilen KDS ile enerji PK'larının ticari davranış tespiti hedeflenmiştir. / The aim of the developed DSS is to detect the trading behavior of energy MPs.

Originality (Özgünlük): Enerji piyasaları için tarihi analiz, portföy izleme, piyasa izleme ve teklif önerisi verme aşamalarını bir KDS yapısında toplayan bir model literature kazandırılmıştır. Ayrıca literatürde ilk defa enerji PK'larının ticari davranış skorlaması yapılmıştır. / A model that combines historical analysis, portfolio monitoring, market surveillance, and bid recommendation stages in a DSS structure for energy markets has been introduced to the literature. Furthermore, this is the first time in the literature that commercial behavior scoring for energy MPs has been conducted.

Bulgular (Results): Geliştirilen KDS seçilen santraller üzerinde uygulanmış, bu santrallerin her bir santral tipine göre ticari davranış skorlaması yapılarak, tüm santrallerin fiyat duyarlılıklarına göre sıralaması yapılmıştır. / The developed DSS has been applied to selected power plants, and trading behavior scoring has been performed for each type of power plant, ranking all power plants according to their price sensitivity.

Sonuç (Conclusion): Bu makalede enerji piyasalarında PK'ların davranışını anlamaya ve analiz etmeye yönelik bir KDS geliştirilmiştir. KDS'nin yapısı hem teknik gereksinimlere uygun olarak tarihi analiz yapmayı, hem PK'ların kendi portföylerini veriye dayalı olarak izleyebilmesini hem de piyasayı akan veri üzerinden izleyerek ticari davranış tespitini gerçekleştirebilen bir yapıya sahiptir. / This article has developed a DSS aimed at understanding and analyzing the behavior of MPs in energy markets. The structure of the DSS is capable of historical analysis according to technical requirements, allowing MPs to monitor their own portfolios based on data and to detect trading behavior through streaming data in the market.



A Decision Support System for Detection of Trading Behavior in Energy Markets

Ezgi AVCI^{1*} ¹TED University, Applied Data Science Department, Ankara, Turkey

Article Info

Research article

Received: 18/04/2024

Revision: 01/04/2024

Accepted: 02/06/2024

Keywords

Energy Markets
Artificial Intelligence
Behavior Detection
Decision Support System

Abstract

The increasing complexity and regulatory needs in energy markets necessitate the development of innovative tools for monitoring and evaluating trading activities. This study introduces a decision support system (DSS) that accurately detects commercial behaviors of market participants using artificial intelligence techniques and big data analytics. The mentioned DSS allows for trading behavior scoring with LGBM based on the plant and/or plant type that market participants want to track, enabling them to make data-driven bids by detecting the main players' trading behaviors in the market.

Enerji Piyasalarında Ticari Davranış Tespiti için Karar Destek Sistemi

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi

Başvuru: 18/04/2024

Düzeltilme: 01/04/2024

Kabul: 02/06/2024

Anahtar Kelimeler

Enerji Piyasaları
Yapay Zeka
Davranış Tespiti
Karar Destek Sistemi

Öz

Enerji piyasalarında artan karmaşıklık ve düzenleme ihtiyacı, ticari faaliyetlerin izlenmesi ve değerlendirilmesi için yenilikçi araçların geliştirilmesini zorunlu kılmaktadır. Bu çalışma, piyasa katılımcılarının davranışlarını yapay öğrenme teknikleri ve büyük veri analitiği kullanarak ticari davranışları yüksek bir doğrulukla tespiti yapan bir karar destek sistemini (KDS) ortaya koymaktadır. Söz konusu KDS, piyasa katılımcılarının takip etmek istedikleri santral ve/veya santral tipine göre LGBM ile ticari davranış skorlaması yaparak piyasadaki ana oyuncuların ticari davranışlarını tespit edebilmekte ve bu sayede piyasa katılımcılarının veriye dayalı teklif verebilmelerini sağlamaktadır.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Enerji piyasaları, enerji kaynaklarının tüketicilere uygun maliyetlerle ulaştırılmasını ve enerji güvenliğinin sağlanmasını temin ederek küresel ekonomide kritik bir rol oynamaktadır. Ancak, enerji piyasalarının doğasında bulunan yüksek oynaklık ve karmaşıklık, piyasa katılımcılarının (PK) sürekli olarak yeni zorluklarla başa çıkmasını gerektirir. Bu zorluklar arasında artan piyasa katılımcı sayısı ve ticari veri hacmi bulunmaktadır.

Dünya genelinde elektrik piyasalarının yeniden yapılandırılmasını takiben, ticari davranış modelleme üzerine yapılan çalışmalar hızla artmaktadır. Bu çalışmalar genellikle idealize edilmiş ve teorik ekonomik varsayımlara dayanır, ancak bu varsayımlar her zaman pratik teklif verme davranışıyla uyumsuz. Bu uyumsuzluk, yaygın piyasa bazlı çalışmaların etkinliğini ve pratikliğini sınırlamaktadır. Bu boşluğu doldurmak amacıyla, EPIAŞ Şeffaflık Platformu'ndan alınan verileri kullanarak

elektrik piyasalarındaki teklif verme davranışını analiz eden veriye dayalı bir analiz çerçevesi ve Karar Destek Sistemi (KDS) önerilmektedir.

Bu araştırmanın yanıtladığı ana soru: *Enerji PK'larının ticari davranışlarını doğru bir şekilde tespit etmek ve analiz etmek için nasıl bir sistem geliştirilebilir ve bu sistem piyasa verimliliğini artırarak veriye dayalı karar vermeyi nasıl destekleyebilir?* Bu araştırmanın hipotezi, *Light Gradient Boosting Machine (LGBM) algoritmasını kullanan bir KDS, enerji PK'larının ticari davranışlarını geçmiş ve gerçek zamanlı verilere dayanarak etkili bir şekilde skorlayıp tespit edebileceği ve böylece piyasa şeffaflığını ve verimliliğini artıracak eyleme geçirilebilir içgörüler sağlayabileceğidir.*

Bu araştırmanın amacı, yapay zeka ve büyük veri analitiğinden yararlanarak enerji piyasası katılımcılarının ticari davranışlarını doğru bir şekilde tespit edebilen bir KDS geliştirmektir. Bu sistem, PK'larının izlemek istedikleri santral tiplerine göre ticari davranışları

skorlayabilmekte ve piyasanın ana oyuncularının davranışlarını tespit edebilmektedir. Böylece daha bilinçli ve veriye dayalı teklif kararları alınmasını sağlar.

Bu çalışma, enerji piyasaları için tarihi analiz, portföy izleme, piyasa gözetimi ve teklif önerisi aşamalarını tek bir KDS yapısında birleştiren yenilikçi bir model sunmaktadır. Ayrıca, enerji PK'larının ticari davranış skorlamasını ilk kez literatüre kazandırmaktadır. Bu bileşenleri bütünleştirerek, KDS enerji piyasalarındaki ticari davranış dinamiklerini anlamak ve analiz etmek için kapsamlı bir araç sağlar.

2. LİTERATÜR TARAMASI (LITERATURE SURVEY)

2.1. Teorik Çalışmalar (Theoretical Studies)

PK'ların davranışını teorik olarak açıklamaya çalışan birçok çalışma yapılmıştır, bunlar arasında PK'ların optimal ticari stratejilerini hesaplama [2]; [3] piyasa takas fiyatı (PTF)'ni simüle etme [4] [5] ve piyasa gücünü hafifletmek için düzenleme mekanizmaları tasarlama [6] yer almaktadır. Çoğu çalışma, teorik mikro ekonomik modellere, özellikle oyun teorisine dayanmaktadır [7] [8]; dolayısıyla, PK'ların stratejik tekliflerini, PK'ların her zaman rasyonel bir şekilde hareket ederek elde edilen bilgileri tam olarak kullanarak bireysel kazançlarını maksimize ettiği idealize varsayımıyla betimlerler [9].

Ancak, teorik çalışmalar ile PK'ların gerçek davranışları arasında sıkça önemli bir uyumsuzluk vardır: PK'ların gerçek ticari davranışlarının idealize hipotezlerden sapması. Teori ile pratik arasındaki bu uyumsuzluk, stratejik ticari davranışları üzerine yaygın çalışmaların etkinliğini ve pratikliğini sınırlamaktadır. Örneğin, EPIAŞ Şeffaflık Platformundan çektiğimiz teklif veri seti üzerindeki fizibilite çalışmamızda, bir PK'nın teklif verme davranışının her zaman piyasa senaryosuyla değişmeyebileceğini, ancak genellikle bitişik zaman dilimleri arasında benzer olduğunu bulduk, bu da teorik çalışmalardaki simülasyon sonuçlarıyla çelişmektedir [10]. Ayrıca, PK'ların genellikle eksik bilgilere sahip olmaları nedeniyle, teklif stratejileri her zaman fiyat alıcı veya fiyat belirleyici olarak temsil edilmeyebilir [11] ve daha fazla çeşitlilik gösterebilir.

2.2. Teorik Çalışmaları Veri ile Doğrulmayı

Amaçlayan Çalışmalar (Studies Aiming to Validate Theoretical Studies with Data)

Akıllı şebekelerin gelişimiyle birlikte, daha fazla yenilenebilir kaynak ve yeni elektrik ekipmanları kademeli olarak güç sistemlerine entegre edilmekte, böylece sistem belirsizliğini artırmakta ve piyasa simülasyonunu daha da zorlaştırmaktadır [12]. Piyasayı daha etkili bir şekilde simüle etmek ve değerlendirmek için, PK'ların ve ticari davranışlarının daha ayrıntılı bir anlayışına sahip olmak önemlidir. PK'ların ticari davranışlarını tanımlamak için uygun bir analiz yöntemi, gerçek piyasa verilerine dayanmalıdır. Birkaç çalışma piyasa verilerini analiz etmiştir. Doraszelski, 6 yıllık bir dönem boyunca İngiltere talep tarafı katılımının evrimini analiz etmiş ve fiyatların nasıl istikrar kazandığını ve PK'ların teklif stratejilerinin zamanla nasıl değiştiğini göstermiştir [13]. Hortaçsu ve Puller, Teksas elektrik piyasası üzerinde ayrıntılı verilerle bir dengeli modeli kurarak PK'ların optimal teklif stratejilerini simüle etmiş ve sonuçları gerçek teklif davranışlarıyla karşılaştırmıştır [14]. Kohansal ve diğerleri, büyük jeneratörler üzerinde sınırlı veri ile bir ay boyunca Kaliforniya'nın gün öncesi piyasasındaki (GÖP) fiyat esnekliklerini analiz etmiş ve yenilenebilir enerji etkilerini değerlendirmiştir [15]. Ayrıca, Kaliforniya enerji piyasasındaki talep tekliflerine ilişkin pilot bir çalışma yapılmış; aynı gün için seçilmiş santrallerin detaylı talep teklifleri sunulmuş, gelecekteki analiz yöntemleri tartışılmış ve öneriler sunulmuştur [16]. Ancak, bu çalışmalar ya teorik modelin doğruluğunu veri kullanarak değerlendirmeye ve tüm piyasanın fiyat eğilimlerini analiz etmeye ya da sadece bir günün teklif verilerini grafiksel olarak sunmaya çalışmıştır.

2.3. Veriye Dayalı Çalışmalar (Data-driven Studies)

Teorik analiz yöntemlerinin aksine, veriye dayalı yöntemler, araştırmacılara olayları sezgi veya idealize varsayımlara dayanarak değil, verilere dayanarak anlama ve analiz etme olanağı sağlar. Makine öğrenimi algoritmalarının hızlı gelişimi ve veri kaynaklarına erişilebilirliğin artmasıyla, akıllı şebekelere uygulanan veriye dayalı analizler, son yıllarda mühendislik çalışmalarında popüler bir konu haline gelmiştir. Yaygın veriye dayalı araştırmalar, fiyat [17] ve yük tahmini

[18][19] yenilenebilir çıktı profilleri [20], hane halkı tüketici davranışı [21] [22], anomali tespiti [23], optimal güç akışı [24] ve güç sistem operasyonu [25] ve planlamasına [26] başlıca uygulanmıştır.

Çok az çalışma, PK'ların ticari davranışlarını analiz etmek için; rakiplerin marjinal maliyetlerini tahmin etmek veya toplam arz eğrilerini çıkarsamak gibi; veriye dayalı yöntemleri kullanmayı denemiştir. [27], açık enerji miktarları ve yerel marjinal fiyatlar temelinde marjinal tedarikçilerin marjinal maliyetlerini belirlemek için ters fonksiyon yöntemlerini kullanmıştır. Yöntemler daha sonra fiyat kırılğan tüketiciler [28], talep tarafı yönetimi [29] ve piyasa tedarikçilerinin optimal teklif vermesi [30] için geliştirilmiş ve uygulanmıştır. [31], gizli Markov modeline dayanarak gün öncesi elektrik piyasasında toplam arz eğrisini çıkarsamak için bir Bayes çıkarımı yaklaşımı önermiştir. Ancak, bu çalışmalar esas olarak önerilen yöntemleri gerçek veriler yerine üretilen (sentetik) veriler üzerinde değerlendirmektedir. Ayrıca, bu çalışmalar; PK'ların teklif verme davranışlarını analiz etmek yerine; belirli değişkenleri (örneğin bir rakibin marjinal maliyetleri gibi) hesaplama üzerine odaklanmaktadır. Bunun ana nedeni, teklif veri setleri çoğu piyasada gizli bilgi olarak kabul edilmektedir ve yayınlanmamaktadır.

Avustralya Enerji Piyasası (AEM) (Australian Energy Market Operator,2019) ve ABD'deki Midcontinent Bağımsız Sistem Operatörü (MISO), Türkiye enerji piyasası (EPIAŞ Şeffaflık platformu) gibi belirli enerji piyasaları, araştırmacıların gerçek veriye dayalı ticari davranışlarını analiz etmelerine olanak tanıyan işlem verilerini açık ve şeffaf bir şekilde açıklamaktadır.

PK'ların ticari davranışlarını büyük teklif veri setine dayanarak doğrudan tanımlamak zordur. Teklifler birçok zaman diliminde benzer olduğundan ve genellikle birkaç modeli oluşturmak üzere toplanabileceğinden, büyük teklif veri setinden bireysel tipik teklif modellerini çıkarmak için kümeleme yöntemleri kullanılmaktadır. Kümeleme yöntemleri; benzer veri setlerini gruplamak ve model çıkarmak için yaygın olarak kullanılmaktadır, bu yöntemler hane halkı yük sınıflandırması [32] ve senaryo indirgeme [33] için geniş bir şekilde kullanılmıştır.

Ancak, tipik olarak analiz edilen zaman serisi verileri; örneğin piyasa fiyatları ve yükler ile karşılaştırıldığında; gerçek teklif verileri farklı formatlardadır ve mevcut kümeleme yöntemleriyle doğrudan kümelenebilir değildir. Bu farklılıklar şunlardır: (1) Teklif verileri fiyat-miktar çiftleri olarak sunulur, bu da yaygın olarak analiz edilen zaman serisi formatlarından farklıdır. (2) Mevcut teklif kapasitesindeki fark, analiz edilen veri serisinin uzunluğunu etkiler ve analiz sürecini zorlaştırır. (3) Negatiften pozitif, binlerce liraya kadar değişen, geniş teklif fiyat aralıkları, piyasa takas fiyatlarına yansıtılmaz, ancak analiz sonuçları üzerinde büyük bir etkiye sahiptir. Bu farklılıklardan dolayı teklif verileri için özel olarak bir veri standardizasyon işleme yöntemi geliştirilmelidir.

Bu çalışmada; veri standardizasyon işleme yöntemi ve uyarlanabilir bir skorlama yöntemi temelinde, teklif verme davranışlarını analiz etmek için veriye dayalı bir çerçeve ve KDS önerilmektedir. Veri işleme yöntemi; teklif eğrisi örnekleme, veri uzunluğunun birleştirilmesi ve aşırı fiyat kesme dahil olmak üzere, teklif veri formatı özelliklerini ele almak ve daha ileri analizler için orijinal teklif verilerini standartlaştırmak için kullanılmıştır. PK'ların tipik teklif modellerini çıkarmak için uyarlanabilir bir teklif verme davranışı skorlama yöntemi önerilmiştir.

3. KARAR DESTEK SİSTEMİ GELİŞTİRİLMESİ (DEVELOPMENT OF DECISION SUPPORT SYSTEM)

3.1. Model Kabulleri (Model Assumptions)

Bu çalışma, merkezi olarak optimize edilen bir enerji piyasasındaki tedarikçilerin ticari davranışlarına odaklanmaktadır. Gün öncesi piyasasında (GÖP); her PK bir sonraki gün için, fiyat ve miktar arasındaki tercih edilen ilişkiyi belirten basamaklı teklifler sunar. Piyasa yapıcı (PY), teklifleri topladıktan sonra optimizasyon algoritmasını çalıştırarak her saat için piyasa takas fiyatını (PTF) belirler. Enerji piyasaları literatürüne göre, PK'lar fiyat alıcılar ve fiyat belirleyiciler olarak kategorize edilebilir. Fiyat alıcı, genellikle teklif verme davranışlarının piyasa takas sonuçları üzerindeki etkilerini teklif stratejileri üzerine karar verme sürecinde dikkate almaz [34]. Ayrıca, fiyat alıcı genellikle sınırlı piyasa gücü nedeniyle PTF üzerinde çok az etkiye sahiptir [35] [36]. Buna karşılık, fiyat belirleyici genellikle büyük bir piyasa gücüne

sahiptir ve teklif stratejisini seçerken tekliflerinin piyasa fiyatları üzerindeki etkilerini dikkate alır. Ayrıca, PK'lar aynı zamanda stratejik olmayan katılımcılar ve stratejik katılımcılar olarak da kategorize edilebilir. Stratejik olmayan PK'lar, PY'ya fiyat-miktar çiftleri olarak gerçek marjinal maliyetleri ve maksimum kapasitelerini sunar. Ancak, stratejik katılımcıları temsil eden PK'lar, sistem marjinal fiyatlarını artırmak veya mevcut kapasiteyi değiştirerek arz-talep oranlarını değiştirmek için fiyat-miktar çiftlerini ayarlayabilir. Teklif ayarlamaları; fiziksel saklama, finansal saklama veya her ikisinin bir kombinasyonunu içeren stratejik teklif verme davranışlarını temsil eder [37].

3.2. Teorik Arka Plan (Theoretical Background)

3.2.1. Elektrik piyasalarında stratejik teklif verme (Strategic Bidding in Electricity Markets)

Elektrik piyasalarında stratejik teklif verme, PK'ların elektrik üretim kapasitelerini ve maliyetlerini göz önünde bulundurarak piyasa fiyatlarını, talep değişimlerini ve rekabet koşullarını en iyi şekilde değerlendirmek amacıyla belirledikleri teklif stratejileridir. Bu süreç, enerji santrallerinin elektrik üretimini kârlarını maksimize edecek şekilde planlayarak teklif vermelerini içerir.

Doğalgaz Santralleri için Stratejik Teklif Verme (Strategic Bidding for Natural Gas Power Plants)

Doğalgaz santralleri, hızlı yanıt verebilme kabiliyetleri ve esneklikleri nedeniyle elektrik piyasalarında önemli bir rol oynar. Doğalgaz fiyatları genellikle yüksek dalgalanma gösterir. Doğalgaz santralleri, teklif verirken yakıt maliyetlerini dikkatlice analiz eder ve bu maliyetleri karşılayacak fiyat seviyelerini belirler. Doğalgaz santralleri, diğer santrallere kıyasla daha hızlı devreye girip çıkabildikleri için piyasa talep dalgalanmalarına hızla yanıt verebilir. Bu esneklik, stratejik teklif verme süreçlerinde önemli bir avantaj sağlar. Doğalgaz santralleri, elektrik fiyatlarının düşük olduğu dönemlerde üretimi azaltabilir veya durdurabilir ve fiyatların yüksek olduğu dönemlerde daha fazla üretim yapmak için teklif verebilir. Talep eğilimleri ve piyasa fiyatları genellikle günün saatlerine ve

mevsimlere göre değişir. Doğalgaz santralleri, yüksek talep ve fiyat dönemlerinde üretim yapmayı tercih eder.

Kömür Santralleri için Stratejik Teklif Verme (Strategic Bidding for Coal Power Plants)

Kömür santralleri, genellikle büyük ölçeklidir ve sabit maliyetli üretim kapasitesi ile yüksek sabit maliyetlere sahiptir. Bu nedenle, kâr elde edebilmek için sürekli olarak yüksek kapasitelerde çalışmaları gerekir. Stratejik teklif verme, bu maliyetlerin karşılanabilmesi için uygun fiyatların belirlenmesini içerir. Kömür santralleri, piyasa talep ve arz dengesini sürekli olarak izler ve bu dengeye göre tekliflerini ayarlar. Talebin yüksek olduğu dönemlerde daha düşük fiyatlarla teklif vererek kapasitelerini tam kullanmayı hedefler. Kömür santralleri genellikle uzun vadeli enerji satış anlaşmaları yapar. Bu anlaşmalar, piyasa fiyatlarının dalgalanmasından bağımsız olarak sabit bir gelir sağlar ve stratejik teklif verme süreçlerini etkiler. Çevresel düzenlemeler ve karbon emisyon maliyetleri, kömür santrallerinin teklif verme stratejilerini etkiler. Stratejik teklif verme süreçlerinde bu maliyetler dikkate alınarak fiyatlar belirlenir.

Hidroelektrik Santralleri için Stratejik Teklif Verme (Strategic Bidding for Hydroelectric Power Plants)

Hidroelektrik santralleri, yenilenebilir enerji kaynakları arasında önemli bir yere sahiptir ve su akışına dayalı üretim kapasiteleri ile bilinir. Hidroelektrik santralleri, su kaynaklarının mevcudiyetine bağlı olarak üretim yapar. Su akışının yüksek olduğu dönemlerde daha fazla üretim yaparak düşük fiyatlarla teklif verebilirler. Su akışları mevsimsel değişikliklere bağlıdır. Hidroelektrik santralleri, su akışının yüksek olduğu yağışlı mevsimlerde daha düşük fiyatlarla enerji üretebilirken, kurak mevsimlerde daha yüksek fiyatlarla teklif vererek suyu koruyabilir. Hidroelektrik santrallerinin çevresel etkileri ve sosyal sorumlulukları dikkate alınarak stratejik teklif verme süreçleri yönetilir. Sürdürülebilir su kullanımı ve ekosistemlerin korunması, stratejik teklif vermede önemli bir rol oynar. Hidroelektrik santralleri, yenilenebilir enerji teşviklerinden yararlanabilir. Bu teşvikler, stratejik teklif verme süreçlerinde fiyatların belirlenmesinde önemli bir etken olabilir.

3.2.2. KGÜP/EAK'nin stratejik teklif vermedeki önemi (The Importance of KGÜP/EAK for Strategic Bidding)

KGÜP/EAK oranı, enerji piyasalarında stratejik teklif vermeyi anlamak ve optimize etmek için kritik öneme sahiptir. Bu oran, bir santralin kapasitesi ile gerçek enerji üretimi arasındaki ilişkiyi temsil eder ve santrallerin kârlarını ve verimliliklerini maksimize etmek için piyasada nasıl stratejik olarak teklif verebileceklerine dair iç görüler sağlar.

Optimal Kaynak Kullanımı: KGÜP/EAK oranı, santrallerin mevcut kapasitelerine göre optimal enerji üretim seviyesini belirler. Bu oranı analiz ederek, santraller düşük kullanıma sahip dönemleri belirler ve teklif stratejilerini ayarlayarak kaynaklarını en verimli şekilde kullanırlar.

Piyasa Fiyat Sinyalleri: Santraller, KGÜP/EAK oranını kullanarak piyasa fiyat sinyallerini yorumlar ve tekliflerini buna göre ayarlayabilirler. Yüksek bir orana sahip bir santral, kapasitesinin her zaman kullanıldığından emin olmak için özellikle yüksek talep dönemlerinde daha düşük fiyatlarda teklif verebilir. Tersine, düşük orana sahip bir santral, operasyonel maliyetlerini karşılamak için yalnızca piyasa fiyatları yeterince yüksek olduğunda elektrik üretmeyi seçerek daha yüksek fiyatlar teklif edebilir.

Rekabetçi Konumlandırma: KGÜP/EAK oranlarını anlayan santraller, piyasada kendilerini rekabetçi bir şekilde konumlandırabilirler. Örneğin, sürekli olarak yüksek bir orana sahip bir santral, daha düşük fiyatlarla rekabetçi tekliflerde bulunabilir, çünkü daha düşük fiyatlarla bile verimli bir şekilde çalışabilir. Bu rekabet avantajı, santralin pazar payını artırmasını ve gelir istikrarını sağlamasını sağlar.

Gelir Maksimizasyonu: Stratejik teklif verme, verimli çalışmanın gerekliliği ile gelir maksimizasyonu hedefini dengelemeyi içerir. KGÜP/EAK oranından yararlanarak, santraller tekliflerinin kabul edilme olasılığının en yüksek olduğu fiyat noktalarını belirleyebilir ve kârlılığı garanti ederken en iyi finansal sonuçları elde etmek için teklif stratejilerini hassaslaştırabilirler.

Risk Yönetimi: KGÜP/EAK oranı, düşük performans veya aşırı kapasite potansiyelini vurgulayarak risk yönetim stratejilerine girdi sağlar. Santraller, talep ve fiyat dalgalanmaları ile ilişkili riskleri hafifletmek için tekliflerini ayarlayabilirler. Örneğin, düşük orana sahip bir santral, belirsiz piyasa koşullarında işletme kayıplarını önlemek için muhafazakâr tekliflerde bulunabilir.

Bilinçli Karar Verme: Karar vericiler, KGÜP/EAK oranını kullanarak daha bilinçli ve veriye dayalı teklif stratejileri geliştirebilirler. Bu, tarihsel performans ve kapasite kullanım trendlerine dayalı olarak minimum kabul edilebilir teklif eşiklerini belirlemeyi içerir. Böyle stratejik planlama, tekliflerin hem piyasa koşulları hem de santralin operasyonel yetenekleriyle uyumlu olmasını sağlar.

3.2.3. KGÜP/EAK senaryo analizi (KGÜP/EAK scenario analysis)

Yüksek KGÜP/EAK Oranı:

Yüksek KGÜP/EAK oranına sahip bir doğal gaz santrali, kapasitesine yakın çalıştığını ve potansiyeline göre yüksek miktarda enerji ürettiğini gösterir. Bu santral, rekabetçi kalmak ve enerji üretimi için sürekli seçilmek amacıyla daha düşük fiyatlarla teklif verebilir, özellikle yüksek talep dönemlerinde. Bu şekilde santral, yüksek kullanım oranlarını koruyarak gelirini maksimize eder.

Düşük KGÜP/EAK Oranı:

Düşük KGÜP/EAK oranına sahip bir kömür santrali, yüksek operasyonel maliyetler veya bakım sorunları nedeniyle yeterince kullanılmıyor olabilir. Bu santral, yalnızca piyasa fiyatları maliyetlerini karşılayacak kadar yüksek olduğunda elektrik üretmek için daha yüksek fiyatlar teklif edebilir. Bu stratejik yaklaşım, santralin düşük fiyatlarla güç üretimiyle ilişkili finansal kayıplardan kaçınmasına yardımcı olur ve düşük kullanım oranlarına rağmen kârlı kalmasını sağlar.

Dalgalanan KGÜP/EAK Oranı:

Mevsimsel su mevcudiyeti nedeniyle KGÜP/EAK oranı dalgalanan bir hidroelektrik santrali, teklif stratejisini dinamik olarak ayarlayabilir. Yüksek su akışına sahip yağışlı mevsimlerde, enerji üretimini ve pazar payını maksimize etmek için daha düşük fiyatlarla teklif verebilir. Kurak mevsimlerde, kaynakları

korumak ve kapasite sınırlı olduğunda kârlılığı sağlamak için daha yüksek fiyatlar teklif edebilir.

3.2.4. Stratejik Teklif Verme Çerçevesi (Strategic Bidding Framework)

KGÜP/EAK oranını stratejik teklif vermede etkili bir şekilde kullanmak için yapılandırılmış çerçeve aşağıda sunulmaktadır:

1. **Veri Analizi:** KGÜP/EAK oranını düzenli olarak analiz ederek trendleri anlamak ve yüksek ve düşük kapasite kullanım dönemlerini belirlemek.
2. **Teklif Optimizasyonu:** Orana dayalı olarak teklif stratejilerini ayarlayarak, hem piyasa koşullarını hem de operasyonel verimliliği yansıtan rekabetçi fiyatlar belirlemek.
3. **Piyasa İzleme:** Tekliflerin gerçek zamanlı piyasa dinamikleriyle uyumlu olmasını sağlamak için piyasa fiyatlarını ve talebi sürekli izlemek.
4. **Risk Değerlendirmesi:** Farklı teklif stratejileriyle ilişkili riskleri değerlendirmek, KGÜP/EAK oranını kullanarak potansiyel finansal kayıpları hafifletmek ve sürdürülebilir operasyonları sağlamak.
5. **Performans İncelemesi:** Teklif sonuçlarını periyodik olarak gözden geçirerek stratejileri iyileştirmek ve santralin uzun vadede rekabetçi ve kârlı kalmasını sağlamak.

KGÜP/EAK oranını stratejik teklif verme süreçlerine entegre ederek, santraller piyasa performanslarını artırabilir, kaynak kullanımını optimize edebilir ve daha iyi finansal sonuçlar elde edebilir.

3.3. Metodoloji (Methodology)

Light Gradient Boosting Machine (LGBM) yöntemi veri biliminde kullanılan güçlü bir makine öğrenmesi algoritmasıdır ve temelinde karar ağaçları kullanılarak iteratif bir şekilde model geliştirilir. Bu süreçte, her adımda önceki adımın hataları üzerinden gidilir ve model sürekli olarak iyileştirilir. LGBM, diğer gradient boosting yöntemlerine göre bazı optimizasyonlar içerir ve büyük veri setleri ile çalışmak için daha uygun bir yapı sunar.

3.3.1. Gradient Boosting (Gradient Boosting)

Gradient boosting, bir dizi zayıf tahmin modelinin (genellikle karar ağaçları) bir araya getirilmesiyle güçlü bir tahmin modeli oluşturmayı hedefler. Modelin temel matematiksel ifadesi (Eş.1):

$$F(x) = \sum_{m=1}^M \gamma_m h_m(x) + const \quad (1)$$

Burada:

- $F(x)$ Tahmin fonksiyonu
- M Modelde kullanılan toplam zayıf öğrenici sayısı
- γ_m m 'inci zayıf öğrenicinin katkı ağırlığı
- $h_m(x)$ m 'inci zayıf öğrenicinin hipotezi veya tahmin modeli
- $const$ Başlangıç sabiti

3.3.2. Leaf-wise Growth (Yaprak-tabanlı Büyüme)

LGBM, diğer gradient boosting yöntemlerinden farklı olarak, yaprak tabanlı büyüme stratejisini kullanır. Bu strateji, ağaçların seviye seviye değil, en yüksek kazancı sağlayacak yapraklardan büyütülmesini ifade eder. Matematiksel olarak, her adımda hata fonksiyonu (Eş.2) minimize edilir:

$$L^{(t)} = \sum_{i=1}^n l(y_i, F^{(t-1)}(x_i) + h_t(x_i)) + \Omega(h_t) \quad (2)$$

Burada:

$L^{(t)}$ t 'inci iterasyonda toplam kayıp fonksiyonu

l Kayıp fonksiyonu, genellikle logaritmik kayıp veya kare kayıp

y_i i 'inci örneğin gerçek değeri

$F^{(t-1)}(x_i)$ $(t-1)$ 'inci iterasyonda modelin tahmin ettiği değer

$h_t(x_i)$ t 'inci zayıf öğrenicinin katkısı

$\Omega(h_t)$ h_t modelinin karmaşıklığına bağlı düzenleme terimi (regularization term)

3.3.3. Model Optimizasyonu ve Hiperparametre Ayarı

(Model Optimization and Hyperparameter Tuning)

LGBM'de model performansını etkileyen başlıca hiperparametreler:

- *learning_rate*: Her adımda yapılan güncellemenin ölçeği.
- *num_leaves*: Her karar ağacındaki maksimum yaprak sayısı.

- *max_depth*: Ağaçların maksimum derinliği.
- *min_data_in_leaf*: Bir yaprağa düşen minimum veri sayısı (aşırı uyumu önlemek için kullanılır).

Bu parametreler, modelin doğruluğunu ve eğitim süresini doğrudan etkilemektedir.

3.3.4. LGBM ile Duyarlılık Analizi

(Sensitivity Analysis with LGBM)

LGBM, büyük veri setlerinde bile hızlı çalışabilen ve yüksek doğruluk sağlayan bir modeldir. Bu, büyük ve karmaşık veri setlerinde duyarlılık analizi yaparken büyük bir avantajdır. Büyük ölçekteki veri setlerinde ve yüksek boyutlulukta (çok sayıda değişken içeren) durumlar için uygundur. LGBM, her özelliğin model üzerindeki etkisini değerlendirebilen ayrıntılı değişken önem metrikleri sağlar, bu da hangi faktörlerin en belirgin etki yarattığını belirlemeyi kolaylaştırır. Çeşitli kayıp fonksiyonları ve düzenleme teknikleri ile özelleştirilebilir, bu sayede farklı türdeki veri yapılarına ve analiz ihtiyaçlarına uyum sağlar. LGBM, bu özellikleri sayesinde, bir sistemdeki değişkenlerin duyarlılıklarını analiz etmek ve önemli girdileri tanımlamak için güçlü ve tercih edilen bir araçtır. Özellikle, değişkenlerin etkileşimlerinin karmaşık olduğu durumlarda, bu tür bir analizin derinlemesine anlayış sağlaması büyük değer taşımaktadır. LGBM ile duyarlılık analizi adımları aşağıdaki gibidir:

Adım 1: Model Kurulumu ve Eğitim:

İlgili veri seti üzerinde LGBM modelini kurulum ve eğitilir. Bu süreçte model, verilen girdi değişkenlerinin (bu durumda normalize edilmiş PTF ve PFK gibi) çıktılarını (ticari davranış) nasıl etkilediğini öğrenir.

Adım 2: Özellik Önem Dereceleri

LGBM, her bir özelliğin model tahminlerine olan katkısını değerlendiren değişken önem skorları sağlar. Bu skorlar, her bir özelliğin model çıktısındaki varyansı ne kadar açıkladığını gösterir. Yüksek bir skor, model çıktısı üzerinde büyük bir etkiye sahip olduğu anlamına gelir.

Adım 3: Duyarlılık Testleri

Farklı senaryolar altında girdi değişkenlerinde değişiklikler yaparak modelin tepkileri incelenir. Örneğin, PTF değerini sistemli bir

şekilde artırarak veya azaltarak ticari davranıştaki değişiklikler gözlemlenir.

3.4. Karar Destek Sistemi Yapısı

(Structure of the Decision Support System)

3.4.1. Tarihsel Analiz (Historical Analysis)

Gösterge paneli arayüzü (Şekil 1) üst kısmında yer alan zaman serisi butonları (günlük, aylık, yıllık), kullanıcılara verileri belirli bir zaman dilimine göre filtreleme imkanı sunar. Bu, piyasa trendlerini ve dönemsel değişimleri analiz etmekte önemli bir rol oynar. Zaman serisi seçimine bağlı olarak dinamik olarak güncellenen bilgi kutucukları, kullanıcıya piyasa ve portföy ile ilgili kritik veri noktalarını sunar. Bu kutucuklar arasında kurulu güç, santral bilgileri, fiyat değişimleri ve teklif analizleri gibi çeşitli veriler yer alır.

3.4.2. Portföy İzleme (Portfoy Monitoring)

Portföy izleme arayüzü (Şekil 2), kullanıcıların portföylerinin çeşitli yönlerini gösteren 8 ayrı çizgi grafiği bulunur. Her bir grafik, belirli bir portföy ögesine (örneğin, Emre Amade Kapasitesi, Maliyet) odaklanır ve ilgili zaman serisi verilerini görsel bir şekilde sunar. Kullanıcılar, her bir grafik üzerinde gezinerek, spesifik veri noktaları hakkında detaylı bilgi alabilirler. Bu interaktif özellik, kullanıcıların veri analiz sürecini derinlemesine ve kolay bir şekilde gerçekleştirmelerini sağlar.

3.4.3. Piyasa İzleme (Market Monitoring)

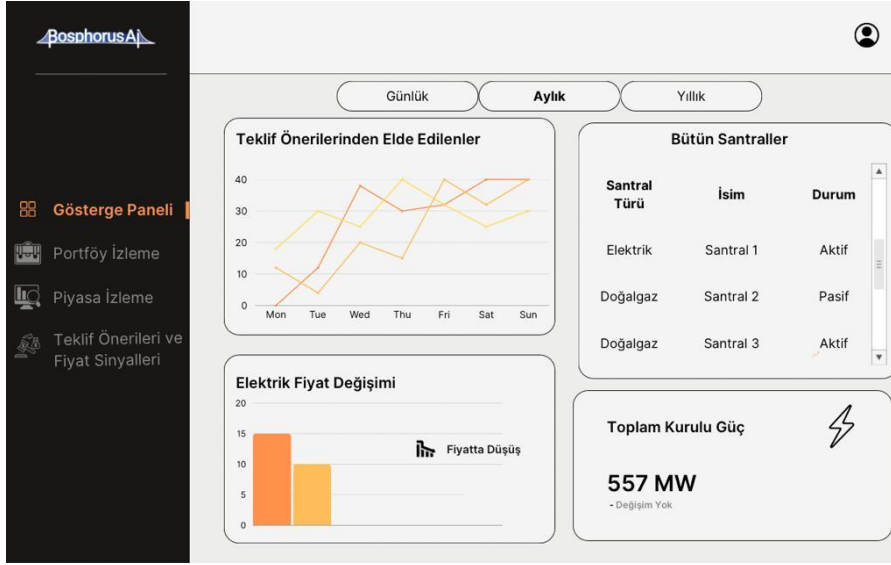
Piyasa izleme arayüzü (Şekil 3), kullanıcılara piyasa takas fiyatları, işlem hacmi ve arz-talep eğrileri gibi kritik verileri içeren çizgi grafikleri sunar. Bu grafikler, piyasa dinamiklerini ve trendleri anlamak için hayati önem taşır. Santrallerin enerji üretimi ve dağılımı ile ilgili veriler, üretimin kaynaklara göre dağılımı, gerçekleşen üretim ve kapasite ayırımı analizi gibi detayları grafiklerle sunar, böylece kullanıcılar enerji piyasasının genel durumu hakkında derinlemesine bilgi edinebilirler.

3.4.4. Teklif Önerileri ve Fiyat Sinyalleri

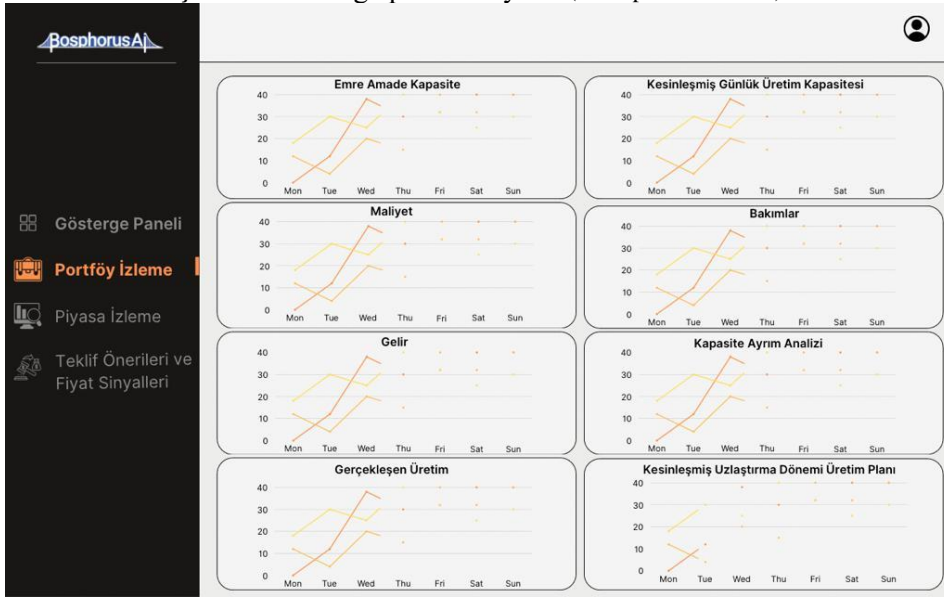
(Bid Recommendations and Price Signals)

Teklif önerileri ve fiyat sinyalleri arayüzü (Şekil 4), kullanıcılar çeşitli parametreler (santral seçimi, risk algısı, model seçimi) arasından seçim yaparak, piyasa koşullarına ve kişisel stratejilerine uygun kişiselleştirilmiş teklifler ve fiyat sinyalleri oluşturabilirler. Seçilen parametrelere göre, kullanıcılara sunulan sonuçlar ve detaylar, finansal verileri hızlı ve

etkin bir şekilde incelemek için tasarlanmış bir tablo formatında gösterilir.



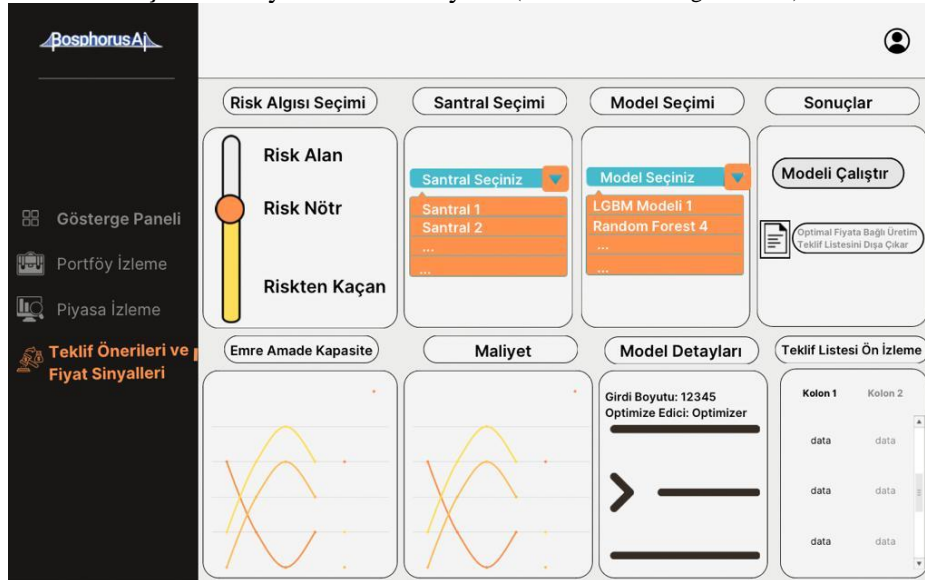
Şekil 1. Gösterge paneli arayüzü (Main panel interface)



Şekil 2. Portföy izleme arayüzü (Portfoy monitoring interface)



Şekil 3. Piyasa izleme arayüzü (Market monitoring interface)



Şekil 4. Teklif Önerileri ve Fiyat Sinyalleri arayüzü (Bid recommendations and price signals interface)

4. KARAR DESTEK SİSTEMİ UYGULAMASI (APPLICATION OF THE DECISION SUPPORT SYSTEM)

4.1. Santrallerin Seçimi

(Identification of Power Plants)

100MW 'ın altı ve EPIAŞ Şeffaflık Platformu'nda verisi eşleşmeyen santraller elenerek analize elverişli santral grupları belirlenmiştir (Tablo 1).

4.2. Stratejik Teklif Verme Analizi

(Analysis of Strategic Bidding)

2019 Haziran – 2024 Şubat döneminde seçilen santraller ortalama %18 oranında 0 MW EAK girmişlerdir. EAK'ı en yüksek ve en düşük

oranda 0 MW giren santraller Tablo 2, 3,4,5,6,7'de sunulmuştur.

EAK'ın sıfır olmadığı durumlarda KGÜP/EAK oranı bize santralin hangi kapasite ayrımı noktalarında yoğunlaştığını göstermektedir. 4 büyük santral örnek olarak seçilmiştir (Şekil 5). Antalya Doğal Gaz Santrali kabaca %0, %75, ve %100 olmak üzere 3 KGÜP/EAK oranında yoğunlaşmıştır. Ankara Doğal Gaz Santrali %0, %100 olmak üzere 2 KGÜP/EAK oranını referans olarak kullanmaktadır. Zetes 1 santrali, fiyattan bağımsız olarak, her zaman tüm kapasitesini piyasaya sunmaktadır. İzdemir santrali ise %95 ve %100 olmak üzere iki referans oranı kullanmaktadır.

Tablo 1. Seçilen santrallerin kaynak tipine göre dağılımı (Distribution of Selected Power Plants by Resource Type)

Santral Sahibi	Santral Tipi	Santral Sayısı	Analize Elverişli Santral Sayısı
EÜAŞ	Hidroelektrik	36	27
	Doğal Gaz	13	6
Özel Sektör	Hidroelektrik	27	23
	İthal Kömür	7	7
	Doğal Gaz	19	19

Tablo 2. En az oranda EAK=0 giren HESler (Hydroelectric Power Plants with Minimum EAK=0 Entry)

No	Santral	Santral Tipi	EAK 0 yüzdesi
9	Ayvalı HES	HES	0.00
10	BAĞIŞTAŞ I HES	HES	0.00
11	BEYHAN-1	HES	0.06
64	ATATÜRK HES DB	HES	0.08
25	YUKARI KALEKÖY BARAJI ve HES	HES	0.21

Tablo 3. En çok oranda EAK=0 giren HESler (Hydroelectric Power Plants with Maximum EAK=0 Entry)

No	Santral	Santral Tipi	EAK 0 yüzdesi
63	ASLANTAŞ HES	HES	29.93
3	EŞEN 1 HES	HES	49.34
85	KIĞI BARAJI ve HES	HES	66.61
71	DEMİRKÖPRÜ	HES	79.51
93	SEYHAN 2 HES	HES	80.37

Tablo 4. En az oranda EAK=0 giren İthal Kömür Santralleri (Coal Power Plants with Minimum EAK=0 Entry)

No	Santral	Santral Tipi	EAK 0 yüzdesi
26	ATLAS TES	İthal Kömür	0.88
27	CENAL TES(TR1+TRA)	İthal Kömür	1.06
31	İÇDAŞ BEKİRLİ 1	İthal Kömür	4.37
28	İÇDAŞ 1	İthal Kömür	5.80
29	İÇDAŞ 2	İthal Kömür	6.92

Tablo 5. En çok oranda EAK=0 giren İthal Kömür Santralleri (Coal Power Plants with Maximum EAK=0 Entry)

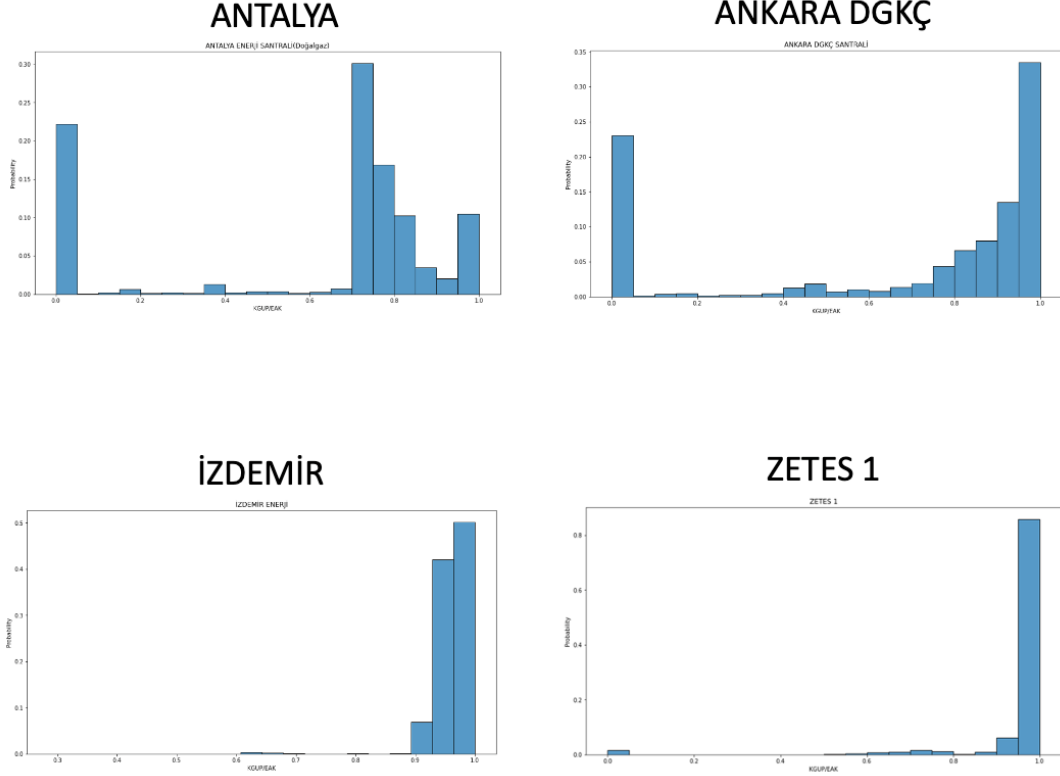
No	Santral	Santral Tipi	EAK 0 yüzdesi
7	ZETES 2-B	İthal Kömür	14.69
35	ZETES 3-B	İthal Kömür	15.43
34	ZETES 3-A	İthal Kömür	18.91
6	ZETES 2-A	İthal Kömür	21.00
5	ZETES 1	İthal Kömür	40.93

Tablo 6. En az oranda EAK=0 giren Doğalgaz santralleri (Naturalgas Power Plants with Minimum EAK=0 Entry)

No	Santral	Santral Tipi	EAK 0 yüzdesi
47	İZMİT-KÖSEKÖY TERMİK SANTRALİ	Doğalgaz	1.54
61	İST DGAZ-B Blok (Blok40+ Blok50)	Doğalgaz	2.40
55	BURSA DG BLOK1	Doğalgaz	4.39
38	ACWA POWER KIRIKKALE DGKÇS	Doğalgaz	4.94
36	ANTALYA ENERJİ SANTRALİ(Doğalgaz)	Doğalgaz	5.17

Tablo 7. En çok oranda EAK=0 giren Doğalgaz santralleri (Naturalgas Power Plants with Maximum EAK=0 Entry)

No	Santral	Santral Tipi	EAK 0 yüzdesi
96	İZMİR DGKÇS GR1(Doğalgaz)	Doğalgaz	49.72
49	GEBZE DGKÇ SANTRALI-2	Doğalgaz	52.53
38	ADAPAZARI DGKÇ SANTRALI	Doğalgaz	55.41
48	GEBZE DGKÇ SANTRALI 1	Doğalgaz	59.60
97	İZMİR DGKÇS GR2(Doğalgaz)	Doğalgaz	60.22



Şekil 5. Örnek Santraller için EAK'ın sıfır olmadığı durumlarda KGÜP/EAK oranı (For Selected Power Plants KGÜP/EAK Ratio When EAK is Not Zero)

4.3. Fiyat Normalizasyonu (Price Normalization)

İthal kömür ve doğal gaz santralleri için elektrik satış fiyatları maliyetleri oranında normalize edilmiştir:

İthal kömür santralleri için normalize fiyat:

- $PTF/Rotterdam$ kömür fiyatı*
- $PFK/Rotterdam$ kömür fiyatı*

*Rotterdam kömür fiyatları T.C. Merkez bankasına USD/TL kuruna göre TL'ye çevrilmiştir.

Hidroelektrik Santralleri için normalize fiyat:

- $SFK/Botaş$ tarife fiyatı

- $PTF/Azami$ Fiyat

Doğal gaz santralleri için normalize fiyat:

- $PTF/Botaş$ tarife fiyatı
- $PFK/Botaş$ tarife fiyatı
- $SFK/Botaş$ tarife fiyatı

4.4. PTF'ye Bağlı Santral Üretim Kapasite Ayrımı

(Categorization of the Production Capacity of Power Plants according to MCP)

Santral üretim kapasite ayrımı, KGUP/EAK oranının $PTF/BOTAŞ$ 'la $SFK/BOTAŞ$ aralığında eşleştirilmesi ile bulunur. 4 örnek santral üzerinden çıktılar Şekil 6,7,8,9'de gösterilmektedir.

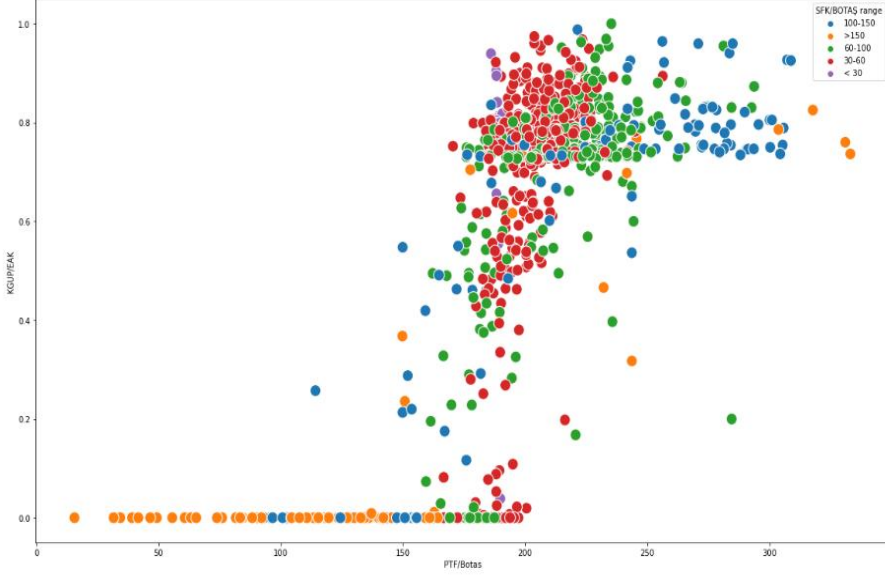
ANTALYA DGKÇ için SFK/BOTAŞ ile PTF/BOTAŞ arasında doğrusal bir ilişki bulunmamaktadır, SFK/BOTAŞ fiyatının en yüksek olduğu çoğu durumda KGUP/EAK=0'dır (Şekil 6).

AGE ENERJİ SFK/BOTAŞ ile PTF/BOTAŞ arasında Antalya doğal gaz santraline göre daha

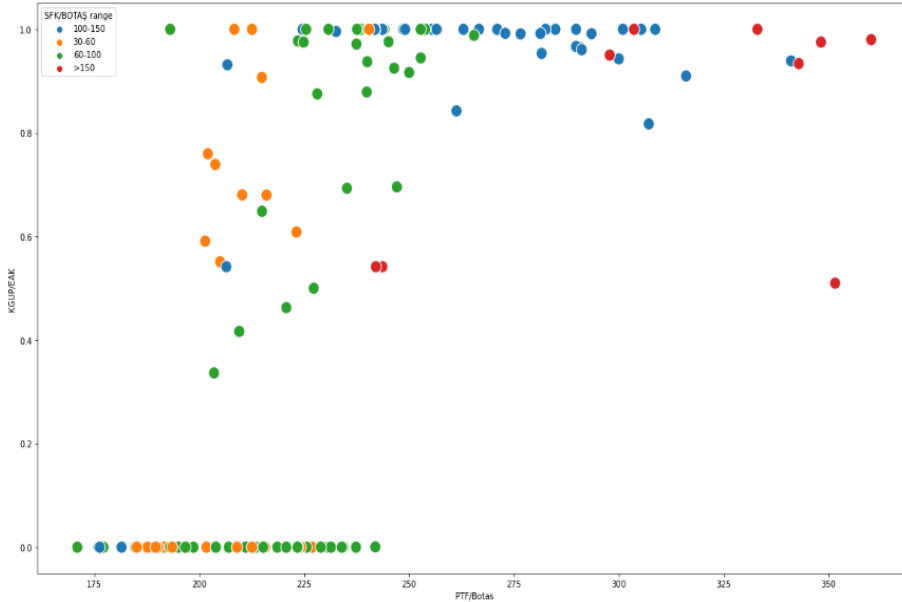
yüksek korelasyon olduğu görülmektedir (Şekil 7).

Zetes-1 santralinin fiyat ne olursa olsun çoğu durumda kapasitesinin %100'ünü GÖP'e ayırdığı görülmektedir (Şekil 8).

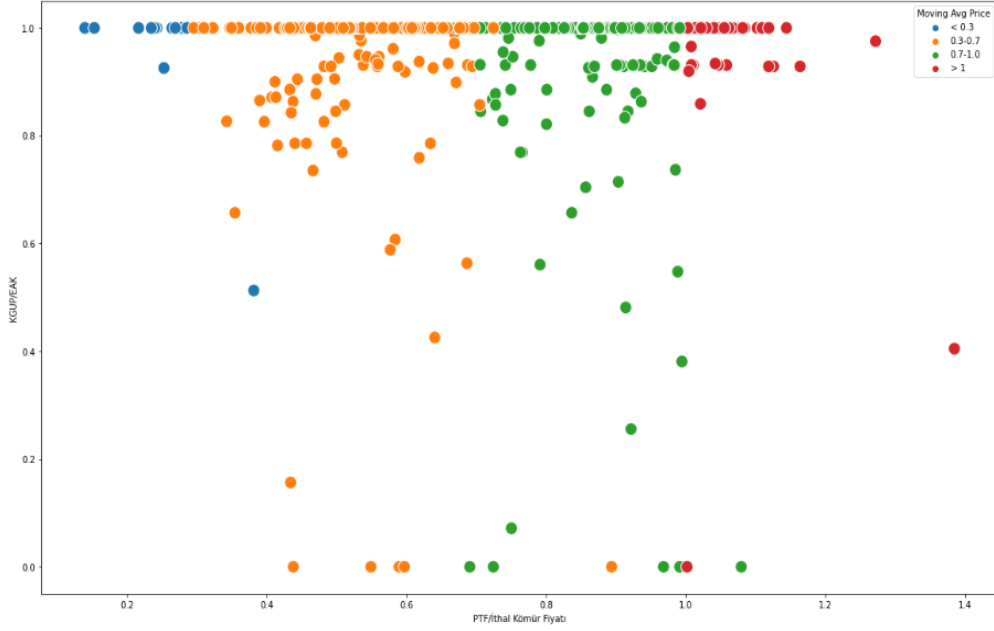
İzdemir santrali için ise %95 ve %100 olmak üzere iki farklı referans oranı bulunmaktadır (Şekil 9).



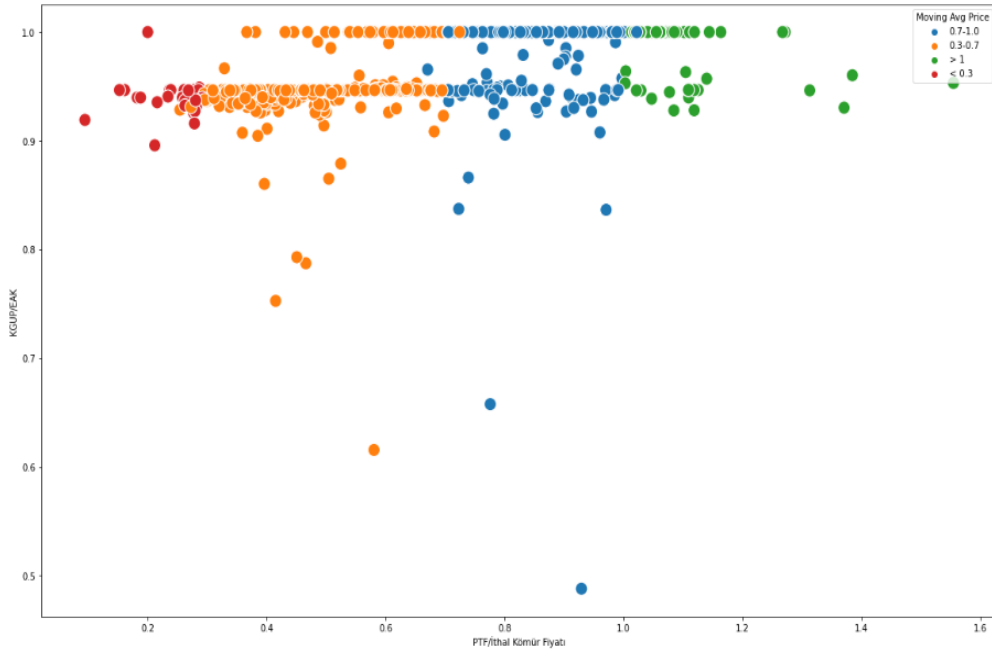
Şekil 6. ANTALYA DGKÇ Santrali Üretim Kapasite Ayrımı
(Production Capacity Separation of ANTALYA DGKÇ Power Plant)



Şekil 7. AGE ENERJİ Santrali Üretim Kapasite Ayrımı
(Production Capacity Separation of AGE ENERJİ Power Plant)



Şekil 8. Zetes-1 Santrali Üretim Kapasite Ayrımı
(Production Capacity Separation of Zetes-1 Power Plant)



Şekil 9. İzdemir Santrali Üretim Kapasite Ayrımı
(Production Capacity Separation of İzdemir Power Plant)

4.5. Santrallerin Ticari Davranış Skorlaması (Trading Behaviour Scoring of Power Plants)

Ticari davranış skorlamasının temel amacı, santrallerin piyasa koşullarına verdikleri tepkileri ölçmektir. Skorlama, santrallerin hangi fiyat aralıklarında daha aktif olduğunu, hangi dönemlerde üretim kapasitelerini artırdıklarını ve piyasa koşullarına göre nasıl stratejiler geliştirdiklerini ortaya koymaktadır. Bu

makalede ticari davranış skorlaması için dört temel adım kullanılmıştır: (1) Santrallerin geçmiş işlem verileri, üretim miktarları, piyasa fiyatları ve talep değişimleri EPIAŞ Şeffaflık Platformundan alınır. (2) Toplanan veriler, eksik veya hatalı verilerden arındırılır ve analiz için uygun hale getirilir. (3) LGBM modeli, temizlenmiş veri seti üzerinde eğitilir. Bu eğitim süreci, modelin santrallerin geçmiş verilerine dayanarak gelecekteki davranışlarını

tahmin etmesini sağlar. (4) Eğitilmiş model, santrallerin belirli piyasa koşullarına verdiği tepkileri analiz eder ve her bir santral için ticari davranış skorları oluşturur.

4.5.1. İthal Kömür Santrallerinin Ticari Davranış Skorlaması

(Trading Behaviour Scoring of Coal Power Plants)

Normalize edilmiş PTF ve PFK değerlerinin kömür üretimine olan fiyat duyarlılığı LGBM yöntemi kullanılarak hesaplanmış ve Tablo 8’de sunulmuştur. En yüksek duyarlılığa sahip santral İÇDAŞ-1 en düşük duyarlılığa sahip santral ise Zetes-1’dir. Tüm santraller için PFK, PTF’den daha önemliken aradaki önem farkı tüm santraller için farklıdır. Örneğin PTF için en duyarlı santral İÇDAŞ-1 iken PFK için en duyarlı santral İÇDAŞ BEKİRLİ 1’dir.

4.5.2. Doğalgaz Santrallerinin Ticari Davranış Skorlaması

(Trading Behaviour Scoring of Naturalgas Power Plants)

Normalize edilmiş PTF, PFK ve SFK değerlerinin doğalgaz üretimine olan duyarlılığı

LGBM yöntemi kullanılarak hesaplanmış ve Tablo 9’de sunulmuştur. En yüksek duyarlılığa sahip santral Bursa DG BLOK2 en düşük duyarlılığa sahip santral ise AGE Enerji’dir. PTF’ye en duyarlı santral Esenyurt, PFK’ya en duyarlı santral İzmit Köseköy, SFK’ya en duyarlı santral ise Enerjisa Bandırma santralidir.

4.5.3. Hidroelektrik Santrallerinin Ticari Davranış Skorlaması

(Trading Behaviour Scoring of Hydroelectric Power Plants)

Normalize edilmiş PTF, PFK ve SFK değerlerinin hidroelektrik üretimine olan duyarlılığı LGBM yöntemi kullanılarak hesaplanmış ve Tablo 10’de sunulmuştur. SFK’ye en yüksek duyarlılığa sahip santral SARIYAR 1 en düşük duyarlılığa sahip santral ise KARKAMIŞ HES’dir. PTF’ye en duyarlı santral Esenyurt, PFK’ya en duyarlı santral İzmit Köseköy, SFK’ya en duyarlı santral ise Enerjisa Bandırma santralidir.

Tablo 8. Seçilen İthal Kömür Santralleri için Ticari Davranış Skorlaması
(Trading Behaviour Scoring of the Selected Imported Coal Power Plants)

Santral Adı	PTF/İthal Kömür Fiyatı	PFK/İthal Kömür Fiyatı	Total
İÇDAŞ 1	0.473169	0.526831	1.000000
ZETES 2-B	0.465718	0.520584	0.986302
ZETES 3-A	0.444645	0.539625	0.984270
ZETES 2-A	0.433657	0.530970	0.964627
İÇDAŞ 2	0.424475	0.534507	0.958982
İÇDAŞ BEKİRLİ 1	0.401069	0.556107	0.957176
İSKENDERUN İTHAL KÖMÜR SANTRALI-1	0.393768	0.553549	0.947317
ZETES 3-B	0.381877	0.554075	0.935952
İZDEMİR ENERJİ	0.413562	0.521412	0.934974
İÇDAŞ 3	0.435388	0.498909	0.934297
İSKENDERUN İTHAL KÖMÜR SANTRALI-2	0.444118	0.481072	0.925190
CENAL TES(TR1+TRA)	0.443441	0.454580	0.898021
ATLAS TES	0.428690	0.462256	0.890946
İÇDAŞ BEKİRLİ 2	0.379544	0.494242	0.873786
ZETES 1	0.335892	0.366975	0.702867

Tablo 9. Seçilen İthal Doğal Gaz Santralleri için Ticari Davranış Skorlaması
(Trading Behaviour Scoring of the Selected Natural Gas Power Plants)

Santral Adı	PTF/Botas	PFK/BOTAŞ	SFK/BOTAŞ	Total
BURSA DG BLOK2	0.258231	0.383516	0.358253	1.000000
RWE TURCAS GUNEY	0.274140	0.370038	0.344038	0.988215
BURSA DG BLOK1	0.252707	0.377624	0.357664	0.987994

ENERJİSA BANDIRMA SANTRALI	0.283273	0.303381	0.396995	0.983649
ERZİN SANTRALI	0.286146	0.350667	0.344627	0.981439
İST.DGAZ-B Blok (Blok40+ Blok50)	0.267143	0.384768	0.324814	0.976725
İZMİT-KÖSEKÖY TERMİK SANTRALI	0.236724	0.419165	0.315092	0.970980
ANTALYA ENERJİ SANTRALI(Doğalgaz)	0.291522	0.345511	0.331737	0.968771
İST.DGAZ-A BLOK(A)	0.279738	0.344848	0.342565	0.967150
YENİ ELEKTRİK DOĞALGAZ KOMBİNE ÇEVİRİM SANTRALI	0.296531	0.362746	0.299256	0.958533
BİLGİN SAMSUN DGKÇS PT2(Doğalgaz)	0.305443	0.345511	0.305738	0.956691
İST.DGAZ-A BLOK(B)	0.281064	0.345584	0.318553	0.945201
BİLGİN SAMSUN DGKÇS PT1(Doğalgaz)	0.284157	0.331296	0.321721	0.937173
ACWA POWER KIRIKKALE DGKÇS	0.307432	0.317301	0.308168	0.932901
İST.DGAZ-A BLOK(C)	0.290565	0.331369	0.310820	0.932754
ESENYURT DGKÇ SANTRALI	0.344995	0.310010	0.272741	0.927745
ENERJİSA BANDIRMA II SANTRALI	0.274140	0.325624	0.326876	0.926641
ALİAĞA DGKÇS(Habaş DGKÇS/DB-1)	0.268321	0.336525	0.302423	0.907270
ŞANLIURFA DGKÇ SANTRALI	0.217574	0.391545	0.294763	0.903882
İÇ ANADOLU DGKÇS	0.220815	0.366870	0.313619	0.901304
HAMİTABAT ÜNİTE-20	0.253370	0.368859	0.278044	0.900273
HAMİTABAT ÜNİTE-10	0.280032	0.329012	0.284378	0.893423
CENGİZ 610 DGKÇS	0.214407	0.365618	0.296384	0.876409
ANKARA DGKÇ SANTRALI	0.239154	0.314208	0.303602	0.856964
GEBZE DGKÇ SANTRALI-2	0.193489	0.302055	0.334463	0.830007
GEBZE DGKÇ SANTRALI 1	0.208220	0.300876	0.308168	0.817264
İZMİR DGKÇS GR2(Doğalgaz)	0.208146	0.304854	0.271341	0.784341
İZMİR DGKÇS GR1(Doğalgaz)	0.167931	0.267659	0.336820	0.772409
ADAPAZARI DGKÇ SANTRALI	0.198424	0.272225	0.280548	0.751197
AGE ENERJİ DOĞALGAZ KÇS	0.227370	0.226412	0.236724	0.690506

Tablo 10. Seçilen HES'ler için Ticari Davranış Skorlaması
(Trading Behaviour Scoring of the Selected Hydroelectric Power Plants)

Santral Adı	PTF/Azami Fiyat	SFK/BOTAŞ	Total
SARIYAR 1	0.434194	0.565806	1.000000
ATATÜRK HES DB	0.514953	0.481803	0.996756
KILIÇKAYA HES DB	0.450205	0.530963	0.981168
GÖKCEKAYA HES DB	0.457822	0.522218	0.980039
DERBENT HES	0.453378	0.524827	0.978206
SIR HES DB	0.505643	0.472422	0.978065
SUAT UĞURLU HES	0.421992	0.549795	0.971787
ENERJİSA KAVŞAKBENDİ HES	0.482226	0.484342	0.966568
H. UĞURLU 1-4	0.453378	0.507476	0.960855
ERMENEK HES1	0.468261	0.491748	0.960008
PEMBELİK HES	0.511497	0.448441	0.959938
KEBAN HES 1-8	0.515658	0.442728	0.958386
BİRECİK-NİZİP BARAJI ve HES	0.455635	0.501129	0.956764

YUKARI KALEKÖY BARAJI ve HES	0.466921	0.488574	0.955494
GEZENDE HES DB	0.441529	0.512414	0.953943
KESİKKÖPRÜ	0.409931	0.541614	0.951545
ÇAMLIGÖZE	0.471435	0.478840	0.950275
KARAKAYAHES1-6	0.476231	0.472634	0.948864
YEDİGÖZE HES	0.459021	0.488080	0.947101
KARKAMIŞ HES	0.439977	0.505643	0.945620

5. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışmada enerji piyasalarında ticari davranışları tespit etmek için bir KDS geliştirilmiştir. Geliştirilen KDS; LGBM algoritmasını kullanarak, santral ve santral tipi bazında ticari davranışları skorlamış ve bu sayede PK'ların karşılaştıkları zorluklara veriye dayalı bir çözüm geliştirilmiştir. Sistem, PK'ların ticari stratejilerini daha etkin bir şekilde yönlendirmelerine olanak tanıyarak, ticari davranışların yüksek doğrulukla tespit edilmesini sağlamaktadır. KDS uygulaması, PK'ların ve PY'lerin enerji piyasalarını daha iyi anlamalarına ve daha etkili politikalar geliştirmelerine yardımcı olacak detaylı ve güncel veriler sağlamaktadır. Bu sistem sayesinde, PK'lar, ticari davranışların dinamiklerini ve piyasa trendlerini daha net görebilmekte ve bu bilgiler ışığında riskleri minimize ederek daha bilinçli teklifler sunabilmektedir. Ayrıca, bu çalışma enerji piyasalarında şeffaflığın ve verimliliğin artırılmasına katkıda bulunmakta, piyasa manipülasyonu risklerini azaltmakta ve piyasa güvenliğini desteklemektedir. KDS'nin sunmuş olduğu analitik yetenekler, piyasa yapılarının ve operasyonlarının sürekli olarak izlenmesi ve değerlendirilmesi için güçlü bir araçtır.

Bu makalenin potansiyel sınırlamaları ve zorlukları: (1) KDS'nin etkinliği büyük ölçüde veri kalitesine ve erişilebilirliğine bağlıdır. Eksik, yanlış veya güncel olmayan veriler yanlış analizlere ve optimal olmayan karar vermeye yol açabilir. Sürekli olarak yüksek kaliteli ve gerçek zamanlı verilere erişimi sağlamak zor olabilir. (2) LGBM algoritması, herhangi bir makine öğrenimi modeli gibi, önyargılı verilerle eğitildiğinde önyargılar sergileyebilir. Bu, belirli PK'ları veya senaryoları kayıran sonuçlara yol açabilir. Modelin doğruluğunu ve adil olmasını sağlamak için çeşitli ve kapsamlı veri setleriyle

düzenli olarak güncellenmesi ve doğrulanması önemlidir.

Bu çalışmada geliştirilen KDS gelecekteki araştırmalar kapsamında daha da iyileştirilmesi ve genişletilmesi için çeşitli potansiyel yönler bulunmaktadır. (1) Gelecek araştırmalar, ticari davranış tespitinde doğruluğu ve verimliliği artırmak amacıyla derin öğrenme veya pekiştirmeli öğrenme gibi daha ileri düzey makine öğrenmesi algoritmalarının entegrasyonunu inceleyebilir. Bu ileri teknikler, daha hassas tahminler sunabilir ve daha büyük ve karmaşık veri setlerini işleyebilir. (2) Sistemi farklı enerji piyasalarında ticari davranışları analiz etmek ve karşılaştırmak için genişletmek, piyasa trendleri ve PK davranışları hakkında değerli içgörüler sağlayabilir. Bu, farklı piyasa yapılarındaki en iyi uygulamaları ve geliştirme alanlarını belirlemeyi sağlar. Bu potansiyel gelecekteki çalışmalar, KDS'nin işlevselliğini, doğruluğunu ve kullanılabilirliğini artıracak, enerji piyasalarında ticari davranışları anlamak ve yönetmek için daha güçlü bir araç sunacaktır.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

Bu çalışma, "TÜBİTAK TEYDEB 1501-Sanayi Ar-Ge Projeleri" programı kapsamında 3220630 proje numarası ile desteklenmiştir.

This study was supported with the project number 3220630 under the program of "TÜBİTAK TEYDEB 1501-Industry R&D Projects".

ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazarı çalışmada kullandığı 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 she used in her work do not require ethical committee approval and/or legal-specific permission.

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

Ezgi AVCI: Modelleri geliştirmiş, sonuçlarını analiz etmiş ve makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

She developed the 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] Borenstein, S., Bushnell, J. B., & Wolak, F. A. (2002). Measuring market inefficiencies in California's restructured wholesale electricity market. *American Economic Review*, 92(5), 1376–1405.
- [2] Li, B., Wang, X., Shahidehpour, M., Jiang, C., & Li, Z. (2019). DER aggregator's data-driven bidding strategy using the information gap decision theory in a non-cooperative electricity market. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 10(6), 6756–6767.
- [3] Xu, X., Yan, Z., Shahidehpour, M., Li, Z., Yan, M., & Kong, X. (2020). Data-driven risk-averse two-stage optimal stochastic scheduling of energy and reserve with correlated wind power. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 11(1), 436–447.
- [4] Dehghanpour, K., Nehrir, M. H., Sheppard, J. W., & Kelly, N. C. (2016). Agent-based modeling in electrical energy markets using dynamic Bayesian networks. *IEEE Transactions on Power Systems*, 31(6), 4744–4754.
<https://doi.org/10.1109/TPWRS.2016.2524678>
- [5] Guo, H., Chen, Q., Xia, Q., & Kang, C. (2021). Deep inverse reinforcement learning for objective function identification in bidding models. *IEEE Transactions on Power Systems*, 36(6), 5684–5696.
- [6] Guo, H., Chen, Q., Fang, X., Liu, K., Xia, Q., & Kang, C. (2019). Market power mitigation clearing mechanism based on constrained bidding capacities. *IEEE Transactions on Power Systems*, 34(6), 4817–4827.
<https://doi.org/10.1109/TPWRS.2019.2913334>
- [7] Zou, P., Chen, Q., Yu, Y., Xia, Q., & Kang, C. (2017). Electricity markets evolution with the changing generation mix: An empirical analysis based on China 2050 high renewable energy penetration roadmap. *Applied Energy*, 185, 56–67.
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.10.061>
- [8] Ruiz, C., Conejo, A. J., & Smeers, Y. (2012). Equilibria in an oligopolistic electricity pool with stepwise offer curves. *IEEE Transactions on Power Systems*, 27(2), 752–761.
<https://doi.org/10.1109/TPWRS.2011.2170439>
- [9] Li, T., & Shahidehpour, M. (2005). Strategic bidding of transmission constrained GENCOs with incomplete information. *IEEE Transactions on Power Systems*, 20(1), 437–447.
- [10] Baringo, L., & Conejo, A. J. (2016). Offering strategy of wind power producer: A multi-stage risk-constrained approach. *IEEE Transactions on Power Systems*, 31(2), 1420–1429.
<https://doi.org/10.1109/TPWRS.2015.2411332>
- [11] Yazdani-Damavandi, M., Neyestani, N., Shafie-khah, M., Contreras, J., & Catalao, J. P. S. (2018). Strategic behavior of multi-energy players in electricity markets as aggregators of demand side resources using a bilevel approach. *IEEE Transactions on Power Systems*, 33(1), 397–411.
<https://doi.org/10.1109/TPWRS.2017.2688344>
- [12] Guo, H., Chen, Q., Xia, Q., & Kang, C. (2019). Efficiency loss for variable renewable energy incurred by competition in electricity markets. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*.
<https://doi.org/10.1109/TSTE.2019.2946930>
- [13] Doraszelski, U., Lewis, G., & Pakes, A. (2018). Just starting out: Learning and equilibrium in a new market. *American Economic Review*, 108(3), 565–615.
- [14] Hortaçsu A. and Puller, S. L. (2008). Understanding strategic bidding in multi-unit auctions: A case study of the Texas electricity spot market,” *RAND J. Econ.*, vol. 39, no. 1, pp. 86–114.
- [15] Kohansal, M., Sadeghi-Mobarakeh, A., & Mohsenian-Rad, H. (2017). A data-driven analysis of supply bids in California ISO market: Price elasticity and impact of renewables. In *Proc. IEEE International*

Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm) (pp. 58–63).

[16] Kohansal, M., & Mohsenian-Rad, H. (2016). A closer look at demand bids in California ISO energy market. *IEEE Transactions on Power Systems*, 31(4), 3330–3331.

<https://doi.org/10.1109/TPWRS.2015.2484062>

[17] Wang, L., Zhang, Z., & Chen, J. (2017). Short-term electricity price forecasting with stacked denoising autoencoders. *IEEE Transactions on Power Systems*, 32(4), 2673–2681.

<https://doi.org/10.1109/TPWRS.2016.2628873>

[18] Wang, Y., Gan, D., Sun, M., Zhang, N., Lu, Z., & Kang, C. (2019). Probabilistic individual load forecasting using pinball loss guided LSTM. *Applied Energy*, 235, 10–20.

[19] Teeraratkul, T., O'Neill, D., & Lall, S. (2018). Shape-based approach to household electric load curve clustering and prediction. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 9(5), 5196–5206.

[20] Velloso, A., Street, A., Pozo, D., Arroyo, J. M., & Cobos, N. G. (2019). Two stage robust unit commitment for co-optimized electricity markets: An adaptive data-driven approach for scenario-based uncertainty sets. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*. <https://doi.org/10.1109/TSTE.2019.2915049>

[21] Kwac, J., Flora, J., & Rajagopal, R. (2014). Household energy consumption segmentation using hourly data. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 5(1), 420–430.

[22] Liang, H., Ma, J., Sun, R., & Du, Y. (2019). A data-driven approach for targeting residential customers for energy efficiency programs. *IEEE Transactions on Smart Grid*. <https://doi.org/10.1109/TSG.2019.2933704>

[23] Zheng, K., Chen, Q., Wang, Y., Kang, C., & Xia, Q. (2019). A novel combined data-driven approach for electricity theft detection. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 15(3), 1809–1819. <https://doi.org/10.1109/TII.2018.2873814>

[24] Sun, W., Zamani, M., Hesamzadeh, M. R., & Zhang, H.-T. (2019). Data-driven probabilistic optimal power flow with nonparametric Bayesian modeling and inference. *IEEE Transactions on Smart Grid*. <https://doi.org/10.1109/TSG.2019.2931160>

[25] Wang, Y., Wan, C., Zhou, Z., Zhang, K., & Botterud, A. (2018). Improving deployment availability of energy storage with data-driven AGC signal models. *IEEE Transactions on*

Power Systems, 33(4), 4207–4217. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2017.2780223>

[26] Bagheri, Wang, J., & Zhao, C. (2017). Data-driven stochastic transmission expansion planning. *IEEE Transactions on Power Systems*, 32(5), 3461–3470.

<https://doi.org/10.1109/TPWRS.2016.2635098>

[27] Ruiz, A. J., Conejo, A. J., & Bertsimas, D. J. (2013). Revealing rival marginal offer prices via inverse optimization. *IEEE Transactions on Power Systems*, 28(3), 3056–3064.

<https://doi.org/10.1109/TPWRS.2012.2234144>

[28] Saez-Gallego, J., Morales, J. M., Zugno, M., & Madsen, H. (2016). A data-driven bidding model for a cluster of price-responsive consumers of electricity. *IEEE Transactions on Power Systems*, 31(6), 5001–5011.

[29] Lu, T., Wang, Z., Wang, J., Ai, Q., & Wang, C. (2019). A data-driven Stackelberg market strategy for demand response-enabled distribution systems. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 10(3), 2345–2357. <https://doi.org/10.1109/TSG.2018.2795007>

[30] Chen, R., Paschalidis, I. C., Caramanis, M. C., & Andrianesis, P. (2019). Learning from past bids to participate strategically in day-ahead electricity markets. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 10(5), 5794–5806.

[31] Mitridati, L., & Pinson, P. (2018). A Bayesian inference approach to unveil supply curves in electricity markets. *IEEE Transactions on Power Systems*, 33(3), 2610–2620.

<https://doi.org/10.1109/TPWRS.2017.2757980>

[32] Sun, M., Wang, Y., Teng, F., Ye, Y., Strbac, G., & Kang, C. (2019). Clustering based residential baseline estimation: A probabilistic perspective. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 10(6), 6014–6028.

<https://doi.org/10.1109/TSG.2019.2895333>

[33] Hu, J., & Li, H. (2019). A new clustering approach for scenario reduction in multi-stochastic variable programming. *IEEE Transactions on Power Systems*, 34(5), 3813–3825.

<https://doi.org/10.1109/TPWRS.2019.2901545>

[34] Shahmohammadi, Sioshansi, R., Conejo, A. J., & Afsharnia, S. (2018). The role of energy storage in mitigating ramping inefficiencies caused by variable renewable generation. *Energy Conversion and Management*, 162, 307–320.

<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.12.054>

[35] Xu, Y., Shi, Y., Kirschen, D. S., & Zhang, B. (2018). Optimal battery participation in frequency regulation markets. *IEEE Transactions on Power Systems*, 33(6), 6715–6725.

<https://doi.org/10.1109/TPWRS.2018.2846774>

[36] He, G., Chen, Q., Moutis, P., Kar, S., & Whitacre, J. F. (2018). An intertemporal decision framework for electrochemical energy storage management. *Nature Energy*, 3(5), 404–412. <https://doi.org/10.1038/s41560-018-0129-9>

[37] Khajeh, H., & Foroud, A. A. (2017). Behavioural market power indices in a transmission-constrained electricity market. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 11(18), 4608–4616. <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2017.0911>

A Comparative Study of Loan Approval Prediction Using Machine Learning Methods

Vahid SİNAP^{1*} 

¹Ufuk University, Faculty of Economics and Administrative Sciences, Department of Management Information Systems, Ankara, Türkiye

Article Info

Research article
Received: 20/03/2024
Revision: 29/04/2024
Accepted: 30/04/2024

Keywords

Data Mining
Loan Prediction
Machine Learning
Banking Sector
Feature Selection
Cross-validation

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 20/03/2024
Düzeltilme: 29/04/2024
Kabul: 30/04/2024

Anahtar Kelimeler

Veri Madenciliği
Kredi Tahmini
Makine Öğrenmesi
Bankacılık Sektörü
Özellik Seçimi
Çapraz Doğrulama

Graphical/Tabular Abstract (Grafik Özet)

In this study, models were developed using machine learning algorithms for loan approval prediction and the effects of various feature selection methods on the models were investigated. / Bu çalışmada kredi onayı tahmini için makine öğrenmesi algoritmaları kullanılarak modeller geliştirilmiş ve çeşitli özellik seçim yöntemlerinin modeller üzerindeki etkileri incelenmiştir.

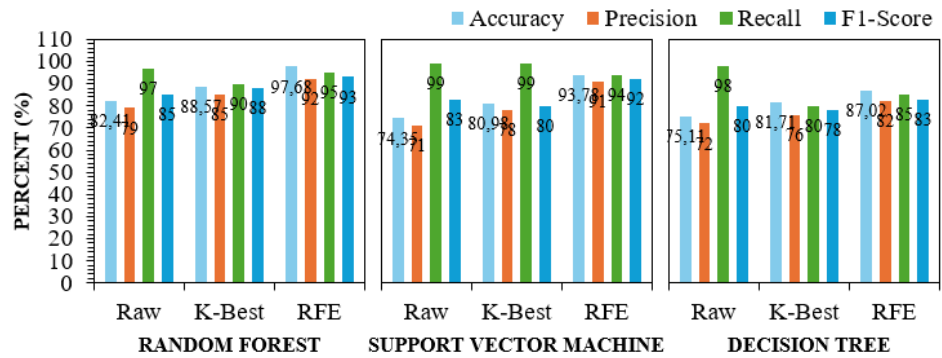


Figure A: Impact of feature selection methods on the performance of models / Şekil A: Özellik seçim yöntemlerinin modellerin performansına etkisi

Highlights (Önemli noktalar)

- The Random Forest (RF) algorithm showed the highest performance with an accuracy rate of 97.71% for loan approval predictions. / RF algoritması, kredi onayı tahminlerinde doğruluk oranı %97.71 ile en yüksek performansı göstermiştir.
- The RFE method significantly improved model performance. Models built with RFE with selected features achieved higher accuracy, recall, precision, and F1-Score values than models built with K-Best method or with all features. / RFE yöntemi, model performansını önemli ölçüde artırmıştır. RFE ile seçilen özelliklerle oluşturulan modeller, K-Best yöntemiyle veya tüm özelliklerle oluşturulan modellere göre daha yüksek doğruluk, duyarlılık, kesinlik ve F1-Skor değerleri elde etmiştir.

Aim (Amaç): The aim of this study is to evaluate the effects of feature selection methods, K-Best and RFE, on model performance in loan approval prediction. / Bu çalışmanın amacı, kredi onayı tahminlemede özellik seçimi yöntemleri olan K-Best ve RFE yöntemlerinin model performansları üzerindeki etkisini değerlendirmektir.

Originality (Özgünlük): With the models developed in the study, significantly higher accuracy rates were obtained in loan approval prediction than similar studies in the literature. / Araştırmada oluşturulan modeller ile kredi onay tahminlemede literatürdeki benzer çalışmalardan önemli ölçüde yüksek doğruluk oranları elde edilmiştir.

Results (Bulgular): It was found that model performance was significantly improved using the RFE method, the RF algorithm achieved the highest accuracy rate, and the cross-validation method provided more consistent results in measuring model performance compared to the Training, Testing and Validation technique. / Çalışmada, RFE yöntemi kullanılarak model performansının belirgin şekilde iyileştiği, RF algoritmasının en yüksek doğruluk oranına ulaştığı, çapraz doğrulama yöntemi, model performansını ölçmede Eğitim, Test ve Doğrulama tekniğine kıyasla daha tutarlı sonuçlar sağladığı tespit edilmiştir.

Conclusion (Sonuç): Feature selection methods can improve model performance and redundant features can negatively affect model performance. / Özellik seçimi yöntemleri model performansını iyileştirebilmekte ve gereksiz özellikler model performansını olumsuz etkileyebilmektedir.



A Comparative Study of Loan Approval Prediction Using Machine Learning Methods

Vahid SİNAP^{1*} ¹Ufuk University, Faculty of Economics and Administrative Sciences, Department of Management Information Systems, Ankara, Türkiye

Article Info

Research article
Received: 20/03/2024
Revision: 29/04/2024
Accepted: 30/04/2024

Keywords

Data Mining
Loan Prediction
Machine Learning
Banking Sector
Feature Selection
Cross-validation

Abstract

Loan prediction plays an important role in the process of evaluating loan applications by financial institutions. Machine learning models can automate this process and make the lending process faster and more efficient. In this context, the main objective of this research is to develop models for loan approval prediction using machine learning algorithms such as Logistic Regression, K-Nearest Neighbors, Support Vector Machine, Decision Tree, and Random Forest and to compare their performances. In addition, determining the effect of K-Best and Recursive Feature Elimination feature selection methods on model performances is another important objective of the research. Furthermore, the evaluation of the effectiveness of techniques such as cross-validation (K-Fold) and Train, Test and Validation in measuring the performance of models is also among the objectives of the research. The findings revealed that married individuals are more likely to be approved for loans than single individuals, high income individuals more likely than low-income individuals, males more likely than females, and university graduates more likely than non-university graduates. According to the performance measures, Random Forest was the most successful algorithm with an accuracy rate of 97.71% in loan approval prediction. To achieve this accuracy rate, feature selection was performed with the Recursive Feature Elimination method and the measurement was made with the cross-validation method. It was found that the feature selection methods have a significant impact on the model performances and the Recursive Feature Elimination method was the most successful method. Moreover, the highest accuracy rate achieved by the Random Forest algorithm, which showed the highest performance in all cases, was measured by cross-validation.

Makine Öğrenmesi Yöntemleri Kullanılarak Kredi Onay Tahmini Üzerine Karşılaştırmalı Bir Çalışma

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 20/03/2024
Düzeltilme: 29/04/2024
Kabul: 30/04/2024

Anahtar Kelimeler

Veri Madenciliği
Kredi Tahmini
Makine Öğrenmesi
Bankacılık Sektörü
Özellik Seçimi
Çapraz Doğrulama

Öz

Kredi tahmini, finans kuruluşlarının kredi başvurularını değerlendirme sürecinde önemli bir rol oynamaktadır. Makine öğrenmesi modelleri bu süreci otomatikleştirebilmekte ve kredi onay sürecini daha hızlı ve verimli hale getirebilmektedir. Bu bağlamda, bu araştırmanın temel amacı Lojistik Regresyon, K-En Yakın Komşu, Destek Vektör Makinesi, Karar Ağacı ve Rastgele Orman gibi makine öğrenmesi algoritmalarını kullanarak kredi onay tahmini için modeller geliştirmek ve performanslarını karşılaştırmaktır. Ayrıca, K-Best ve Yinelemeli Özellik Eleme (Recursive Feature Elimination) özellik seçim yöntemlerinin model performansları üzerindeki etkisinin belirlenmesi de araştırmanın bir diğer önemli amacıdır. Buna ek olarak, çapraz doğrulama (K-Fold) ve Eğitim, Test Et ve Doğrula gibi tekniklerin modellerin performansını ölçmedeki etkinliğinin değerlendirilmesi de araştırmanın amaçları arasındadır. Bulgular, evli bireylerin bekar bireylere, yüksek gelirli bireylerin düşük gelirli bireylere, erkeklerin kadınlara ve üniversite mezunlarının üniversite mezunu olmayanlara kıyasla kredilerinin onaylanma olasılığının daha yüksek olduğunu ortaya koymuştur. Performans ölçütlerine göre, Rastgele Orman kredi onay tahmininde %97,71 doğruluk oranıyla en başarılı algoritma olmuştur. Bu doğruluk oranına ulaşmak için özellik seçimi Yinelemeli Özellik Eleme yöntemi ile gerçekleştirilmiş ve ölçüm çapraz doğrulama yöntemi ile yapılmıştır. Özellik seçim yöntemlerinin model performansları üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu ve Özyinelemeli Özellik Eleme yönteminin en başarılı yöntem olduğu görülmüştür. Ayrıca, tüm durumlarda en yüksek performansı gösteren Rastgele Orman algoritmasının elde ettiği en yüksek doğruluk oranı çapraz doğrulama ile ölçülmüştür.

1. INTRODUCTION (GİRİŞ)

The loan approval process is a critical step in a financial institution's lending decisions to customers. A properly structured loan approval process improves the lender's profitability by lending to customers who are unlikely to be insolvent. This process also improves risk management and avoids potential losses by avoiding lending to high-risk customers [1]. Moreover, the right loan approval process increases customer satisfaction, strengthens customer loyalty, and expands the customer base [2]. This has the potential to provide more loans and increase the lender's revenue. In addition, the proper execution of the approval process has a direct impact on the financial well-being of applicants. A proper loan approval process determines the loan terms, considering the financial situation of the applicants. In this way, applicants can receive loans on favorable terms and build a more financially sound foundation [3]. In other words, the right loan terms can reduce the financial burden of applicants by offering payment plans and interest rates that suit their financial situation [4]. This makes the loan repayment process more manageable for applicants and helps them build a more financially sound foundation. Furthermore, providing loans with favorable loan terms can make it easier for applicants to achieve their financial goals and increase their financial well-being. Thus, identifying the right loan terms can improve the financial situation of applicants and be an important step towards a more financially secure future [5].

The traditional loan approval process used to be manually assessed on certain parameters such as the applicant's credit history, income level, employment status and similar financial metrics. Credit history shows a person's past loan and debt repayments, and payment history is an important factor indicating a borrower's eligibility for a loan [6]. The income level determines whether a person has the financial strength to afford the loan payments, while the employment status reflects the person's ability to earn a regular income [7]. In addition, financial metrics such as the debt-to-income ratio are among other important parameters considered during the loan approval process. These parameters help the lender assess the applicant's eligibility for the loan and set the loan terms. However, since this process is manual, it is time-consuming and the risk of making mistakes is high.

Recently, loan usage and applications have increased significantly in Türkiye. Especially with the various loan products and campaigns offered by

banks, there has been a significant increase in loan requests. In the July-September 2023 period, a total of TRY 277 billion worth of loans were extended to approximately 6.5 million people. These figures represent a 13% increase in the number of borrowers and a 61% growth in the amount of loans disbursed compared to the same period of the previous year [8]. This increase in demand has made manual processes in the loan approval process even more challenging. The intensity of manual processes may prevent the rapid evaluation and finalization of loan applications, thus increasing the risk of errors. In addition, efficiency issues stand out among the disadvantages that manual loan approval processes face with increasing loan applications. During peak application periods, manual processes are inefficient and may hinder the rapid processing of loan applications. This leads to long periods of waiting for answers and dissatisfaction on the part of applicants [9]. Furthermore, the time-consuming nature of manual processes can incur additional costs for organizations. Factors such as hiring additional staff and repeating processes are factors that increase operating costs. On the other hand, the human factor increases the possibility of making mistakes in manual processes. Staff working under intensity and stress may enter data incorrectly or make erroneous decisions [10]. Long loan approval processes and erroneous decisions can negatively affect organizations' reputation and customer loyalty [11]. Finally, the weight of manual processes in the rapidly digitalizing financial sector can reduce competitiveness. Rival organizations with faster and more efficient processes may be preferred by customers [12]. For these reasons, the need for automated and data-driven loan approval systems is becoming more and more important. These systems evaluate loan applications faster and more efficiently, reducing the workload of banks and providing a better service to customers.

Automated and data-driven loan approval systems enable faster evaluation of loan applications, reducing the workload of banks and providing better service to customers. Applicants' financial history, income level and other important factors are analyzed using technologies such as big data analytics, artificial intelligence and machine learning, and decisions such as loan approval or rejection are made automatically [13]. This ensures that applications are finalized quickly and at the same time reduces the risk of making mistakes. In addition to reducing the workload of banks, automated loan approval systems provide a better service to customers. Rapid decision-making has the potential to increase customer satisfaction, while at the same time increasing the competitiveness of

organizations. These systems also ensure that loan approval processes are more transparent and fairer. Data-driven decisions are made based on objective criteria and the impact of human error is minimized [14]. This results in a positive outcome for both banks and customers.

Along with the advantages of automated loan approval systems, there are also some disadvantages [15]. For instance, incorrect decisions can be made if these systems are programmed incorrectly or if data are misinterpreted. In addition, the sensitivity level of these systems needs to be adjusted and continuously updated. If these systems are misused or abused by malicious people, customer privacy may be at risk and unfair practices may arise. Therefore, the security and accuracy of these systems is of paramount importance and should be continuously reviewed [16]. In addition, the fact that these systems eliminate the human factor may, in some cases, reduce the importance of human observation and assessment, leading to potential errors. For these reasons, automated loan approval systems need to be properly programmed, regularly updated, and secured to be used effectively [17].

The selection of machine learning models is an important step for making the right decisions in loan approval systems. If the right model is not selected, the performance of the system may decrease, and wrong decisions may be made. In the literature, there are various techniques used in loan application approval prediction. These techniques include machine learning algorithms and statistical methods. Some of these techniques are as follows:

- **Logistic Regression (LR):** Provides a simple and interpretable model. However, it may be limited in problems with complex relationships, such as loan application approval prediction. It may struggle to express complex interactions between income, credit history and other factors. Therefore, it can be combined with other methods or replaced with more flexible models to model more complex relationships.
- **Decision Trees (DT):** Effective for modeling complex decision structures. It can be used to explain complex decision processes such as loan application approval prediction. However, they can be prone to overfitting, meaning that they may overfit the training data and lose the ability to generalize. To avoid this, it is important to control the depth of the trees. Deeper trees are generally more prone to overfitting, while shallower trees can produce more generalizable models. Therefore, it is

important to determine the optimal depth of the decision tree model [18].

- **Random Forest (RF):** RF is another method used for credit approval prediction. This method is an ensemble model that is built by combining multiple decision trees. RF is more resistant to overfitting because it uses a common decision algorithm that is built by combining many different trees [19]. This means that the ensemble model can often produce more generalizable results, even if each individual tree is prone to overfitting. RF generally provides high accuracy and is capable of modeling complex relationships. However, this complexity can reduce the interpretability of the model. That is, it can be difficult to understand why the model makes a particular prediction or which features are important. Therefore, when using complex models such as RF, it is important to carefully evaluate the model's performance as well as the model's results so that they can be interpreted correctly.
- **K-Nearest Neighbors (KNN):** This algorithm is known as a simple and interpretable classification method. To classify an instance, KNN looks at the labels of its nearest neighbors and takes a majority decision and assigns that instance to that class [20]. Therefore, it is basically simple and easy to understand. However, KNN also has some disadvantages. For large datasets, the computational cost can be high because for each prediction, it may be necessary to calculate the distance to all other instances in the dataset. It can also be sensitive to noise in the dataset, meaning that small random changes in the dataset can significantly affect the model's predictions.
- **Support Vector Machine (SVM):** SVM is resistant to overfitting, meaning that it does not overfit the training data and retains the ability to generalize. It can also perform well on high-dimensional datasets. However, the computational cost of SVM when working on large datasets can be high because SVM classifies each instance in the dataset by comparing it with support vectors. Therefore, it should be considered that the computational cost and time may increase when using SVM on large datasets [21]. Also, due to the complexity of SVM, it can be difficult to interpret the results of the model, especially when working on multidimensional datasets. For these reasons, SVM can often be a good option for medium-sized datasets, while for large datasets

it is a method that should be used with more caution. However, when properly applied, SVM can provide high accuracy and can be an important tool with the ability to model complex relationships.

Determining the hyperparameters of the models is an important step to avoid the disadvantages of the techniques. Incorrect specification of hyperparameters can affect the accuracy of the model and reduce its performance [22]. For instance, overfitting or underfitting levels for a model can negatively affect the model's performance. These problems can be avoided by making the right hyperparameter adjustments. Feature selection is also an important process that affects the performance of the models in predicting the loan approval procedure. Selecting the wrong or unnecessary features can reduce the performance of the model [23]. For instance, ignoring an important feature such as income level may prevent accurate loan decisions from being made. If all these factors are not handled correctly, the performance of loan approval systems can be degraded, and incorrect decisions can be made. This can result in losses for both lenders and customers. Therefore, attention should be paid to the selection of machine learning models, determination of hyperparameters and feature selection.

This study deals with predicting the loan approval status of a bank using customer data. Within the scope of the research, the models are trained with LR, KNN, SVM, DT and RF machine learning algorithms and the performance of the models is evaluated by comparing the test data with actual loan approval results. The main objective of the study is to evaluate the effect of techniques such as K-Best and Recursive Feature Elimination (RFE) used in feature selection on model performance. Another important objective of the study is to evaluate the effectiveness of cross-validation (K-Fold) and Train, Test and Validation techniques in measuring the performance of the models.

2. RELATED RESEARCH (İLGİLİ ARAŞTIRMALAR)

Predicting loan approval is a topic of great importance for financial institutions because accurate predictions help them minimize financial risks and increase profits. Research on this topic has evaluated the usability and effectiveness of various machine learning and statistical methods.

The study by Kadam et al. [24] emphasizes the importance of forecasting loan defaults in banking

systems. A large portion of banks' revenue comes from loan interest and therefore, predicting loan defaults significantly affects banks' profitability. The aim of the study is to examine and compare different machine learning methods used to predict loan defaults. The study finds that the Naïve Bayes model outperforms the SVM model for predicting loan defaults.

Kadam et al. [25] aim to develop a web-based application for banks to evaluate loan applications more efficiently. The web application developed in their study provides instant loan approval predictions to users. The application uses LR to predict the probability of loan approval and calculates a credit score called CIBIL score. The developed model provides an efficient performance for accurately evaluating loan applications and calculating the credit score.

In the study conducted by Saini et al. [26], RF, KNN, SVM, and LR models were used to predict customers' loan approval outcomes, and their performances were compared. According to the results of the study, the RF algorithm was the most successful algorithm with an accuracy rate of 98.04%.

The aim of the study by Singh et al. [27] is to use machine learning models to predict whether loan applications will be approved in the banking sector and to determine the most successful algorithm. For this purpose, various classification algorithms such as LR, RF classifier, SVM classifier were used. As a result of the experimental studies, it was determined that the best performance was obtained with the RF classifier.

With the increasing demand for loans, banks are forced to lend despite their limited resources. This creates the need to reduce risks so that banks can make safer choices when lending. Diwate et al. [28] examined the use of artificial intelligence models to predict the safety of loan applications by data mining on data from banks' previous lending experiences. In this way, it is aimed to contribute to the safe lending process by saving banks' efforts and resources. SVM algorithm was used in the research and an accuracy rate of 81% was obtained.

The aim of the study by Alaradi and Hilal [29] is to develop a high-performance forecasting model for loan approval prediction using decision trees. They experimented with different tree methods starting from the most simplified and comprehensible decision tree to the most complex random forests. The results showed poor performance over

simplified decision trees because due to the highlighted correlated and complex feature space, most critical parameters affecting loan approval are not reflected, resulting in an oversimplified tree that is impractical to implement. However, in terms of performance, relevance and interpretability, the DT algorithm stood out. The accuracy on the test dataset was 97.25%. Therefore, the DT-based prediction model is proposed to facilitate the decision-making process regarding the eligibility of loan application based on the applicants' characteristics.

Kumar et al. [30] analyzed bank loan data using machine learning methods. The study aimed to identify the features that are important for accurately predicting the loan value of customers. The analysis shows that the identified important features are effective in accurately determining the loan value of customers. Naive Bayes, DT and LR algorithms were used in the study and the most successful algorithm in predicting the loan value of customers was Naive Bayes with an accuracy rate of 80%.

Uddin et al. [31] discuss the challenges faced by banks in the process of evaluating loan applications. In order to overcome these difficulties, a system that enables automatic evaluation of loan applications using machine learning methods has been developed. The study includes the use of LR, DT, RF, Extra Trees (ET), SVM, KNN, Gaussian Naive Bayes, AdaBoost, Gradient Boosting, Dense Neural Network, Long Short-Term Memory, and Recurrent Neural Network algorithms and evaluating the performance of these algorithms. The experiments show that the ensemble model performs better than the individual models. In this context, ET algorithm was the most successful algorithm with 86.64% accuracy.

Tejaswini et al. [32] mentioned in their study that forecasting loan borrowers is a difficult task for the banking sector. Loan recovery is an important parameter in a bank's financial statements. Predicting a customer's probability of loan repayment is a significant challenge. The researchers mentioned that machine learning techniques can be useful in such tasks. In their study, LR, DT, and RF machine learning algorithms were used to predict customer loan approval. The experimental results show that the accuracy of the DT machine learning algorithm is better than LR and RF.

The study by Ramachandra et al. [33] aims to deploy the model on cloud-based platforms using machine learning algorithms and concepts to

identify and understand the working method of loan systems for loan prediction. The main objective of the project is to predict which of the customers will or will not pay their loans, using leading algorithms such as DT, LR and RF. The LR algorithm achieved 86% accuracy with minimal error.

While Meshref [34] notes that the Bank Marketing dataset on Kaggle is often used to predict long-term deposit subscription, he thinks that this dataset can also be used to predict whether loan applications will be approved or not. The research builds a loan approval prediction model using ensemble machine learning techniques such as Bagging and Boosting. The results showed that the AdaBoost model had an accuracy rate of 83.98%.

Gupta et al. [35] points out that with the advancement of technology, there have been many developments in the banking sector and the number of applications for loan approval increases every day. There are certain policies that banks need to consider when selecting an applicant for loan approval. Based on certain parameters, the bank needs to decide which applicant it finds most suitable for approval. It is difficult and risky to manually check each individual and then recommend them for loan approval. In their work, they developed a web-based application that utilizes LR and RF algorithms to predict creditworthy borrowers based on the borrower's past records.

Sheikh et al. [36] stated that there are many products such as loans in the banking sector and the main source of income of banks comes from these products. It is stated that by predicting loan approval results in advance, banks can reduce the Non-Performing Assets (NPA) problem. In the study conducted with the data collected from Kaggle, the LR model was used to predict loan approvals. In the study, which emphasizes the importance of attribute selection in terms of the performance of the model, an accuracy rate of 81% was obtained in determining the selection of customers eligible for loan approval.

Tumuluru et al. [37] noted that in today's increasingly competitive market, estimating the risk involved in a loan application is one of the most important challenges to the survival and profitability of banks. The study mentioned that most banks use credit scoring and risk assessment procedures to review loan applications and make loan approval decisions, yet every year many people fail to repay their loans or default on their loans. This causes financial institutions to lose significant amounts of money. In the study, Machine Learning

algorithms were used to extract patterns from a common loan dataset and predict future loan defaulters. In the analysis, customer data such as age, income, loan amount and tenure were used. RF, SVM, KNN and LR algorithms were evaluated and compared with standard metrics. Among the algorithms, RF achieved a better accuracy of 81%.

This study differs from other studies in the literature by focusing on the impact of advanced techniques such as cross-validation, feature selection, hyperparameter optimization on models while evaluating the effectiveness of machine learning methods in predicting loan approval in the banking industry. The main objective of the study is to provide a comprehensive analysis to determine the most appropriate model by comparing various machine learning algorithms. In this analysis, the effectiveness of machine learning algorithms such as LR, KNN, SVM, DT and RF will be examined, and it will be determined which algorithm predicts loan applications more accurately.

K-Best and RFE methods, which are feature selection methods, will be discussed in this study. It will be examined whether and how these methods can be used to determine which features are the most important in evaluating loan applications and which method provides the best performance. In addition, this study will evaluate K-Fold cross-validation and Train, Test, and Validation techniques. It will be investigated which method provides the best results and how these techniques can be used to accurately evaluate the model performance. As a result of these analyses, an approach that allows banks to evaluate loan applications more effectively will be proposed. This proposal will offer a new perspective to improve the effectiveness of machine learning methods in loan approval prediction.

3. MATERIAL AND METHODS (MATERYAL VE METOD)

In this section, descriptions of the machine learning algorithms used in the study, performance criteria used in comparing the algorithms, characteristics of the dataset, and data preparation process are provided. The aim is to establish the methodological and analytical foundations of the research, enhance its scientific contribution, and ensure reproducibility.

3.1. Classification Algorithms (Sınıflandırma Algoritmaları)

In this study, five supervised classification

algorithms include LR, KNN, SVM, DT, and RF. The algorithms used in the study are briefly explained in subheadings.

3.1.1. Logistic regression (Lojistik regresyon)

LR is a classification algorithm often used in machine learning. This algorithm attempts to predict the probability of a dependent variable by taking a set of linear combinations of independent variables. Typically, LR is used if the dependent variable is divided into two classes (binary classification), such as predicting whether loan applications will be approved. These predictions are then classified at a threshold (usually set at 0.5) to determine the class of the dependent variable [38]. The basic formula for LR is given in Equation 1.

$$P(Y = 1) = \frac{1}{1 + e^{-(b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + \dots + b_kX_k)}} \quad (1)$$

When the equation is analyzed, $P(Y=1)$ signifies the likelihood of the dependent variable being 1. The letter e represents Euler's number, and the coefficients $b_0, b_1, b_2, \dots, b_k$ are the model's estimated parameters. X_1, X_2, \dots, X_k stand for the independent variables.

3.1.2. K-nearest neighbors (K-en yakın komşu)

KNN is a simple yet effective classification and regression algorithm. The core idea is to classify or evaluate a new data point based on the classes or values of its nearest neighbors [39]. The working principle of the algorithm is itemized below:

1. In KNN, each data point is represented by an inter-axis distance calculation. Euclidean Distance is usually used for classification. This distance measure calculates the direct distance between two data points.
2. For the algorithm to work, a value K is set. This represents the number of neighbors. For instance, if K=3, then for each new data point, the 3 closest neighbors are looked at.
3. For the given value of K, the K closest neighbors to the new data point are determined.
4. For classification, a majority vote is taken between the classes of these K neighbors. That is, the new data point is assigned to the class of the majority of its nearest neighbors.
5. For regression, an average or weighted mean is calculated between the values of these K

neighbors and the new data point is assigned an approximation to this value.

KNN classification is formally expressed as in Equation 2:

$$\hat{Y} = \operatorname{argmax}_{y_i} \left(\sum_{i=1}^K I(y_i = y) \right) \quad (2)$$

In Equation 2, \hat{Y} is the predicted class of the new data point. y_i , is the i -th class of K neighbors. $I()$, is an indicator function and checks whether y_i is equal to y .

3.1.3. Support vector machine (Destek vektör makinesi)

The aim of the SVM is to find a hyperplane that best discriminates data points for classification. The working principle of SVM includes the following steps:

1. The dataset consists of labeled samples separated into two or more classes. Each sample is represented by a feature vector.
2. SVM tries to create a hyperplane between classes using feature vectors. This hyperplane is determined to best separate the classes.
3. The main goal of SVM is to maximize the distance between the closest examples of two classes, called margin. This allows for better discrimination between classes.
4. In some cases, the dataset cannot be linearly separated. In this case, SVM makes the data linearly separable by transforming it into high-dimensional space using a method called kernel trick [40].

3.1.4. Decision tree (Karar ağacı)

DT algorithm is a machine learning technique used in classification and regression problems. DT classifies data by creating simple decision rules from features in the dataset [41]. The DT algorithm includes the following steps:

1. A node is created to represent each instance in the dataset. These nodes are separated according to the values of the features in the dataset.
2. The DT aims to divide the data at each node into homogeneous subsets (branches). This splitting process involves determining the feature and

threshold value that will best classify the dataset.

3. By dividing (splitting) the dataset, the DT creates a tree structure that will best classify the entire dataset as it branches.
5. When a new data point arrives, the DT classifies it using decision rules, starting from the root node and moving downwards (towards the branches).

3.1.5. Random forest (Rastgele orman)

RF is a model created by combining decision trees, an ensemble learning algorithm. This algorithm aims to obtain a more powerful and balanced model by creating multiple decision trees and combining the result of each tree. The RF algorithm creates a training dataset for each tree by randomly selecting a subset of the dataset. These subsets include random selection of features and data samples. Each tree tries to learn the relationship between the inputs and outputs of the instance. Once the decision trees are created, each tree is used to make predictions [42]. In classification problems, voting is used to determine the final prediction by taking the majority of the classes predicted by each tree. In regression problems, the final prediction is made by averaging the predicted values of each tree. The RF algorithm is resistant to overfitting and generally provides high accuracy. It can also be used to determine the order of importance of different features.

3.2. Performance Metrics (Performans Metrikleri)

Performance metrics play a crucial role in evaluating the effectiveness and efficiency of machine learning models. These metrics provide quantitative measures to assess how well a model is performing, allowing researchers and practitioners to compare different models and select the most suitable one for a particular task. In machine learning, performance metrics are used to evaluate various aspects of a model's performance, such as its accuracy, precision, recall, and F1 score. In addition to these basic metrics, other performance metrics such as receiver operating characteristic curve (ROC) and area under the ROC curve (AUC) provide further insights into the model's performance.

Performance metrics are calculated based on the values of True Positives (TP), False Positives (FP), True Negatives (TN), and False Negatives (FN). These values are typically organized into a confusion matrix, which provides a tabular

representation of a model's predictions against the actual values in the dataset. TP are the cases where the model correctly predicts the positive class (e.g., approved loans). FP are the cases where the model incorrectly predicts the positive class. TN are the cases where the model correctly predicts the negative class (e.g., denied loans). FN are the cases where the model incorrectly predicts the negative class.

3.2.1. Accuracy (Doğruluk)

Accuracy refers to the proportion of instances that a classification model predicts correctly. It is calculated by the formula in Equation 3.

$$Accuracy = \frac{TP + TN}{TP + FP + TN + FN} \quad (3)$$

3.2.2. Precision (Kesinlik)

Precision is a performance metric that measures how many of the instances that a classification model predicts as positive are actually positive. Precision is considered an important performance metric, especially in imbalanced classification problems, that is, when the number of instances between classes is very different. It is calculated by the formula in Equation 4.

$$Precision = \frac{TP}{TP + FP} \quad (4)$$

3.2.3. Recall (Duyarlılık)

Recall is a performance metric that measures how many TP a classification model correctly identifies. Recall is considered an important performance metric, especially when FN have a high cost. In such cases, it is important not to miss TP. It is calculated by the formula in Equation 5.

$$Recall = \frac{TP}{TP + FN} \quad (5)$$

3.2.4. F1-score (F1-skor)

The F1-Score is the harmonic mean of the precision and recall metrics of a classification model. The F1-Score provides a balance by considering the effects of both FP and FN. F1-Score takes values between 0 and 1, with 1 representing the best performance and 0 representing the worst performance. F1-Score will have a high value when precision and recall are balanced. It is calculated with the formula in Equation 6.

$$F1 = 2 * \frac{(precision * recall)}{(precision + recall)} \quad (6)$$

3.2.5. Receiver operating characteristic curve (Alıcı işletim karakteristik eğrisi)

ROC Curve is a graphical method used to evaluate the performance of classification models. The ROC curve shows the relationship between sensitivity and specificity of a model. The ROC curve allows to visually assess the performance of the model at different classification thresholds. A model's ROC curve shows the relationship between the model's TP rate and FP rate at each threshold value. For an ideal classifier, the ROC curve approaches a diagonal line at a 45-degree angle starting from the upper left corner. Mathematically, the ROC curve is calculated with the formulas in Equation 7 and Equation 8.

$$TPR (True Positive Rate) = \frac{TP}{TP + FN} \quad (7)$$

$$FPR (False Positive Rate) = \frac{FP}{FP + TN} \quad (8)$$

3.2.6. Area under the ROC curve (ROC eğrisi altında kalan alan)

AUC is a measure of the classification performance of the model. The AUC value is between 0 and 1 and the closer it is to 1, the better the performance of the model. If the AUC value is 0.5, the model's performance is indistinguishable from random guessing. The ROC curve and AUC help to evaluate the performance of the model at different classification thresholds and provide a more comprehensive understanding of the overall performance of the model.

3.3. Dataset (Veri Seti)

“The Loan Status Prediction” dataset contains information on applicants who have previously applied for loans secured by property. Banks use various factors such as Applicant Income, Loan Amount, previous Credit History, Co-applicant Income, among others, to determine whether to approve or reject a loan application. The purpose of this dataset is to test the development of machine learning models that can predict whether a loan application will be approved or rejected for an applicant. The dataset was taken from a Hackathon on Kaggle, a platform for those interested in data science and machine learning [43]. The dataset contains 13 features and 381 records. The features and their descriptions are given in Table 1. The

correlation matrix and heat map of the dataset are given in Figure 1.

Table 1. Dataset features and descriptions (Veri seti özellikleri ve açıklamaları)

Feature	Description
Loan_ID	A unique loan ID.
Gender	Gender of the applicant (1: Male, 0: Female).
Married	Marital status of the applicant (1: Married, 0: Not Married).
Dependents	Number of dependents on the applicant.
Education	Education level of the applicant (1: Graduate, 0: Not Graduate).
Self_Employed	Whether the applicant is self-employed (1: Yes, 0: No).
ApplicantIncome	Income of the applicant.
CoapplicantIncome	Income of the co-applicant.
LoanAmount	Loan amount in thousands.
Loan_Amount_Term	Term of the loan in months.
Credit_History	Whether the applicant's credit history meets guidelines (1: Yes, 0: No).
Property_Area	Area where the applicant lives (1: Urban, 2: Semi-Urban, 3: Rural).
Loan_Status	Whether the loan was approved (1: Approved, 0: Not Approved).

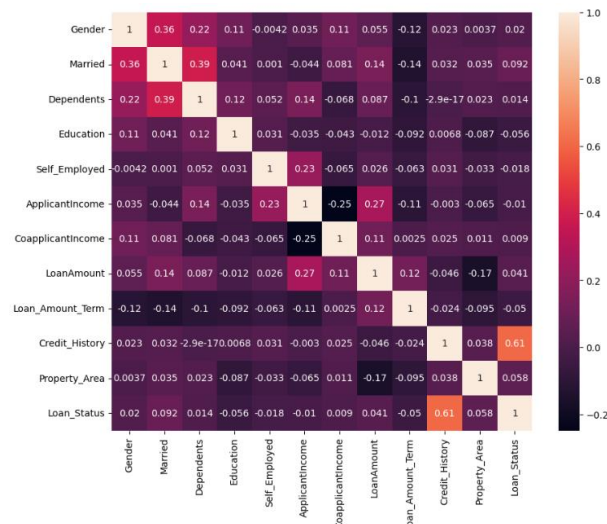


Figure 1. Heatmap of the dataset (Veri setinin ısı haritası)

3.4. Data Preparation (Veri Hazırlama)

Data Preparation is one of the most fundamental steps in the data analysis process and an important step for the success of data science projects. Data preparation is the process of making the dataset suitable for analysis and modeling. This process includes correcting missing or erroneous data in the dataset, removing redundant or repetitive data, and transforming data to improve the understandability and processability of the dataset. Proper data preparation is important to achieve more accurate results and improve model performance. Therefore, the data preparation process should be carried out rigorously.

During the data preparation phase, several crucial steps were taken to ensure the dataset was suitable for analysis and modeling. Firstly, missing values in columns such as Gender, Dependents, Self_Employed, Loan_Amount_Term, and Credit_History were addressed by filling them with the mode value, which represents the most frequently occurring value in each column. This step helped maintain the integrity of the dataset and ensured that all necessary information was available for analysis. Secondly, categorical features like Gender, Married, Education, Self-employed, and Loan status were converted into binary values. This conversion simplified the representation of these features, making them more suitable for use in machine learning algorithms. Another important transformation concerns the Loan_Amount_Term column, where a significant majority of values (around 84%) have a value of 360, indicating a long-term loan. To capture this distinction, the column was transformed such that values greater than or equal to 360 were encoded as 1, while values less than 360 were encoded as 0. Additionally, the representation of loan amounts in the Loan Amount column was adjusted to be in thousands. This adjustment was made by multiplying all values in this column by 1000, ensuring consistency in the representation of loan amounts throughout the dataset. Furthermore, for better clarity and understanding, the Education column was renamed to Graduated, and the Loan_Amount_Term column was renamed to Long_term. Lastly, the Loan_ID column, which did not provide relevant information for the analysis and modeling process, was dropped from the dataset.

In the dataset used in the study, there was an imbalance between the number of approved and unapproved loan applications, with approved loans significantly outnumbering unapproved ones (Figure 2a). To tackle this imbalance, a technique called resampling was employed for the minority class (unapproved loan applications). In the first step, the number of observations for the minority class was determined, and then random samples

were taken until this number matched the number of observations for the majority class (approved loan applications). These samples were added back to the dataset to increase the number of observations for the minority class. As a result of this process, the class imbalance in the dataset was mitigated, and the model was trained on a more balanced dataset (Figure 2b).

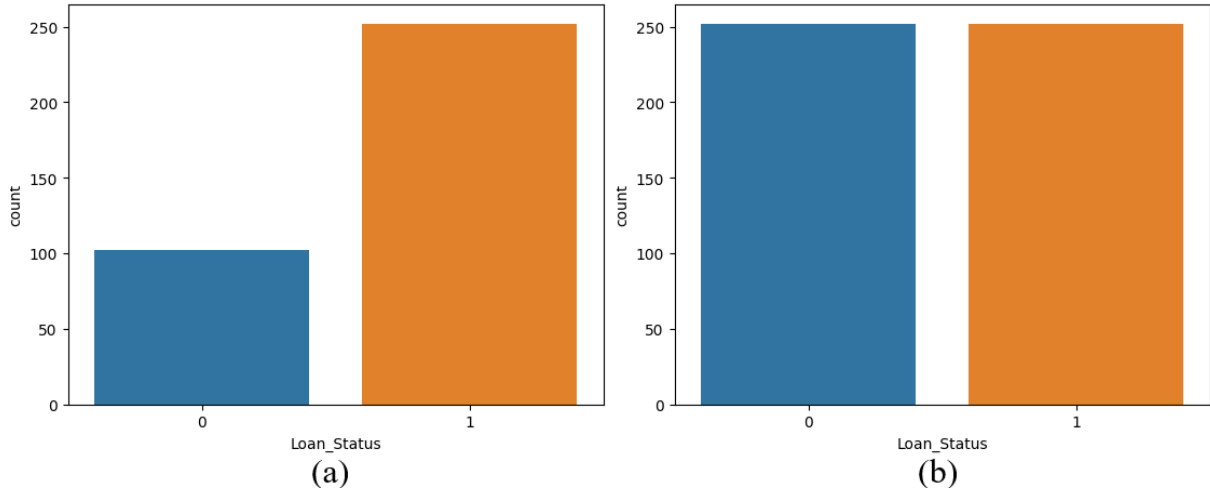


Figure 2. Class distributions: a) before resampling technique; b) after resampling technique (Sınıf dağılımları: a) yeniden örnekleme tekniğinden önce; b) yeniden örnekleme tekniğinden sonra)

3.5. Feature Selection (Özellik Seçimi)

Feature selection is a process used to determine the importance of features in a dataset and select the most appropriate ones. This process prevents overfitting by reducing the complexity of the model and increases the generalization ability of the model. It also reduces computational time by removing unnecessary features and provides better interpretability. One of the important sub-objectives of the research is to examine the effect of using various feature selection methods on the performance of the algorithms. In this context, without using feature selection, K-Best and RFE methods were used to measure the performance of the algorithms and comparisons were made.

In the K-Best method, the relationship of each feature in the dataset with the target variable is evaluated and the most important features are identified. The "K" value determines the number of features to be retained [44]. For this study, K is set as 8, which has the highest accuracy and precision rates according to the experiments. In the RFE method, a model with all features is initially created and then the model is re-evaluated by removing the least effective features one by one. This process continues until a set number of features (the number at which the model performs best) is reached. The main idea of RFE is that by removing the least influential features, the model becomes simpler and more generalizable [45]. In this study, the number of features where the model performs best was determined as 9. Figure 3 shows the flowchart of RFE.

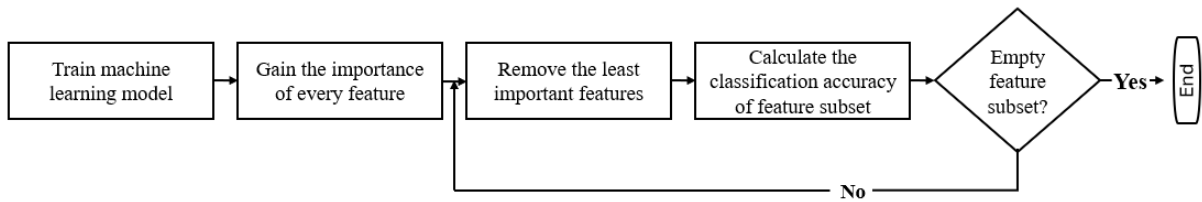


Figure 3. Flowchart of RFE (RFE Akış Şeması)

Table 2 shows the features that both methods find important for predicting the Loan_Status variable.

Commonly selected features include Married, Self_Employed, ApplicantIncome, LoanAmount,

Credit_History and Education. However, the RFE method selected additional features such as Dependents and Property_Area, while the K-Best method did not find these features important.

Table 2. Selected features (Seçilen özellikler)

Method	Number of Features	Features
K-Best	8	Married, Self_Employed, ApplicantIncome, CoapplicantIncome, LoanAmount, Credit_History, Education, Loan_Status
RFE	9	Married, Self_Employed, ApplicantIncome, Dependents, LoanAmount, Credit_History, Education, Property_Area, Loan_Status

3.6. Model Setups (Model Ayarları)

In this study, machine learning classification algorithms LR, KNN, SVM, DT and RF algorithms were used. In order to create a model in the dataset, the data was divided into 75% training and 25% testing. Class distribution of training and test sets is given in Figure 4. In all algorithms, the random state was set as 42. The best hyperparameter settings for the models were determined using the GridSearchCV method. This method selects the best performing hyperparameters by trying different combinations within the specified hyperparameter ranges [46]. Table 3 lists the best hyperparameter settings determined using GridSearchCV for the machine learning models used in the study.

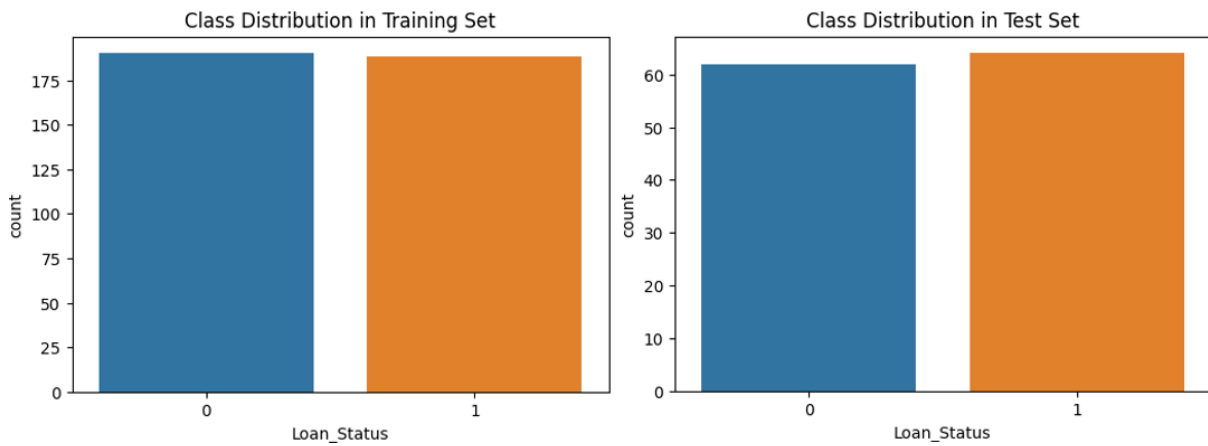


Figure 4. Class distribution in training and test sets (Eğitim ve test setlerindeki sınıf dağılımı)

Table 3. Hyperparameter settings for algorithms (Algoritmalar için hiper parametre ayarları)

Model	Hyperparameters	Settings
LR	C, Class Weight, Max Iter, Penalty, Solver	1, {0: 0.15, 1: 0.85}, 100, 11, liblinear
KNN	Algorithm, Metric, N Neighbors, Weights	auto, euclidean, 20, distance
SVM	C, Class Weight, Gamma, Kernel	1, balanced, 10, rbf
DT	Criterion, Max Depth, Min Samples Split	entropy, 20, 2
RF	Max Depth, Max Features, Min Samples Leaf, Min Samples Split, N Estimators	20, auto, 1, 2, 200

In this study, Python programming language was used for data analysis and model testing. Basic data processing libraries such as pandas and NumPy were used for data analysis, while scikit-learn was preferred for model building and testing. Visualization libraries such as matplotlib and seaborn were used to analyze the results and the findings were presented graphically. All these processes were carried out in the Jupyter Notebook development environment.

4. EXPERIMENTAL STUDY AND FINDINGS (DENEYSSEL ÇALIŞMA VE BULGULAR)

In the experimental phase of the research, firstly, Exploratory Data Analysis (EDA) was conducted to examine the dataset in detail. As a result of this analysis, important inferences about the dataset were obtained. Then, to evaluate the performance of the machine learning algorithms used in the research, various measurements were made, and the performances of the algorithms were compared. Figure 5 shows the matrix containing the graphs

showing the loan application success of the applicants according to the features.

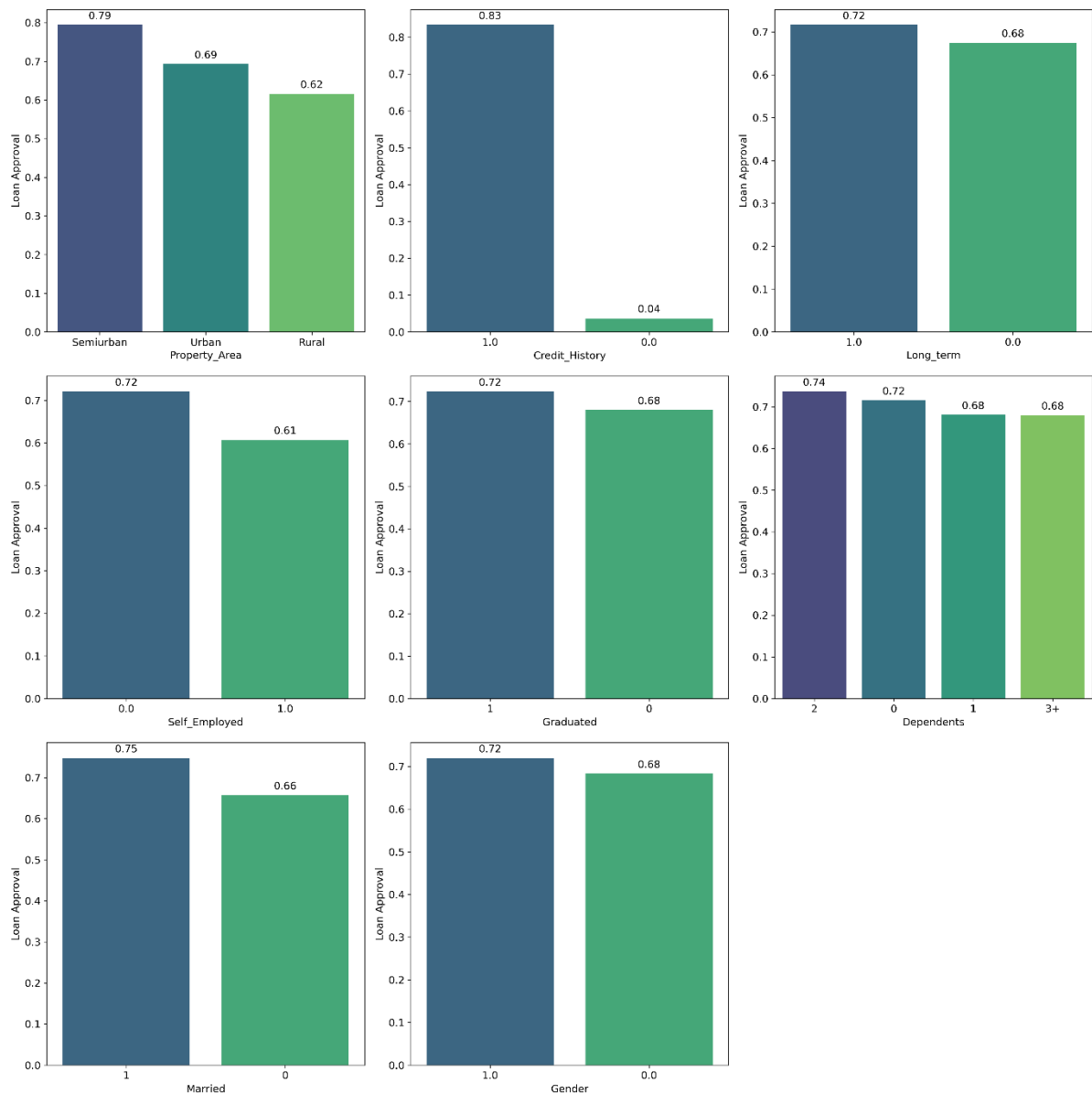


Figure 5. Distribution of features by loan approval status (Özelliklerin kredi onay durumuna göre dağılımı)

In the analysis of loan approval predictors, it was observed that males were more likely to have their loan applications approved compared to females. Similarly, married individuals had a higher likelihood of loan approval than unmarried individuals. Graduates were also more likely to get their loans approved compared to non-graduates. On the other hand, self-employed individuals were less likely to have their loan applications approved. Long-term loans showed a higher probability of approval than short-term loans. Moreover, a strong credit history significantly increased the chances of loan approval compared to a weak credit history. Additionally, residents in semiurban areas had a higher likelihood of loan approval than urban residents, while rural residents had the lowest

probability. Furthermore, individuals with 2 dependents had a higher probability of loan approval compared to those with 0, 1, or more than 3 dependents. Figure 6's graph illustrates the relationship between credit history and applicant income, and its impact on loan approval.

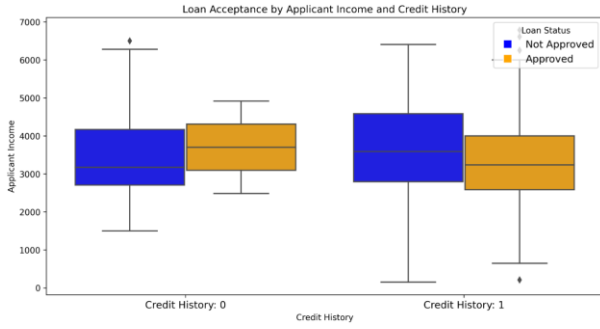


Figure 6. Applicant income and credit history impact on loan approval (Başvuru sahibinin geliri ile kredi geçmişinin kredi onayı üzerindeki etkisi)

Figure 6 shows that the income ranges of applicants with a positive credit history are higher than those with a negative credit history, the applications of applicants with higher income are more likely to be approved, and the average income of applicants are close to each other according to credit history or loan approval status. Figure 7 shows the relationship between the amount of loan applied for and the region of the applicant's residence and its impact on loan approval.

When the relationship between loan amount and loan acceptance rate is analyzed, it is observed that

the loan acceptance rate decreases as the loan amount increases. Moreover, there are differences in loan amounts according to the type of region where applicants live. In particular, loan amounts of applicants living in urban areas are higher than those of applicants living in semi-urban and rural areas.

Table 4 shows the model performance values measured without feature selection. Table 5 shows the model performance values obtained using the K-Best method and Table 6 shows the model performance values obtained using the RFE method.

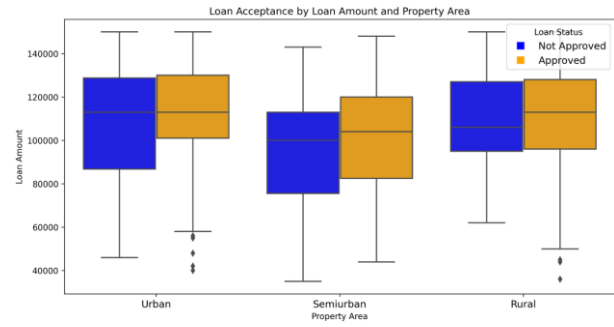


Figure 7. Loan approval by loan amount and property area (Kredi tutarı ve mülk bölgesine göre kredi onayı)

Table 4. Model performance measured without feature selection (Özellik seçimi yapılmadan modellerin performans değerleri)

Model	Accuracy	Precision	Recall	F1-Score
LR	0.7423	0.75	0.98	0.84
KNN	0.7926	0.77	0.96	0.82
SVM	0.7435	0.71	0.99	0.83
DT	0.7511	0.72	0.98	0.80
RF	0.8241	0.79	0.97	0.85

Table 5. Model performance values with K-best method (K-best yöntemi ile modellerin performans değerleri)

Model	Accuracy	Precision	Recall	F1-Score
LR	0.7730	0.79	0.85	0.82
KNN	0.7409	0.82	0.87	0.85
SVM	0.8098	0.78	0.82	0.80
DT	0.8171	0.76	0.80	0.78
RF	0.8857	0.85	0.90	0.88

Table 6. Model performance values with RFE method (RFE yöntemi ile modellerin performans değerleri)

Model	Accuracy	Precision	Recall	F1-Score
LR	0.7950	0.79	0.86	0.83
KNN	0.7841	0.80	0.88	0.86
SVM	0.9378	0.91	0.94	0.92
DT	0.8702	0.82	0.85	0.83
RF	0.9768	0.92	0.95	0.93

Tables 4, 5 and 6 show how the use of different feature selection methods (K-Best and RFE) affects model performance. According to the model

performances measured without feature selection (Table 4), the model with the highest accuracy value is the RF algorithm, with an accuracy value of

0.8241 and an F1-Score value of 0.85. The performance of the models built with features selected by the K-Best method (Table 5) resulted in an increase in the accuracy value for the RF model (0.8857, F1-Score: 0.88). The performance of the models with features selected by RFE method (Table 6) showed a more significant increase in accuracy for the RF model (0.9768, F1-Score: 0.93). The RF model shows higher accuracy, precision, recall and F1-Score values compared to the other models in all tables.

It is seen that the features selected with the RFE method significantly improve the model performance. The models created with the features selected with RFE show higher performance than the models created using the K-Best method or all features. This shows that the feature selection method can improve model performance and unnecessary features can negatively affect model performance.

Table 7. Performance results of models with cross-validation (Çapraz doğrulama ile modellerin performans sonuçları)

Model	Cross-Validation (K-fold) Accuracy Rate	Train, Test, and Validation Accuracy Rate	AUC Rate	SD
LR	0.7672	0.7950	0.85	0.0562
KNN	0.7557	0.7841	0.95	0.0643
SVM	0.9441	0.9378	0.94	0.0361
DT	0.8782	0.8702	0.87	0.0316
RF	0.9771	0.9768	0.96	0.0309

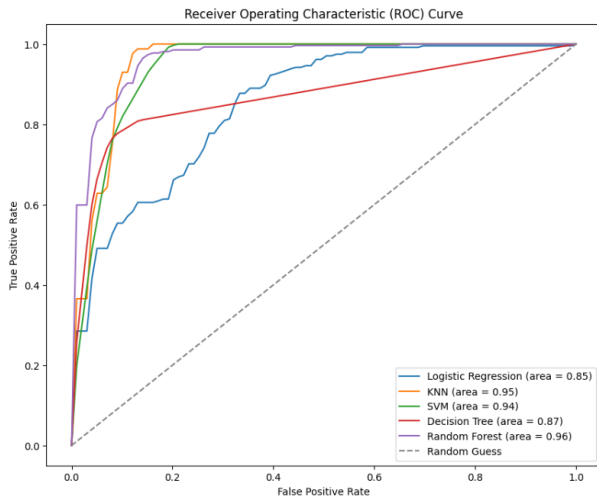


Figure 8. ROC curves (ROC eğrileri)

In this part of the study, the results obtained with cross-validation and Train, Test, and Validation methods are compared. Since the highest model performances were obtained with the RFE method, these analyses were conducted on the features selected with the RFE method. Table 7 shows the accuracy rates, AUC rates and standard deviation (SD) values of the models. Figure 8 shows the ROC curve graph of the models. The K-Fold method was used for the accuracy rate obtained by the cross-validation method. In this method, the dataset is divided into K parts and each part is used as a test set and the remaining part is used as a training set. In this way, K different models are created, and accuracy values are obtained [47]. In this research, the number of folds was set as 10 for all algorithms. Train, Test, and Validation Accuracy Rate is the accuracy rate obtained after training the model by separating the dataset into a single training and test

set. In addition, the AUC ratio measures the classification performance of the model. The SD value indicates the variability of the model's performance. According to Table 7, the RF algorithm performs the best in predicting loan approval, with a cross-validation rate of 0.9771, Train, Test, and Validation accuracy rate of 0.9768, AUC rate of 0.96, and SD of 0.0309.

5. DISCUSSION (TARTIŞMA)

In this study, machine learning models for loan approval prediction are developed and their performance is evaluated. In addition, EDA was conducted on the dataset to reveal various information about loan approval. The findings of the paper are discussed and compared with similar studies in the literature.

The impact of demographic factors on loan approval is the starting point of this study and this has been frequently discussed in the literature. Dansana et al. [48] and Stavins [49], in line with the findings of this study, find that married individuals are more likely to be approved for a loan than single individuals. There are several possible reasons for this. First, married individuals may generally have more stable sources of income and may be more likely to plan and manage their income according to the needs of the household. Moreover, married individuals often have joint income with their spouse, which may make their loan repayments stronger and increase the likelihood that banks will approve their loan applications. However, given that married individuals bear more responsibility for their families, their sense of responsibility for

making timely loan payments may be higher. These reasons may increase the likelihood that married individuals are more likely to have their loan applications approved than single individuals.

Similar to the findings of this study, Escalante et al. [50] report that men's loan applications are more likely to be approved than women's. Among social factors, income inequality may lead men to generally have higher incomes [51], which may make loan payments more secure and increase the likelihood of loan applications being approved. Moreover, the fact that men are generally perceived as more competent and trustworthy in financial matters may be associated with traditional gender roles and perceptions [52], which may contribute to favorable evaluation of loan applications.

The effect of education level on loan approval is also a topic examined in the literature. In their study, Bandyopadhyay [53] found that graduates have a higher chance of loan approval than non-graduates. This finding is consistent with the results of this study and shows that education level is an important factor on loan approval. The fact that graduates have a higher chance of loan approval compared to non-graduates can be attributed to several reasons. Education level is often associated with income level [54]. A higher level of education may imply a higher income and financial stability. This may lead to the perception that loan repayments will be more reliable. Moreover, educational attainment is associated with financial literacy and financial planning skills [55]. This can lead to more careful and informed loan applications, which in turn increases the likelihood of loan approval.

The impact of financial factors on loan approval is also an important issue in the literature. For instance, Ravina [56] finds that loan applications of individuals with higher income are more likely to be approved. Similarly, Netzer et al. [57] report that individuals with a strong credit history are more likely to have their loan applications approved. These results are consistent with the findings of this study and suggest that financial factors such as income level and credit history have an impact on loan approval. High income is associated with financial reliability and loan repayment capacity [58]. This assumes that the loan applicant is more likely to repay the loan. Therefore, it is a factor that increases the likelihood of loan approval. Moreover, higher income provides a stronger position when applying for a loan as an indicator of financial stability and security. In addition, the impact of financial history on loan approval is also significant. Having a strong credit history indicates that

previous loan payments have been made regularly and on time, which is an important factor in the favorable evaluation of the loan application [59]. In this context, the impact of financial factors such as income level and credit history on loan approval are important criteria evaluated by financial institutions and are scrutinized during the loan application process.

The study reveals a significant finding regarding the relationship between loan amount and loan acceptance rate, indicating a decrease in the acceptance rate as the loan amount increases. This trend suggests that higher loan amounts are perceived as riskier, leading to more thorough scrutiny and a lower probability of approval. This observation aligns with previous studies [60]. Furthermore, the study highlights regional disparities in loan amounts. Specifically, applicants residing in urban areas tend to have higher loan amounts compared to those in semi-urban and rural areas. This discrepancy may be attributed to the higher cost of living in urban areas, resulting in a greater need for loans among urban residents.

For loan approval forecasting, this study provides important findings on how the use of different feature selection methods (K-Best and RFE) affects model performance. According to the model performances measured without feature selection, the RF algorithm has the highest accuracy of 82.4% (F1-Score: 0.85). However, these results reflect the case where all features are used. An increase in the performance of all models created with the features selected with the K-Best method was observed. The most successful algorithm in the K-Best method was RF with an accuracy of 88.5% (F1-Score: 0.88). The highest values were obtained in the performances of the models obtained with the features selected by RFE method. In fact, compared to the model performances measured without feature selection, the performances of the models obtained with the features selected with the RFE method increased up to 26% and the performance of the models created with the features selected with the K-Best method increased up to 19%. The most successful algorithm in predicting loan approval was the RF algorithm with an accuracy of 97.6%, and this was achieved with the features selected with the RFE method (F1-Score: 0.93). These results show that feature selection can improve model performance and redundant features can negatively affect model performance. Similar studies in the literature also emphasize the importance of feature selection. Feature selection can prevent overfitting by reducing the complexity of the model and increase the generalization ability

of the model [61]. Moreover, by removing redundant features, the model can achieve higher performance [62]. Similar to the findings of this study, Meshref [34], in his study on loan approval prediction, found that feature selection improves the performance of machine learning models rather than using all features. Sarizeybek and Sevli [47] achieved an average performance increase of 7% with the K-Best method in their study on customers' propensity to take loans. Similarly, in this study, the performance of the models increased by about 19% when feature selection was made with the K-Best method. Apart from loan approval prediction, various feature selection methods have been found to improve the performance of models in image processing and speech processing [63], disease risk prediction [64], bank marketing and human activity recognition [65]. Many studies from different fields in the literature show that feature selection methods improve the performance of machine learning models. In Table 8, most of the scores obtained from studies on loan approval prediction are achieved without using feature selection methods. It is expected that these studies can achieve higher scores by using feature selection methods. In addition, when the accuracy of the models is calculated using K-Fold, one of the cross-validation methods, the RF algorithm reaches the highest accuracy value with 97.71% (AUC: 0.96). Cross-validation is an important technique used to assess how well the model fits real-world data. Instead of dividing the dataset into training and test sets, this technique allows for a more reliable evaluation of the model's performance by dividing the data into different subsets. For instance, Adagbasa et al. [66] evaluated the performance of a deep learning model using K-Fold cross-validation. In their study, instead of a single training-test partition, they divided the data into 5 different subsets with 5-fold cross-validation. In this way, they analyzed in more detail how the model performed on each subset. Their results show that the model performs well overall but underperforms on some subsets. On the

other hand, Valavi et al. [67] evaluated the performance of a classification model using a single training-test partition. Their results showed that the model fits the training data well but the test data poorly. This suggests that the model cannot accurately assess how well it fits real-world data. In addition, in line with the findings of this study, Sarizeybek and Sevli [47] found that the success rates obtained using 10-fold cross-validation were significantly higher than a single training-test partitioning in their study predicting customers' propensity to take loans.

There are some notable studies in the literature that perform loan approval prediction on various datasets. Table 8 shows the comparison of models and accuracy rates of loan approval prediction studies. From the table, the model proposed in this study differs significantly from many studies in the field and achieves a high classification accuracy of 97.71%. Only the study by Saini et al. [26] surpassed this study with an accuracy of 98.04%, but despite the high accuracy rates, the F1-Score of their model is 0.85. A high F1-Score indicates that both the classification accuracy and the FP and FN rates of the model are balanced. In this study, the F1-Score of the RF algorithm was measured as 0.93. This result indicates that the model has a high accuracy rate as well as a good balance between FP and FN predictions. Although Saini et al. [26] achieved 98.04% accuracy in their study, the F1-Score of 0.85 suggests that the model focuses on a certain class and neglects other classes or shows an unbalanced performance. In addition to this information, when the table is analyzed, it is understood that tree-based algorithms achieve a higher success in the loan approval prediction task compared to other algorithms. Especially ensemble methods such as RF allow many decision trees to come together to form a stronger model. This reduces the noise in the dataset and allows for more robust predictions.

Table 8. Comparison of accuracy rates of loan approval prediction models in the field (Alandaki kredi onay tahmin modellerinin doğruluk oranlarının karşılaştırılması)

Reference	Year	Model	Accuracy
Saini et al. [26]	2023	RF	98.04%
Uddin et al. [31]	2023	ET	86.64%
Tumuluru et al. [37]	2022	RF	81.00%
Ramachandra et al. [33]	2021	LR	86.00%
Singh et al. [27]	2021	RF	77.00%
Diwate et al. [28]	2021	SVM	81.00%
Alaradi & Hilal [29]	2020	DT	97.25%
Meshref [34]	2020	AdaBoost	83.98%
Sheikh et al. [36]	2020	LR	81.00%
Current study	-	RF	97.71%

5. CONCLUSION (SONUÇ)

The findings of this research have important implications for the development and performance evaluation of machine learning models for loan approval prediction. The EDA study examined the effects of demographic factors, education level, financial status, and other factors on loan approval. When the impact of demographic factors on loan approval is analyzed, it is found that married individuals and individuals with higher income are more likely to be approved for loans. Similarly, it was found that loan applications of men were more likely to be approved than those of women. Education level was also found to be an important factor in loan approval. It has been determined that loan applications of individuals with a university degree are more likely to be approved. In terms of financial factors, it is observed that loan applications of individuals with high income and a strong credit history are approved more frequently. In addition, in the relationship between loan amount and loan acceptance rate, it was found that the loan acceptance rate decreased as the loan amount increased.

In evaluating the performance of machine learning algorithms, it was observed that the use of feature selection methods (K-Best and RFE) significantly improved model performance. The performance of the models obtained with the features selected with the RFE method reached the highest accuracy, precision, and F1-Score values. RF algorithm showed the highest accuracy, precision, recall and F1-Score values in all model performances measured without and after feature selection. In addition, the accuracy rate obtained with the K-Fold method, which is one of the cross-validation methods in SVM and RF models, is significantly higher than the accuracy rate obtained with the Train, Test, and Validation method. The proposed models can be used by financial institutions and lenders to evaluate loan applications. By providing an automated evaluation process, these models can enable faster review of loan applications and faster feedback to customers. This can increase customer satisfaction. The models can also reduce credit risks, thereby reducing costs and operational risks for institutions. As a result, using the proposed models can both reduce costs and improve customer experience for financial institutions, which can lead to a significant competitive advantage in the sector.

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)

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

Deneyle ilgili yapılmış 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] B. Huang and L. C. Thomas, "Credit card pricing and impact of adverse selection," *J. Oper. Res. Soc.*, vol. 65, no. 8, pp. 1193-1201, 2014.
- [2] V. Leninkumar, "The relationship between customer satisfaction and customer trust on customer loyalty," *Int. J. Acad. Res. Bus. Soc. Sci.*, vol. 7, no. 4, pp. 450-465, 2017.
- [3] M. Siles, S. D. Hanson, and L. J. Robison, "Socio-economics and the probability of loan approval," *Appl. Econ. Perspect. Policy*, vol. 16, no. 3, pp. 363-372, 1994.
- [4] J. E. Stiglitz and A. Weiss, "Incentive effects of terminations: Applications to the credit and labor markets," *Am. Econ. Rev.*, vol. 73, no. 5, pp. 912-927, 1983.
- [5] S. T. Bharath, S. Dahiya, A. Saunders, and A. Srinivasan, "Lending relationships and loan contract terms," *Rev. Financial Stud.*, vol. 24, no. 4, pp. 1141-1203, 2011.
- [6] S. M. Livingstone and P. K. Lunt, "Predicting personal debt and debt repayment: Psychological, social and economic determinants," *J. Econ. Psychol.*, vol. 13, no. 1, pp. 111-134, 1992.
- [7] N. W. Hillman, "College on credit: A multilevel analysis of student loan default," *Rev. High. Educ.*, vol. 37, no. 2, pp. 169-195, 2014.

- [8] The Banks Association of Türkiye, "Consumer Loans and Housing Loans," 2023. [Online]. Available: https://www.tbb.org.tr/Content/Upload/istatistikiraporlar/ekler/4227/Tuketici_Kredileri_Raporu-Eylul_2023.pdf
- [9] S. Carter, E. Shaw, W. Lam, and F. Wilson, "Gender, entrepreneurship, and bank lending: The criteria and processes used by bank loan officers in assessing applications," *Entrepreneurship Theory and Practice*, vol. 31, no. 3, pp. 427-444, 2007.
- [10] C. Parkan and M. L. Wu, "Measurement of the performance of an investment bank using the operational competitiveness rating procedure," *Omega*, vol. 27, no. 2, pp. 201-217, 1999.
- [11] J. S. Chiou, "The antecedents of consumers' loyalty toward Internet service providers," *Inf. & Manage.*, vol. 41, no. 6, pp. 685-695, 2004.
- [12] R. S. Swift, *Accelerating customer relationships: Using CRM and relationship technologies*. Prentice Hall Professional, 2001.
- [13] S. Sachan, J. B. Yang, D. L. Xu, D. E. Benavides, and Y. Li, "An explainable AI decision-support-system to automate loan underwriting," *Expert Syst. Appl.*, vol. 144, p. 113100, 2020.
- [14] B. Lepri, N. Oliver, E. Letouzé, A. Pentland, and P. Vinck, "Fair, transparent, and accountable algorithmic decision-making processes: The premise, the proposed solutions, and the open challenges," *Philos. Technol.*, vol. 31, pp. 611-627, 2018.
- [15] J. F. Martínez Sánchez and G. Pérez Lechuga, "Assessment of a credit scoring system for popular bank savings and credit," *Contad. y Adm.*, vol. 61, no. 2, pp. 391-417, 2016.
- [16] R. Parasuraman, M. Mouloua, R. Molloy, and B. Hilburn, "Monitoring of automated systems," in *Automation and human performance*, CRC Press, 2018, pp. 91-115.
- [17] M. McKay, "Best practices in automation security," in *2012 IEEE-IAS/PCA 54th Cement Industry Technical Conference*, May 2012, pp. 1-15.
- [18] D. Bertsimas, and J. Dunn, "Optimal classification trees," *Machine Learning*, vol. 106, pp. 1039-1082, 2017.
- [19] A. J. Wyner, M. Olson, J. Bleich, and D. Mease, "Explaining the success of adaboost and random forests as interpolating classifiers," *Journal of Machine Learning Research*, vol. 18, no. 48, 1-33, 2017.
- [20] Z. G. Liu, Q. Pan, and J. Dezert, "A new belief-based K-nearest neighbor classification method," *Pattern Recognition*, vol. 46, no. 3, pp. 834-844, 2013.
- [21] I. W. Tsang, J. T. Kwok, P. M. Cheung, and N. Cristianini, "Core vector machines: Fast SVM training on very large data sets," *Journal of Machine Learning Research*, vol. 6, no. 4, 2005.
- [22] J. Wu, X. Y. Chen, H. Zhang, L. D. Xiong, H. Lei, and S. H. Deng, "Hyperparameter optimization for machine learning models based on Bayesian optimization," *Journal of Electronic Science and Technology*, vol. 17, no. 1, pp. 26-40, 2019.
- [23] A. Janecek, W. Gansterer, M. Demel, and G. Ecker, "On the relationship between feature selection and classification accuracy," in *New challenges for feature selection in data mining and knowledge discovery*, PMLR, 2008, pp. 90-105.
- [24] E. Kadam, A. Gupta, S. Jagtap, I. Dubey, and G. Tawde, "Loan approval prediction system using logistic regression and CIBIL score," in *2023 4th International Conference on Electronics and Sustainable Communication Systems (ICESC)*, Jul. 2023, pp. 1317-1321.
- [25] A. S. Kadam, S. R. Nikam, A. A. Aher, G. V. Shelke, and A. S. Chandgude, "Prediction for loan approval using machine learning algorithm," *Int. Res. J. Eng. Technol. (IRJET)*, vol. 8, no. 04, pp. 4089-4092, 2021.
- [26] P. S. Saini, A. Bhatnagar, and L. Rani, "Loan approval prediction using machine learning: A comparative analysis of classification algorithms," in *2023 3rd Int. Conf. Adv. Comput. Innov. Technol. Eng. (ICACITE)*, May 2023, pp. 1821-1826.
- [27] V. Singh, A. Yadav, R. Awasthi, and G. N. Partheeban, "Prediction of modernized loan approval system based on machine learning approach," in *2021 Int. Conf. Intell. Technol. (CONIT)*, Jun. 2021, pp. 1-4.
- [28] Y. Diwate, P. Rana, and P. Chavan, "Loan Approval Prediction Using Machine Learning," *Int. Res. J. Eng. Technol. (IRJET)*, vol. 8, no. 05, 2021.
- [29] M. Alaradi and S. Hilal, "Tree-based methods for loan approval," in *2020 International Conference on Data Analytics for Business and Industry: Way Towards a Sustainable Economy (ICDABI)*, Oct. 2020, pp. 1-6.
- [30] V. S. Kumar, A. Rokade, and S. MS, "Bank loan approval prediction using data mining technique," *Int. Res. J. Modern. Eng. Technol. Sci.*, vol. 2, no. 05, pp. 965-970, 2020.
- [31] N. Uddin, M. K. U. Ahamed, M. A. Uddin, M. M. Islam, M. A. Talukder, and S. Aryal, "An ensemble machine learning based bank loan approval predictions system with a smart application," *International Journal of Cognitive*

- Computing in Engineering*, vol. 4, pp. 327-339, 2023.
- [32] J. Tejaswini, T. M. Kavya, R. D. N. Ramya, P. S. Triveni, and V. R. Maddumala, "Accurate loan approval prediction based on machine learning approach," *J. Eng. Sci.*, vol. 11, no. 4, pp. 523-532, 2020.
- [33] H. V. Ramachandra, G. Balaraju, R. Divyashree, and H. Patil, "Design and simulation of loan approval prediction model using AWS platform," in *2021 Int. Conf. Emerg. Smart Comput. Informatics (ESCI)*, Mar. 2021, pp. 53-56.
- [34] H. Meshref, "Predicting loan approval of bank direct marketing data using ensemble machine learning algorithms," *Int. J. Circuits. Syst. Signal Process.*, vol. 14, pp. 914-922, 2020.
- [35] A. Gupta, V. Pant, S. Kumar, and P. K. Bansal, "Bank Loan Prediction System using Machine Learning," in *2020 9th International Conference System Modeling and Advancement in Research Trends (SMART)*, Dec. 2020, pp. 423-426.
- [36] M. A. Sheikh, A. K. Goel, and T. Kumar, "An approach for prediction of loan approval using machine learning algorithm," in *2020 Int. Conf. Electron. Sustainable Commun. Syst. (ICESC)*, Jul. 2020, pp. 490-494.
- [37] P. Tumuluru, L. R. Burra, M. Loukya, S. Bhavana, H. M. H. CSaiBaba, and N. Sunanda, "Comparative Analysis of Customer Loan Approval Prediction using Machine Learning Algorithms," in *2022 Second Int. Conf. Artif. Intell. Smart Energy (ICAIS)*, Feb. 2022, pp. 349-353.
- [38] F. Y. Osisanwo, J. E. T. Akinsola, O. Awodele, J. O. Hinmikaiye, O. Olakanmi, and J. Akinjobi, "Supervised machine learning algorithms: classification and comparison," *Int. J. Comput. Trends Technol. (IJCTT)*, vol. 48, no. 3, pp. 128-138, 2017.
- [39] L. E. Peterson, "K-nearest neighbor," *Scholarpedia*, vol. 4, no. 2, p. 1883, 2009.
- [40] M. N. Murty and R. Raghava, "Kernel-based SVM," in *Support vector machines and perceptrons: Learning, optimization, classification, and application to social networks*, 2016, pp. 57-67.
- [41] B. Charbuty and A. Abdulazeez, "Classification based on decision tree algorithm for machine learning," *J. Appl. Sci. Technol. Trends*, vol. 2, no. 01, pp. 20-28, 2021.
- [42] J. Ali, R. Khan, N. Ahmad, and I. Maqsood, "Random forests and decision trees," *Int. J. Comput. Sci. Issues (IJCSI)*, vol. 9, no. 5, p. 272, 2012.
- [43] Kaggle, "Loan Status Prediction," Available: <https://www.kaggle.com/datasets/bhavikjikada/ra/loan-status-prediction/data>.
- [44] M. Cinelli et al., "Feature selection using a one dimensional naïve Bayes' classifier increases the accuracy of support vector machine classification of CDR3 repertoires," *Bioinformatics*, vol. 33, no. 7, pp. 951-955, 2017.
- [45] A. S. Paramita and S. V. Winata, "A comparative study of feature selection techniques in machine learning for predicting stock market trends," *J. Appl. Data Sci.*, vol. 4, no. 3, pp. 147-162, 2023.
- [46] D. M. Belete and M. D. Huchaiah, "Grid search in hyperparameter optimization of machine learning models for prediction of HIV/AIDS test results," *Int. J. Computers and Applications*, vol. 44, no. 9, pp. 875-886, 2022.
- [47] A. T. Sarizeybek and O. Seveli, "A comparative analysis of bank customers' loan propensity using machine learning methods," *J. Intell. Syst. Theory Appl.*, vol. 5, no. 2, pp. 137-144, 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.38016/jista.1036047>
- [48] D. Dansana, S. G. K. Patro, B. K. Mishra, V. Prasad, A. Razak, and A. W. Wodajo, "Analyzing the impact of loan features on bank loan prediction using Random Forest algorithm," *Engineering Reports*, vol. 6, no. 2, p. e12707, 2024.
- [49] J. Stavins, "Credit card borrowing, delinquency, and personal bankruptcy," *New Engl. Econ. Rev.*, pp. 15-30, 2000.
- [50] C. L. Escalante, J. E. Epperson, and U. Raghunathan, "Gender bias claims in farm service agency's lending decisions," *J. Agric. Resour. Econ.*, pp. 332-349, 2009.
- [51] S. Kuznets, "Economic growth and income inequality," in *The gap between rich and poor*, Routledge, 2019, pp. 25-37.
- [52] D. Oh, E. A. Buck, and A. Todorov, "Revealing hidden gender biases in competence impressions of faces," *Psychol. Sci.*, vol. 30, no. 1, pp. 65-79, 2019.
- [53] A. Bandyopadhyay, "Studying borrower level risk characteristics of education loan in India," *IIMB Management Review*, vol. 28, no. 3, pp. 126-135, 2016.
- [54] C. Jamir and T. Z. Ezung, "Impact of education on employment, income, and poverty in Nagaland," *Int. J. Res. Econ. Soc. Sci. (IJRESS)*, vol. 7, no. 9, pp. 50-56, 2017.
- [55] A. Lusardi, "Financial literacy and the need for financial education: Evidence and implications," *Swiss J. Econ. Stat.*, vol. 155, no. 1, pp. 1-8, 2019.

- [56] E. Ravina, "Love & loans: The effect of beauty and personal characteristics in credit markets," SSRN Working Paper, 2019.
- [57] O. Netzer, A. Lemaire, and M. Herzenstein, "When words sweat: Identifying signals for loan default in the text of loan applications," *J. Marketing Res.*, vol. 56, no. 6, pp. 960-980, 2019.
- [58] H. K. Mutegi, P. W. Njeru, and N. T. Ongesa, "Financial literacy and its impact on loan repayment by small and medium entrepreneurs," *Int. J. Econ. Commerce Manag.*, vol. 3, no. 3, pp. 1-28, 2015.
- [59] M. Li, A. Mickel, and S. Taylor, "Should this loan be approved or denied?: A large dataset with class assignment guidelines," *J. Stat. Educ.*, vol. 26, no. 1, pp. 55-66, 2018.
- [60] R. Van Ooijen, and M. C. Van Rooij, "Mortgage risks, debt literacy and financial advice," *Journal of Banking & Finance*, vol. 72, pp. 201-217, 2016.
- [61] B. Venkatesh, and J. Anuradha, "A review of feature selection and its methods," *Cybernetics and Information Technologies*, vol. 19, no. 1, pp. 3-26, 2019.
- [62] Y. Xiao, C. Xing, T. Zhang, and Z. Zhao, "An intrusion detection model based on feature reduction and convolutional neural networks," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 42210-42219, 2019.
- [63] P. Dhal, and C. Azad, "A comprehensive survey on feature selection in the various fields of machine learning," *Applied Intelligence*, vol. 52, no. 4, pp. 4543-4581, 2022.
- [64] N. Pudjihartono, T. Fadason, A. W. Kempa-Liehr, and J. M. O'Sullivan, "A review of feature selection methods for machine learning-based disease risk prediction," *Frontiers in Bioinformatics*, vol. 2, pp. 927312, 2022.
- [65] R. C. Chen, C. Dewi, S. W. Huang, and R. E. Caraka, "Selecting critical features for data classification based on machine learning methods," *Journal of Big Data*, vol. 7, no. 1, pp. 52, 2020.
- [66] E. G. Adagbasa, S. A. Adelabu, and T. W. Okello, "Application of deep learning with stratified K-fold for vegetation species discrimination in a protected mountainous region using Sentinel-2 image," *Geocarto International*, vol. 37, no. 1, pp. 142-162, 2022.
- [67] R. Valavi, G. Guillera-Aroita, J. J. Lahoz-Monfort, and J. Elith, "Predictive performance of presence-only species distribution models: a benchmark study with reproducible code," *Ecological Monographs*, vol. 92, no. 1, pp. e01486, 2022.

Derin Öğrenme Tabanlı Gerçek Zamanlı Vücut Hareketlerinden Duygu Analizi Modeli

Mustafa YAĞCI^{1*} , Muhammed Erkam AYGÜL¹ 

¹Ahi Evran Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği, Kırşehir, Türkiye

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 01/11/2023
Düzeltilme: 15/02/2024
Kabul: 04/04/2024

Anahtar Kelimeler

Derin Öğrenme
Makine Öğrenmesi
Görüntü İşleme
Duygu Analizi
Nitelik Çıkarımı

Article Info

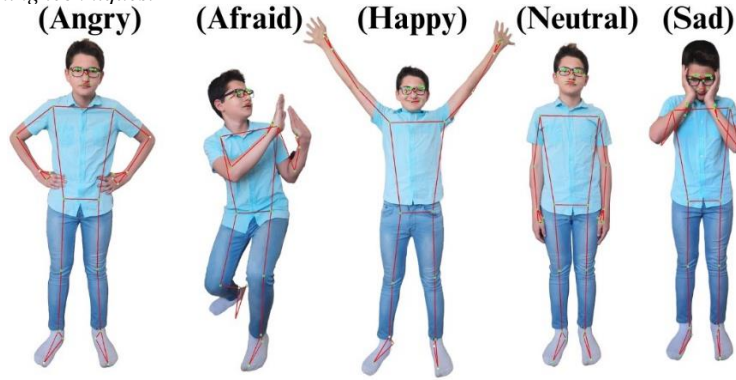
Research article
Received: 01/11/2023
Revision: 15/02/2024
Accepted: 04/04/2024

Keywords

Deep Learning
Machine Learning
Image Processing
Emotion Analysis
Attribute Extraction

Grafik Özet (Graphical/Tabular Abstract)

Bu çalışmada insan pozlarını gerçek zamanlı olarak inceleyen ve duygu çıkarımı yapabilen bir makine öğrenmesi modeli, derin öğrenme teknikleri ile geliştirilmiştir. / In this study, a machine learning model that can analyze human poses in real time and infer emotions is developed with deep learning techniques.



Şekil A: Vücut pozu ve iskelet model / Figure A: Body pose and skeleton model

Önemli noktalar (Highlights)

- Duygu çıkarımı, insan vücut hareketlerinin analiz edilmesi ile yapılmıştır. / Emotion inference is done by analyzing human body movements.
- Kızgın, korkmuş, mutlu, nötr ve üzgün duyguları tanımlanmıştır. / Angry, scared, happy, neutral and sad emotions were identified.
- Derin öğrenme ve yapay zekâ teknikleri ile teknolojinin insanlarla daha derin ve anlamlı şekilde etkileşime girmesi mümkündür. / With deep learning and artificial intelligence techniques, it is possible for technology to interact with people in a deeper and more meaningful way.

Amaç (Aim): Bu çalışmanın amacı, insan vücut hareketlerini derin öğrenme teknikleri ile analiz ederek bireyin duygusal durumlarını tahmin eden yeni bir makine öğrenmesi modeli geliştirmektir. / The aim of this research is to develop a new machine learning model that predicts an individual's emotional states by analyzing human body movements with deep learning techniques.

Özgünlük (Originality): Geleneksel duygu analizi yöntemleri genellikle yüz ifadelerine odaklanmaktadır. Bu çalışmada ise duygu analizi insan vücuduna iskelet modelin oturtulması ve eğitilen modelden çıkarım yapılması şeklindedir. / Traditional sentiment analysis methods usually focus on facial expressions. In this research, sentiment analysis is based on fitting a skeletal model to the human body and inferring from the trained model.

Bulgular (Results): Model, tanımlanan duyguları başarıyla sınıflandırarak, duygusal ifadelerin vücut dilinde belirgin olduğunu ve modelin bu ifadeleri doğru şekilde yorumlayabildiğini göstermiştir. / The model successfully classified the identified emotions, demonstrating that emotional expressions are evident in body language and that the model can correctly interpret these expressions.

Sonuç (Conclusion): Duygu çıkarımının insan pozlarından yapılabildiği gösterilmiştir. En yüksek doğruluk oranının %97.80 ile rastgele orman algoritması ile elde edildiği görülmüştür. Ayrıca gerçek zamanlı çıkarımda doğruluk oranı %94.50 olarak hesaplanmıştır. / It was shown that emotion extraction can be done from human poses. The highest accuracy rate was 97.80% with the random forest algorithm. In addition, the accuracy rate was calculated as 94.50% in real-time extraction.



Derin Öğrenme Tabanlı Gerçek Zamanlı Vücut Hareketlerinden Duygu Analizi Modeli

Mustafa YAĞCI^{1*}, Muhammed Erkam AYGÜL¹

¹Ahi Evran Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği, Kırşehir, Türkiye

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 01/11/2023
Düzeltilme: 15/02/2024
Kabul: 04/04/2024

Anahtar Kelimeler

Derin Öğrenme
Makine Öğrenmesi
Görüntü İşleme
Duygu Analizi
Nitelik Çıkarımı

Öz

İletişim, canlılar arasında bilgi, duygu ve düşüncelerin aktarılması için kullanılan bir araçtır. Araştırmalar, insan iletişiminin yaklaşık %80'inin beden dili veya mimiklerle yapıldığını göstermektedir. Bir kişinin beden dilini yorumlamak ise o kişinin duygularından çıkarım yapılmasını sağlayabilir. Bu çalışmanın amacı, gerçek zamanlı olarak insan vücut hareketlerini derin öğrenme teknikleri ile analiz ederek bireyin duygusal durumlarını tahmin eden yeni bir makine öğrenmesi modeli geliştirmektir. İnsanların vücudunu tanıyan ve tanınan vücut pozuna iskelet modelin oturtulması işlemi ile o pozdan veri toplayan model geliştirilmiş, toplanan veri seti ile farklı modeller eğitilmiştir. Bununla birlikte gerçek zamanlı analiz yapılması için bir tahmin modeli geliştirilmiştir. Bu sayede insanların beden dili ve mimiklerinden duygu çıkarımı yapılabilmektedir. Yapılan farklı test modellerinin sonuçlarının doğruluk oranının en düşük %92.86, en yüksek %97.80 olduğu ve gerçek zamanlı analiz sonuçlarının doğruluk oranının %94.50 olduğu görülmüştür. Bu çalışmanın sonuçları daha iyi insan-makine etkileşimi, duygusal zekâ uygulamaları ve sosyal etkileşim alanlarında kullanılabilir.

Deep Learning Based Real-Time Emotion Analysis Model from Body Movements

Article Info

Research article
Received: 01/11/2023
Revision: 15/02/2024
Accepted: 04/04/2024

Keywords

Deep Learning
Machine Learning
Image Processing
Emotion Analysis
Attribute Extraction

Abstract

Communication is a tool used to transfer information, feelings and thoughts between living beings. Research shows that about 80% of human communication is done through body language or gestures. Interpreting a person's body language can help infer their emotions. The aim of this study is to develop a new machine learning model that predicts an individual's emotional states by analyzing human body movements in real-time with deep learning techniques. A model was developed that recognizes the human body and collects data from that pose by fitting a skeletal model to the recognized body pose, and different models were trained with the collected data set. In addition, a prediction model was developed for real-time analysis. In this way, emotions can be inferred from people's body language and facial expressions. The accuracy rate of the results of the different test models was 92.86% at the lowest and 97.80% at the highest, and the accuracy rate of the real-time analysis results was 94.50%. The results of this study can be used in better human-machine interaction, emotional intelligence applications and social interaction.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Teknolojinin hızla evrildiği günümüz dünyasında, insan-makine etkileşimi gittikçe karmaşık hale gelmektedir. Bu karmaşıklık, kullanıcı deneyimini ve insanlarla yapay zekâ sistemleri arasındaki etkileşimi daha anlamlı hale getirmek için daha sofistike yaklaşımların arayışına yol açmaktadır.

İnsanların sözsüz ifadeleri, yani vücut hareketleri, genellikle duygusal durumların en doğal ifadelerinden biridir. Bu durum, özellikle etkileşimli robotlar, sanal gerçeklik deneyimleri ve sağlık sektöründeki uygulamalar gibi alanlarda duygusal zekâ ile donatılmış sistemlerin geliştirilmesine olan ilgiyi artırmıştır. Bu bağlamda, insanların duygusal durumlarını doğru bir şekilde

anlamak, insan-makine etkileşiminin kalitesini artırmanın ve sosyal etkileşimde bulunan yapay zekâ sistemlerinin daha insan benzeri hale gelmesinin temelidir.

İnsanlar, duygusal ifadelerini sadece kelimelerle ifade etmezler; aynı zamanda vücut hareketleri, jestler ve yüz ifadeleri gibi sözsüz iletişim araçlarını da kullanırlar. Bu sözsüz ifadeler, bir kişinin duygusal durumunu anlamının önemli bir parçasını oluşturur. Bu durum, özellikle insan-makine etkileşiminde, robot teknolojilerinde, oyun endüstrisinde, eğitimde ve zihinsel sağlık uygulamalarında önemli bir rol oynamaktadır. Bu bağlamda, insan vücut hareketlerinden duygusal durumları anlamak, yapay zekâ sistemlerinin insanlara daha duyarlı ve anlayışlı bir şekilde tepki vermesine imkân tanıyan bir anahtar haline gelmiştir. Derin öğrenme tekniklerini kullanarak insan vücut hareketlerinden duygusal durumlarını tahmin etmeye yönelik bazı çalışmalar şu şekildedir:

Gunawan vd. [1] derin öğrenme tekniklerini kullanarak video verilerinden duygusal durumları tanımak için bir model önermişlerdir. Evrişimli sinir ağlarını (CNN) ve uzun-kısa vadeli hafıza (LSTM) ağlarını kullanarak video görüntülerinden duygusal ifadeleri çıkarmışlardır. Ahmed vd. [2] vücut hareketlerinden duygu tanımayı amaçlamış, beş temel duyguyu (mutluluk, üzüntü, korku, öfke ve nötr) doğru bir şekilde tanımak için özellik seçim yöntemini kullanmışlardır. İlgisiz özellikleri ortadan kaldırmak için varyans analizi ve çok değişkenli varyans analizini kullanmışlardır. Duygu tanıma oranını maksimize eden ilgili özellikler listesinden bir özellik alt kümesi seçmek için ikili kromozom tabanlı bir genetik algoritma önermişlerdir. Chowdary vd. [3] yüz ifadeleri ve beyin dalgalarını (EEG) içeren veri setlerini kullanarak derin öğrenme modelleri oluşturmuşlardır. Yüz ifadeleri için önceden eğitilmiş bir derin öğrenme modeli (örneğin, VGGFace) ve EEG sinyalleri için özel bir derin öğrenme mimarisi kullanarak duygusal durumları tahmin etmişlerdir. Balti vd. [4] insan pozunu tahmin etmek, yürüyüş özelliklerini çıkarmak ve videoları analiz etmek için derin öğrenmeye dayalı bir model önermişlerdir. Normal ve patolojik yürüyüşü sınıflandırmak için geleneksel sinir ağlarını kullanmışlardır. Park vd. [5] spor analizi sonuçlarını geliştirmek için birden fazla rastgele orman türü kullanan bir insan pozu tahmin algoritması önermişler ve sporcunun anatomisindeki eklemlerini gösteren bir tür iskelet modeli kullanmışlardır. Wang vd. [6] 3 boyutlu poz tahmini için mevcut derin öğrenme tabanlı

çalışmaların kapsamlı bir incelemesini sunarak, bu yöntemlerin avantaj ve dezavantajlarını tartışmışlardır. Ota vd.[7] OpenPose kütüphanesinin eklem noktalarını tespit etme hassaslığını test etmek için 24 katılımcı ile bir çalışma yapmışlardır. Çalışmada katılımcıların görüntüleri alınmış ve eklem bölgelerini tespit ederek karşılaştırmışlardır. Si ve Liu [8] iskelet model verilerinin özelliklerinin anlaşılmasına dayanarak, insan vücut yapısıyla birleştirilmiş bir mesafe özelliği ve açı özelliği modeli önermektedir. Deneysel sonuçlarla mesafe özelliğinin ve açı özelliği değerinin temel olarak mesafe değişiminden etkilenmediğini tespit etmişlerdir. Verma vd. [9] vücut duruşunun analizini yaptığı çalışmalarında belirli bir görüntü için bir dizi vücut parçası çifti arasındaki en optimum mesafeleri hesaplamış ve karmaşık eylemlerin temsilini öğrenmek için derin sinir ağlarını kullanmışlardır. Hyppönen vd. [10] Progresif Miyoklonus Epilepsi Tip 1 (EPM1) hastalığının tespitini hasta insanların pozunu ve vücut hareketi analizleri, vücut kilit noktalarını belirleme, hareket düzgünlüğü ve hızını analiz ederek geliştirdikleri model ile yapmışlardır. Xu vd. [11] 2B algılamaya koşullanmış monoküler 3B poz tahmini için simetri kaybı ve bağlantı açısı sınırı gibi sorunları düzeltmek amacıyla bir insan pozunu uygulaması geliştirmişlerdir. 2B girdilerin ve 3B çıktılarının statik/dinamik yapısını eşzamanlı olarak dikkate alan derin bir kinematik analiz sistemi oluşturmuş ve derin modeller entegre etmişlerdir. Bu sayede 2B veride bulunan gürültülü verilerden kurtulmayı, kayıp paket oranını düşürmeyi amaçlamışlardır. Rohan vd. [12] hasta üzerine giydirilen sensörler ve hastayı izleyen kameralar ile hasta kas hareketleri, yürüyüş kuvveti gibi değerleri ölçmüşlerdir. CNN algoritmasını kullanarak bir yapay zekâ modeli geliştirmişlerdir.

Paudel vd. [13] endüstride çalışan insanların çalışma alanlarındaki yanlış ve sağlıklarına zarar veren duruşların tespiti amacıyla bir model geliştirmişlerdir. Model, 3B insan pozunu tahmini yoluyla çalışanların ergonomik duruşlarının risk analizini gerçekleştirmek için yeni bir model önermektedir. Hareketler esnasında insan vücudu eklemlerinin değerlerini analiz etmişlerdir. Bu sayede işçilere göre en güvenilir vücut bükülme açılarını hesaplamak için vücut açısı güvenilirlik kararı (BARD) yöntemini tanıtmışlardır. Stenum vd. [14] insanların yürüyüşlerini analiz etmek için insan pozunu tanıma modeli önermişlerdir. OpenPose ile ölçülen uzamsal-zamansal ve yönsel analizde kinematik yürüyüş parametrelerini, sağlıklı yetişkinlerin yürümesinden eşzamanlı olarak kaydedilen üç boyutlu hareketleri ile karşılaştırmışlardır. Kim vd. [15] evde yalnız

yaşayan yaşlıların düşme ve kendilerini yaralama riskiyle karşı karşıya olması nedeni ile duruşlarını otomatik olarak izleyen ve tanıyan bir mobil robota ihtiyaç duyabileceğini düşünmüşlerdir. Bu soruna yönelik 2B ve 3B insan pozlarının eklem açılarını kullanarak yapay zekâ destekli bir model önermişlerdir. Wang vd. [16] vücut hareketlerinden duyguları sürekli olarak tanıyan gerçek zamanlı bir model geliştirmişlerdir. Verileri sınıflandırmak için akış tabanlı yarı denetimli uyarlanabilir rastgele orman yöntemini kullanmışlardır. Santhoshkumar ve Geetha [17] insan vücut hareketlerinden ileri beslemeli derin evrişimli sinir ağı mimarisini kullanarak duygu tanıma ve duygusal durumların tespiti için bir model önermişlerdir.

Sonuç olarak, duygusal durumları tahmin etmek için derin öğrenme tekniklerinin insan vücut hareketlerini analiz etmedeki potansiyeli üzerine yapılan çalışmalar, araştırmacılara şu önerilerde bulunmaktadır:

Çoklu Öznitelikli (Multimodal) Veri Kullanımı: İnsan vücut hareketleri, ses tonu, yüz ifadeleri ve diğer çoklu öznitelikli veriler bir araya getirilerek daha doğru duygusal durum tahminleri yapılabilir. Bu, duygusal ifadelerin karmaşıklığını daha iyi yakalayabilir ve doğruluğu artırabilir [18].

Derin Öğrenme Modellerinin Uyarlanabilirliği: Derin öğrenme modelleri, büyük veri setlerinde eğitildiğinde daha iyi performans gösterir. Bu nedenle, geniş ve çeşitli veri setlerini kullanarak modelleri eğitmek, genel doğruluk düzeyini artırabilir [19].

Uygun Özellik Mühendisliği: Verilerden uygun özelliklerin çıkarılması, derin öğrenme modelleri için kritiktir. Özellik mühendisliği, doğru özelliklerin seçilmesi ve modelin bu özellikleri doğru bir şekilde öğrenmesine yardımcı olabilir [20].

Gerçek Zamanlı Uygulamalar: Derin öğrenme modelleri, gerçek zamanlı duygusal analiz uygulamalarında kullanılabilir. Bu, interaktif uygulamalar ve insan-makine etkileşimi için önemlidir [21].

Yeni Veri Toplama Yöntemleri: Yeni ve daha hassas sensörler, insan vücut hareketlerini daha iyi yakalayabilir. Bu, daha zengin ve doğru veri setlerinin toplanmasına olanak tanır [22].

Daha Derin ve Karmaşık Modeller: Duygusal durumları tahmin etme konusunda derin öğrenme modellerinin karmaşıklığı artırılabilir. Örneğin, çoklu dalgaları (örneğin, EEG ve EKG) veya

mekânsal ilişkileri (örneğin, vücut parçaları arasındaki ilişkiler) yakalayabilen daha karmaşık mimariler geliştirilebilir. Bu, daha karmaşık duygusal ifadeleri anlayabilmek anlamına gelir [23].

Transfer Öğrenme ve Uyumluluk: Başka bir alanda eğitilmiş modellerin (örneğin, görüntü tanıma) duygusal analize uygulanabilmesi için transfer öğrenme teknikleri geliştirilmelidir. Ayrıca, farklı modellerin (örneğin, bir modelin ses analizi, diğerinin vücut hareket analizi) sonuçlarını birleştirmek için uyumluluk stratejileri de geliştirilmelidir [24].

Yeni Veri Zenginleştirme Yöntemleri: Var olan veri setlerini zenginleştirmek ve genişletmek için sentetik veri üretme yöntemleri kullanılabilir. Bu, modelin çeşitli durumları daha iyi anlamasına ve genelleştirmesine yardımcı olabilir [25].

Hassasiyet ve Çeşitlilik: Duygusal durumlar kültürel, bölgesel ve bireysel farklılıklara dayanabilir. Bu nedenle, modellerin hassasiyeti artırılmalı ve farklı kültürel bağlamlara uyum sağlama yetenekleri geliştirilmelidir. Bu, duygusal ifadelerin çeşitliliğini ve karmaşıklığını daha doğru bir şekilde yansıtabilir [26].

İnsan-Makine Etkileşimi ve Rehabilitasyon: Duygusal analiz, insana yönelik arayüzlerde (örneğin, konuşma tanıma sistemleri, öğrenme asistanları) ve rehabilitasyon uygulamalarında kullanılabilir. Modeller, duygusal ifadeleri anlayarak daha duyarlı ve etkili tepkiler verebilir, bu da insan-makine etkileşimini ve rehabilite edici süreçleri geliştirebilir [27].

Eğitim ve Psikoloji Alanlarıyla İşbirliği: Duygusal analiz çalışmaları, eğitim ve psikoloji alanlarındaki uzmanlarla işbirliği yaparak daha derinlemesine anlayışlar geliştirebilir. Bu iş birlikleri, özellikle eğitimde ve zihinsel sağlık uygulamalarında, duygusal analizin daha etkili bir şekilde kullanılmasını sağlayabilir [28].

Bu öneriler, duygusal durum tahmini üzerine yapılan derin öğrenme çalışmalarının gelecekteki yönelimlerini ve odak noktalarını belirlemek için önemli bir rehber sağlar. Bu alandaki ilerlemeler, daha iyi insan-makine etkileşimi, duygusal zekâ uygulamaları ve sosyal etkileşim alanlarında kullanılabilir. Ayrıca bu alandaki ilerlemeler, teknolojiyle insan etkileşimini daha anlamlı ve duygusal olarak zengin hale getirmeye yönelik büyük potansiyele sahiptir.

Literatürden ve yukarıdaki önerilerden derin öğrenme tekniklerini kullanarak insan vücut hareketlerinden doğru ve derinlemesine duygusal durumları çıkarabilen bir modelin geliştirilmesinin önemi anlaşılmaktadır. Geliştireceğimiz model, video verilerinden vücut hareketlerini hassas bir şekilde analiz edebilecek, jestleri, mimikler ile diğer vücut dilini yorumlayabilecek ve bu bilgileri kullanarak kullanıcının duygusal halini tahmin edebilecektir. Aynı zamanda geliştireceğimiz bu model gerçek dünya uygulamalarında, örneğin terapötik robotlar, interaktif eğitim sistemleri ve insan-makine etkileşimli oyunlar gibi alanlarda önemli bir etki yaratabilir.

1.1. Amaç (Purpose)

Bu çalışmanın amacı, insan vücut hareketlerini derin öğrenme teknikleri ile analiz ederek bireyin duygusal durumlarını tahmin eden yeni bir makine öğrenmesi modeli geliştirmektir. Geleneksel duyu analizi yöntemleri genellikle yüz ifadelerine odaklanmaktadır. Literatürden vücut hareketlerinin duygusal durumları yansıtabileceği anlaşılmaktadır. Bu çalışmada insan vücut tespiti, iskelet modelin oturtulması ve öznitelik çıkarımı gibi adımlarla vücut hareketleri belirlenmiştir. Eğitilmiş bir sınıflandırma algoritması kullanarak vücut hareketlerinden duygusal durumlar tahmin edilmiştir.

2. MATERYAL VE YÖNTEM (MATERIALS AND METHODS)

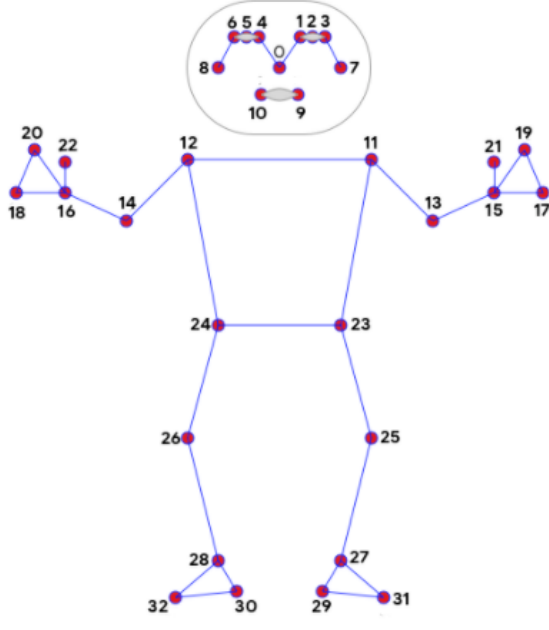
Bu çalışmada deneme ortamı olarak Jupyter Notebook, derleme ve çalıştırma ortamı olarak PyCharm kullanılmıştır. Kullanılan araçlar en genel olarak Python kütüphanelerinden OpenCV, NumPy, MediaPipe, Pandas, OS, Math, TensorFlow, Keras, Scikit-learn'dür. Sonuçları doğrulamak için evrişimli sinir ağları (CNN), destek vektör makineleri (DVM), K-en yakın komşular (k-NN), lojistik regresyon (LR) ve rasgele orman (RO) algoritmaları kullanılmıştır. Kızgın, korkmuş, mutlu, nötr ve üzgün olarak tanımladığımız beş ana duyguya ait resimler, internet ortamından elde edilmiştir. Her duygu için 200 olmak üzere

toplamda 1000 adet resim kullanılmıştır. İnsanların verdiği pozlardan çıkarım yapılmaktadır, eksik vücut bölümü bu verilerin alınmaması demektir ve bu istenmeyen bir durumdur. Bundan dolayı insan vücudunun tüm kısımları eksiksiz görünmelidir ve veriler toplanırken, insan vücudunun görünmeyen kısmının olmamasına dikkat edilmiştir.

Veri ön işleme sürecinde veriler ilk olarak klasörlerde toplanmıştır. Kullanılan resimler öznitelik çıkarımından önce MediaPipe kütüphanesinin en gelişmiş iskelet modeli olan "Pose" kütüphanesi ile ön işlemeye tabi tutulmuştur. Bu kütüphane kendi içinde modelin türüne göre 256x256 veya 320x320 piksel olacak şekilde yeniden boyutlandırma yapar ardından resmi RGB'ye dönüştürerek pikselleri 0-1 arası ölçeklendirir. Ayrıca parametreler ile bu değerler özelleştirilebilir. Resimler bu sayede standartlaştırılır. Doğru çıkarılan öznitelikler istenen ve hedeflenen tahmin doğruluğuna ulaşmak için önemlidir.

2.1. İskelet Model ile Özniteliklerin Çıkarılması (Extracting Features with Skeleton Model)

İskelet model, insan pozlarındaki uç noktaları birbirine bağlayarak koordinat noktaları ile bir düzleme oturtan yapıdır. MediaPipe kütüphanesinin iskelet modelinde bir insan pozu için 33 nokta tanımlanmıştır. Bu noktalar ve ne oldukları Görsel 1'de gösterilmiştir. Bu 33 nokta, iskelet modelden alınacak özniteliklerin ana sınıfıdır. Buradaki her bir noktayı 3 boyutlu bir düzlem gibi düşünüp, değerleri alınmaktadır. Bundan dolayı bu 33 noktanın her birinin x,y,z ve vis değerleri hesaplanmaktadır. Koordinat düzlemindeki 3 yönü belirten x,y ve z için, bu noktaların 3B düzlemindeki değeri hesaplanır ve alınır. Buradaki 4.öznitelik türü olan vis (visible) yani görünürlük değeridir. 0 ile 1 arasında bir değer alır ve ilgili vücut noktası hiç görünmüyor ise 0'a yakın bir değer alır. Eğer görülen bir nokta ise 1'e yakın bir değer alır. 33 noktanın her biri için bu x,y,z ve vis değerleri çarpazlanır ve 132 öznitelik oluşturulur. Bu, her bir insan pozundan 132 öznitelik çıkarıldığı anlamına gelir.



- | | |
|-----------------|------------------------|
| 0. burun | 17. sol_serçe_parmağı |
| 1. sol_göz_içi | 18. sağ_serçe_parmağı |
| 2. sol_göz | 19. sol_ışaret_parmağı |
| 3. sol_göz_dışı | 20. sağ_ışaret_parmağı |
| 4. sağ_göz_içi | 21. sol_başparmak |
| 5. sağ_göz | 22. sağ_başparmak |
| 6. sağ_göz_dışı | 23. sol_kalça |
| 7. sol_kulak | 24. sağ_kalça |
| 8. sağ_kulak | 25. sol_diz |
| 9. ağız_sol | 26. sağ_diz |
| 10. ağız_sağ | 27. sol_ayak_bileği |
| 11. sol_omuz | 28. sağ_ayak_bileği |
| 12. sağ_omuz | 29. sol_topuk |
| 13. sol_dirsek | 30. sağ_topuk |
| 14. sağ_dirsek | 31. sol_ayak_uçu |
| 15. sol_bilek | 32. sağ_ayak_uçu |
| 16. sağ_bilek | |

Şekil 1. Eşleşme noktalarının iskelet modelde gösterimi (Representation of matching points in the skeleton model) [29]

Şekil 1’de bir iskelet modelde bulunan eşleşme noktaları gösterilmiştir. Bunlar, insan vücudu üzerine oturtulan bir koordinat sistemi noktalarıdır. Her bir noktanın doğru şekilde insan vücuduna oturtulması ile öznitelikleri alınabilir. Aksi takdirde, resim kapsama uygun olsa da iskelet model öznitelikleri kapsama uymaz. Bu da uzun vadede modelin doğruluk oranını düşürecektir. Resimlerin doğru bir şekilde modele oturtulabilmesi için piksel boyutları birbirlerine yakın değerlerde olmalıdır. Ayrıca arka plan ve insan pozunu arasında belirgin bir fark olması gerekmektedir. Sıradaki işlem insan pozunun tanınması iskelet modelin tam olarak pozun üzerine oturtulmasıdır.

İnsan pozunun tanınması için ilk olarak poz üzerindeki vücut noktaları kütüphane tarafından tespit edilerek ilgili noktalar yerleştirilmiştir. İnsan iskeletine dönüştürmek için bu noktalar çizgilerle birleştirilmiştir. İki nokta arasındaki mesafe “Öklidyen mesafe” formülü ile hesaplanmıştır. Bu formül, iki nokta arasındaki doğru çizginin uzunluğunu hesaplar ve 3 boyutlu uzayda da kullanılabilir. Bir noktanın bir çizgiye olan konumunu belirlemek için “Noktanın çizgiye olan konumu” hesaplanmıştır. Bu hesaplama, bir noktanın bir çizgi üzerinde mi yoksa çizginin solunda veya sağında mı olduğunu belirler. Bu sayede noktalar arasındaki açılar ve çizgiler yerleştirilebilir. Bir çizginin ortak noktaları arasındaki açıyı hesaplamak için ise “İki çizgi arasındaki açı” formülü kullanılmıştır. Bu formül,

iki çizginin vektörlerini kullanarak kosinüs teoremiyle açıyı hesaplar. Daha sonra bir çizginin yatayla yaptığı açıyı hesaplamak için “Çizgi ve yatay arasındaki açı” formülü kullanılmıştır. Bu açı, çizginin eğimini yani yatay eksene olan açısını ifade eder. Bu sayede pozun iskeleti çıkartılmış olunur. Son olarak, çıkarılan öznitelikler bir CSV dosyasına kaydedilmiştir. Bu CSV dosyasındaki her bir satır, öznitelikleri çıkarılmış bir resimdir. İlk satır ise, özniteliklerin tanımlarının yani duyguların bulunduğu satırdır.

2.2. Özniteliklerin Etiketlenmesi (Tagging Attributes)

Öznitelikleri çıkarılan resimlerin, hangi duygu pozuna ait olduğunun makine tarafından öğrenilebilmesi için etiketlenmesi gerekmektedir. Etiket, o özniteliğin hangi duygu pozunu taşıdığını gösterir. Etiketlerin sayısının belirlenmesi, veri setindeki verilerin sayısı ile ilişkilidir. Tüm etiketlerin ilgili CSV satırına kaydedilmesi gerekir. Bunun için özniteliklerin kaydedildiği CSV dosyasının en sonuna yeni bir sütun eklenir. Bu sütun baştan sona yazısal değişkendir. Makineler, sadece sayısal veriler üzerine işlem yapar. Sırası ile kızgın, korkmuş, mutlu, nötr, üzgün etiketleri için 0, 1, 2, 3, 4 sayıları sütunlarda bu yazısal değerler yerine yazılırsa, makine sayıların büyüklüğüne göre yanlış çıkarım yapacaktır. Örneğin kızgın duygusunun sayısal değeri 0 iken, üzgün duygusunun sayısal değeri 4 olmuş olur. Bu

durumda üzgün çıkarımını, kızgın çıkarımından daha önde tutabilir. Bu ve benzeri durumların önüne geçmek için ise Sckit-Learn kütüphanesinin içerisinde olan OneHotEncoder ve LabelEncoder sınıfları kullanılmıştır.

OneHotEncoder, çok sınıflı kategorik verileri sayısallaştırmak için kullanılan bir metod'dur. Bu metod'da her bir kategori ayrı bir özellik olarak temsil edilir ve bu özelliklerin değerleri 0 veya 1 olur. Örneğin kızgın, korkmuş, mutlu, nötr, üzgün gibi duygu etiketlerinin OneHotEncoder ile sayısallaştırılmış hali Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. OneHotEncoder ile sayısallaştırılmış duygu etiketleri (Digitized emotion labels with OneHotEncoder)

Duygu	kızgın	korkmuş	mutlu	nötr	üzgün
Kızgın	1	0	0	0	0
Korkmuş	0	1	0	0	0
Mutlu	0	0	1	0	0
Nötr	0	0	0	1	0
Üzgün	0	0	0	0	1

LabelEncoder ise tek sütunlu kategorik verileri sayısal etiketlere dönüştürmek için kullanılmıştır. Her bir kategoriye benzersiz bir sayı atanmıştır. 132 sütun bulunan CSV dosyasına etiket

sütunları olan 5 sütun daha eklenerek 137 sütuna çıkarılmıştır. Şekil 2'de veri setinin ilk 4 kaydı gösterilmiştir.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
1	NOSE_x,NOSE_y,NOSE_z,NOSE_vis,LEFT_EYE_INNER_x,LEFT_EYE_INNER_y,LEFT_EYE_INNER_z,LEFT_EYE_INNER_vis,LEFT_EYE_x,LEFT_EYE_y,LEFT_EYE_z,LEFT_EYE_vis,LEF															
2	0.5480905771255493,0.2401376366615295,-0.9046703577041626,0.9999902248382568,0.5611100792884827,0.2250009179115295,-0.8805035352706909,0.9999676942825316															
3	0.4835946261882782,0.0982447117567062,-0.8734963536262512,0.9999909996986388,0.5032166838645935,0.0829728618264198,-0.8343377709388733,0.999970555305481,															
4	0.5256025195121765,0.1147461459040641,-1.047596096992493,0.9999905228614808,0.5438736081123352,0.0965046286582946,-0.9985254406929016,0.9999712705612184,															
5	0.5439168214797974,0.1091045811772346,-1.0460264682769775,0.9999913573265076,0.5656952857971191,0.0939799472689628,-0.9741354584693908,0.9999738931655884															
6																

Şekil 2. CSV dosyasındaki veriler (Data in CSV file)

2.3. Model Eğitimi (Model Training)

Bir model eğitimi için öncelikle model eğitim fonksiyonlarının, parametrelerinin ve hiper parametrelerinin bilinmesi gerekmektedir. Kullanılan kütüphanelere göre bu parametre ve fonksiyonlar değişiklik gösterebilir. Ancak her model için kullanılan hiper parametreler aynıdır.

Bunlardan birisi batch_size hiper parametresidir. Batch_size, bir eğitim döngüsünde aynı anda işlenen örneklerin sayısını belirleyen bir parametredir. Batch_size, bir trade-off oluşturan bir parametredir. Trade-off ise, bir seçim veya karar verme sürecinde birbirine zıt olan iki veya daha fazla öğe arasında denge kurma veya uzlaşma anlamına gelir. Trade-off, bir öğenin artışı veya iyileştirilmesiyle diğer öğenin azalması veya bozulması arasındaki ilişkiyi ifade eder. Bu çalışmada batch_size değeri 64 olarak belirlenmiştir. Bir diğer hiperparametre learning_rate (öğrenme oranı)'dir. Learning_rate, modelin her bir güncelleme adımında ağırlıklarının ne kadar değiştireceğini belirler. Bir makine

öğrenme modeli, hedef fonksiyonunu minimize etmek için ağırlıklarının güncellerken, learning_rate bu güncellemelerin büyüklüğünü kontrol eder. Bu çalışma için learning_rate değeri 0.001'dir. Bir diğer hiper parametre ise epoche sayısıdır. Epoch, makine öğrenmesi ve derin öğrenme modellerinde eğitim verilerinin tamamının model tarafından geçirilmesi anlamına gelir. Bir epoch, modelin bir kez tüm eğitim verilerini kullanarak öğrenme ve güncelleme işlemini tamamladığı bir iterasyonu ifade eder. Her epoch, modelin ağırlıklarını veya parametrelerini güncellediği bir eğitim döngüsünü temsil eder. Bu çalışmada epoch sayısı karşılaştırma yapılması amacı ile 10,20,30,50,75 ve 100 olarak belirlenmiştir. Her bir epoch değeri için ayrı model çıktıları oluşturulmuştur. Tüm batch_size değerleri için epoch sayısı arttıkça hata yüzdesinin düştüğü görülmüştür.

Ayrıca modelin doğruluk oranının epoch sayısı ile doğru orantılı bir şekilde arttığı görülmüştür. Kayıp paket miktarı ise düşmüştür. Her iki grafikte de bir zaman sonra duraksama meydana gelmiştir. Bu da

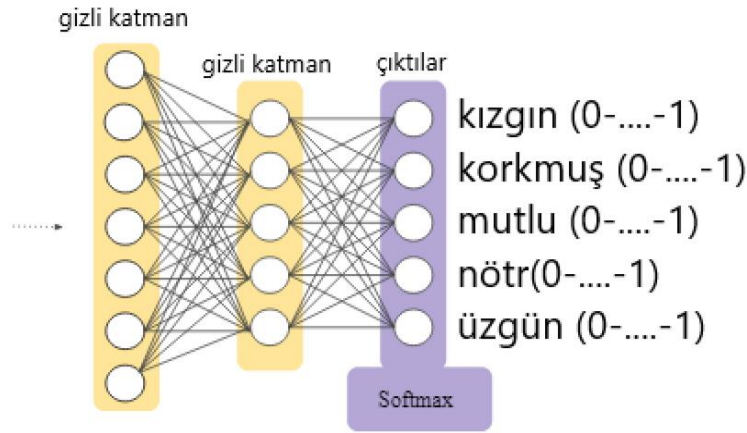
epoch sayısının çok yüksek değil, optimum düzeyde ayarlanması gerektiği anlamına gelmektedir.

Bu çalışmada eğitim modeli olarak sequential sınıfı seçilmiştir. Sequential, Keras kütüphanesinde yer alan bir sınıftır. Bu sınıf, yapay sinir ağlarını oluşturmak için kullanılan bir model türünü temsil eder. Modelin her katmanı ardışık olarak bir önceki katmanın çıktısını alır ve kendisinden sonraki katmana girdi olarak verir.

Bu aşamada sequential bir model oluşturulup, yoğun (dense) katman eklenmiştir. Bu katmanda her bir nöron, bir önceki katmandaki tüm nöronların çıktılarından etkilenir. Giriş katmanının boyutunu ayarlamak için, özniteliklerin toplam sayısı alınmıştır. Aktivasyon fonksiyonu olarak bu yoğun katmana ReLU uygulanmıştır. Bu fonksiyon, modelin yapılandırılması sırasında ilk katman olarak kullanılır ve giriş verilerini doğru boyutta kabul edebilecek bir yoğun katmanı modelin yapısına ekler. Böylece, model, verileri giriş katmanından alarak daha karmaşık işlemler yapabilen diğer katmanlara aktarabilir. Bu 132 nöronlu yoğun katmanın üstüne bir yoğun (dense) katman daha eklendi ve bu katman sadece 1 adet nörona sahip olacak şekilde ayarlanmıştır. Bu, çıkış katmanının yalnızca bir çıktı üreteceği anlamına

gelmektedir. Ayrıca, aktivasyon fonksiyonu olarak da sigmoid kullanılmıştır.

Artık yukarıdaki tanımlama ile 132 nöronlu giriş ve 1 nöronlu çıkışa sahip modelin ilk aşaması tamamlanmış oldu. Sigmoid fonksiyonunun çıkışının 1 olması, sınıfların toplam tahmin değerlerinin 1 olduğu anlamına gelir. Yani ileride tanımlanacak olan 5 sınıfa ait 5 çıkışın değerlerinin toplamının 1 olacağını ifade eder. Sonraki aşama için, öznitelik sayılarına sahip 132 nöron girişli, aktivasyon fonksiyonu ReLU olan bir model daha oluşturulmuştur. Bu modele, bir yoğun (dense) katmanı daha eklenmiş ve bu katman 5 adet nörona sahip olacak şekilde ayarlanmıştır. Bu, çıkış katmanının 5 farklı sınıf için, yani duygu etiketlerimiz için olasılık değerleri üreteceği anlamına gelmektedir. Bu aşamanın son adımı olarak da softmax fonksiyonu uygulanmıştır. Softmax fonksiyonu, çıkışları normalleştirerek her sınıf için bir olasılık dağılımı üretmektedir. Bu da, çok sınıflı çıkışın olduğu bir sınıflandırma problemindeki tüm sınıfların olasılıklarını temsil ettiği anlamına gelmektedir. Bu kod, modelin yapılandırılması sırasında son katman olarak kullanılır ve modelin çok sınıflı sınıflandırma problemlerindeki çıkışını tanımlar. Böylece, toplam değerleri 1 olacak şekilde oranları dağıtılacak olan 5 çıkış nöronlu modelimiz tanımlanmıştır.



Şekil 3. Softmax 5 nöronlu çıkış şekli (Softmax 5 neuron output shape)

Şekil 3’de Softmax’ın 5 nöronlu çıkış şekli verilmiştir. Sigmoid ile softmax beraber kullanıldığında, değerleri 0 ile 1 arasında olan 5 çıkış nöronu oluşur. Bu nöron çıktılarının toplam değeri 1’dir.

2.4. Modelden Gerçek Zamanlı Çıkarım Yapılması (Real-Time Inference from the Model)

Gerçek zamanlı çıkarım, oluşturulan ve çıktısı alınan modelin öğrendiği veriler ile kameradan anlık olarak alınan görüntü üzerinde tahmin yapması ve çıktı vermesi anlamına gelir. Model eğitiminde resimler üzerinde iskelet model uygulama işlemi yapılmıştı. Daha sonra ise çıkarılan iskelet model öznitelikleri kaydedilmişti.

Burada da her bir çerçeve üzerinde iskelet modeli işlenir, alınan öznitelikler ile çağrılan model üzerinde tahmin işlemi gerçekleştirilir.

Tablo 2. Gerçek zamanlı duygu çıkarımı (Real-time emotion extraction)

Görsel 4'ten alınan verilerin çıkarım oranları ve çıkarım sonucu %						
Satır	Kızgın	Korkmuş	Mutlu	Nötr	Üzgün	Çıkarım Sonucu
1	%0	%37.8	%0	%62.1	%0	Nötr
2	%0	%41.0	%0	%58.9	%0	Nötr
3	%0	%47.4	%0	%52.5	%0	Nötr
4	%0	%68.7	%0	%31.2	%0	Korkmuş
5	%0	%91.2	%0	%08.7	%0	Korkmuş

Tablo 2'de gerçek zamanlı işlenen insan pozundan yapılan öznitelik çıkarımında bazı duygu etiketlerinin 0'dan küçük değer almasından dolayı 0 değerini aldığı, bazı duygu etiketlerinin ise olasılık değerleri çerçevesinde 0'dan büyük değerler aldığı görülmektedir. İlk satırda kızgın, mutlu ve üzgün

duyguları 0 değerini almışken, korkmuş duygusu %37.8 oranında, nötr duygusu %62.1 oranında değer almıştır. İlk satır, o çerçeve için yapılan işlemlerden çıktı olarak "nötr" duygusunun çıkarımını yapmıştır. Bu sayede insan pozlarından gerçek zamanlı çıkarım yapılmış olunur.



Şekil 5. Gerçek zamanlı çıkarım (Real-time emotion extraction)

Şekil 5'de gerçek zamanlı çıkarımın insan vücudu üzerinde nasıl durduğu ve pozdan ürettiği tahmin değeri görülmektedir. Modelden gerçek zamanlı yapılan çıkarımların görüntülerinin derlenmiş halidir. Duygulara ait çıkarımlar ve yüzdeler tespit edilen insan yüzünün üstüne konulmuştur. İskelet modeli ise isteğe bağlı olarak konulup kaldırılabilir.

3. BULGULAR (FINDINGS)

Bu çalışmada seçilen batch-learning tekniği, modelin sürekli öğrenmeye kapalı olduğu ve tüm eğitim verilerinden bir kere eğitimin yapıldığı, eğitimin bir süreç değil sonuç olduğu yaklaşımdır.

Bu yaklaşımın kullanılmasının nedeni, insan pozlarını anlama zorluğundan kaynaklıdır. Çünkü insan pozları sınırsız hareket kombinasyonlarına sahiptir. Aykırı verilere yakalanılmaması için ise etiketlere göre incelenmesi gerekir. Bu nedenle, modelin eğitimi aktif bir süreç yerine toplu olarak gerçekleştirilmiş, insan pozlarının anlaşılmasındaki zorluk ve etiketlere göre incelenmesi gerekliliği göz önünde bulundurularak, modelin doğruluk oranının yükseltilmesi amaçlanmıştır.

3.1. Performans Ölçüm Modelleri ve Sonuçları

(Performance Measurement Models and Results)

edilen duygu tespiti sınıflandırma sonuçları verilmiştir.

Tablo 3, 4, 5, 6 ve 7’de CNN, DVM, KNN, Lojistik Regresyon ve Rastgele Orman algoritmaları ile elde

Tablo 3. CNN sınıflandırması (CNN classification)

CNN Sınıflandırması		
Duygu Durumu	Sınıflandırma Doğruluğu	Yüzde
Kızgın	0.983	%98.30
Korkmuş	0.989	%98.90
Mutlu	0.994	%99.40
Nötr	0.950	%95.00
Üzgün	0.978	%97.80

Tablo 3 incelendiğinde en düşük doğruluğa sahip duygunun %95.00 ile “nötr” duygusu olduğu, en yüksek doğruluğa sahip duygunun %99.40 ile

“mutlu” duygusu olduğu görülmektedir. CNN ile doğrulamanın ortalama doğruluk değeri ise %97.88’dir.

Tablo 4. DVM sınıflandırması (DVM classification)

DVM Sınıflandırması		
Duygu Durumu	Sınıflandırma Doğruluğu	Yüzde
Kızgın	0.989	%98.90
Korkmuş	0.984	%98.40
Mutlu	1.0	%100
Nötr	0.995	%99.50
Üzgün	0.978	%97.80

Tablo 4 incelendiğinde en düşük doğruluğa sahip duygunun %97.80 ile “üzgün” duygusu olduğu, en yüksek doğruluğa sahip duygunun %100 ile “mutlu” duygusu olduğu görülmektedir. DVM ile

doğrulamanın ortalama doğruluk değeri ise %98.92’dir.

Tablo 5. KNN sınıflandırması (KNN classification)

KNN Sınıflandırması		
Duygu Durumu	Sınıflandırma Doğruluğu	Yüzde
Kızgın	1.0	%100
Korkmuş	0.934	%93.40
Mutlu	0.989	%98.90
Nötr	1.0	%100
Üzgün	0.945	%94.50

Tablo 5 incelendiğinde en düşük doğruluğa sahip duygunun %93.40 ile “korkmuş” duygusu olduğu, en yüksek doğruluğa sahip duyguların %100 ile

“kızgın” ve “nötr” duyguları olduğu görülmektedir. KNN ile doğrulamanın ortalama doğruluk değeri ise %97.36’dır.

Tablo 6. Lojistik regresyon sınıflandırması (Logistic regression classification)

Lojistik Regresyon Sınıflandırması		
Duygu Durumu	Sınıflandırma Doğruluğu	Yüzde
Kızgın	0.995	%99.50
Korkmuş	0.972	%97.20
Mutlu	1.0	%100
Nötr	0.995	%99.50
Üzgün	0.989	%98.90

Tablo 6 incelendiğinde en düşük doğruluğa sahip duygunun %97.20 ile “korkmuş” duygusu olduğu, en yüksek doğruluğa sahip duygunun %100 ile

‘mutlu’ duygusu olduğu görülmektedir. Lojistik Regresyon ile doğrulamanın ortalama doğruluk değeri ise %99.02’dir.

Tablo 7. Rastgele orman sınıflandırması (Random forest classification)

Rastgele Orman Sınıflandırması		
Duygu Durumu	Sınıflandırma Doğruluğu	Yüzde
Kızgın	1.0	%100
Korkmuş	0.989	%98.90
Mutlu	1.0	%100
Nötr	0.983	%98.30
Üzgün	0.989	%98.90

Tablo 7 incelendiğinde en düşük doğruluğa sahip duygunun %98.30 ile “nötr” duygusu olduğu, en yüksek doğruluğa sahip duyguların %100 ile “kızgın” ve “mutlu” duyguları olduğu görülmektedir. Rastgele Orman ile doğrulamanın ortalama doğruluk değeri ise %99.22’dir.

Sonuç olarak Rastgele Orman algoritması tüm duyguları yüksek bir doğrulukla tahmin etme yeteneği göstermiştir. Kızgın ve Mutlu duygularının sınıflandırmada tüm algoritmalar çok başarılı olmuştur. Bu da kızgın ve mutlu duygularının diğerlerine kıyasla daha belirgin ve kolay tanımlanabilir bir yapıya sahip olduklarını göstermektedir. Nötr ve korkmuş duyguları ise diğer duygulara kıyasla daha düşük sonuç vermiştir. Özellikle korkmuş duygusu hiçbir modelde en yüksek doğruluğa erişememiştir. Bunun nedeni, diğer duygulara göre aykırı yapıda olmasıdır. Diğer duygular genelde bir insanın dik bir şekilde poz vermesinden oluşurken korkmuş duygusu, kendini küçülterek korumaya çalışan bir insan poz şeklindedir.

3.2. Resim Üzerinde Test Sonuçları (Test Results on Picture)

Aynı resim üzerinde farklı epoch sayılarının etkisi Tablo 8’de gösterilmiştir. Tablo 8 incelendiğinde, kızgın, üzgün ve mutlu duygularının doğruluk oranının epoch sayısı ile doğru orantılı olarak arttığı, korkmuş duygusunun ilk 3 epoch modelinde pasif kaldığı ancak son 3 epoch modelinde yüksek doğruluk gösterdiği, nötr duygusunun ilk 3 epoch modelinde yarı pasif kaldığı ve son 3 epoch modelinde arttığı görülmüştür. Korkmuş duygusunun doğruluk oranının yüksek çıkmasının nedeni, diğer duygu pozlarına kıyasla çok daha geniş bir öznitelik korelasyonuna sahip olması olabilir. Korkmuş duygusu bu yüzden model eğitimlerinin düşük epoch değerlerinde pasif kalmıştır. Nötr duygusu ise diğer ana duygular ile benzerlikler taşıdığı için, makine öğrenimi düşük epoch sayılarında başarısız denilebilecek sonuçlar vermektedir.

Tablo 8’den 50 epoch değerinin 3 duygu için çok başarılı, 1 duygu için başarılı, 1 duygu için ise yetersiz kaldığı görülmektedir. Epoch 75 değerine çıktığında ise 5 duygu için de çok başarılı sonuçlar alındığı görülmüştür. Epoch değeri 100’e yükseltildiğinde, duyguların çoğunda doğruluk oranında bir artış gözlemlenmiştir. Fakat bu aşamada, modelin aşırı öğrenme sorununa karşı

dikkatli olunması gerekir. Bu sonuçlara göre epoch değeri için 100 ideal bir değerdir.

Tablo 8. Epoch doğruluk oranları (Epoch accuracy rates)

Epoch sayısı / Sınıflandırma doğruluğu %						
Duygu / Epoch sayısı	10	20	30	50	75	100
Kızgın	%46	%77	%85	%98	%99	%99
Korkmuş	%16	%18	%26	%95	%97	%99
Mutlu	%78	%96	%99	%99	%99	%99
Nötr	%44	%44	%50	%70	%91	%95
Üzgün	%58	%78	%80	%82	%93	%95

3.3. Gerçek Zamanlı Test ve Sonuçları (Real Time Testing and Results)

Modelin gerçek zamanlı test edilmesinin önemi, uygulama alanına en yakın test alanı olmasıdır. Modelin gerçek zamanlı performansını göstermekte ve ileriye dönük geliştirme işlemleri için ipuçları sunmaktadır. Buradaki veriler, gerçek zamanlı tahmin işleminde alınan insan pozlarından çıkarılan verilerin doğruluk oranlarının aralığını barındırır. Bu aralık pozlara göre değişen doğruluk oranlarının en düşük ve en yüksek değerleridir. Bant aralıklarına ve epoch değerine bakıldığında, epoch sayısının arttıkça gerçek zamanlı testin doğruluk aralıklarının da yükseldiği görülmektedir.

Tablo 9 incelendiğinde, kızgın ve nötr duygusunun başlangıçta pasif kaldığı görülmektedir. Epoch değeri 100 iken doğruluk oranı 90'ın altında olan tek duygunun kızgın olmasının nedeni, genel olarak nötr duygusuna çok yakın değerlere sahip

olmasındandır. Bununla birlikte 100 epoch değeri ile öğrenmede %80 olan en düşük doğruluk oranının iyi bir sonuç olduğu söylenebilir. Korkmuş duygusunun hızlı bir şekilde öğrenilmesinin nedeni korkmuş duygusunun özneliklerinin diğer duygulardan oldukça farklı olmasıdır. Korkmuş hariç diğer 4 duyguda gövde ve bacak yapısı birbirine çok benzemekle beraber, korkmuş hariç 4 duygu arasındaki öğrenme farkı kollar, omuzlar ve baş bölgesi ile yapılır. Buna karşın korkmuş pozunu veren kişi, görünür vücudunu küçültme ve elleri ile kendini koruma içgüdüleri sergiler. Bu doğruluk değerleri, eğitim setindeki insan pozlarına özenle uyum sağlayarak verilen pozlardan elde edilmiştir. Eğitim setindeki pozlara olabildiğince çok benzer pozlar verilmesinin nedeni, tıpkı doğrulama modellerinin yaptığı türden bir doğruluk testi yapma amacı taşımaktadır. Modelin gerçek zamanlı olarak verebileceği en yüksek değerlerin tespiti amaçlanmıştır.

Tablo 9. Gerçek zamanlı epoch doğruluk oranları (Real-time epoch accuracy rates)

Epoch sayısı / Sınıflandırma doğruluğu %						
Duygu / Epoch sayısı	10	20	30	50	75	100
Kızgın	%28-%31	%34-%40	%33-%35	%66-%75	%75-%80	%80-%87
Korkmuş	%35-%42	%51-%61	%76-%86	%98-%99	%98-%99	%98-%99
Mutlu	%70-%80	%80-%86	%91-%96	%91-%98	%98-%99	%98-%99
Nötr	%30-%40	%54-%58	%77-%80	%90-%92	%94-%97	%93-%98
Üzgün	%57-%60	%60-%65	%63-%73	%84-%91	%92-%97	%98-%99

4. SONUÇ VE TARTIŞMA (CONCLUSION AND DISCUSSION)

Bu çalışmada, gerçek zamanlı olarak vücut pozlarına dayalı ifade durumlarının tespiti için bir insan pozunu tanıma sistemi geliştirilmiş ve veri setindeki görüntüler ile farklı sınıflandırma yöntemleri, derin evrimsel sinir ağlarının

doğruluk oranları ve eğitim süreleri karşılaştırılmıştır. Bu çalışmada Keras, Tensorflow, MediaPipe ve OpenCV kütüphaneleri kullanılmıştır. Sınıflandırma algoritmalarından CNN, k-NN, DVM, LR ve RO algoritmaları kullanılmıştır. Ayrıca, dâhili kamera ile yüz tespiti için OpenCV kütüphanesinin derin sinir ağları (DSA) sınıfından yüz tanıma algoritması

kullanılmıştır. Veri depolama alanı olarak CSV uzantılı dosya depolama türü tercih edilmiştir. Bu dosyanın tercih edilmesinin nedeni ise, barındırdığı verilerin kolaylıkla incelenebilmesidir. Model çıktısını kaydetmek için ise “.h5” uzantılı yani “Hiyerarşik Veri Formatı 5” kullanılmıştır. Sonuç olarak en yüksek doğruluk oranının %97.80 ile rastgele orman ile elde edildiği görülmüştür. Çalışmadaki gerçek zamanlı doğruluk oranı ortalaması ise %94.50 olarak hesaplanmıştır.

Doğruluk sonucunun artması için veri seti büyüklüğü ve duygulara ait resimlerin sayısal dağılımının eşit olmasına, duygusal ifadelerin spesifik özelliklerinin kapsamları dışına çıkmamasına ancak kapsam dışına çıkmadan olabileceği her durum için veri setinde örneğinin bulunmasına, hiper parametrelerin veri seti büyüklüğüne göre özenle seçilmesine ve modelin gerçek zamanlı kullanımı için performansı yüksek bir bilgisayara ihtiyaç duyduğu görülmüştür. Çalışmada kullanılan veri seti büyüklüğü 1000 resim olmakla birlikte gerçek zamanlı testte en yüksek doğruluğun learning_rate değeri 0.001, batch_size değeri 64, epoch değeri 100 iken olduğu görülmüştür.

Bu çalışma, özellikle insan-makine etkileşimi, duygusal zekâ, psikoloji ve yapay zekâ alanlarında önemli katkılar sağlayabilir. Bu çalışmanın önemi, sadece teknolojik bir ilerleme olarak değil, aynı zamanda sosyal bağlamda da büyük bir anlam taşımaktadır. Örneğin, otizm spektrum bozukluğu gibi durumlarla ilgili bireylere daha iyi yardım sağlama, psikolojik rahatsızlıkları olan bireylerin tedavi ve destek süreçlerini geliştirme ve etkileşimli eğitim uygulamalarını daha kişiselleştirme gibi bir dizi alanda önemli etkileri olabilir. Ayrıca bu çalışma, duygusal analiz alanındaki gelecekteki araştırmalar için bir temel oluşturarak, teknolojinin insanlarla daha derin ve anlamlı bir şekilde etkileşime girmesini sağlayabilecek yeni yöntemlerin geliştirilmesine de katkıda bulunacaktır.

ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

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

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

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

Yazarlar makalenin fikir aşamasından yazım aşamasına kadar tüm aşamalarında birlikte çalışmıştır.

The authors worked together at all stages of the article, from idea to writing.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

There is no conflict of interest in this study.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Gunawan, T. S., Ashraf, A., Riza, B. S., Haryanto, E. V., Rosnelly, R., Kartiwi, M., & Janin, Z., Development of video-based emotion recognition using deep learning with Google Colab. TELKOMNIKA (Telecommunication Computing Electronics and Control), 18 (5), 2463-2471, 2020.
- [2] Ahmed, F., Bari, A. H., & Gavrilova, M. L., Emotion recognition from body movement. IEEE Access, 8, 11761-11781, 2019.
- [3] Chowdary, M. K., Nguyen, T. N., & Hemanth, D. J., Deep learning-based facial emotion recognition for human-computer interaction applications. Neural Computing and Applications, 35(32), 23311-23328, 2023.
- [4] Balti, A., Khelifa, M. M. B., Hassine, S. B., Ouazaa, H. A., Abid, S., Lakhoua, M. N., & Sayadi, M., Gait Analysis and Detection of Human Pose Diseases. In 2022 8th International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT), 1 (IEEE), 1381-1386, 2022.
- [5] Park, S., Yong Chang, J., Jeong, H., Lee, J. H., & Park, J. Y., Accurate and efficient 3d human pose estimation algorithm using single depth images for pose analysis in golf. In Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition workshops, 49-57, 2017.
- [6] Wang, J., Tan, S., Zhen, X., Xu, S., Zheng, F., He, Z., & Shao, L., Deep 3D human pose estimation: A review. Computer Vision and Image Understanding, 210, 103225, 2021.
- [7] Ota, M., Tateuchi, H., Hashiguchi, T., Kato, T., Ogino, Y., Yamagata, M., & Ichihashi, N., Verification of reliability and validity of motion analysis systems during bilateral squat using human

- pose tracking algorithm. *Gait & posture*, 80, 62-67. 2020.
- [8] Si, L., & Liu, B., Multifeature Fusion Human Pose Tracking Algorithm Based on Motion Image Analysis. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2022.
- [9] Verma, A., Meenpal, T., & Acharya, B., Human body pose distance image analysis for action recognition. *International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence*, 36 (07), 2255012. 2022.
- [10] Hyppönen, J., Hakala, A., Annala, K., Zhang, H., Peltola, J., Mervaala, E., & Kälviäinen, R., Automatic assessment of the myoclonus severity from videos recorded according to standardized Unified Myoclonus Rating Scale protocol and using human pose and body movement analysis. *Seizure*, 76, 72-78, 2020.
- [11] Xu, J., Yu, Z., Ni, B., Yang, J., Yang, X., & Zhang, W., Deep kinematics analysis for monocular 3d human pose estimation. In *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on computer vision and Pattern recognition*, 899-908, 2020.
- [12] Rohan, A., Rabah, M., Hosny, T., & Kim, S. H., Human pose estimation-based real-time gait analysis using convolutional neural network. *IEEE Access*, 8, 191542-191550, 2020.
- [13] Paudel, P., Kwon, Y. J., Kim, D. H., & Choi, K. H., Industrial Ergonomics Risk Analysis Based on 3D-Human Pose Estimation. *Electronics*, 11 (20), 3403, 2022.
- [14] Stenum, J., Rossi, C., & Roemmich, R. T., Two-dimensional video-based analysis of human gait using pose estimation. *PLoS computational biology*, 17 (4), e1008935, 2021.
- [15] Kim, J. W., Choi, J. Y., Ha, E. J., & Choi, J. H., Human pose estimation using mediapipe pose and optimization method based on a humanoid model. *Applied Sciences*, 13 (4), 2700, 2023.
- [16] Wang, W., Enescu, V., & Sahli, H., Adaptive real-time emotion recognition from body movements. *ACM Transactions on Interactive Intelligent Systems (TiiS)*, 5 (4), 1-21, 2015.
- [17] Santhoshkumar, R., & Geetha, M. K., Deep learning approach: emotion recognition from human body movements. *Journal of Mechanics of Continua and Mathematical Sciences (JMCMs)*, 14(3), 182-195, 2019.
- [18] Samadiani, N., Huang, G., Cai, B., Luo, W., Chi, C. H., Xiang, Y., & He, J., A review on automatic facial expression recognition systems assisted by multimodal sensor data. *Sensors*, 19 (8), 1863, 2019.
- [19] Al Ghaithi, A., A robust approach for shear log predictions using deep learning on big data sets from a carbonate reservoir for integrated reservoir characterization projects. In *Second International Meeting for Applied Geoscience & Energy* (pp. 1840-1844). Society of Exploration Geophysicists and American Association of Petroleum Geologists, 2022.
- [20] Zhang, X., Hu, Y., Deng, J., Xu, H., & Wen, H., Feature engineering and artificial intelligence-supported approaches used for electric powertrain fault diagnosis: a review. *IEEE Access*, 10, 29069-29088, 2022.
- [21] Mo, Y., Wu, Y., Yang, X., Liu, F., & Liao, Y., Review the state-of-the-art technologies of semantic segmentation based on deep learning. *Neurocomputing*, 493, 626-646, 2022.
- [22] Šumak, B., Brdnik, S., & Pušnik, M., Sensors and artificial intelligence methods and algorithms for human-computer intelligent interaction: A systematic mapping study. *Sensors*, 22 (1), 20, 2021.
- [23] Yang, C. Y., Chen, P. C., & Huang, W. C., Cross-Domain Transfer of EEG to EEG or ECG Learning for CNN Classification Models. *Sensors*, 23 (5), 2458, 2023.
- [24] Tamil Priya, D., & Divya Udayan, J., Transfer learning techniques for emotion classification on visual features of images in the deep learning network. *International Journal of Speech Technology*, 23, 361-372, 2020.
- [25] Mukhopadhyay, A., Rajshekar Reddy, G. S., Mukherjee, I., Kumar Gopa, G., Pena-Rios, A., & Biswas, P., Generating Synthetic Data for Deep Learning using VR Digital Twin. In *Proceedings of the 2021 5th International Conference on Cloud and Big Data Computing*, August, 52-56, 2021.
- [26] Rudovic, O., Utsumi, Y., Lee, J., Hernandez, J., Ferrer, E. C., Schuller, B., & Picard, R. W., CultureNet: A deep learning approach for engagement intensity estimation from face images of children with autism. In *2018 IEEE/RSJ*

International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), October, 339-346, 2018.

[27] Yao, R., Hou, L., Yang, L., Gui, J., & Wu, O., Deep human answer understanding for natural reverse QA. *Knowledge-Based Systems*, 254, 109625, 2022.

[28] Wang, T., Zhao, Y., & Yin, M., Analysis and research on the influence of music on students' mental health under the background of deep learning. *Frontiers in Psychology*, 13, 998451, 2022.

[29] YOLOv7. Pose vs MediaPipe in Human Pose Estimation. <https://learnopencv.com/yolov7-pose-vs-mediapipe-in-human-pose-estimation/>. Accessed: Feb. 12, 2024.

Öznitelik Seçimi ile Desteklenen Makine Öğrenmesine Dayalı Göğüs Kanserinin Erken Tespiti ve Teşhisi

Cihan AKYEL^{1*}, Bünyamin CİYLAN², Hüseyin POLAT²

¹Millî Eğitim Bakanlığı, İnşaat ve Emlak Genel Müdürlüğü, Beşevler Kampüsü, Ankara, Turkey

²Gazi University, Teknoloji Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Ankara, Turkey

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 07/12/2023
Düzeltilme: 13/02/2024
Kabul: 01/03/2024

Anahtar Kelimeler

Göğüs Kanseri
Öznitelik Seçimi
Makine Öğrenmesi
Karar Destek Sistemleri
Bilişim Sistemleri
Veri Yönetimi

Article Info

Research article
Received: 07/12/2023
Revision: 13/02/2024
Accepted: 01/03/2024

Keywords

Breast Cancer
Feature Selection
Machine Learning
Decision Support Systems
Information Systems
Data Management

Grafik Özet (Graphical/Tabular Abstract)

Bu çalışmada göğüs kanserinin tespiti için Wisconsin veri setinde öznitelik seçimi yöntemleri ile öznitelik sayısı beşe indirilerek "iyi huylu" ve "kötü huylu" olarak sınıflandırılmıştır. Farklı öznitelik seçimi ve makine öğrenmesi yöntemleri denenerek en yüksek başarıyı gösteren ikili seçilmiştir. Teşhis sürecinde karar desteği sağlamak adına bir karar destek sistemi oluşturulmuştur. / In this study, for the detection of breast cancer, the number of features in the Wisconsin data set was reduced to five using feature selection methods and classified as "benign" and "malignant". By trying different feature selection and machine learning methods, the pair with the highest success was selected. A decision support system was created to provide decision support in the diagnosis process of breast cancer.



Şekil A: Çalışmaya ait genel akış / Figure A: General flow of the study

Önemli noktalar (Highlights)

- Farklı öznitelik seçimi ve makine öğrenmesi yöntemleri denenerek en uygun ikili seçildi. / Different feature selection and machine learning methods were tried and the most suitable pair was selected.
- Çalışmada göğüs kanserinin teşhisi süreci için karar destek sistemi tasarlandı. / In the study, a decision support system was designed for the breast cancer diagnosis process.
- Daha az öznitelik kullanılarak daha az kaynak ile yüksek başarı elde edildi. / High success was achieved with fewer resources by using fewer attributes.

Amaç (Aim): Çalışmada bellek, gpu gücü gibi parametrelerde daha az kaynak kullanılarak, göğüs kanserinin ikili sınıflandırılması ve bir karar destek sistemi üzerinden teşhis sürecine destek sağlanması amaçlanmaktadır. / The aim of the study is to dual-classify breast cancer and provide support to the diagnosis process through a decision support system, by using fewer resources in parameters such as memory and gpu power.

Özgünlük (Originality): Çalışmada farklı öznitelik seçimi ve makine öğrenmesi yöntemlerine ait olası tüm kombinasyonlar için eğitimler yapılmıştır. Hangi özniteliklerin teşhis için daha etkili olduğu ortaya konulmuştur. Daha az öznitelik ile uygun öznitelik seçimi ve makine öğrenmesi yöntemleri kullanılarak da yüksek başarı elde edilebileceği görülmüştür. Ayrıca çalışma kapsamında karar destek sistemi oluşturularak bu alanda farklılık sağlanmıştır. / In the study, training was conducted for all possible combinations of different feature selection and machine learning methods. It has been revealed which features are more effective for diagnosis. It has been observed that high success can be achieved by using appropriate feature selection and machine learning methods with fewer features. In addition, a decision support system was created within the scope of the study and a difference was made in this field.

Bulgular (Results): %98,83 doğruluk, %99 kesinlik ve %99 duyarlılık değerleri, Variance inflation factors (VIF) öznitelik seçimi ve Random Forest algoritması kullanılarak elde edilmiştir. / It was obtained using Variance inflation factors (VIF) feature selection and Random Forest algorithm with 98.83% accuracy, 99% precision and 99% sensitivity values.

Sonuç (Conclusion): Bu çalışma ile kanserin erken teşhisinde karar vericilere yardımcı olacak bir sistem sunulmaktadır. / This study presents a system that will assist decision makers in the early diagnosis of cancer.



Öznitelik Seçimi ile Desteklenen Makine Öğrenmesine Dayalı Göğüs Kanserinin Erken Tespiti ve Teşhisi

Cihan AKYEL^{1*} , Bünyamin CİYLAN² , Hüseyin POLAT² 

¹Millî Eğitim Bakanlığı, İnşaat ve Emlak Genel Müdürlüğü, Beşevler Kampüsü, Ankara, Turkey

²Gazi University, Teknoloji Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Ankara, Turkey

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 07/12/2023
Düzeltilme: 13/02/2024
Kabul: 01/03/2024

Anahtar Kelimeler

Göğüs Kanseri
Öznitelik Seçimi
Makine Öğrenmesi
Karar Destek Sistemleri
Bilişim Sistemleri
Veri Yönetimi

Öz

Kanserin tam nedeni bilinmemekle birlikte, yaşam tarzı, çevresel faktörler, beslenme ve genetik gibi birçok faktörün kanser gelişimine katkıda bulunabileceği bilinmektedir. Kanser türleri arasında özellikle göğüs kanseri, dünya genelinde kadınlar arasında görülme sıklığı yüksek olan bir hastalıktır. Göğüs kanserinin teşhisinde fiziksel muayene ve mamografi görüntülerinin incelenmesi gibi yöntemler kullanılmaktadır. Gelişen teknolojiyle birlikte makine öğrenmesi uygulamalarının tıp alanında kullanımı giderek artmaktadır. Bu sayede göğüs kanserinin daha erken aşamada ve hızlı şekilde teşhisi konusunda doktorlara yardımcı olabilecek umut verici çalışmalar giderek artmaktadır. Bu çalışmada, göğüs kanserinin erken teşhisinde kullanmak için 4 farklı öznitelik seçimi ve 5 farklı makine öğrenme yönteminin performansları karşılaştırılmıştır. Çalışmanın ilk aşamasında, Principal Component Analysis (PCA), Recursive feature elimination, Variance inflation factors (VIF) ve Univariate feature selection yöntemleri ile veri kümesinde hedef öznitelige en çok etki eden öznitelikler seçilerek veri kümesindeki öznitelik sayısı azaltılmıştır. İkinci aşamada, K Nearest Neighbors (KNN), Naive Bayes, Decision Tree, Support Vector Machine (SVM) ve Random Forest makine öğrenme algoritmaları orijinal ve öznitelik seçimi yapılmış veri kümelerine dayalı olarak eğitilmiş ve test edilmiştir. Test sonuçlarına göre %98,83 doğruluk, %99 kesinlik ve %99 duyarlılık değerleri ile Variance inflation factors (VIF) öznitelik seçimi ve Random Forest algoritması kullanılarak elde edilmiştir. Daha az öznitelik kullanımı sayesinde eğitim ve test aşamalarında benzer başarı değerleri, kaynak kullanımı ile sağlanmıştır. Çalışmada eğitilip test edilen makine öğrenme modeli Flask framework kullanılarak bir web ara yüzüne sahip uygulama haline getirilmiştir.

Early Detection and Diagnosis of Breast Cancer Based on Machine Learning Supported by Feature Selection

Article Info

Research article
Received: 07/12/2023
Revision: 13/02/2024
Accepted: 01/03/2024

Keywords

Breast Cancer
Feature Selection
Machine Learning
Decision Support Systems
Information Systems
Data Management

Abstract

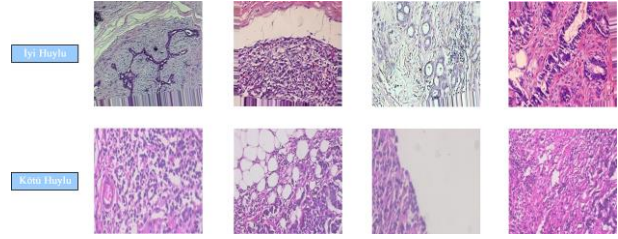
Although the exact cause of cancer is unknown, it is known that many factors such as lifestyle, environmental factors, nutrition and genetics can contribute to the development of cancer. Among the types of cancer, especially breast cancer is a disease with a high incidence among women worldwide. Methods such as physical examination and examination of mammography images are used to diagnose breast cancer. With developing technology, the use of machine learning applications in the medical field is increasing. In this way, promising studies that can help doctors diagnose breast cancer at an earlier and faster stage are increasing. In this study, the performances of 4 different feature selection and 5 different machine learning methods were compared for use in the early diagnosis of breast cancer. In the first stage of the study, the number of features in the dataset was reduced by selecting the features that most affect the target feature in the dataset using Principal Component Analysis (PCA), Recursive feature elimination, Variance inflation factors (VIF) and Univariate feature selection methods. In the second stage, K Nearest Neighbors (KNN), Naive Bayes, Decision Tree, Support Vector Machine (SVM) and Random Forest machine learning algorithms were trained and tested based on original and feature selected datasets. According to the test results, 98.83% accuracy, 99% precision and 99% sensitivity values were obtained using Variance inflation factors (VIF) feature selection and Random Forest algorithm. Thanks to the use of fewer features, similar success values were achieved in the training and testing phases with the use of resources. The machine learning model trained and tested in the study was turned into an application with a web interface using the Flask framework.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Kanser, yaşam tarzı, beslenme alışkanlıkları, genetik etmenler ve çevresel faktörlere bağlı olarak gelişebilen ve dünya genelinde görülen sağlık sorunları arasında büyük öneme sahip bir hastalıktır. Her yıl milyonlarca insan kanser nedeniyle yaşamını yitirmektedir. Kanser etkileri sadece bireylerle sınırlı kalmamakta, aynı zamanda ekonomi ve sağlık sistemi üzerinde de büyük bir yük oluşturmaktadır. Kanser türlerinin kadınlar ve erkekler arasındaki görülme ihtimali ve sıklığı değişkenlik gösterebilmektedir. Göğüs kanseri özellikle kadınlarda, dünya genelinde en yaygın görülen kanser türüdür. Göğüs kanseri, meme dokusunda anormal hücrelerin kontrolsüz şekilde çoğalıp tümör oluşturması ve çevre dokulara yayılması ile ortaya çıkmaktadır. Bununla birlikte bir tümör her durumda kanser anlamına da gelmemektedir. Tümörler iyi huylu eğilim de gösterebilmektedirler. İyi huylu tümörler vücudun diğer bölgelerine yayılmadıkları için kanser olmayan tümörler olarak kabul edilirler. Kötü huylu tümörler ise kanser olarak adlandırılırlar ve çoğalarak vücudun diğer bölgelerine yayılabilirler. Kötü huylu kanser vakaları hastalar için ölümle sonuçlanan durumlar oluşturabilmektedirler. Dünya Sağlık Örgütü'nün verilerine göre 2020 yılında yaklaşık 2,3 milyon yeni göğüs kanseri vakası görülmüş olup, bu vakaların 685.000'i ölümle sonuçlanmıştır [1]. Bu veriler, göğüs kanserini 2020 yılında en ölümcül beşinci kanser türü yapmaktadır. Göğüs kanserinde erken teşhis ve tedavi gerçekleşmezse kanser hücreleri lenfatik sistem aracılığıyla vücudun diğer bölgelerine yayılabilmektedir. Bu durum da tedavi sürecini hasta ve sağlık sistemi açısından daha zorlu hale getirmektedir. Bu yüzden göğüs kanserinin erken teşhisi hastaların tedavi başarısını artırması açısından son derece önemlidir. Erken teşhis durumunda, göğüs kanseri vakalarında hayatta kalma oranları %97'lere kadar çıkabilmektedir [2].

Göğüs kanserinin teşhis sürecinde mamografi, ultrason, manyetik rezonans görüntüleme, ince iğne aspirasyonu (fine needle aspirate) ve cerrahi biyopsi gibi yöntemlerden faydalanılır [3]. Doğru bir teşhis için bu yöntemlerin duyarlılık sonuçları şu şekilde değişmektedir: mamografi %68-%79, ince iğne aspirasyonu %65 - %98 ve cerrahi biyopsi yaklaşık %100 [4]. Kesin teşhis için cerrahi biyopsi etkili bir yöntem olmasına rağmen, hastalar üzerinde olumsuz psikolojik davranışlara neden olan maliyetli bir prosedür olarak bilinmektedir. Göğüs kanserinin teşhisinde kullanılan bir diğer etkili yöntem de, tümörden hücre örnekleri alma ve mikroskop altında hücresel gözlem yapma tekniği

olan ince iğne aspirasyon biyopsisidir. İnce iğne aspirasyonunun birçok avantajı ve potansiyel kullanımı vardır, bu da onu göğüs kanserinin tanısı için popüler bir seçenek haline getirmektedir. İnce iğne aspirasyonu, meme lezyonlarından doku ve sıvı örnekleri almak için küçük (21 ile 25 kalibrelik) bir iğne kullanılarak yapılan bir biyopsi türüdür. Doktorlar tümör veya tümörlerin derinliğini, sayısını ve yerini belirlemek için ince iğne aspirasyonundan önce bir ultrason isteyebilirler. Kanser hücrelerinin özelliklerinin bilinmesi, kanserin teşhisi için büyük önem taşır. Bir hastadaki kanserli hücrelerin belirlenmesi oldukça öznel ve hekim uzmanlığına bağlıdır. Bu durum göğüs kanseri hücrelerinin tespiti ve sınıflandırılması için doğru araçlara yönelmeyi gerektirmektedir. İnce iğne aspirasyonu yardımıyla göğüs kanseri teşhis sürecinin doğruluğunu, tutarlılığını ve verimliliğini artırmak için, hücre görüntülerinden hücre çekirdeklerinin şekil bilgisi ile teşhis yapılmaya çalışılır [5]. Günümüzde bu işlemi bir örüntü sınıflandırma problemi olarak ele alan makine öğrenme teknikleri kullanılmaktadır. İyi huylu ve kötü huylu lezyonlara ait örnekler Şekil 1'de görülmektedir.



Şekil 1. İyi huylu ve kötü huylu lezyon örnekleri (Examples of benign and malignant lesions)

Teknolojik gelişmeler sayesinde makine öğrenme yöntemleri, göğüs kanserinin erken teşhisinde büyük bir potansiyel taşımaktadır ve makine öğrenmesi teşhis sürecini daha hassas, etkili ve hızlı hale getirebilir. Göğüs kanseri teşhisinde hücre çekirdeği ölçümleri, kanser hücrelerinin içsel özelliklerini anlamada kritik bir rol oynar. Kanser hücreleri genellikle büyük, anormal şekilli ve hızlı bölünen çekirdeklere sahip olabilir. Bu hücre çekirdek özellikleri, makine öğrenmesi algoritmaları tarafından değerlendirilebilir ve kanserli hücreleri tespit etmek için kullanılabilir. Bu sayede, kanserli hücreler daha hızlı ve hassas şekilde belirlenebilir.

Makine öğrenmesi genel olarak verilerin toplanması, makine öğrenme modelinin eğitimi ve test aşamalarını içeren bir süreçtir. Makine öğrenmesi yöntemleriyle hastalık teşhisinde eğitim

ve test süreçlerinde veri kümeleri önemli bir yer tutmaktadır. Vakalara ait verilerin yer aldığı bu veri kümelerinde birçok öznelikler yer alabilmektedir. Bu öznelikler hedef (teşhis) ile değişen oranlarda korelasyon göstermektedirler. Öznelik seçim yöntemleri ile hedef ile korelasyonu yüksek öznelikler seçilerek veri kümesinin boyutu azaltılabilmektedir. Öznelik seçimi, sınıflama çalışmalarında alakasız öznelikleri veri kümesinden kaldırarak doğruluk değerini artırır [6]. Veri kümelerinin ham halleriyle eğitime alınması eğitim süresini ve modelin cevap süresini artırmaktadır. Bu çalışmada "Breast Cancer Wisconsin (Diagnostic) Data Set" adlı veri kümesi üzerinde öznelik seçimi teknikleri uygulanmıştır. Daha sonra farklı makine öğrenme teknikleriyle sınıflandırma yapılmıştır. Deneysel çalışmalar sonucunda en yüksek başarıyı gösteren öznelik seçimi ve makine öğrenme yöntemi seçilmiştir. Ayrıca bu yöntem ikilisinin uygulama olarak kullanılabilmesi için bir web ara yüzüne sahip bir karar destek sistemi geliştirilmiştir. Oluşturulan karar destek sistemi ile veri yönetimi kapsamında veriler csv uzantılı bir dosyada saklanarak karar vericilere sunulan sonuçlar için işlenmektedir [7].

1.1. Literatür Taraması (Literature Review)

Günümüzde hemen her alanda olduğu gibi sağlık alanında da veri yönetimi karar süreçleri açısından önemlidir. Verilerin işlenmesi ve sınıflandırılması veri yönetiminin önemli aşamalarındandır. Veri yönetimiyle ilgili yapılan bir çalışmada sağlıkta veri kalitesi ve veri madenciliği uygulamaları araştırılmıştır [8]. Ultrason görüntülerini (OASBUD veri seti) kullanarak yapılan bir çalışmada MobileNetV2 modeli ile %71 başarı oranı elde edilmiştir [9]. Doğan vd. sundukları çalışmada göğüs kanserinin makine öğrenme teknikleriyle teşhisi konusu yer almıştır. Klinik sayısal bulguların yer aldığı bir veri kümesi kullanılmıştır. Bu çalışmada farklı yöntemler denenmiş olup K en yakın komşu algoritmasının en yüksek başarıyı gösterdiği belirtilmiştir K en yakın komşu algoritması ile yapılan sınıflandırmada %99,42 doğruluk oranı elde edilmiştir [10]. Bozkurt Keser ve Keskin, tarafından sunulan çalışmada göğüs kanseri sınıflandırılmıştır. Çalışmada Wisconsin Üniversitesine ait görüntülerin yarıçap, doku ve çevre gibi farklı öznelikleri bulduran bir veri kümesi kullanılmıştır. Önerilen sınıflama yöntemi ile %98,77 doğruluk oranı gözlemlenmiştir [11].

Erdem ve Aydın, histopatolojik görüntülerin sınıflandırılması ilgili bir çalışma sunmuşlardır. Çalışmada iki farklı model olan Inception-V3 ve VGG16 birlikte kullanılarak hibrit bir yaklaşım ortaya konmuştur. Veri kümesi olarak göğüs kanserine ait histopatolojik görüntüleri içeren BreakHis adlı toplam 9109 görüntü içeren bir veri kümesi tercih edilmiştir. Çalışma sonucunda önerilen yaklaşım ile %98,3 doğruluk oranı elde edilmiştir. Veri kümesi üzerinde veri artırma ve yeniden boyutlandırma işlemleri gerçekleştirilmiştir [12].

ResNet esnek yapısından dolayı birçok farklı türe sahip olan ve görüntü sınıflandırma çalışmalarında sıklıkla tercih edilen bir modeldir. Bu çalışmalardan biri Talo tarafından sunulmuştur. Çalışmada bir ResNet türevi olan 50 katmana sahip ResNet-50 modeli eğitim aşamalarında tercih edilmiştir. Çalışmada BreakHis veri seti kullanılmıştır. Bu veri ile ResNet-50 modeli kullanılarak 40X büyütme oranına sahip veriler ile %98,83 doğruluk oranı elde edilmiştir [13].

Görüntülerin sınıflandırılmasında ön eğitilmiş modellerin kullanılması başarı artışını sağlayan, aynı zamanda eğitim süresini azaltabilen bir yaklaşımdır. Spanhol vd. tarafından sunulan çalışmada ön eğitilmiş kullanıma sahip olan AlexNet temelli bir algoritma kullanılmıştır. BreakHis veri setinin kullanıldığı bu çalışmada %85,6 doğruluk oranı gözlemlenmiştir [14]. Han vd. tarafından sunulan çalışmada BreakHis veri kümesi veri artırma yöntemleri ile birlikte kullanılmıştır. Bu çalışmada veriler üzerinde normalizasyon uygulanmıştır. Çalışmada CSDCNN adlı bir derin öğrenme algoritması önerilmiştir. Bu model kullanılarak %96,90 doğruluk oranı 100x büyütülmüş verilerle elde edilmiştir [15].

IRRCNN adlı derin öğrenme modeli kullanılarak yapılan çalışmada veri artırma yöntemlerinin desteğiyle %97,95 doğruluk oranı elde edilmiştir. BreakHis veri kümesi bu çalışmada tercih edilerek eğitim aşaması tamamlanmıştır. Burada paylaşılan başarı değeri veri kümesinde yer alan 40X büyütülen görüntülerle yapılan eğitim sonucunda elde edilen başarı sonucudur [16]. Kahya vd. histopatolojik görüntülerle göğüs kanserinin teşhisi için bir çalışma sunmuşlardır. BreakHis veri kümesi halka açık olması ve farklı büyütme oranlarından dolayı birçok çalışmada tercih edilmektedir. Destek vektör makineleri algoritması kullanılarak en yüksek başarı olan %96,28, 200x büyütme

oranındaki verilerle yakalanmıştır. Çalışmada aktarılan ASSVM modeli ise en yüksek başarıyı 40x büyütme oranı kullanıldığında %94,97 ile elde etmiştir [17]. Lavanya ve Rani tarafından sunulan çalışmada CART algoritması tercih edilmiştir. Bu çalışmada veri seti olarak Breast Cancer Wisconsin (Diagnostic) kullanılmıştır. %92,27 başarı değeri orijinal veri seti ile elde edilmiştir. PCVA öznitelik seçimi yöntemi ile öznitelik sayısı 9'a düşürülerek yeni veri seti elde edilmiştir. Bu veri seti ile %96,99 doğruluk oranı elde edilmiştir. Bu çalışma öznitelik seçimi yöntemleri ile daha az öznitelige sahip veri setleri elde edilebildiği görülmektedir. Ayrıca bu durumun başarıyı artırdığı de ortaya konulmuştur [6].

BreakHis veri setindeki görüntüler 40X, 100X, 200X ve 400X olmak üzere dört farklı şekilde bulunmaktadır. Gupta vd. tarafından sunulan çalışmada BreakHis veri seti kullanılmıştır. En yüksek başarı 200X büyütülmüş görüntülerle %88,89 doğruluk oranı şeklinde elde edilmiştir. Farklı yöntemler birleştirilerek kullanılmıştır [18]. Dandil ve Serin sundukları çalışmada BreakHis veri setini Xception modeli ile eğitimde kullanmışlardır. Çalışmada %98,11 doğruluk oranı, %97,89 kesinlik (precision) ve %97,47 duyarlılık (recall) değerleri elde edilmiştir [19]. Narin ve Kefeli tarafından sunulan çalışmada ResNet ve VGG16 algoritmalarını kullanmışlardır. Ön eğitilmiş ResNet50 ile 200X görüntüler kullanılarak en yüksek başarısı olan %93,03 doğruluk oranı elde edilmiştir (hassaslık-sensitivity %92,81, özgüllük-specificity %93,55). VGG16 ile en yüksek hassasiyet değeri %99,28 olarak gözlemlenmiştir (doğruluk oranı %93,03, özgüllük-specificity %79,03) [20].

Sağlık alanında karar vericilere yardımcı olacak karar destek sistemlerinin kullanım örnekleri literatürde yer almaktadır. Ülkemizde kullanılan Merkezi Hekim Randevu Sistemi (MHRS) sistemi de karar destek sistemi olarak görülebilmektedir [21]. Bu alanda yapılan diğer bir çalışmada covid-19 teşhisi için bir karar destek sistemi oluşturulmuştur. Model bileşeninde yapay zeka kullanılan bu karar destek sistemi ile %90 doğruluk değeri elde edilmiştir [22]. Geliştirilen diğer bir karar destek sistemi ile hemşirelerin yapacakları hasta risk değerlendirmelerinde harcayacakları sürenin azaltılması sağlanmıştır. Farklı durumlar için oluşturulan algoritmalar karar destek sisteminin model bileşenini oluşturmuştur [23].

Göğüs kanserinin teşhisinde literatürde genellikle histopatolojik görüntüler kullanılarak yapılan çalışmalar vardır. Bunun yanı sıra "breast cancer Wisconsin" gibi görüntülere ait öznitelik bilgilerini barındıran veri kümelerinin kullanıldığı çalışmalar da mevcuttur. Bu çalışmalardan birisi Mohammed vd. tarafından sunulmuştur. Çalışmada K en yakın komşu (K-nearest neighbor-KNN) ve destek vektör makinası (Support vector machine-SVM) gibi farklı modeller ile eğitimler yapılmıştır. En yüksek doğruluk oranı SVM ile %97,70 olarak elde edilmiştir [24]. Bu veri kümesinin kullanıldığı diğer bir çalışmada SVM, KNN ve random forest gibi modeller ile eğitim yapılmıştır. Çalışma sonucunda en yüksek doğruluk oranı random forest yöntemi ile %98,77 olarak elde edilmiştir. SVM yönteminin kullanıldığı bir diğer çalışmada quadratic SVM ile göğüs kanserinin sınıflandırılması yapılmıştır. Breast Cancer Wisconsin (Diagnostic) veri setinin kullanıldığı çalışmada %98,1 doğruluk oranı elde edilmiştir [25]. Agarap tarafından yapılan bir çalışmada SVM yöntemi ve Breast Cancer Wisconsin (Diagnostic) Data Set veri seti kullanılarak %96,09 doğruluk değeri elde edilmiştir [26].

Çalışmanın ikinci bölümde kullanılan veri kümesi ve yöntemler detaylandırılmıştır. Üçüncü bölümde elde edilen sonuçlar yöntemlere göre karşılaştırılarak sunulmuştur. Dördüncü bölümde geliştirilen karar destek sistemi örnek değerler üzerinden açıklanmıştır. Beşinci bölümde ise çalışmada elde edilen sonuçlar ele alınarak literatüre olan katkısı üzerinde durulmuştur.

2. MATERIALS AND METHODS (MATERİYAL VE METOD)

Bu çalışmada, öncelikle mevcut veri kümesi üzerinde Principal Component Analysis (PCA), Variance inflation factors (VIF), Recursive feature elimination ve Univariate feature selection öznitelik seçim yöntemleri uygulanarak veri kümesinin yeni versiyonları oluşturulmuştur. Bu yöntemler temelde bir dizi muhtemelen ilişkili değişkeni, temel bileşenler adı verilen daha az sayıda değişkene dönüştürmeyi hedefleyen matematiksel ilkeleri kullanılmaktadırlar [27, 28]. İkinci aşamada, orijinal ve öznitelik seçimi uygulanmış veri kümeleri üzerinde farklı makine öğrenme yöntemleri ile eğitim ve test işlemleri gerçekleştirilmiştir. Makine öğrenme yöntemleri olarak literatürde yerini almış ve birçok sınıflandırma çalışmasında tercih edilen toplamda 5 farklı algoritma seçilerek kullanılmıştır.

Bunlar KNN (K Nearest Neighbors), Naive Bayes, Decision Tree, SVM ve Random Forest algoritmalarıdır. Her bir yöntem hem orijinal veri kümesiyle hem de öznitelik seçimi uygulanmış veri kümeleriyle eğitilmiş ve test edilmiştir.

2.1. Veri Kümesi (Dataset)

Bu çalışmada “Breast Cancer Wisconsin (Diagnostic) Data Set” adlı veri kümesi kullanılmıştır. Veri kümesi, University of Wisconsin-Madison Hastanesi'nde 1995 yılında toplanan ve Dr. William H. Wolberg tarafından oluşturulan bir veritabanına dayanmaktadır. Veri kümesinde, hücreler hakkında çeşitli bilgiler içeren toplam 30 farklı öznitelik (id ve diagnosis alanları hariç) bulunmaktadır. Öznitelikler, bir meme kitlesinin ince iğne aspirasyonunun

sayısallaştırılmış görüntüsünden hesaplanır. Bu öznitelikler, kanser hücrelerine ait lezyon görüntülerinin hücre çekirdeği ölçümlerini ve diğer biyolojik özellikleri temsil eder. Bu veri kümesinde 357 iyi huylu ve 212 kötü huylu olmak üzere toplam 569 örnek yer almaktadır. Tüm veri kümesinin %62,7'sine tekabül eden 357 örnek iyi huylu hücrenin varlığını, %37,3'üne tekabül eden 212 örnek ise kanserli hücrenin varlığını göstermektedir [29].

Her hücre çekirdeği için on (10) gerçek değerli ana öznitelik bulunmaktadır (Tablo 1). Her bir ana öznitelik için ortalama (mean), standart hata (se) ve en büyük 3 değerlerin ortalaması (worst) şeklinde 3 öznitelik değeri (radius_mean, radius_se ve radius_worst gibi) hesaplanmıştır (30 öznitelik) [29].

Table 1. Veri kümesinde yer alan temel öznitelikler (Key attributes included in the dataset)

	Temel Öznitelik	Açıklama	Öznitelikler
1	Radius	Hücrelerin yarıçap değerlerinin ortalama (mean), standart hata (se) ve en kötü değeri (worst) hesaplanır.	radius_mean radius_se radius_worst
2	Texture	Hücrelerin iç yüzeylerinin gri tonlama değişim oranlarının ortalaması (mean), standart hatası (se) ve en kötü değeri (worst) hesaplanır.	texture_mean texture_se texture_worst
3	Perimeter	Hücrelerin çevrelerinin ölçüm değerlerinin ortalama (mean), standart hata (se) ve en kötü değeri (worst) hesaplanır.	perimeter_mean perimeter_se perimeter_worst
4	Area	Hücrelerin yüzey alanlarının ortalama (mean), standart hata (se) ve en kötü durum değeri (worst) hesaplanır.	area_mean area_se area_worst
5	Smoothness	Komşu hücrelerin yarıçap uzunluklarının ortalaması (mean), standart hatası (se) ve en kötü değeri (worst) hesaplanır.	smoothness_mean smoothness_se smoothness_worst
6	Compactness	$perimeter^2 / area - 1,0$	compactness_mean compactness_se compactness_worst
7	Concavity	Hücrelerin etrafındaki girinti ve çıkıntıların ortalaması (mean), standart hatası (se) ve en kötü değeri (worst) hesaplanır.	concavity_mean concavity_se concavity_worst
8	Concave points	Hücrelerin etrafındaki girinti ve çıkıntı alanlarının sayısına göre ortalama (mean), standart hata (se) ve en kötü değer (worst) hesaplanır.	concave points_mean concave points_se concave points_worst
9	Symmetry	Hücrelerin elips şeklindeki değişimlerinin ortalaması (mean), standart hatası (se) ve en kötü değeri (worst) hesaplanır.	symmetry_mean symmetry_se symmetry_worst
10	Fractal dimension	coastline approximation - 1	fractal dimension_mean fractal dimension_se fractal dimension_worst

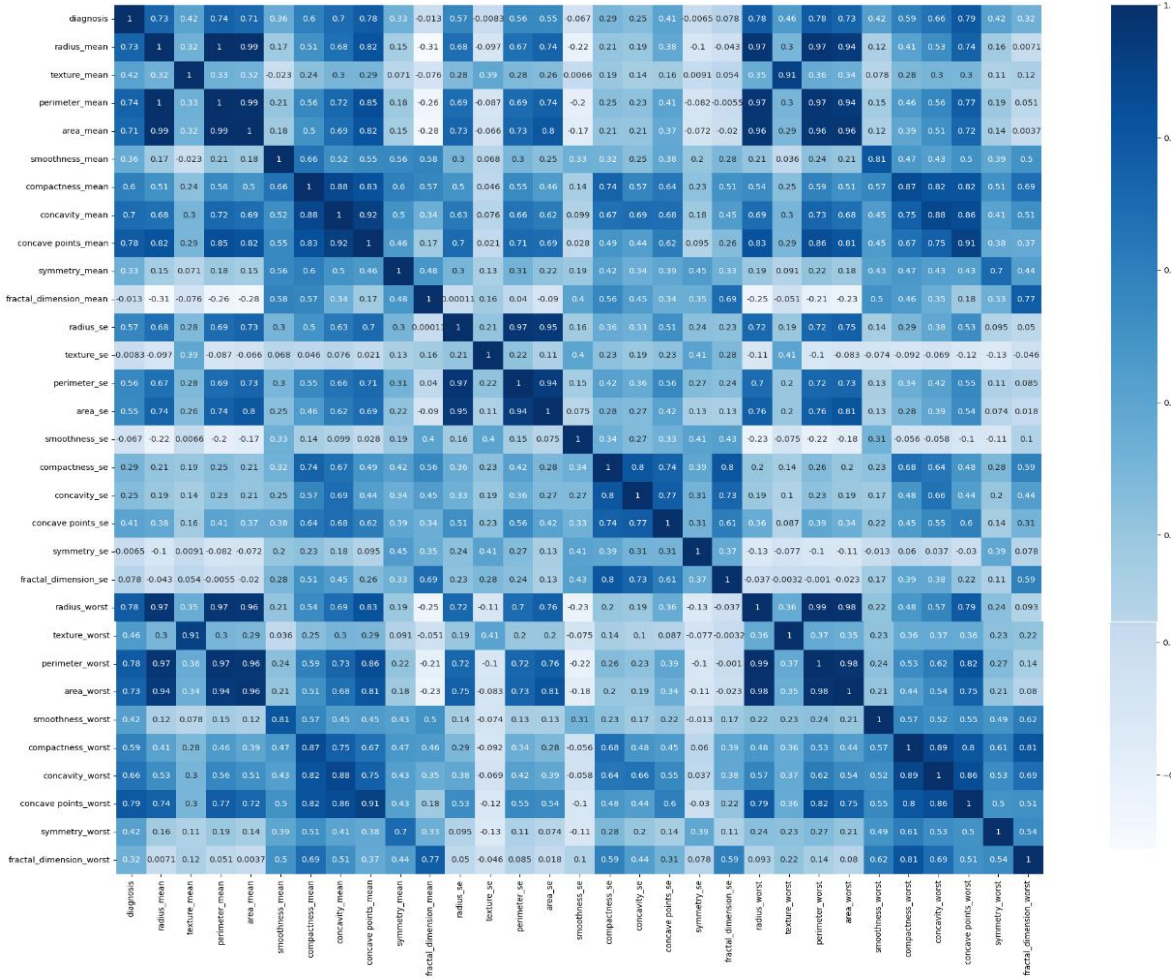
Veri kümesinde yer alan 30 özneliğe ait örneklerin iyi huylu ya da kötü huylu etiket durumuna göre dağılım grafikleri Şekil 2’de sunulmuştur.

Veri kümesindeki 30 özneliğin birbiriyle nasıl ilişkili olduğunu ve iki değişkenli ilişkileri görmek için korelasyon haritası Şekil 3’de gösterilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi fractal_dimension_mean, texture_se gibi bazı özneliklerin diagnosis (teşhis) alanı ile korelasyonları çok düşük değerlerdedir. Bu gibi özneliklerin veri kümesinden çıkarılması veri kümesinin boyutunu azaltarak modellerin performansını artırmaktadır.

Şekil 3’e göre sırasıyla concave point_worst (0,79), perimeter_worst (0,78), radius_worst (0,78), concave points_mean (0,78), perimeter_mean (0,74), area_worst (0,73), area_mean (0,71) öznelikleri diagnosis (teşhis) alanı ile en yüksek korelasyona sahip alanlar olarak görülmektedir. Kullanılan farklı öznelik seçim yöntemlerine göre seçilen öznelikler değişkenlik gösterebilmektedir.



Şekil 2. Veri kümesinde iyi ve kötü huylu dağılımları (Benign and malicious distributions in the dataset)



Şekil 3. Özniteliklere ait korelasyon değerleri (Correlation values of attributes)

2.2. Öznitelik Seçim Yöntemleri (Feature Selection Methods)

Yüksek boyutlu veriler makine öğrenimi için sorun teşkil edebilmektedir. Bu tür verilere dayanan tahmine dayalı modeller aşırı uyum riskini taşıyabilmektedir. Bu sebeple öznitelik seçim yöntemleri ile veri kümeleri üzerinde öznitelik sayısı azaltılabilmektedir. Ayrıca, özniteliklerden birçoğu gereksiz olabilir ve bu da tahmin doğruluğunun bozulmasına yol açabilir. Çalışmada kullanılan öznitelik seçim yöntemleri bu başlık altında kısaca açıklanmıştır [30]. Özellikle medikal alanda veri setleri üzerinde öznitelik seçimi yöntemleri tercih edilmektedir [31, 32].

2.2.1. Temel bileşenler analizi (Principal component analysis-PCA)

PCA, bir veri kümesinin özniteliklerini temel bileşenler (Principal Component-PC) adı verilen ilişkisiz öznitelikler kümesi olarak adlandırılan yeni bir duruma dönüştürmek için kullanılan istatistiksel

bir yöntemdir. Bu sebeple PCA değişkenliğin çoğunu koruyarak, bir veri kümesinin boyutunu azaltmak amacıyla kullanılabilir. Temel Bileşen Analizinin amacı, hedef değişkenler hakkında herhangi bir ön bilgi olmaksızın değişkenler arasındaki en önemli kalıpları veya ilişkileri korurken bir veri kümesinin boyutluluğunu azaltmaktır [30].

2.2.2. Tek değişkenli öznitelik seçimi (Univariate feature selection)

Tek değişkenli öznitelik seçiminde (Univariate feature selection), özneliğin hedef değişkeniyle ilişkisinin gücünü belirlemek için her öznitelik tek tek incelenir. Bu yöntemde farklı özniteliklere göre sıralanmış bir öznitelik listesi döndürülür [33]. Bu algoritmada k kadar en iyi özneliği seçen selectkBest yöntemi sıklıkla tercih edilmektedir.

2.2.3. Özyinelemeli öznelik seçimi (Recursive feature elimination)

Özyinelemeli öznelik seçimi (Recursive feature elimination-RFE), boyut azaltmak için kullanılan bir özyineleme yöntemidir. Bu yöntem mevcut öznelikleri her iterasyonda bir veya daha fazla olacak şekilde azaltmayı amaçlamaktadır. Özyinelemeli öznelik seçiminde geriye doğru eleme işleminde farklı tekniklerin kullanılması mümkündür. Bu teknikler arasında destek vektör makineleri, rastgele orman, doğrusal regresyon yer almaktadır [34]. Özneliklerin belirlenmesinde hesaplayıcı (estimator) olarak karar ağaçları, lojistik regresyon gibi farklı yöntemler kullanılmaktadır.

2.2.4. Fark enflasyon faktörleri (Variance inflation factors-VIF)

Variance Inflation Factors (VIF), tüm modelin varyansının yalnızca söz konusu özneliğe sahip bir modelin varyansına oranını doğrudan ölçer. Bir özneliğin dâhil edilmesinin, modeldeki özneliklerin katsayılarının genel varyansına ne kadar katkıda bulunduğu ölçülür. VIF'nin 1 olması, özneliğin diğer özneliklerinden herhangi biriyle korelasyonunun olmadığını gösterir [28]. VIF yapay zeka uygulamalarında temel olarak veri kümesindeki özneliklerin azaltılması için kullanılan bir yöntemdir.

2.3. Makine Öğrenmesi Yöntemleri (Machine Learning Methods)

Verilerin sınıflandırılması için kullanılan çok sayıda makine öğrenme yöntemleri vardır. Bu yöntemlerin birbirine göre avantaj ve dezavantajları vardır.

2.3.1. K en yakın komşu algoritması (K Nearest Neighborhood - KNN)

K-en yakın komşu (KNN) sınıflandırıcısı sık kullanılan klasik bir yöntemdir. K-En Yakın Komşular (KNN) algoritması, sınıflandırma ve regresyon görevleri için kullanılan popüler bir makine öğrenme tekniğidir. Benzer veri noktalarının benzer etiketlere veya değerlere sahip olma eğiliminde olduğu fikrine dayanır. Bu yöntemde bazı öznelik vektörleri tarafından temsil edilen bilinmeyen bir örnek öznelik uzayında bir nokta olarak sınıflandırmak için uzaklık hesaplanır. Bu uzaklık hesabında oklid, manhattan gibi farklı teknikler kullanılabilir. Sınıflandırma işleminde bulunulacak örnek veri noktasının bulunduğu sınıfın ve en yakın komşunun, k değerine (benzerliğe) göre belirlendiği bir denetimli

makine öğrenme yöntemi olarak ifade edilmektedir. Yeni bir veri geldiğinde mevcut verilerle uzaklıkları hesaplanır ve en küçük uzaklık değerine sahip sınıfa dâhil edilir [35].

2.3.2. Naive bayes - Gaussian

Naive Bayes sınıflandırma algoritması, adını Matematikçi Thomas Bayes'den alan bir sınıflandırma/ kategorilendirme algoritmasıdır. Naive Bayes sınıflandırması olasılık ilkelerine göre tanımlanmış bir dizi hesaplama ile sisteme sunulan verilerin sınıfını tespit etmeyi amaçlar. Naive Bayes sınıflandırmasında eğitim için sunulan verilerin mutlaka bir sınıfı/kategorisi bulunmalıdır. Eğitilmiş veriler üzerinde yapılan olasılık işlemleri ile sisteme sunulan yeni test verileri, daha önce elde edilmiş olasılık değerlerine göre öğretilir ve verilen test verisinin hangi kategoride olduğu tespit edilmeye çalışılır [36].

2.3.3. Karar ağaçları (Decision Trees)

Karar ağacı, sınıflandırma ve regresyon görevleri için parametrik olmayan denetimli bir öğrenme, verilerin sınıflandırılması ve tahmin edilmesi için kullanılan bir makine öğrenimi algoritmasıdır. Bu algoritma, bir ağacın dalları gibi bir dizi karar düğümüne dayanır ve her düğümde bir öznelik test edilir. Test sonucuna göre, ağaç farklı dallara ayrılır ve sonunda bir tahmin veya sınıflandırma yapılır [37].

2.3.4. Destek vektör makineleri (Support vector machines -SVM)

Destek vektör makinesi algoritmasının amacı, N boyutlu bir uzayda (N - öznelik sayısı) veri noktalarını belirgin bir şekilde sınıflandıran bir hiperdüzlem bulmaktır. İki veri noktası sınıfını ayırmak için en uygun hiperdüzlem bulunmaya çalışılır. Destek vektör makineleri (SVM'ler), sınıflandırma, regresyon ve aykırı değerlerin tespiti için kullanılan denetimli bir öğrenme yöntemidir [38].

2.3.5. Rastgele orman algoritması (Random forest algorithm)

Rastgele Orman algoritması denetimli bir sınıflandırma algoritmasıdır. Algoritmada birden fazla ağaçtan oluşabilmektedir. Rastgele Orman algoritması ile Karar Ağacı algoritması arasındaki temel fark, rastgele orman'da kök düğümü bulma ve düğümleri bölme işlemlerinin rastgele oluşuyor

olmasıdır. Bu algoritma ile sınıflandırma ve regresyon için, eğitim aşamasında çok sayıda karar ağacı oluşturarak probleme göre sınıf tahmini yapılmaktadır [39].

Topluluk öğrenme yöntemlerinden biri olan Rastgele Orman (RF) algoritmasında verilerden örnekler seçilerek rastgelelik sağlanır. Her ağacın aldığı kararlar birleştirilerek sonuçlandırılır. Rastgele orman verideki aşırı öğrenmeye ve eksik değerlere karşı güçlüdür [40]. Rastgele orman algoritmasında kullanılan önemli parametrelerden biri toplam kaç ağacın yer alacağıdır. Bu çalışmada kullanılan scikit-learn kütüphanesinde yer alan RandomForestClassifier fonksiyonunda n_estimators ağaç sayısını belirler [41].

2.4. Performans Metrikleri (Performance Metrics)

Çalışmada sınıflandırma alanında literatürde sıklıkla kullanılan doğruluk, duyarlılık, özgüllük, kesinlik ve f-skor performans parametreleri tercih edilmiştir. Bu metrikler kısaca açıklanmıştır.

- **Doğruluk:** Doğruluk değeri modelde doğru tahmin edilen alanların toplam veri kümesine oranı ile hesaplanmaktadır (1) [42].

$$\text{Doğruluk} = (GP + GN)/(GP + GN + YP + YN) \quad (1)$$

- **Duyarlılık:** Duyarlılık ise pozitif olarak tahmin edilmesi beklenenlerin hangi sayıda pozitif olarak tahmin edildiğini göstermektedir (2) [43].

$$\text{Duyarlılık} = GP/GP + YN \quad (2)$$

- **Özgüllük:** Özgüllük, gerçek negatif oran olarak ifade edilir ve bir testte negatif sonuç veren gerçekten de negatif olan örneklerin oranıdır (3) [43].

$$\text{Özgüllük} = GN/GN + YP \quad (3)$$

- **Kesinlik:** Kesinlik pozitif olarak tahminlenen değerlerin gerçekten kaç tanesinin pozitif olduğunun göstergesidir (4) [43].

$$\text{Kesinlik} = GP/GP + YP \quad (4)$$

- **F-Skor:** F-puanı, bir sistemin kesinlik ve geri çağırma değerlerinin harmonik ortalamasıdır [43].

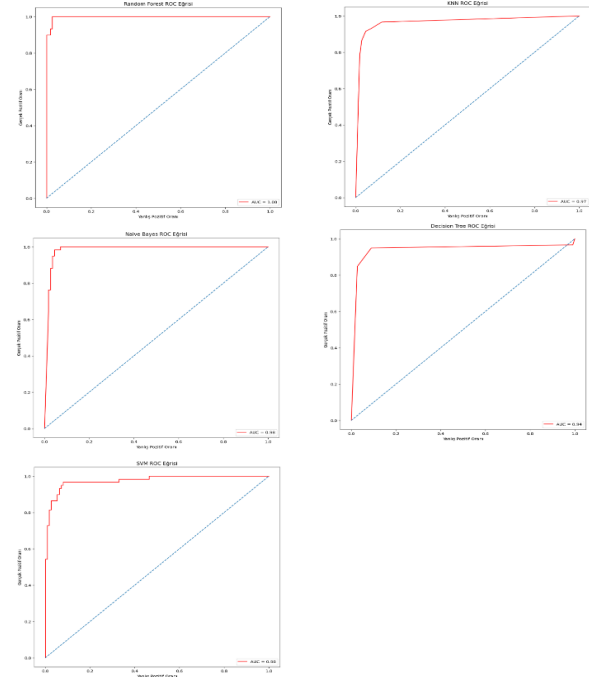
$$\text{F-Skor} = 2 * (\text{Kesinlik} * \text{Duyarlılık})/(\text{Kesinlik} + \text{Duyarlılık}) \quad (5)$$

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

Bu çalışmada, göğüs kanserinin sınıflandırması için hem orijinal hem de öznetelik seçimi uygulanmış veri kümeleri kullanılmıştır. Tüm olası kombinasyonlar uygulanmaya çalışılarak en uygun öznetelik seçimi ve makine öğrenme yöntem ikilisi belirlenmeye çalışılmıştır. Veri kümeleri %70 eğitim %30 test olacak şekilde ayrılmışlardır.

3.1. Orijinal Veri Kümesi ile Elde Edilen Deneysel Sonuçlar (Experimental Results with Original Data Set)

Öncelikle orijinal veri kümesi öznetelik seçimine tabi tutulmadan farklı makine öğrenme algoritmaları ile eğitilmiş, ve test edilmiştir. Daha sonra her bir makine öğrenme modeline ait ROC eğrileri elde edilmiştir (Şekil 4). Her bir model için ağırlıklı ortalama kullanılarak elde edilen doğruluk (accuracy), duyarlılık, kesinlik ve özgüllük, f-skor (f-score) değerleri Tablo 2’de gösterilmiştir.



Şekil 4. Modellere ait ROC eğrileri (ROC curves of models)

Tablo 2. Orijinal veri kümesi ile elde edilen sonuçlar (Results with original dataset)

Yöntem	Parametre	Doğruluk %	Duyarlılık %	Özgüllük %	Kesinlik %	F-Skor %
KNN (K Nearest Neighbors)	K=5 manhattan	94,15	94,00	94,00	94,00	94,00
Naive Bayes	GaussianNB	95,91	96,00	96,00	96,00	96,00
Decision Tree	-	92,98	93,00	93,00	93,00	93,00
SVM	-	93,57	94,00	94,00	94,00	93,00
Random Forest	-	97,66	98,00	98,00	98,00	98,00

3.2. Öznitelik Seçimi ile Oluşan Veri Kümeleri ile Elde Edilen Deneysel Sonuçlar (Experimental Results Obtained with Data Sets Created by Feature Selection)

Orijinal veri kümesi üzerinde Principal Component Analysis (PCA), Variance inflation factors (VIF), Recursive feature elimination ve Univariate feature selection olmak üzere 4 farklı öznitelik seçme yöntemi uygulanarak veri kümesinin yeni versiyonları oluşturulmuştur. Daha sonra oluşturulan bu yeni veri kümeleri KNN, Naive Bayes, Decision Tree, SVM ve Random Forest makine öğrenme algoritmalarına uygulanarak en başarılı öznitelik seçim yöntemi ve makine öğrenme modeli tespit edilmiştir.

Tablo 3, 4, 5 ve 6 her bir öznitelik seçim yöntemine göre elde edilen sonuçları göstermektedir. Tablo 3, 4, 5 ve 6 ile sunulan sonuçlara bakıldığında en yüksek doğruluk, duyarlılık, kesinlik ve f-skor değerleri Variance Inflation Factors öznitelik seçimi ve random forest yöntem ikilisi ile elde edilmiştir.

Variance Inflation Factors ile veri kümesinde yer alan 30 öznitelik 5'e düşürülmüştür. Bütün öznitelik indirilerek karşılaştırma olanağı sağlanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre doğruluk, duyarlılık,

özgüllük, kesinlik ve f-Skor metriklerine göre en yüksek başarıyı gösteren Random Forest ve Variance Inflation Factors ikilisi karar destek sisteminin model bileşeni için seçilmiştir.

Variance Inflation Factors öznitelik seçimi yöntemine göre teşhis alanıyla en yüksek korelasyona sahip ilk 5 öznitelik 'radius_mean', 'perimeter_mean', 'radius_worst', 'perimeter_worst' ve 'area_mean' olarak belirlenmiştir. Bu alanlara göre veri setinin boyutu azaltılarak modelde kullanılmıştır.

Çalışmada Variance Inflation Factors ile elde edilen veri kümesinin Random Forest modeline uygulanması sonucu elde edilen karışıklık matrisine ait sonuçlar Tablo 7'de sunulmuştur. Şekil 5'te ise bu ikili ile elde edilen ROC eğrisi görülmektedir.

Tablo 3. PCA ile elde edilen veri kümesine ait deneysel sonuçları (Experimental results of the data set conducted with PCA)

Öznitelik Seçimi Yöntemi	Makine Öğrenme Yöntemi	Öznitelik Sayısı	Doğruluk %	Duyarlılık %	Özgüllük %	Kesinlik %	F-Skor %
PCA	KNN (k=5)	5	94,15	94,00	94,00	94,00	94,00
PCA	Naive Bayes	5	93,57	94,00	94,00	94,00	94,00
PCA	Decision Tree	5	96,49	96,00	97,00	97,00	97,00
PCA	SVM	5	93,57	94,00	94,00	94,00	94,00
PCA	Random Forest n_estimators=95	5	95,32	96,00	96,00	96,00	96,00

Tablo 4. Variance inflation factors ile elde edilen veri kümesine ait deneysel sonuçları (Experimental results of the data set conducted with variance inflation factors)

Öznitelik Yöntemi	Seçimi	Makine Öğrenme Yöntemi	Öznitelik Sayısı	Doğruluk %	Duyarlılık %	Özgüllük %	Kesinlik %	F-Skor %
Variance Factors	Inflation	KNN (k=5)	5	92,40	94,00	94,00	94,00	94,00
Variance Factors	Inflation	Naive Bayes	5	94,74	95,00	95,00	95,00	95,00
Variance Factors	Inflation	Decision Tree	5	96,49	96,00	96,00	96,00	96,00
Variance Factors	Inflation	SVM	5	93,80	94,00	94,00	94,00	93,00
Variance Factors	Inflation	Random Forest	5	98,83	99,00	99,00	99,00	99,00

Tablo 5. Univariate feature selection ile elde edilen veri kümesine ait deneysel sonuçları (Experimental results of the data set conducted with univariate feature selection)

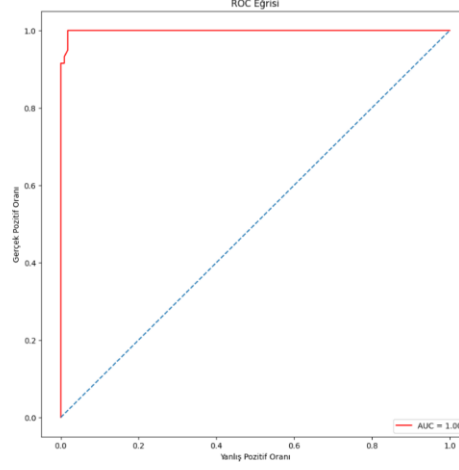
Öznitelik Yöntemi	Seçimi	Makine Öğrenme Yöntemi	Öznitelik Sayısı	Doğruluk %	Duyarlılık %	Özgüllük %	Kesinlik %	F-Skor %
Univariate selection	feature	KNN (k=5)	5	93,50	94,00	94,00	94,00	94,00
Univariate selection	feature	Naive Bayes	5	91,81	92,00	92,00	92,00	92,00
Univariate selection	feature	Decision Tree	5	92,10	92,00	92,00	92,00	92,00
Univariate selection	feature	SVM	5	93,60	94,00	94,00	94,00	93,00
Univariate selection	feature	Random Forest	5	95,32	95,00	95,00	95,00	95,00

Tablo 6. Recursive feature elimination (estimator: lojistik regresyon) ile elde edilen veri kümesine ait deneysel sonuçları (Experimental results of the data set conducted with recursive feature elimination)

Öznitelik Seçimi Yöntemi	Makine Öğrenme Yöntemi	Öznitelik Sayısı	Doğruluk %	Duyarlılık %	Özgüllük %	Kesinlik %	F-Skor %
Recursive feature elimination	KNN (k=5)	5	95,61	96,00	96,00	96,00	96,00
Recursive feature elimination	Naive Bayes	5	90,35	90,00	90,00	91,00	90,00
Recursive feature elimination	Decision Tree	5	94,74	95,00	95,00	95,00	95,00
Recursive feature elimination	SVM	5	92,11	92,00	92,00	92,00	92,00
Recursive feature elimination	Random Forest	5	94,91	95,00	95,00	95,00	95,00

Tablo 7. Variance inflation factors ve random forest ikilisi ile elde edilen deneysel sonuçlar (Experimental results obtained with variance inflation factors and random forest duo)

Doğruluk %	Duyarlılık %	Özgüllük %	Kesinlik %	F Skor %
98,83	96,00	99,00	99,00	99,00

**Şekil 5.** Recursive feature selection ve random forest ikilisi ile elde edilen ROC eğrisi (ROC curve obtained with recursive feature selection and random forest duo)**Tablo 8.** Karşılaştırma sonuçları (Results of comparisons)

Referans	Veri Seti	Öz nitelik Seçimi Yöntemi – Öz nitelik Sayısı	Makine Öğrenme Yöntemi	Doğruluk %	Hassasiyet %	Duyarlılık %	Kesinlik %
Doğan vd. [10]	Breast Cancer Wisconsin Diagnostic	PCA	KNN (k=3)	92,40	94,50	-	93,64
Mohammed vd. [24]	Breast Cancer Wisconsin Diagnostic	-	SVM	97,70	-	97,70	97,70
Lavanya ve Rani [6]	Breast Cancer Wisconsin Diagnostic	Symmetric UncertAttri butesetEval - 8	CART	94,72	-	-	-
Obaid vd., [25]	Breast Cancer Wisconsin Diagnostic	-	SVM	98,10	-	-	-
Agarap [26]	Breast Cancer Wisconsin Diagnostic	-	SVM	96,09	-	-	-
Rasol vd., [44]	Breast Cancer Wisconsin Diagnostic	RFS-15	SVM	98,68	-	98,22	98,95
Çalışma: Orijinal Veri Seti ile	Breast Cancer Wisconsin Diagnostic	-	Random Forest	97,66	98,00	98,00	98,00
Çalışma: VIF Öz nitelik seçimi ile	Breast Cancer Wisconsin Diagnostic	VIF - 5	Random Forest	98,83	99,00	99,00	99,00

Literatürde göğüs kanserinin teşhisi ile ilgili çok sayıda çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmalarda tomografi görüntüleri ya da sayısallaştırılmış öznitelik verileri kullanılmaktadır. Bu çalışmada sayısallaştırılmış öznitelik değerlerinden oluşan Breast Cancer Wisconsin (Diagnostic) Data Set tercih edildiği için literatürde bu veri kümesinin kullanıldığı çalışmalar üzerinde durulmuştur.

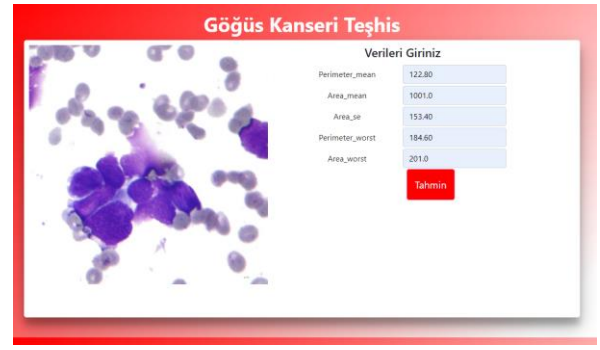
Tablo 8’de Breast Cancer Wisconsin (Diagnostic) Data Set isimli veri kümesini kullanan çalışmalara ait sonuçlar, bu çalışmada elde edilen sonuçlarla birlikte karşılaştırılmıştır.

4. GELİŞTİRİLEN KARAR DESTEK SİSTEMİ (DEVELOPED DECISION SUPPORT SYSTEM)

Karar destek sistemlerinin sağlık alanında kullanımı giderek yaygınlaşmaktadır. Karar destek sistemleri model, arayüz ve veri olmak üzere üç temel bileşene sahiptir. Çalışma kapsamında geliştirilen Karar destek sisteminin veri bileşenini kullanılan Breast Cancer Wisconsin (Diagnostic) Data Set adlı veri kümesi oluşturmaktadır.

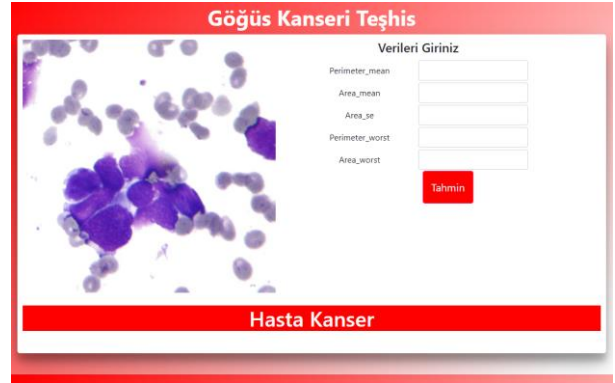
Öncelikle Python kodlama dilinde sade basit bir web ara yüzü oluşturmak için Flask kütüphanesi tercih edilmiştir. Flask, bir web uygulamasının tüm temel özelliklerini sunan bir mikro çerçevedir (framework). Python ile birlikte kullanılan Flask kütüphanesi ile Python uygulamaları için web arayüzleri oluşturulabilmektedir [45].

Model bileşeninde ise makine öğrenme yöntemleri yer almaktadır. Model bileşeninde makine öğrenmesinin yer almasıyla göğüs kanseri teşhisinde yüksek başarı sağlayan bir karar destek sistemi sunulmuştur. Şekil 6’da görüldüğü gibi ara yüz üzerinden 5 parametre girilerek tahmin sonucu elde edilebilmektedir. Bu 5 parametre, öznitelik seçimi sonucu teşhis (diagnosis) sütunuyla en yüksek korelasyona sahip ilk 5 özniteliktir. Bu değerler girildikten sonra “Tahmin” butonu kullanılarak model üzerinden elde edilen sonuç görülebilmektedir. Flask ile oluşturulan ara yüz render web sitesi kullanılarak deploy edilmiştir.



Şekil 6. Web ara yüz giriş sayfası (Web interface login page)

Web ara yüzünde tahmin butonuna basıldıktan sonra model ile elde edilen sonuç metin üzerinden kullanıcıya sunulmaktadır. Şekil 7’de görüldüğü gibi 5 parametreye göre elde edilen sonuç kullanıcıya tahmin butonunun altında sunulmaktadır.



Şekil 7. Web ara yüz sunumu (Web interface presentation)

5. SONUÇ VE ÖNERİLER (RESULTS AND SUGGESTIONS)

Çalışmada öznitelik seçimi ve makine öğrenme yöntemi ikilisinden en yüksek doğruluk (accuracy), duyarlılık (recall), özgüllük (specificity), kesinlik (precision) ve f-skor (f-score) değerlerinin elde edildiği Variance Inflation Factors öznitelik seçimi ve random forest makine öğrenme yöntemi web ara yüzünde tercih edilmiştir. Random forest algoritması bir düğümü bölerken en önemli özelliği aramak yerine, rastgele bir özellik alt kümesi arasından en iyi özelliği arar. Özniteliklerin sınıflandırılmasında literatürde en başarılı algoritmalar arasında yer almaktadır. Variance Inflation Factors ise birden fazla değişken arasındaki korelasyonu belirlemede etkili bir yöntemdir. Orijinal veri kümesinde random forest yöntemi ile ulaşılabilen en yüksek doğruluk değeri % 97,66 olurken, Variance Inflation Factors

öznitelik seçimi ve random forest yöntemiyle elde edilen doğruluk değeri %98,83 olarak gözlemlenmiştir. Variance Inflation Factors yöntemiyle öznitelik sayısı 30'dan 5'e düşürülmüştür. Bu sonuçlara göre öznitelik seçimi ile veri kümesinin boyutu azaltılmış ve doğruluk, duyarlılık, Özgüllük, kesinlik ve f-skör değerlerinde düşüş gözlemlenmemiştir. Öznitelik seçimi kullanılarak mevcut veri kümesinin boyutu azalmakta ve modelin daha hızlı çalışabilmesi sağlanmaktadır.

Çalışmanın web ortamına yüklenerek kullanıcıların erişimine açılabilmesi için Flask kütüphanesi ile bir web ara yüzü oluşturulmuştur. Flask ile web tabanlı bir ara yüz oluşturulmasının en büyük avantajı bu web sitesinin internet ortamına yüklenmesiyle erişilebilirliğinin artmasıdır. Bu çalışmada ücretsiz hosting hizmeti veren render.com adlı site kullanılmıştır. Sonuç olarak farklı öznitelik seçimi ve makine öğrenmesi kombinasyonları ile daha yüksek başarıyı daha az öznitelikle elde edecek çözümler sonraki çalışmalarda elde edilebilir. Bu çalışma farklı öznitelik seçimi ve makine öğrenme tekniklerinin karşılaştırması açısından önemli olabilecektir. Çalışmada veri kümesinde yer alan öznitelik sayısı 30'dan 5'e düşürülerek veri kümesinin boyutu düşürülmüştür. Yeni veri kümesi ile doğruluk (accuracy) % 1,17, kesinlik (precision) %1, duyarlılık (recall) %1, özgüllük (specificity) %1 ve f-skör (f-score) %1 artış göstermiştir.

Kanserin erken teşhisi hastaların tedavi edilebilmesinde önemli bir etkidir. Bu çalışma ile kanserin erken teşhisinde karar vericilere yardımcı olacak bir sistem sunulmaktadır. Kanser tedavisinde hastaları yoran kemoterapi gibi yöntemlerin yanı sıra Nano/mikromotor gibi yöntemler de geliştirilmektedir. Nano/mikromotorlar enerjiyi harekete dönüştürebilen küçük makineler olarak tanımlanabilir [46]. Sunulan çalışma teşhis başarısını artırması, tedavinin erken başlaması ve en uygun öznitelik seçimi ve yapay zeka yöntem ikilisini bulmaya çalışması ile birlikte literature katkı sağlayacaktır.

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 used in their studies do not require ethics committee approval and/or legal-specific permission.

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

Cihan AKYEL: Deneyle yapılmış, sonuçlarını analiz etmiş ve makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

He conducted the experiments, analyzed the results and wrote the article.

Bünyamin CİYLAN: Veri setlerini düzenlemiş ve makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

He organized the data sets and wrote the article.

Hüseyin POLAT: Çalışmada kullanılan tablolar, grafikler ve şekillerle ilgili düzenlemeleri yapmıştır. Çalışmada kullanılan metodların oluşturulmasında katkı sağlamıştır.

He made arrangements for the tables, graphs and figures used in the study. He contributed to the creation of the methods used in the study.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

There is no conflict of interest in this study.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Sung H, Ferlay J, Siegel RL, Laversanne M, Soerjomataram I, Jemal A, Bray F. Global Cancer Statistics 2020: GLOBOCAN Estimates of Incidence and Mortality Worldwide for 36 Cancers in 185 Countries. CA A Cancer Journal for Clinicians. 2021; 2021: 209–249.
- [2] Koçak HS, Olçar E, Güngörmüş Z. Birinci Derece Yakını Meme Kanseri Kadınların Korku Düzeyinin Erken Tanı Davranışlarına Etkisi. Hemşirelik Bilimi Dergisi. 2022; 6: 22-29.
- [3] Altındağ Bayrak E, Kırıcı P, Ensari T, Seven E, Dağtekin M. Göğüs Kanseri Verileri Üzerinde Makine Öğrenmesi Yöntemlerinin Uygulanması. Journal of Intelligent Systems: Theory and Applications. 2022; 5: 35-41.
- [4] Pantel P. Breast cancer diagnosis and prognosis. <https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=78266df15a9754b7661f1f01722f9f4aea4244fb>
- [5] McMorran J, Crowther DC. Fine needle aspiration cytology (breast),

- <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-031-26900-4>
- [6] Lavanya D, Rani DKU. Analysis of feature selection with classification: Breast cancer datasets. *Indian Journal of Computer Science and Engineering (IJCSSE)*. 2011; 2: 756-763.
- [7] Tamer HY. Akıllı Şehirlerde Veri Yönetimi Yaklaşımları. *Abant Sosyal Bilimler Dergisi*. 2022; 22: 519-534.
- [8] Koçak A, Ergün PMA. Sağlıkta veri kalitesi ve veri madenciliği uygulamaları. *Disiplinlerarası Yenilik Araştırmaları Dergisi*. 2023; 3: 23-30.
- [9] Demir, F. Ultrason RF Sinyallerinden Göğüs Kanserinin Derin Öğrenme Tabanlı Yaklaşımlarla Tespit Edilmesi. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*. 2022; 34: 761-768.
- [10] Doğan, H, Tatar A, Tanyıldızı AK, Taşar B. Breast Cancer Diagnosis with Machine Learning Techniques. *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*. 2022; 11: 594-603.
- [11] Bozkurt Keser S, Keskin K. Ağırlıklı Oy Tabanlı Topluluk Sınıflandırma Algoritması ile Göğüs Kanseri Teşhisi. *Mühendislik Bilimleri ve Araştırmaları Dergisi*. 2022; 4: 112-120.
- [12] Erdem E, Aydın T. Göğüs Kanseri Histopatolojik Görüntü Sınıflandırması. *Bilişim Teknolojileri Dergisi*. 2022; 14: 87-94.
- [13] Talo M. Meme Kanseri Histopatolojik Görüntülerinin Konvolüsyonel Sinir Ağları ile Sınıflandırılması. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*. 2019; 31: 391-398.
- [14] Spanhol F, Oliveira E, Petitjean C, Heutte L. Breast cancer histopathological image classification using Convolutional Neural Networks. *International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN)*. 2016; 32: 2560-2567.
- [15] Han Z, Wei B, Zheng Y, Yin Y, Li K, Li S. Breast cancer multi-classification from histopathological images with structured deep learning model. *Scientific reports*, 2017; 7: 4172-4182.
- [16] Alom Z, Yakopcic C, Taha M, Asari K. Breast Cancer Classification from Histopathological Images with Inception Recurrent Residual Convolutional Neural Network. *J Digit Imaging*, 2019; 45: 1-13.
- [17] Kahya, AAM, Al-Hayani W, Algamal ZY. Classification of breast cancer histopathology images based on adaptive sparse support vector machine. *Journal of Applied Mathematics and Bioinformatics*. 2017; 7: 1-15.
- [18] Gupta V, Bhavsar A. Breast Cancer Histopathological Image Classification: Is Magnification Important. 2017 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (CVPRW): Proceedings. 2017: 769-776.
- [19] Dandıl E, Serin Z. Derin Sinir Ağları Kullanarak Histopatolojik Görüntülerde Meme Kanseri Tespiti. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*. 2020; Ejosat Özel Sayı: 451-463.
- [20] Narin A, Kefeli SK. Meme Kanserinin Evrimsel Sinir Ağı Modelleriyle Tespitinde Farklı Görüntü Büyütme Oranlarının Etkisi. *Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisi*. 2020; 10: 186-194.
- [21] Akalın B, Veranyurt Ü. Sağlıkta Dijitalleşme Ve Yapay Zekâ. *SDÜ Sağlık Yönetimi Dergisi*. 2022; 2: 128-137.
- [22] Hoşgör H, Güngördü H. Sağlıkta Yapay Zekanın Kullanım Alanları Üzerine Nitel Bir Araştırma. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*. 2022; 35: 395-407.
- [23] Purkuloğlu E, Ün A, Yürürdurmaz F. Hemşire Karar Destek Sistemleri Uygulamaları. *Hacettepe Sağlık İdaresi Dergisi*. 2019; 22: 491-514.
- [24] Mohammed TR, Al-Aaraj H, Rubbai YSY, Arabyat MM. Diagnosis of Breast Cancer Pathology on the Wisconsin Dataset with the Help of Data Mining Classification and Clustering Techniques. *Applied Bionics and Biomechanics*. 2022; 2022: 1-9.
- [25] Obaid OI, Mohammed MA, Ghani MKA, Mostafa A, Taha F. Evaluating the performance of machine learning techniques in the classification of Wisconsin Breast Cancer. *International Journal of Engineering & Technology*. 2018; 7: 160-166.
- [26] Agarap AFM. On breast cancer detection: an application of machine learning algorithms on the wisconsin diagnostic dataset. *The 2nd International Conference on Machine Learning and Soft Computing (ICMLSC '18): Proceedings*. 2018: 1-5.
- [27] Salem N, Hussein S. Data dimensional reduction and principal components analysis. *Procedia Computer Science*. 2019; 161: 292-299.
- [28] Marcoulides KM, Raykov T. Evaluation of Variance Inflation Factors in Regression Models Using Latent Variable Modeling Methods. *Educational and Psychological Measurement*. 2019; 79: 874-882.
- [29] Çetin Taş İ. An Applied Analysis of Breast Cancer Diagnosis By Using Different Methods. *Abant Sağlık Bilimleri ve Teknolojileri Dergisi*. 2022; 2: 72-87.
- [30] Howley T, Madden MG, O'Connell M, Ryder AG. The Effect of Principal Component

- Analysis on Machine Learning Accuracy with High Dimensional Spectral Data. Knowledge-Based Systems. 2006; 19: 209-222.
- [31] Parlak, B, Uysal, AK. On feature weighting and selection for medical document classification. In Developments and advances in intelligent systems and applications. Springer International Publishing. 2018; 718: 269-282.
- [32] Parlak, B, Uysal, AK. On classification of abstracts obtained from medical journals. Journal of Information Science. 2020; 46: 648-663.
- [33] Subho RH, Chowdhury R, Chaki D, Islam S, Rahman M. A Univariate Feature Selection Approach for Finding Key Factors of Restaurant Business. IEEE Region 10 Symposium: Proceedings. 2019: 605-610.
- [34] Niquini FGF, Branches AMB, Costa JFCL, Moreira GC, Schneider CL, Araújo FC, Capponi LN. Recursive Feature Elimination and Neural Networks Applied to the Forecast of Mass and Metallurgical Recoveries in A Brazilian Phosphate Mine. Minerals. 2023; 13: 748-759.
- [35] Hu LY, Huang MW, Ke SW et al. The distance function effect on k-nearest neighbor classification for medical datasets. SpringerPlus. 2016; 5: 1-9.
- [36] Anand MV, KiranBala B, Srividhya SR, Kavitha C, Younus M, Rahman H. Gaussian Naïve Bayes Algorithm: A Reliable Technique Involved in the Assortment of the Segregation in Cancer. Mobile Information Systems. 2022; 2022: 1-7.
- [37] Song YY, Lu Y. Decision tree methods: applications for classification and prediction. Shanghai Arch Psychiatry. 2015; 27: 130-135.
- [38] Cervantes J, Garcia-Lamont F, Rodríguez-Mazahua L, Lopez A. A comprehensive survey on support vector machine classification: Applications, challenges and trends. Neurocomputing. 2020; 408: 189-215.
- [39] Breiman L. Random Forests. Machine Learning. 2001; 45: 5-32.
- [40] Şahin H, İçen D. Application of Random Forest Algorithm for the Prediction of Online Food Delivery Service Delay. Turkish Journal of Forecasting. 2021; 5: 1-11.
- [41] Saygılı A. Classification and Diagnostic Prediction of Breast Cancers via Different Classifiers. International Scientific and Vocational Studies Journal. 2018; 2: 48-56.
- [42] Powers, D, Powers A. Evaluation: From precision, recall and F-measure to ROC, informedness, markedness & correlation. Journal of Machine Learning Technologies. 2011; 2: 2229-3981.
- [43] Sokolova, M, Japkowicz, N, Szpakowicz, S. Beyond Accuracy, F-Score and ROC: A Family of Discriminant Measures for Performance Evaluation. AI 2006: Advances in Artificial Intelligence. Lecture Notes in Computer Science. 2006; 4304: 1015-1021.
- [44] Rasool A, Bunternghit C, Tiejian L, Islam MR, Qu Q, Jiang Q. Improved Machine Learning-Based Predictive Models for Breast Cancer Diagnosis. International Journal of Environmental Research and Public Health. 2022; 19: 1-19.
- [45] Aslam FA, Mohammed HN, Lokhande PS. Efficient Way Of Web Development Using Python And Flask, International Journal of Advanced Research in Computer Science. 2015; 6: 54-57.
- [46] Türker A, Bülbül YE, Öksüz A, Yurdabak Karaca G. Kanser Teşhis ve Tedavisinde Nano/mikromotor Teknolojisi. Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology. 2023; 11: 652-672.

Farklı YOLO Algoritmalarının Gerçek Zamanlı İHA Tespitine Etkileri ve Karşılaştırmalı Analizi

Hediye ORHAN^{1*}  Ferda Nur ARICI¹ 

¹Necmettin Erbakan University, Department of Computer Engineering, Konya, Turkey

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 19/12/2023
Düzeltilme: 12/03/2024
Kabul: 29/03/2024

Anahtar Kelimeler

İha
Görüntü işleme
Derin öğrenme
Opencv
Yapay zekâ
Yolo

Article Info

Research article
Received: 19/12/2023
Revision: 12/03/2024
Accepted: 29/03/2024

Keywords

Uav
Image processing
Deep learning
Opencv
Artificial intelligence
Yolo

Grafik Özet (Graphical/Tabular Abstract)

Bu çalışmada, kullanım kolaylığı için tasarlanan ara yüz örneği, Şekil A'da sunulmaktadır. Bu ara yüz, çalışmanın başarıyla tamamlanan kısmını kullanıcıya net bir şekilde iletmek için tasarlanmıştır. / In this study, an example of the interface designed for ease of use is presented in Figure A. This interface is designed to clearly communicate to the user the successfully completed part of the work.



Şekil A: Tasarlanan ara yüz / Figure A: Designed interface

Önemli noktalar (Highlights)

- İHA'nın otonom görevi sırasında gerçek zamanlı olarak hedef tespit etmesi üzerine odaklanılmıştır. / The focus is on real-time target detection of the UAV during its autonomous mission.
- Hedef İHA'nın tespiti için farklı Yolo algoritmaları kullanılmıştır ve bu algoritmalar karşılaştırılmıştır. / Different Yolo algorithms were used to detect the target UAV and these algorithms were compared.
- Gerçek zamanlı hedef tespiti için özgün veri seti oluşturulmuş ve Yolo algoritmaları ile eğitilmiştir. / An original data set was created and trained with Yolo algorithms for real-time target detection.

Amaç (Aim): Bu çalışmadaki amaç bir İHA'nın otonom görevi sırasında gerçek zamanlı olarak hedefi tespit etmesini sağlamaktır. / The aim of this study is to enable a UAV to detect the target in real time during its autonomous mission.

Özgünlük (Originality): Gerçek zamanlı hedef tespiti için bu çalışmaya özgü veri seti oluşturulmuştur. / A data set specific to this study was created for real-time target detection.

Bulgular (Results): Bu çalışmanın özgün veri seti kullanarak geniş kapsamlı bir derin öğrenme tabanlı nesne tespiti algoritmaları karşılaştırması sunması ve bu algoritmaların farklı versiyonlarını içermesi, literatüre önemli bir katkı yapabileceğini göstermektedir. / The fact that this study presents a comprehensive comparison of deep learning-based object detection algorithms using an original data set and includes different versions of these algorithms shows that it can make a significant contribution to the literature.

Sonuç (Conclusion): FPS ve doğruluk değerleri üzerinden yapılan analizler neticesinde, yolov4-tiny-tensorrt algoritmasının kullanılmasının daha verimli olduğuna karar verilmiştir. Bu algoritma ile yaklaşık olarak 30 FPS değeri elde edilmiştir, bu da çalışmadaki nesne algılama ve sınıflandırma işlemlerinin hızlı ve güvenilir bir şekilde gerçekleştirilebileceğini göstermektedir. / As a result of the analysis made on FPS and accuracy values, it was decided that using the yolov4-tiny-tensorrt algorithm was more efficient. Approximately 30 FPS value was obtained with this algorithm, which shows that object detection and classification operations in the study can be carried out quickly and reliably.



Farklı YOLO Algoritmalarının Gerçek Zamanlı İHA Tespitine Etkileri ve Karşılaştırmalı Analizi

Hediye ORHAN^{1*} Ferda Nur ARICI¹ ¹ Necmettin Erbakan University, Department of Computer Engineering, Konya, Turkey

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 19/12/2023
Düzeltilme: 12/03/2024
Kabul: 29/03/2024

Anahtar Kelimeler

İha
Görüntü işleme
Derin öğrenme
Opencv
Yapay zekâ
Yolo

Öz

Ülkemizde ve dünyada havacılık sektörü sürekli olarak gelişmektedir. Değişen ve gelişen teknolojiler ile birlikte insansız hava araçları (İHA) da pek çok sektörde farklı amaçlar doğrultusunda kullanılmaya başlanmıştır. İHA'ların kullanım alanlarına; başta askeri uygulamalar olmak üzere, jeolojik ve meteorolojik araştırmalar, doğal afet yönetimi, tarımsal keşifler, ulaştırma, yeryüzünün haritalanması ve üç boyutlu modelleme örnekleri verilebilir. Ülkemizde askeri alanda İHA kullanımı her geçen gün artmaktadır. Bunların başında hedef tespiti, hedef vuruşu ve hedef takibi gelmektedir. Hedef vuruşunda İHA üzerindeki kameralar ile hedef tespit edildikten sonra vuruş gerçekleştirilmektedir. Hedefin doğru tespit edilmesi çok önemlidir. Bir İHA'nın tam otonom görevini gerçekleştirebilmesi için hedefleri tespit edip kaçış manevraları uygulaması gerekmektedir. Bunun için hedef tespitinin doğruluk değeri yüksek olmalıdır ve gerçek zamanlı olarak çalışmalıdır. Bu araştırmadaki amaç bir İHA'nın otonom görevi sırasında gerçek zamanlı olarak hedefi tespit etmesini sağlamaktır. Araştırma amacı doğrultusunda hedef İHA'nın tespiti için farklı Yolo (You Only Look Once) algoritmaları kullanılmıştır. Gerçek zamanlı hedef tespiti için özgün veri seti oluşturulmuştur. Bu veri seti Yolo algoritmaları ile eğitilip, sonuçları karşılaştırılıp, orantılı olarak yüksek doğruluk değeri ve saniyede yüksek görüntü sayısına (frame per second (FPS)) sahip yolov4-tiny-tensort algoritması tercih edilmiştir. Algoritmanın mAP (mean average precision) değeri yaklaşık olarak %95'tir. Elde edilen sonuçlar analiz edilmiştir. Böylece gerçek zamanlı hedef tespiti yapılmıştır.

Effects and Comparative Analysis of Different YOLO Algorithms on Real-Time UAV Detection

Article Info

Research article
Received: 19/12/2023
Revision: 12/03/2024
Accepted: 29/03/2024

Keywords

Uav
Image processing
Deep learning
Opencv
Artificial intelligence
Yolo

Abstract

The aviation industry is constantly developing in our country and around the world. With changing and developing technologies, unmanned aerial vehicles (UAVs) have begun to be used for different purposes in many sectors. Usage areas of UAVs; Military applications, geological and meteorological research, natural disaster management, agricultural exploration, transportation, earth mapping and three-dimensional modeling can be given as examples. The use of UAVs in the military field in our country is increasing day by day. The most important of these are target detection, target shooting and target tracking. In target shooting, the hit is carried out after the target is detected with the cameras on the UAV. It is very important to identify the target correctly. In order for a UAV to perform its fully autonomous mission, it must detect targets and perform escape maneuvers. For this, the accuracy of target detection must be high and it must work in real time. The aim of this research is to enable a UAV to detect the target in real time during its autonomous mission. In line with the research purpose, different Yolo (You Only Look Once) algorithms were used to detect the target UAV. A unique data set was created for real-time target detection. This data set was trained with Yolo algorithms, the results were compared, and the yolov4-tiny-tensort algorithm, which has a proportionally high accuracy value and high frame per second (FPS), was preferred. The mAP (mean average precision) value of the algorithm is approximately 95%. The results obtained were analyzed. Thus, real-time target detection was achieved.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

İçerisinde güç sistemi olan, otomatik veya uzaktan kontrol sistemi ile uçurulan pilotsuz hava araçlarına İnsansız Hava Araçları (İHA) denilmektedir [1].

Teknolojinin gelişmesiyle kullanım alanı bir hayli genişleyen İHA'lar ilk olarak askeri amaçla kullanılmıştır. Gelişen teknoloji ile paralel olarak günümüzde İHA'lar tarım, taşımacılık, jeolojik ve

meteorolojik araştırmalar, ticaret gibi pek çok alanda kullanılmaktadır. Bu alanlarda İHA kullanımı otonom olarak hızla ilerlemektedir. Ülkemizde İHA'lar askeri alanda pek çok amaç için kullanılmakta ve bu alandaki başarısını her geçen gün arttırmaktadır. İHA'ların askeri alanda kullanımı hem başarı hem de güvenilirlik açısından son derece önemlidir. TAI-TUSAŞ'ın geliştirdiği ANKA isimli İHA [2], Vestel Savunma Sanayi firmasının ürettiği Karayel isimli silahlı insansız hava aracı (SİHA) [3], Baykar tarafından keşif İHA'sı olarak üretilip sonradan silahlandırılan Bayraktar Taktik İHA, Bayraktar TB2 [4, 5], kısa pistli gemilerden kalkış ve iniş kabiliyetine sahip SİHA Bayraktar TB3 [6] ülkemizde askeri alanda yapılan İHA çalışmalarına örnek olarak verilebilir.

Ülkemizde ve dünyada askeri gibi çok önemli alanlarda kullanılan İHA'lar, bu çalışmada motivasyon kaynağı olmuştur. Askeri alanda yapılan çalışmaların başında hedef tespiti, hedef vuruşu ve hedef takibi gelmektedir. Hedef vuruşunda İHA üzerindeki kameralar ile hedef tespit edildikten sonra vuruş gerçekleştirilmektedir. Hedefin doğru tespit edilmesi bu noktada çok önemlidir. Yanlış hedefin tespit edilme durumunda hedef vuruşu yanlış olur ve bu durum büyük problemlere yol açar. Bu nedenle hedef tespit algoritmalarının doğruluk değerlerini kesinleştirmek ve arttırmak önemlidir. Hedef tespitinde amaç, hedef İHA'yı geliştirilen algoritma yardımı ile tespit etmektir. Literatürde nesne tespiti üzerine bir çok çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmalara örnekler literatür taraması kısmında verilmiştir.

Derin öğrenme, yapay sinir ağları ve insan beyninin işlevlerini taklit eden hesaplama sistemleri kavramına dayanır [7]. Derin öğrenme tabanlı algoritmaların kullanılması durumunda bir veri seti gereklidir. Veri seti, tespit edilecek hedefin farklı açılardan görsellerini ve görsellerde hedefin nerede olduğunu belirten etiket dosyalarından oluşmaktadır. Veri setindeki görsellerin pikselleri ve hedefin konumunun doğru etiketlenmesi hedef tespit algoritmasının doğruluğuna etki etmektedir. Kullanılan algoritmalarda belirli parametreler optimum değere ayarlanmalıdır.

Araştırma kapsamında gerçeğ zamanlı İHA tespitinde yüksek FPS değeri ve yüksek doğruluk değeri elde edilmesi hedeflenmiştir. Bir İHA'nın tam otonom görevini gerçekleştirebilmesi için hedefleri tespit edip kaçış manevraları uygulaması gerekmektedir. Bunun için hedef tespitinin doğruluk değeri yüksek olmalıdır ve gerçeğ zamanlı olarak çalışmalıdır. FPS değeri algoritmanın

doğruluğunu etkilediğinden dolayı gerçeğ zamanlı görüntü işleme algoritmalarında önem arz etmektedir. Hedef tespitinde optimum algoritmanın seçimi için FPS ve doğruluk değeri parametrelerine dikkat edilmelidir. Hata payı en aza indirilmelidir. Örneğin; İHA üzerinden hedefe atış gerçekleştirilmesi gerektiğinde yanlış bir tespit ve hedef koordinatı atışın başarısız olmasına sebep olur. Bu durum kötü sonuçlara sebebiyet verebilir. Bu nedenle algoritma doğruluğuna çok dikkat edilmelidir.

Bu araştırma, gerçeğ zamanlı İHA tespiti konusunda algoritmalarının evrimini, araştırmacı tarafından özgün olarak oluşturulan bir veri seti üzerinden değerlendirerek ve inceleyerek, Yolov3'ten başlayarak Yolov8'e kadar olan YOLO (You Only Look Once) versiyonlarını kapsayan geniş bir değerlendirme sunmaktadır. Bu çalışma, özgün bir veri seti kullanarak Yolo algoritmalarının evrimini anlamak ve gerçeğ zamanlı İHA tespiti alanında en uygun çözümleri bulmak isteyen araştırmacılara yönelik kritik bir kaynak olup, algoritma sürümleri arasındaki performans farklarını ayrıntılı bir şekilde ele almaktadır. Çalışmada özgün veri seti olması, çalışmanın güvenilirliğini artırırken, aynı zamanda gerçeğ dünya koşullarında elde edilen verilerin algoritmaların gerçeğ performansını daha doğru bir şekilde yansıttığını vurgular. Test sonuçları, Yolo algoritmasının farklı versiyonlarının hem doğruluk hem de hız açısından farklı performanslar sergilediğini göstermiştir. Çalışma, mevcut araştırmalarda genellikle belirli Yolo versiyonlarına odaklanıldığını ve geniş bir karşılaştırmanın eksik olduğunu vurgular. Ayrıca, gerçeğ zamanlı İHA tespiti konusunda mevcut literatürde Yolov8'in potansiyelini değerlendiren sınırlı sayıda çalışma bulunması üzerinde durarak, bu alanda daha fazla kapsamlı analizlerin ve karşılaştırmaların önemine vurgu yapar. Özetlenirse; araştırmada elde edilen hedef tespit algoritması istenen doğruluk ve FPS değerine ulaşınca uygun işlemci gücüne sahip bir bilgisayar ve kamera üzerinde test edilmiştir. Elde edilen sonuçlar analiz edilmiştir.

Çalışmanın Materyal ve Metod bölümünde, projenin geliştirme aşamaları, özgün veri setinin oluşturulması, veri setinin farklı Yolo algoritmaları ile eğitilmesi, eğitimlerden elde edilen performans metriklerinin değerleri ve eğitim sonucunda oluşan model dosyalarının donanım üzerinde test edilmesi adımları detaylı olarak açıklanmıştır.

Bulgular ve Tartışma bölümünde, literatürdeki diğer çalışmaların ana konuları incelenmiş ve

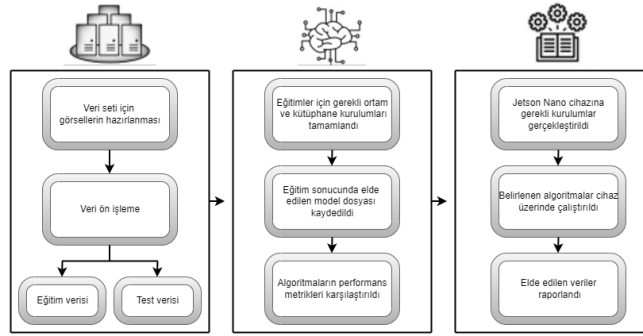
mevcut çalışma ile literatürdeki diğer çalışmalar arasındaki artılar ve eksikler değerlendirilmiştir.

Sonuç bölümünde, kullanılmasına karar verilen algoritma ile ilgili bilgiler ve çalışmanın sonuçlandırılması hakkında özetleyici bilgiler yer almaktadır.

2. MATERYAL VE METOD (MATERIALS AND METHODS)

Araştırmada öncelikle derin öğrenme algoritmasında eğitilmek üzere bir veri seti hazırlanmıştır. Hazırlanan veri seti ile birden fazla derin öğrenme algoritması farklı parametreler ile

eğitilmiştir. Eğitimler sonucunda elde edilen performans metrikleri raporlanmıştır. Elde edilen performans metrikleri karşılaştırılmıştır ve donanım üzerinde test edilecek derin öğrenme algoritmaları belirlenmiştir. Derin öğrenme algoritmalarına karar verildikten sonra bu algoritmalar için gerekli kütüphaneler Jetson Nano [8] cihazı içerisine kurulmuştur. Kurulumlar tamamlandıktan sonra algoritmalar cihaz üzerinde çalıştırılmıştır ve FPS değerleri gözlemlenmiştir. Buradan elde edilen çıktılar raporlanmıştır. Elde edilen tüm veriler sonucunda hangi algoritmanın proje isteklerine daha uygun olduğuna karar verilmiştir. Projenin geliştirilme aşaması şematik olarak Şekil 1'de görülmektedir.

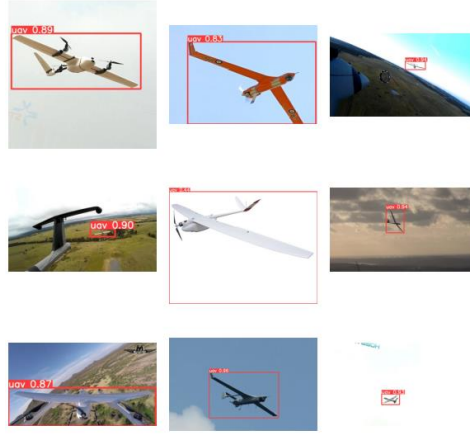


Şekil 1. Projenin geliştirilme aşamaları (Development stages of the project)

2.1. Veri Seti Hazırlanması (Data Set Preparation)

Veri setinin hazırlanma aşamasında öncelikle nasıl verilere ihtiyaç olduğu belirlenmiştir. Sonrasında bu verilerin elde edilebileceği internet sitelerinde araştırma yapılmıştır. İstenilen nitelikte veriye ulaşamadığı için Youtube platformu üzerinden sabit kanat İHA'ların uçuş videoları elde edilmiştir. Bu videolardan belirli zaman aralıklarıyla görüntü kaydetmek için bir Python kodu yazılmıştır. Alınan bu görüntülerden veri setine eklenmesi uygun olanlar seçilmiştir. Bu şekilde yaklaşık olarak 200'e yakın videodan veri elde edilmiştir. Elde edilen bu veriler tekrardan gözden geçirilerek veri setine uygun olmayanlar çıkarılmıştır. Örneğin, yerdeki uçak görüntüleri ilk başta dâhil edilse de sonrasında algoritma doğruluğunu olumsuz etkileyeceği düşünüldüğünden veri setinden çıkarılmıştır. Veri

seti görüntüleri genel olarak havadaki İHA görüntülerinden oluşmaktadır. Çünkü projede amaç, havadaki sabit kanat İHA'ları tespit etmektir. Bu sebeple veri seti için uygun olan görüntüler havada sabit kanat İHA içeren görüntülerdir. Bu tespite göre İHA kaçış manevraları uygulayabilecektir veya hedefi etkisiz hale getirebilecektir. Veri setindeki verilerin sayısı arttığında algoritma doğruluğunun da artacağı düşünüldüğünden verilere veri artırma yöntemi uygulanmıştır. Keras kütüphanesi [9] kullanılarak verilere döndürme, öteleme ve renk tonlarında değişim gibi işlemler uygulanmıştır. Veri artırma işlemi gerçekleştirildikten sonra uygun veriler seçilerek veri setine eklenmiştir. Bu şekilde veri setinin oluşturulma aşaması tamamlanmıştır. Veri setinde toplamda 5858 adet sabit kanat İHA görseli bulunmaktadır. Veri setinden örnek görseller Şekil 2'de görülmektedir.



Şekil 2. Veri setinden örnek görüntüler (Sample images from the data set)

Veri setindeki görseller tamamlandıktan sonra bu görsellerin etiketlenmesi aşamasına geçilmiştir. LabelImg [10] programı kullanılarak veriler tek tek etiketlenmiştir. Etiket dosyaları ile birlikte veri setinin boyutu 11716 olmuştur. Bu veriler etiket dosyaları ile birlikte %80 eğitim ve %20 test olarak ayrılmıştır. Eğitim verileri algoritmaların eğitimi sırasında kullanılan verilerdir bu nedenle daha fazladır. Test verileri ise algoritma eğitimi esnasında doğrulama doğruluğu ve doğrulama kaybı değerlerinin hesaplanmasında kullanılmıştır. Veri sayısı çok fazla olmadığı için doğrulama verisi ayrılmamıştır. Doğrulama işlemi için de test verileri kullanılmıştır. Algoritma eğitimleri tamamlandıktan sonra test verileri ile algoritma test edilmiştir.

2.2. Veri Seti Eğitimi ve Algoritmaların Karşılaştırılması (Dataset Training and Comparison of Algorithms)

Veri seti hazırlanma aşaması tamamlandıktan sonra kullanılacak algoritmalar hakkında araştırma yapılarak gerekli ortam kurulumları yapılmıştır. Faster R-CNN ve SSD algoritmalarının kullanılması planlanmıştı fakat eğitimde kullanılacak Tensorflow kütüphanesi [11] ve birkaç kütüphanede yaşanan sürüm çakışmaları ve hatalar sebebi ile bu algoritmalarda eğitim denememiştir. Bu algoritmalarda alınan hatalar sebebiyle farklı algoritmalar üzerinde karşılaştırma yapabilmek amacıyla Yolo (you only look once) [12] algoritmasının farklı versiyonları üzerinde eğitim gerçekleştirilmiştir. Yolo algoritmalarının arka planında evrişimli sinir ağları (convolutional neural network (CNN)) [13] yapısı bulunmaktadır. Yolo bir nesne takip algoritmasıdır. Görüntüyü bölgelere ayırarak işlem yapar. Görüntüyü tek seferde nöral ağlardan geçirir bu sebeple diğer nesne takip algoritmalarına göre daha hızlı çalışmaktadır. Diğer algoritmaların yavaş olmasının sebebi, nesne olması muhtemel alanları belirleyip hepsini ayrı ayrı nöral

ağlardan geçirmeleridir. Görüntü üzerindeki işlem sayısı arttıkça hız performansı düşmektedir.

Yolo, nesne tespit aşamasında sınırlayıcı kutu kullanır. Sınırlayıcı kutu içerisinde nesne varsa orta noktası bulunur. Sınırlayıcı kutu içerisinde nesne boyutu, koordinatları ve güven skoru bulunur [14]. Bu değerler vektör şeklinde tutulmaktadır. Her sınırlayıcı kutu için ayrı ayrı tahmin vektörleri oluşturulur. Denklem 1’de oluşturulan vektör yapısı görülmektedir.

$$y^T = [pc, bx, by, bw, bh, c] \quad (1)$$

- pc: Nesne var ise 1 yoksa ise 0’dır.
- bx: Nesnenin orta noktasının x koordinatıdır.
- by: Nesnenin orta noktasının y koordinatıdır.
- bw: Nesnenin genişliğidir.
- bh: Nesnenin yüksekliğidir.
- c: Bağlı skor değeridir. Sınıf sayısı ne kadarsa o kadar sınıf değeri barındırır. (Örneğin, iki sınıflı bir algoritma için araba:1, yaya:0 şeklindedir.)

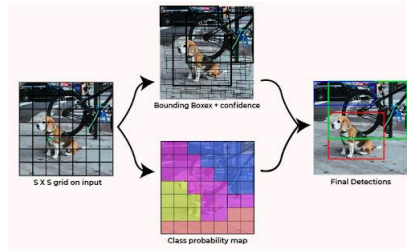
Sınırlayıcı kutu içerisinde birden fazla nesne olduğunda karışıklık olduğu için Anchor kutu eklenmiştir. Anchor kutu, her nesne için sınırlayıcı kutu ve güven skoru hesaplar. Bunu yaparken Intersection over Union (IoU) [15] kullanır. IoU, genellikle tahmin edilen bölge ve gerçek bölgenin ne kadar örtüştüğünü ölçer. IoU, bu örtüşme miktarını yüzde cinsinden ifade eder. Çok fazla sınırlayıcı kutu olması durumunda Non Max Suppression algoritması ile güven skoru düşük olan kutular silinir. En yüksek güven skoruna sahip nesne çıktı olarak alınır.

Yolo algoritmaları her versiyonunda gelişmeye devam etmiştir. Yolov3’te daha küçük nesne tespiti için residual blocks, skip connection ve up sampling özellikleri eklenmiştir. Önceki Yolo versiyonlarında nesne tespitinin sonucu, öznelik

haritası üzerine uygulanmış 1×1 detection kernels sonucuna göre belirleniyor. Yolov3'te ise bu durum farklıdır. Üç farklı yerde üç farklı ölçekteki görüntüye uygulanmaktadır. Yolo [16], Yolov2 [17], Yolov3 [18] ve Yolov4 [19] algoritmalarının mimarisi Darknet'tir. Yolov5'te [20] ise Pytorch üzerine kurulu bir mimari kullanılmaya başlanmıştır. Yolov5'te mozaik veri artırma, otomatik öğrenme sınırlayıcı kutu bağlantıları bulunmaktadır.

Yolo algoritmasının nesne tespit aşamaları Şekil 3'te görülmektedir. Burada yola çıkarak adım adım açıklandığında:

1. Öncelikle girdi olarak verilen görseli $S \times S$ kısımlara bölmektedir. (S değeri genellikle 3, 5, 7, 9 olmaktadır.)
2. Sınırlayıcı kutular ile vektör oluşturulmaktadır.



Şekil 3. Yolo algoritmasının çalışma prensibi (Working principle of the yolo algorithm) [21]

Yolov3'te özellik piramit ağı (feature pyramid network (FPN)) kullanılmıştır. Piramitte kendinden önceki görüntünün boyutunu iki katına çıkararak komşu görüntü ile aynı boyuta getirir ve ikisini birbirine ekleyerek görüntü elde eder. Bu işlem bitince piramitin tüm katmanlarındaki nesnelere tahmin eder. Yolov4'te FPN yerine SAM, PAN, SPP kullanılmıştır. SAM, maksimum havuzlama ve ortalama havuzlama işlemleri ayrı ayrı uygulanmaktadır. Sonuçlar sigmoid ile beslenmektedir. Yolov5, Pytorch implementasyonudur. CSP backbone ve PANet neck kullanılmaktadır. Head kısmı Yolov4 ile aynıdır. Orta katmanlarında aktivasyon fonksiyonu olarak leaky relu son katmanında ise sigmoid kullanılmaktadır. Optimizer olarak stokastik gradyan inişi (stochastic gradient descent (SGD)) kullanılmaktadır. Yolov7 [22], Yolov4 yapısını

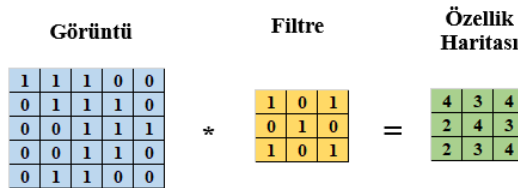
3. Her bir bölüt kendi içerisinde nesne bulunup bulunmadığını kontrol etmektedir. Eğer varsa nesnenin orta noktasının kendisinde bulunup bulunmadığını kontrol etmektedir. Nesne yüksekliğini, genişliğini bulmakla sorumludur. Orta nokta hangi bölüt içerisinde yer alıyorsa tespitten o bölüt sorumludur.
4. Bir bölütte çok fazla nesne varsa, her bölüt için anchor kutu sayısı kadar vektör değerleri hesaplanmaktadır. Birden çok nesne olduğu durumlarda vektör yapısı Denklem 2'de görülmektedir.

$$y^T = [c1, \dots, c20, pc1, bx1, by1, bw1, bh1, pc2, bx2, by2, bw2, bh2] \quad (2)$$

5. Birden fazla bölüt yanlışlıkla düşerse en yüksek güven skoruna sahip kutu çizilir. Burada Non Max Suppression algoritması kullanılır.

kullanılmaktadır. Spatial Pyramid Pooling (SPP) kullanılmaktadır. Farklı boyutlardaki nesnelere daha iyi tahminini sağlamaktadır. Daha az hesaplama ve parametre içermektedir. Yolov6 [23], Pytorch yapısını kullanılmaktadır. Yolov8 ise CSP Darknet mimarisi üzerine kurulmuştur.

Yolo algoritmasının arka planında bulunan CNN yapısı girdi olarak bir görüntü almaktadır. Girdi; evrişim, havuzlama ve tam bağlantılı katmanlardan geçerek eğitilir. Burada evrişim katmanı; görüntüyü ele alan ilk katmandır. Görüntü, belirli değerler taşıyan piksellerden oluşan matrislerdir. Bu katmanda orijinal görsel boyutundan daha küçük bir filtre görsel üzerinde gezer ve bu görsellerden belirli özellikleri yakalamaya çalışır. Bir görselin matris haline getirilmesi ve evrişim işlemi uygulanması Şekil 4'te görülmektedir. 3×3 'lük bir filtre uygulanarak bir çıktı matrisi elde edilir.



Şekil 4. 3×3 'lük filtre ile evrişim işleminin gerçekleştirilmesi (Performing convolution with a 3×3 filter)

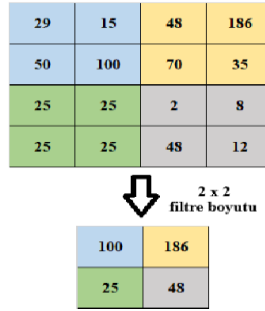
Burada filtre uygulanması sonucunda oluşturulan matrise özellik haritası denilmektedir. CNN'de öğrenilen parametreler bu matrislerdeki değerlerdir. Model sürekli bu değerleri günceller ve özellikleri daha iyi öğrenmeye başlar. Bu filtreler; köşe bulma, kenar bulma ve bulanıklaştırma gibi özellik filtreleridir. Kenar bulma, giriş bilgisinin yüksek frekanslı bölgelerini temsil etmektedir. Sobel, prewitt, gabor gibi kenar bulma filtreleri mevcuttur. Elde edilen çıkış, görüntülerin kenar bilgisini verir. Kenarlar genelde CNN katmanının en başında hesaplanır. Filtrelerin girdi üzerinde kaç piksel boyunca kayacağı adım (stride) sayısı ile belirlenmektedir. Buna göre özellik haritası boyutu artabilir veya azalabilir.

Kenar bulma, bulanıklaştırma gibi filtreler kullanılırken girdi verisinin boyutu korunmak istenirse padding işlemi uygulanmaktadır. Padding işlemi çıktı boyutunu korur. Padding işlemi girdi verisinin etrafını 0 ile doldurabilir ya da girdi verisini kopyalayarak çoğaltabilir. Burada temel amaç, bilgi kaybını minimuma indirmektir.

Aktivasyon fonksiyonu olarak ara katmanlarda genel olarak Relu [24] tercih edilmektedir. Relu, negatif ve doğrusal olmayan bir fonksiyondur. Sıfıra eşit ve sıfırdan küçük bir girdi geldiğinde sıfır değeri döndürür. Pozitif bir girdi geldiğinde ise

girdinin kendisini döndürür. Burada temel amaç, negatif değerlerden kurtulmaktır. Fakat negatif değerlerin türevinin sıfır olması geriye yayılım (back propagation) esnasında parametrelerin güncellenemeyeceği, yani öğrenme işlemi olmayacağı anlamına gelir. Bu probleme dying relu adı verilmektedir. Bu sebeple Leaky Relu [25] geliştirilmiştir. Leaky Relu ile negatif değerlere tam sıfır değeri atanması yerine sıfıra yakın küçük değerler atanmaktadır. Böylece türevin sıfır olmasının önüne geçilmektedir. Çıktı katmanında genel olarak sigmoid ve softmax tercih edilmektedir. Sigmoid, [0,1] arasında değerler almaktadır. Türevlenebilir, doğrusal olmayan bir fonksiyondur. Genelde ikili sınıflandırma problemlerinde kullanılmaktadır. Softmax, çoklu sigmoid olarak bilinmektedir. İki'den fazla sınıf barındıran problemlerde kullanılmaktadır.

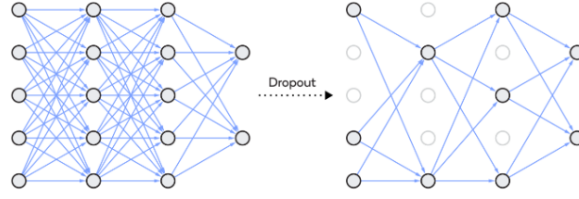
Havuzlama katmanının amacı, girdinin boyutunu azaltmaktır. Hem işlem yoğunluğu azalır hem de gereksiz özellikler yok sayılarak önemli özelliklere odaklanılır. Ağın bu katmanında öğrenilen parametre yoktur. Maksimum havuzlama işleminde filtre uygulanan kısımdaki en büyük değerler seçilir. Ortalama havuzlama katmanında ise filtre uygulanan kısımdaki değerlerin ortalaması alınır. Şekil 5'te maksimum havuzlama işlemi görülmektedir.



Şekil 5. Havuzlama katmanında işlemlerin gerçekleştirilmesi (Performing operations in the pooling layer)

Tam bağlantılı (fully connected) katman genelde CNN mimarisinin sonunda bulunmaktadır. Sınıf skorları gibi hedefleri optimize etmek için kullanılmaktadır. Bu katmanda evrişim işlemleri ve havuzlama işlemleri sonucunda oluşan matris düz vektör haline getirilmektedir. Bu katman, her girişin tüm nöronlara bağlı olduğu bir giriş üzerine çalışır.

Seyreltme katmanı (dropout), aşırı öğrenme (overfitting) problemini önlemek için kullanılmaktadır. Birbirine bağlı nöronlar arasında seyreltme işlemi yapar. Rastgele nöronların aktif ve pasif hale getirilmesi ile gerçekleştirilen seyreltme işlemi Şekil 6'de görülmektedir.



Şekil 6. Seyreltme işlemi (Dropout) [26]

Kullanılan Yolo algoritması sürümleri şunlardır: V3, V4, V5, V6, V7 ve V8. Bu algoritmalarından bazı sürümlerde x, m, s ve l gibi farklı modeller bulunmaktadır. Yolo algoritmalarının eğitimi uzun sürdüğünden dolayı eğitim işlemi için Google Colaboratory [27] ortamı tercih edilmiştir. Google Colaboratory ortamı kullanıcılara ücretsiz Graphics Processing Unit (GPU) desteği sağlamaktadır. Bu algoritmalarından ilk olarak Yolov3, Yolov4, Yolov3-tiny ve Yolov4-tiny [28] algoritmalarının eğitimi gerçekleştirilmiştir. Farklı yığın boyutu

(batch size) değerleri, subdivision değerleri ve girdi boyutları ile eğitimler gerçekleştirilmiştir. Yığın boyutu, her döngüde (epoch) kaç adet görüntü ile eğitim gerçekleştirileceğini belirtmektedir. Subdivision ise yığınları mini-yığın gruplarına ayırmaktadır. Böylece, büyük görüntüler ile gerçekleştirilen eğitimler sırasında belleğin daha verimli bir şekilde kullanılmasını sağlamaktadır. Gerçekleştirilen eğitimlerden elde edilen veriler ve algoritmaların karşılaştırılması Tablo 1'de görülmektedir.

Tablo 1. Yolov3 ve Yolov4 algoritmalarının karşılaştırılması (Comparison of Yolov3 and Yolov4 algorithms)

Algoritma	Yığın Boyutu	Subdivision	Genişlik Yükseklik	F1 Skor (%)	mAP (%)
yolov3	64	8	256x256	0.90	0.9131
yolov3	64	16	320x320	0.89	0.9360
yolov3-tiny	64	16	416x416	0.76	0.8399
yolov3-tiny	64	4	416x416	0.78	0.8472
yolov3-tiny	64	2	416x416	0.79	0.8520
yolov4-tiny	64	4	416x416	0.90	0.9483
yolov4-tiny	64	1	416x416	0.88	0.9370

Tablo 1'de görülmekte olan mAP performans metriğinin formülü Denklem 3'te verilmiştir. F1-skor performans metriğinin formülü ise Denklem 4'te verilmiştir. F1-skor değerinin kullanılmasının en temel sebebi eşit dağılmayan veri kümelerinde hatalı bir model seçimi yapmamaktır. Ayrıca sadece yanlış negatif ya da yanlış pozitif değil tüm hata maliyetlerini de içerecek bir ölçme metriğine ihtiyaç duyulduğu için F1-skor çok önemlidir. F1-skor değeri doğru pozitif, yanlış pozitif ve yanlış negatif değerleri ile hesaplanmaktadır.

$AP_k = \text{the AP of class } k$

$$mAP = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^{k=n} AP_k \quad (3)$$

$n = \text{the number of classes}$

$$F1 = 2 * \frac{\text{precision} * \text{recall}}{\text{precision} + \text{recall}} \quad (4)$$

Burada verilen AP (Average precision) değeri ortalama precision değerini belirtmektedir. "k" parametresi ise her bir sınıf için hesaplanan ortalama precision değerini temsil etmek için kullanılmaktadır. "n" parametresi ise veri setindeki toplam sınıf sayısını belirtmektedir. Denklem 4'te bahsedilen precision (P) performans metriği ve Recall (R) performans metriğinin hesaplanması Denklem 5'te verilmiştir. Precision, pozitif olarak tahmin edilen değerlerin gerçekten kaç tanesinin pozitif olduğunu göstermektedir. Recall ise pozitif olarak tahmin edilmesi gereken işlemlerin ne kadarının pozitif olarak tahmin edildiğini gösteren bir metriktir. Bu performans metrikleri yolov5, yolov6, yolov7 ve yolov8 algoritmalarının

değerlendirilmesinde de kullanılmaktadır.

$$Recall (R) = \frac{TP}{TP + FN} , Precision (P) = \frac{TP}{TP + FP} \quad (5)$$

Denklem 5’te verilen terimlerin açıklamaları şu şekildedir:

- Doğru Pozitif (TP): Gerçek değer 1 ve tahmin edilen değer de 1 olduğu örneklerdir.
- Doğru Negatif (TN): Gerçek değer 0 ve tahmin edilen değer de 0 olduğu örneklerdir.
- Yanlış Pozitif (FP): Gerçek değer 0 ancak tahmin edilen değer 1 olduğu örneklerdir.
- Yanlış Negatif (FN): Gerçek değer 1 ancak tahmin edilen değer 0 olduğu örneklerdir.

Eğitimler sonucunda elde edilen veriler incelendiğinde hem FPS değerinin daha verimli olması hem de değerlendirilen performans metriklerinin daha yüksek olması sebebi ile yolov4-tiny algoritmasının kullanılmasına karar verilmiştir. FPS karşılaştırması için yolov3 modeli de Jetson Nano cihazı üzerinde çalıştırılarak çıktılar elde edilmiştir. Elde edilen çıktılar “Algoritmaların Seçilmesi ve Donanım Üzerinde Çalışması” başlığı altında sunulmuştur.

Yolov5 algoritmasının farklı versiyonları bulunmaktadır. Bunlar; 5l, 5m, 5x ve 5s modelleridir. Bu algoritmalarda farklı yığın boyutu değerleri ile eğitimler gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen eğitimlerden elde edilen performans metrikleri ve algoritmaların karşılaştırılması Tablo 2’de görülmektedir.

Tablo 2. Yolov5 algoritmalarının eğitim sonuçları ve karşılaştırılması (Training results and comparison of Yolov5 algorithms)

Algoritma	Yığın Boyutu	Döngü	P (%)	R (%)	mAP (%)	Parametre (M)	BFLOPs
yolov5-s	4	100	0.97	0.957	0.976	7.2	16.5
yolov5-x	8	100	0.968	0.946	0.977	86.7	205.7
yolov5-m	8	100	0.971	0.941	0.975	21.2	49.0
yolov5-l	8	100	0.979	0.966	0.983	46.5	109.1
yolov5-s	8	100	0.961	0.952	0.978	7.2	16.5

Tablo 2’ de görüldüğü üzere en başarılı Yolov5 algoritması 5-l modeli olmuştur. Yolov5-l algoritması, yolov5-x algoritmasına göre daha düşük BFLOPs (Billion Floating Point Operations Per Second) ve parametre değerlerine sahiptir. Bu durum, yolov5-l modelinin daha az karmaşık bir yapıya sahip olduğunu ve daha düşük işlem gücüne ihtiyaç duyduğunu göstermektedir. Ancak, modelin performansını değerlendirmek için yalnızca BFLOPs ve parametre sayısına bakmak yeterli değildir. Modelin içyapısı, kullanılan katmanlar, aktivasyon fonksiyonları ve diğer faktörler de önemlidir. Algoritmaların değerleri birbirine yakın olması sebebi ile en çok FPS değeri elde edilen algoritmanın kullanılabilmesi düşünülmüştür.

Yolov6 algoritmasının da farklı versiyonları bulunmaktadır. Bunlar; 6n, 6l, 6m ve 6s modelleridir. Bu algoritmalarda aynı yığın boyutu ve döngü değerleri ile eğitimler gerçekleştirilerek

farklı versiyonların performansları değerlendirilmiştir. Yapılan karşılaştırmalar Tablo 3’te görülmektedir.

Tablo 3. Yolov6 algoritmalarının eğitim sonuçları ve karşılaştırılması (Training results and comparison of Yolov6 algorithms)

Algoritma	Yığın Boyutu	Döngü	AP (%)	AR (%)	mAP (%)	Parametre (M)	GFLOPs
yolov6-l	8	20	0.955	0.744	0.9553	63.6	95.5
yolov6-n	8	20	0.975	0.719	0.974	4.9	7.0
yolov6-m	8	20	0.979	0.718	0.9787	37.1	54.3
yolov6-s	8	20	0.978	0.724	0.9781	19.6	27.7

Tablo 3'e bakıldığında en başarılı yolov6 algoritmasının s versiyonu olduğu görülmüştür. 6-m ve 6-s algoritmalarının performans metrikleri birbirlerine çok yakındır ancak 6-s modelinde parametre ve GFLOPs (Giga Floating Point Operations Per Second) değerleri incelendiğinde

daha düşük işlem gücüne ihtiyaç duyduğu görülmektedir.

Yolov7 algoritmasının çalışma süresi çok uzun sürdüğünden dolayı Google Colab süresi yetersiz kalmıştır buna ek olarak yapılan eğitimde elde edilen sonuç çok başarılı olmadığı için sadece bir eğitim gerçekleştirilmiştir. Yolov7 algoritmasının eğitiminden elde edilen sonuç Tablo 4'te görülmektedir.

Tablo 4. Yolov7 algoritmasının eğitim sonucu (Training result of Yolov7 algorithm)

Algoritma	Yığın Boyutu	Döngü	P (%)	R (%)	mAP (%)
yolov7-x	4	20	0.817	0.821	0.87

Yolov8 algoritmasının da farklı versiyonları bulunmaktadır. Bunlar; 8s, 8m, 8n ve 8x modelleridir. Bu algoritmalarda aynı batch size ve döngü değerleri ile eğitimler gerçekleştirilerek

farklı versiyonların performansları değerlendirilmiştir. Yapılan karşılaştırmalar Tablo 5'te görülmektedir.

Tablo 5. Yolov8 algoritmalarının eğitim sonuçları ve karşılaştırılması (Training results and comparison of Yolov8 algorithms)

Algoritma	Yığın Boyutu	Döngü	P (%)	R (%)	mAP (%)	Parametre (M)	BFLOPs
yolov8-s	8	20	0.936	0.931	0.969	11.2	28.6
yolov8-x	8	20	0.9725	0.9157	0.975	68.2	257.8
yolov8-m	8	20	0.968	0.944	0.98	25.9	78.9
yolov8-n	8	20	0.954	0.901	0.961	3.2	8.7

Tablo 5'e bakıldığında yolov8 algoritmalarından en başarılı versiyonun m olduğu görülmektedir. Yolov8-x modeli, yüksek mAP değeriyle dikkat çekmektedir ancak, parametre ve BFLOPs değerleri incelendiğinde, bu modelin daha karmaşık olduğu ve daha fazla işlem gücü gerektirdiği görülmektedir. Tabloda görülen performans metriklerinde iyi

sonuçlar vermesi sebebi ile Jetson Nano cihazında çalıştırılmasına karar verilmiştir.

Eğitimlerden elde edilen sonuçlar değerlendirilerek yolov3, yolov4, yolov5, yolov7 ve yolov8

algoritmaları Jetson Nano cihazı üzerinde çalıştırılarak elde edilen çıktılar sunulmuştur.

2.3. Algoritmaların Seçilmesi ve Donanım Üzerinde Çalışması (Selection of Algorithms and Running on Hardware)

Algoritmalar eğitim sırası ile cihaz üzerinde çalıştırılmıştır. Öncelikle Nvidia Jetson Nano Developer Kit üzerinde çalışma ortamı kurulmuştur. Cihaz üzerine takılan sd karta Nvidia'nın sitesinden erişilen img uzantılı dosyanın kurulumu balenaEtcher [29] programı ile

gerçekleştirilmiştir. Jetson Nano'nun çalışması için gerekli kurulumlar tamamlandıktan sonra kütüphane kurulumlarına geçilmiştir. Açık kaynak kodlu görüntü işleme kütüphanesi olan Opencv cuda desteği ile derlenmiştir [30]. Bu şekilde cuda çekirdeklerinin aktif kullanılması sağlanmıştır. Gerekli diğer kütüphaneler de kurulduktan sonra yolov3 ve yolov4 algoritmaları cihaz üzerinde çalıştırılmıştır. İlk olarak yolov3 algoritması çalıştırılmıştır. Elde edilen çıktı Şekil 7'de görülmektedir.



Şekil 7. Yolov3 algoritmasından elde edilen çıktı (Output from the yolov3 algorithm)

Görüldüğü üzere yaklaşık olarak 1,30 FPS alınmıştır. Bu FPS değeri yetersiz olduğu için yolov3-tiny modeli test edilmiştir. Yolov3-tiny

modelinden elde edilen çıktı Şekil 8'de görülmektedir.



Şekil 8. Yolov3-tiny algoritmasından elde edilen çıktı (Output from the yolov3-tiny algorithm)

Görüldüğü üzere tiny modelinde katman sayısı daha az olduğu için algoritma daha hızlıdır. Bu sebeple FPS değeri daha yüksektir. Fakat doğruluk olarak baktığımızda örnekte %60 civarında eşleşmiştir. Bu

nedenle yolov4-tiny algoritması değerlendirilmiştir. Şekil 9'da yolov4-tiny algoritmasının donanım üzerindeki çıktısı ile ilgili bir örnek verilmiştir.



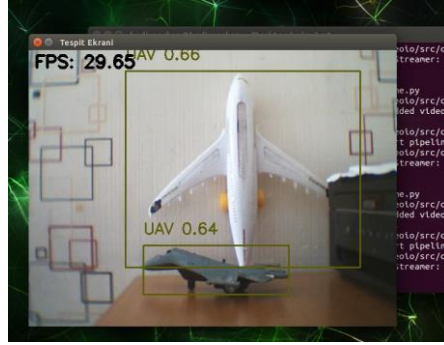
Şekil 9. Yolov4-tiny algoritmasından elde edilen çıktı (Output from the yolov4-tiny algorithm)

Görüldüğü üzere yaklaşık olarak 8 FPS değeri elde edilmiştir. Fakat bu değer gerçek zamanlı görüntü işleme uygulamaları için yeterli değildir bu nedenle artırılması gerekmektedir. FPS değerini arttırmak için kullanılan weights uzantılı model dosyasının

tensorrt'ye çevrilmesine karar verilmiştir. Tensorrt [31], Nvidia tarafından geliştirilen ve derin öğrenme modellerini optimize ederek hızlandırmak için kullanılan bir yazılım platformudur. Bellek kullanımını optimize etmektedir ve algoritmaları

hızlandırmaktadır. GPU üzerinde optimize edilmiş bir şekilde çalışmaktadır. Bu sayede GPU kaynaklarını daha verimli kullanmaktadır. Bu sebeple yolov4-tiny algoritması tensorrt'ye dönüştürülmüştür. Dönüşüm sonucunda elde edilen

trt uzantılı model dosyası ile hedef tespiti gerçekleştirilmiştir. Donanım üzerinde trt uzantılı model dosyasının çalıştırılması ile elde edilen çıktı Şekil 10'da görülmektedir.

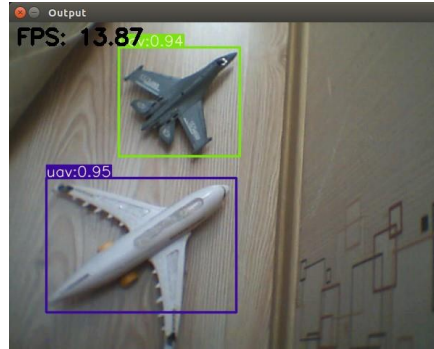


Şekil 10. Yolov4-tiny-tensorrt algoritmasından elde edilen çıktı (Output from the yolov4-tiny algorithm)

Şekil 10'da görüldüğü üzere tensorrt ile birlikte yolov4-tiny algoritmasının FPS değeri yaklaşık olarak 30'dur. 30 FPS değeri ile yolov4-tiny-tensorrt algoritmasının kullanılabilirliği düşünülmüştür.

Algoritmaların karşılaştırılması için en yüksek doğruluk değeri elde edilen yolov5-l algoritması donanım üzerinde çalıştırılmıştır. Yolov5-l

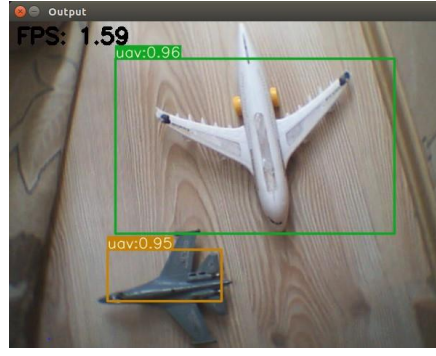
algoritmasının donanım üzerinde çalıştırılması için tensorrt dönüşümü gerekmektedir. Yolov5 algoritması Pytorch tabanlı bir algoritma olduğu için yolov3 ve yolov4'ten farklı olarak dönüşüm sonucunda engine uzantılı bir model dosyası oluşmaktadır. Yolov5-l algoritmasından yaklaşık olarak 15 FPS değeri elde edilmiştir. Elde edilen çıktı Şekil 11'de görülmektedir.



Şekil 11. Yolov5-l algoritmasından elde edilen çıktı (Output from the yolov5-l algorithm)

Yolov7-x algoritmasının elde edilen doğruluk değeri düşük olmasına rağmen FPS değerinin test edilmesi için donanım üzerinde çalıştırılmıştır. Yolov7-x algoritmasının donanım üzerinde çalıştırılması için tensorrt dönüşümü gerekmektedir. Dönüşüm sonucunda engine uzantılı

bir model dosyası oluşmaktadır. Yolov7-x algoritmasının çalıştırılması ile yaklaşık olarak 2 FPS değeri elde edilmiştir. Yolov7-x algoritmasından elde edilen çıktı Şekil 12'de görülmektedir.



Şekil 12. Yolov7-x algoritmasından elde edilen çıktı (Output from the yolov7-x algorithm)

Donanım üzerinde son olarak yolov8 algoritması test edilmiştir. Yolov8 algoritmasının donanım üzerinde çalıştırılması için tensorrt dönüşümü gerekmektedir. Dönüşüm sonucunda engine uzantılı bir model dosyası oluşmaktadır. Yolov8-m

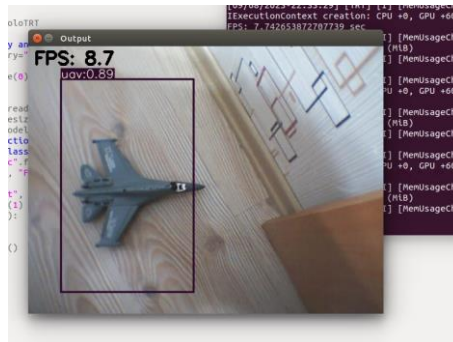
algoritmasında en yüksek doğruluk değeri elde edildiği için donanım üzerinde test edilmiştir. Yolov8-m algoritması ile yaklaşık olarak 4 FPS elde edilmiştir. Elde edilen çıktı örneği Şekil 13'te görülmektedir.



Şekil 13. Yolov8-m algoritmasından elde edilen çıktı (Output from the Yolov8-m algorithm)

Yolov8-s algoritmasının CNN katmanları daha az olduğu için daha hızlı olduğu düşünülmüştür. Bu nedenle FPS karşılaştırılması için yolov8-s algoritması donanım üzerinde test edilmiştir. Yolov8-s algoritması ile donanım üzerinde yaklaşık

olarak 9 FPS değeri elde edilmiştir. Elde edilen çıktı örneği Şekil 14'te görülmektedir. Gözlemlenen sonuçlar doğrultusunda yolov8-m algoritması yerine yolov8-s algoritmasının da tercih edilebileceği düşünülmüştür.



Şekil 14. Yolov8-s algoritmasından elde edilen çıktı (Output from the yolov8-s algorithm)

Algoritmalar Jetson Nano cihazı üzerinde başarıyla çalıştırıldıktan sonra, kullanıcı dostu bir ara yüz tasarlamak amacıyla PyQt5 [32] kütüphanesi kullanılmıştır. PyQt5, Qt adlı C++ kütüphanesinin Python için bir bağlamasıdır ve Qt kütüphanesi üzerinde uygulama geliştirmeyi sağlar. Qt, geniş bir

kullanım alanına sahip olan bir araç setidir ve masaüstü uygulamalardan mobil uygulamalara, oyunlardan grafiksel araçlara kadar birçok yazılım türü için kullanılır.

Projenin kullanım kolaylığı için tasarlanan ara yüz örneği, Şekil 15'te sunulmaktadır. Bu ara yüz,

projenin başarıyla tamamlanan kısmını kullanıcıya net bir şekilde iletmek için tasarlanmıştır.



Şekil 15. Tasarlanan ara yüz (Designed interface)

3. BULGULAR (RESULTS)

Bu kısımda literatür taraması verilerek yapılan çalışmanın, daha önce yapılan çalışmalarla ilişkisi/farklılıkları verilmiştir.

Mingjie ve ark. [33] çeşitli derin öğrenme algoritmaları kullanarak hedef tespiti yapmışlardır. Kullandıkları algoritmaların karşılaştırmalarını sunmuşlardır. Bir başka çalışmada Yuanyuan Hu ve ark. [34] nesne tespiti için veri seti oluşturup bir derin öğrenme algoritması önermişlerdir.

Şahin ve ark. Yolov3, Yolov5 ve YoloDrone+ [35] algoritmalarını iki farklı hazır veri seti ile test etmiştir ve karşılaştırmıştır. Mevcut çalışmada ise FPS ve mAP değerleri belirtilerek daha fazla algoritma ile karşılaştırma yapılmıştır ve özgün bir veri seti kullanılmıştır.

Çelik ve ark. [36] üç farklı sınıf için Yolov3 algoritması ile %84,81 doğruluk elde etmiştir. Çalışmada özgün bir veri seti yerine hazır bir veri seti tercih edilmiştir. Mevcut çalışmada özgün veri seti kullanılarak Yolov3 algoritması ile %93 doğruluk, Yolov3-tiny algoritması ile %85 doğruluk elde edilmiştir.

Albayrak çalışmasında [37] araç tespiti için Yolov3 algoritması ve Mask R-CNN algoritması kullanmıştır. Algoritmalar karşılaştırıldığında sonuçların birbirine yakın olduğu ama Mask R-CNN algoritmasının doğruluk açısından küçük bir farkla daha iyi olduğu görülmüştür. Yolov3 algoritmasının işlem yükünün daha az olması sebebiyle Mask R-CNN'den daha hızlı olduğu belirtilmiştir. Li ve ark. [38] VisDrone veri seti ile 10 farklı sınıf için Yolov8-s algoritması kullanılarak

bir yapay zekâ modeli eğitmiştir. Yolov5-m, MobilNetv2-SSD, Yolov4-s, Yolov5-s, YoloX-s, Yolov7-tiny algoritmaları ile karşılaştırılmıştır. Yolov8-s ve yolov5-s algoritmalarının doğruluk değeri ve FPS değeri bakımından avantajlı olduğu belirtilmiştir. Mevcut çalışmada bu bulgulara ek olarak Yolov3, Yolov6, Yolov7 ve bunların s, m, l, x versiyonları karşılaştırılmıştır.

Liu ve ark. [39] Yolov5-s algoritmasının backbone yapısını Efficientlite ile değiştirmişlerdir. Yolov5-s algoritmasının daha gelişmiş bir versiyonu ile %94,82 doğruluk elde etmişlerdir. Mevcut çalışmada ise Yolov5-s algoritması ile %97,80 doğruluk elde edilmiştir. Shi ve ark. [40] Yolov4 modeli kullanarak düşük irtifa drone tespiti için bir tanıma yöntemi önermiştir. Karşılaştırma için Yolov3 ve SSD algoritmaları tercih edilmiştir. Çalışmada Yolov4 algoritması ile elde edilen doğruluk değeri %89,32 'dir. Mevcut çalışmada ise Yolov4-tiny algoritması ile elde edilen doğruluk değeri ise %94,83'tür.

Verilen literatür özeti, derin öğrenme tabanlı nesne tespiti alanında bir dizi çalışmayı kapsamaktadır. Çeşitli araştırmalar, farklı derin öğrenme algoritmalarının performanslarını değerlendirmiş ve farklı veri setleri üzerinde bu algoritmaların karşılaştırmalarını sunmuştur. Özellikle, YOLO serisi algoritmaları (YOLOv3, YOLOv5, YOLOv8, YOLOv4) ve bunların farklı versiyonları, yaygın olarak karşılaştırılan ve incelenen algoritmalar arasında yer almaktadır. YOLOv5, YOLOv8 gibi daha yeni ve geliştirilmiş versiyonlarının, yüksek doğruluk ve işlem hızı açısından avantajlı olduğu vurgulanmıştır. Özellikle, YOLOv5-S ve YOLOv8-S algoritmalarının, farklı çalışmalarda daha yüksek doğruluk değerleri ve hızlı işlem performansı

sunduğu belirtilmiştir. Sonuç olarak, verilen çalışmaların üzerinden yola çıkarak, mevcut çalışmada özgün veri seti kullanarak geniş kapsamlı bir derin öğrenme tabanlı nesne tespiti algoritmaları karşılaştırması sunması ve bu algoritmaların farklı versiyonlarını içermesi, literatüre önemli bir katkı yapabileceğini göstermektedir. Bu çalışma, araştırmacıların belirli bir algoritmayı seçme konusunda daha bilinçli kararlar vermelerine ve gerçek dünya uygulamalarına daha uygun algoritmaları belirlemelerine yardımcı olabilir.

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Yapılan testler ve eğitimler sonucunda yolov3 algoritmasından elde edilen en yüksek doğruluk değeri %93,6'dır. Yolov3-tiny algoritmasından elde edilen en yüksek doğruluk değeri %84,72'dir. Yolov4-tiny algoritmasından elde edilen en yüksek doğruluk değeri %94,83'tür. Tiny modellerinin tercih edilme sebebi FPS değerlerinin daha yüksek olmasıdır. Yolov5 algoritmaları içerisinde en yüksek doğruluk değerinin elde edildiği yolov5 algoritması 5-l'dir ve %98,3 doğruluk elde edilmiştir. Yolov6 algoritmaları içerisinde elde edilen en yüksek doğruluk değeri 6-s algoritmasına aittir ve %97,8'dir. Yolov7-x algoritmasında elde edilen doğruluk değeri %87'dir. Çok yüksek bir değer elde edilemediği için diğer versiyonları ile eğitim gerçekleştirilmemiştir. Yolov8 algoritmaları içerisinde elde edilen en yüksek doğruluk değeri 8-m algoritmasına aittir ve %98'dir.

Eğitim sürecinin sonunda elde edilen verilerin değerlendirilmesi sonucunda, FPS ve doğruluk değerleri üzerinden yapılan analizler neticesinde, yolov4-tiny-tensorrt algoritmasının kullanılmasının daha verimli bir tercih olduğuna karar verilmiştir. Yolov4-tiny algoritmasından elde edilen model dosyası tensorrt'ye çevrilerek FPS değeri artırılmıştır. Bu algoritma ile yaklaşık olarak 30 FPS değeri elde edilmiştir, bu da sistemdeki nesne algılama ve sınıflandırma işlemlerinin hızlı ve güvenilir bir şekilde gerçekleştirilebileceğini göstermektedir.

Kullanılan algoritmanın eğitim parametreleri ve performans metrikleri şu şekildedir:

- Yığın Boyutu: 64
- Subdivision: 4
- Genişlik x Yükseklik: 416 x 416

- F1 Skor: %90
- mAP: %94,83

Çalışma sonucunda elde edilen sonuç ve bulgulardan yola çıkılarak gelecek çalışmalar için araştırmacılara şunlar önerilir; Yolov4-tiny-tensorrt algoritmasının yüksek FPS değeri sağlaması, tiny modellerin önemini vurgular. Gelecekteki çalışmalar, bu tiny modellerin geliştirilmesi üzerine odaklanabilir. Bu çalışmada kullanılan algoritmalar arasında yapılan karşılaştırmalar genişletilebilir. Diğer yaygın olarak kullanılan nesne algılama algoritmalarıyla karşılaştırmalar yapmak, alandaki en iyi performansı elde etmek için katkı sağlayabilir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

Bu araştırma, TÜBİTAK 2209-A Üniversite Öğrencileri Araştırma Projeleri Destekleme Programı kapsamında desteklenmiştir. TÜBİTAK'ın sağladığı maddi kaynaklar ve destek, bu araştırmanın gerçekleşmesine katkı sağlamıştır ve bilimsel araştırma deneyimi elde etmemize yardımcı olmuştur. Proje numarası 1919B012203674 olan bu araştırmanın gerçekleştirilmesinde maddi ve manevi desteklerinden dolayı TÜBİTAK'a teşekkür ederiz.

ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

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

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

Ferda Nur ARICI: Deneyleri yapmış, sonuçlarını analiz etmiş ve makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

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

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

There is no conflict of interest in this study.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Akyürek, S., M.A. Yılmaz, and M. Taşkıran, İnsansız Hava Araçları: Muhabere Alanında ve Terörle Mücadelede Devrimsel Dönüşüm. Bilge Adamlar Stratejik Araştırma Merkezi, Ankara, 2012.
- [2] ANKA İHA. Available from: <https://www.tusas.com/urunler/iha/operatif-stratejik-iha-sistemleri/anka>.
- [3] Vestel Karayel İHA. Available from: <https://www.vestel.com.tr/content/karayel>.
- [4] Ekmekcioglu, A. and M. Yıldız, İnsansız Hava Araçlarının Askeri ve Sivil Alanlarda Kullanımı: ABD ve Türkiye Örnekleri ve Bazı Politika Önerileri. Türk İdare Dergisi: p. 169.
- [5] Bayraktar TB2. Available from: <https://www.baykartech.com/tr/uav/bayraktar-tb2/>.
- [6] Bayraktar TB3. Available from: <https://baykartech.com/tr/bayraktar-tb3/>.
- [7] Kayaalp, K. and A.A. Süzen, Derin Öğrenme. Derin Öğrenme ve Türkiye'deki Uygulamaları, Adıyaman, Türkiye: İKSAD Yayınevi, 2018: p. 25-28.
- [8] Nvidia Jetson Nano Developer Kit. Available from: <https://developer.nvidia.com/embedded/jetson-nano-developer-kit>.
- [9] Keras Library. Available from: <https://keras.io/>.
- [10] LabelImg. Available from: <https://github.com/tzutalin/labelImg>.
- [11] Tensorflow Library. Available from: <https://www.tensorflow.org/?hl=tr>.
- [12] Du, J. Understanding of object detection based on CNN family and YOLO. in Journal of Physics: Conference Series. 2018. IOP Publishing.
- [13] Orhan, H. and E. YAVŞAN, Artificial intelligence-assisted detection model for melanoma diagnosis using deep learning techniques. Mathematical Modelling and Numerical Simulation with Applications, 2023. 3(2): p. 159-169.
- [14] Aktaş, A., Ö. DEMİR, and B. DOĞAN, Derin öğrenme yöntemleri ile dokunsal parke yüzeyi tespiti. Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 2020. 35(3): p. 1685-1700.
- [15] Zhou, D., et al. Iou loss for 2d/3d object detection. in 2019 international conference on 3D vision (3DV). 2019. IEEE.
- [16] Deng, J., et al. A review of research on object detection based on deep learning. in Journal of Physics: Conference Series. 2020. IOP Publishing.
- [17] Sang, J., et al., An improved YOLOv2 for vehicle detection. Sensors, 2018. 18(12): p. 4272.
- [18] Aswini, N. and S. Uma. Custom Based Obstacle Detection Using Yolo v3 for Low Flying Drones. in 2021 International Conference on Circuits, Controls and Communications (CCUBE). 2021. IEEE.
- [19] Bochkovskiy, A., C.-Y. Wang, and H.-Y.M. Liao, Yolov4: Optimal speed and accuracy of object detection. arXiv preprint arXiv:2004.10934, 2020.
- [20] Li, S., et al., Yolo-firi: Improved yolov5 for infrared image object detection. IEEE access, 2021. 9: p. 141861-141875.
- [21] Şekil 3. Available from: <https://www.geeksforgeeks.org/yolo-you-only-look-once-real-time-object-detection/>.
- [22] Wang, C.-Y., A. Bochkovskiy, and H.-Y.M. Liao. YOLOv7: Trainable bag-of-freebies sets new state-of-the-art for real-time object detectors. in Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 2023.
- [23] Li, C., et al., YOLOv6: A single-stage object detection framework for industrial applications. arXiv preprint arXiv:2209.02976, 2022.
- [24] Schmidt-Hieber, J., Nonparametric regression using deep neural networks with ReLU activation function. 2020.
- [25] Dubey, A.K. and V. Jain. Comparative study of convolution neural network's relu and leaky-relu activation functions. in Applications of Computing, Automation and Wireless Systems in Electrical Engineering: Proceedings of MARC 2018. 2019. Springer.
- [26] Şekil 6. Available from: <https://developer.qualcomm.com/software/qualcomm-neural-processing-sdk/learning-resources/developing-apps-with-neural-processing-sdk/tuning-optimizing-machine-learning>.
- [27] Bisong, E. and E. Bisong, Google colabatory. Building machine learning and deep learning models on google cloud platform: a comprehensive guide for beginners, 2019: p. 59-64.
- [28] Jiang, Z., et al., Real-time object detection method based on improved YOLOv4-tiny. arXiv preprint arXiv:2011.04244, 2020.
- [29] BalenaEtcher. Available from: <https://github.com/balena-io/etcher>.
- [30] Opencv. Available from: <https://qengineering.eu/install-opencv-on-jetson-nano.html>.

- [31] TensorRT. Available from: <https://developer.nvidia.com/tensorrt>.
- [32] PYQT5. Available from: <https://pypi.org/project/PyQt5/>.
- [33] Liu, M., et al., Uav-yolo: Small object detection on unmanned aerial vehicle perspective. *Sensors*, 2020. 20(8): p. 2238.
- [34] Hu, Y., et al. Object detection of UAV for anti-UAV based on improved YOLO v3. in 2019 Chinese Control Conference (CCC). 2019. IEEE.
- [35] Sahin, O. and S. Ozer. YOLODrone+: improved YOLO architecture for object detection in UAV images. in 2022 30th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU). 2022. IEEE.
- [36] ALTINÖRS, A. and S. ÇELİK, YOLOv3 Derin Öğrenme Algoritması ile İHA Görüntülerinden Çevresel Atık Tespiti. *International Journal of Innovative Engineering Applications*. 7(1): p. 76-85.
- [37] Albayrak, E., Derin öğrenme ile İHA görüntülerinden nesne tespiti yapılması. 2021, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [38] Li, Y., et al., A Modified YOLOv8 Detection Network for UAV Aerial Image Recognition. *Drones*, 2023. 7(5): p. 304.
- [39] Liu, B. and H. Luo, An improved Yolov5 for multi-rotor UAV detection. *Electronics*, 2022. 11(15): p. 2330.
- [40] Shi, Q. and J. Li. Objects detection of UAV for anti-UAV based on YOLOv4. in 2020 IEEE 2nd International Conference on Civil Aviation Safety and Information Technology (ICCASIT). 2020. IEEE.



Prediction of Mechanical Properties from Microstructure Images of AISI 1040 Steel Using Deep Learning

Rıdvan SERT^{1*}, Ömer ŞAHİN², Volkan KILIÇLI², Fecir DURAN¹

¹Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bilgisayar Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Yenimahalle/ANKARA

²Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Yenimahalle/ANKARA

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 22/04/2024
Düzeltilme: 15/05/2024
Kabul: 16/05/2024

Anahtar Kelimeler

AISI 1040 Çeliği
Mikroyapı
Mekanik Özellikler
Derin Öğrenme
Evrimsel Sinir Ağı

Article Info

Research article
Received: 22/04/2024
Revision: 15/05/2024
Accepted: 16/05/2024

Keywords

AISI 1040 Steel
Microstructure
Mechanical Properties
Deep Learning
Convolutional Neural
Network

Grafik Özet (Graphical/Tabular Abstract)

Çalışmaya ait akış şeması. / Flowchart of the study



Şekil A: İş akış şeması / Figure A: Flowchart diagram

Önemli noktalar (Highlights)

- Mikroyapı görüntülerinden mekanik özellik tahmini / Prediction of mechanical properties from microstructure images
- Ferrit oranlarının analizi / Analysis of ferrite ratios
- Evrimsel Sinir Ağı ile regresyon / Regression with Convolutional Neural Network

Amaç (Aim): AISI 1040 Çeliğinin mikroyapı resimlerinden Evrimsel Sinir Ağı kullanarak mekanik özelliklerin tahmin edilmesidir. / The aim is to predict the mechanical properties of AISI 1040 steel from microstructure images using a Convolutional Neural Network.

Özgünlük (Originality): Mekanik özellikler tahmin edilirken mikroyapıdaki ferrit hacim oranlarının dahil edilmesidir. / Including the ferrite volume fractions in the microstructure when predicting mechanical properties

Bulgular (Results): 100x büyütmede optik mikroyapı resimleri haddeye dik ve haddeye paralel olarak alınmış ve çekme testi sonucunda alınan veriler ile etiketlenmiştir. Bu veriler kullanılarak Evrimsel Sinir Ağı ile yapılan deneyler sonucunda MSE'de 4,36; RMSE'de 2,08; MAE'de 1,66 ve R²'de 0,99'luk başarı oranı elde edilmiştir. / 100x magnified optical microstructure images were taken both transverse and parallel to the rolling direction, and these images were labeled with data obtained from the tensile test results. Using these data, experiments conducted with a Convolutional Neural Network resulted in a Mean Squared Error (MSE) of 4.36, Root Mean Squared Error (RMSE) of 2.08, Mean Absolute Error (MAE) of 1.66, and an R-squared (R²) value of 0.99.

Sonuç (Conclusion): Çekme testlerine gerek kalmadan doğrudan mikroyapı resimlerinden mekanik özellikler tahmin edilebilmektedir. / Mechanical properties can be predicted directly from microstructure images without the need for tensile tests.



AISI 1040 Çeliğinin Mikroyapı Resimlerinden Mekanik Özelliklerinin Derin Öğrenme ile Tahmini

Rıdvan SERT^{1*}, Ömer ŞAHİN², Volkan KILIÇLI², Fecir DURAN¹

¹Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bilgisayar Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Yenimahalle/ANKARA

²Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Yenimahalle/ANKARA

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 22/04/2024
Düzeltilme: 15/05/2024
Kabul: 16/05/2024

Anahtar Kelimeler

AISI 1040 Çeliği
Mikroyapı
Mekanik Özellikler
Derin Öğrenme
Evrişimsel Sinir Ağı

Öz

Malzeme biliminde işlem-mikroyapı ve mekanik özellikler arasındaki çok iyi bir ilişki bulunmaktadır. Çeliklerin oda sıcaklığındaki mekanik özellikleri doğrudan mikroyapıda bulunan ferrit, sementit ve perlit hacim oranlarına ve tane boyutlarına bağlıdır. Bu çalışmada, AISI 1040 çeliğinin mikroyapı görüntülerinden yapay zekâ ile oda sıcaklığındaki çekme özelliklerinin tahmini gerçekleştirilmiştir. AISI 1040 çeliğinden ASTM-E8/E8M standardına uygun olarak hazırlanan çekme numuneleri oda sıcaklığında çekme testine tabii tutulmuştur. Sonraki adımda aynı çekme numunelerinin deforme olmamış bölgelerinden metalografik numune hazırlanıp mikroyapı resimleri elde edilmiş, ferrit ve perlit hacim oranları görüntü analizi yazılımıyla hesaplanmıştır. Bu veriler ile özgün bir veri seti oluşturulmuştur. Evrişimsel Sinir Ağı kullanılarak, mikroyapı resimlerinden akma, çekme ve kopma gerilimi değerleri tahmin edilmiştir. Gerçekleştirilen deneyler sonucunda mikroyapı resimlerinden AISI 1040 çeliğinin mekanik özelliklerinin başarılı bir şekilde tahmininin gerçekleştirilebileceği ortaya konulmuştur. Çalışma sonucunda Ortalama Kare Hatası 4,36; Kök Ortalama Kare Hatası 2,08; Ortalama Mutlak Hata 1,66; R-Kare 0,99 skorları elde edilmiştir.

Prediction of Mechanical Properties from Microstructure Images of AISI 1040 Steel Using Deep Learning

Article Info

Research article
Received: 22/04/2024
Revision: 15/05/2024
Accepted: 16/05/2024

Keywords

AISI 1040 Steel
Microstructure
Mechanical Properties
Deep Learning
Convolutional Neural Network

Abstract

In materials science, there is a strong link between process-microstructure and mechanical properties. The mechanical properties of steels at room temperature are directly affected by the ferrite, cementite and pearlite volume fractions and grain sizes of the microstructure. In this study, artificial intelligence was used to predict the tensile properties of AISI 1040 steel at room temperature based on images of its microstructure. Tensile specimens prepared from AISI 1040 steel in accordance with ASTM-E8/E8M were subjected to tensile tests at room temperature. In the next stage, metallographic specimens were created from undeformed sections of the tensile specimens, microstructure images were captured and image analysis tools were used to calculate ferrite and pearlite volume fractions. The data obtained as a result of this procedure was combined to create a unique dataset. The images in the dataset were then used to predict yield, tensile and break stress values using a Convolutional Neural Network. The results of the experimental studies carried out in this research have shown that microstructural images can be used to accurately predict the mechanical properties of AISI 1040 steel. In the experimental studies carried out in this study, 4.36 Mean Square Error (MSE), 2.08 Root Mean Square Error (RMSE), 1.66 Mean Absolute Error (MAE) and 0.99 R-Square (R²) values were obtained respectively as a result of testing the Convolutional Neural Network model on the dataset obtained.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Malzemelerin mekanik özelliklerinin belirlenmesi genellikle tahribatlı test yöntemleriyle yapılmakta olup, test süreci zaman alan, maliyetli ve titizlikle sürdürülmesi gereken bir süreçtir. Sıcaklık, nem ve diğer çevresel faktörler, numunenin malzemeyi en

iyi temsil edecek yerden alınması, mekanik testlerde kullanılan cihazların hassas ve kalibrasyonlu olması gibi durumlar mekanik özellik tespitini zorlaştırmaktadır. Bu sorunların üstesinden gelmek için son yıllardaki çalışmalarda Makine Öğrenmesi ve Derin Öğrenme algoritmaları kullanılmıştır [1-10].

Wang ve arkadaşları [1], su verilmiş ve temperlenmiş çelikler üzerinde bir tahmin çalışması yapmıştır. Çalışmada maksimum çekme gerilimi, akma gerilimi ve toplam uzama olmak üzere üç farklı mekanik özellik tahmin edilmiş ve bunun için altı farklı Makine Öğrenmesi algoritması kullanılmıştır. Yapılan deneylere göre en iyi performans sonuçları optimum Gauss Süreç Regresyonu ile elde edilmiştir ve veri miktarının tahmin performansı üzerindeki etkisi tartışılmıştır.

Xu ve arkadaşları [2], üretim sürecinde çelik ürünler için çevrimiçi kalite ön belirlemesini sağlayan bir çalışma gerçekleştirmiştir. Bu çalışma için çekme gerilimi, akma gerilimi, uzama ve şekil değiştirme oranı olmak üzere dört farklı mekanik özellik değeri dikkate alınmıştır. Mekanik özelliklerin tahmin edilmesi için Uzun Kısa Süreli Bellek, Geçitli Tekrarlayan Birim ve Gauss Süreç Regresyonu modelleri kullanılmış ve testler gerçekleştirilerek karşılaştırma işlemleri yapılmıştır.

Yüksek sıcaklıklarda yüksek dayanımlı çelik üzerinde Shaheen ve arkadaşları [3] tarafından bir çalışma yapılmıştır. Çeliğin akma gerilimi, çekme gerilimi ve Young modülü tahmin edilmeye çalışılmıştır. Bu özelliklerin tahmin edilmesi amacıyla Makine Öğrenmesi tabanlı Derin Sinir Ağı yöntemi kullanılmıştır. Sıcaklık ve kimyasal bileşim gibi girdi parametreleri alan bir tahmin yöntemi geliştirilmiştir.

Diao ve arkadaşları [4], karbon çelik verilerine dayanarak farklı mekanik özellikler üzerinde bir çalışma yapmıştır. Çekme gerilimi, kopma gerilimi, toplam uzama, Charpy darbe tokluğu, sertlik ve yorulma dayanımı gibi mekanik özelliklerin tahmin edilmesi için beş adet Makine Öğrenmesi modeli kullanılmıştır. Destek Vektör Regresyonu, Çok Katmanlı Algılayıcı, K-En Yakın Komşu, Çekirdekli Sirt Regresyonu ve Rastgele Orman modelleri ile testler gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Böylelikle kapsamlı ve yüksek performansa sahip yeni çeliklerin geliştirilmesinde kullanılması beklenen yeni bir optimizasyon stratejisi sunulmuştur.

Choudhury [5], çeşitli termomekanik işlemlerle üretilen seçilmiş çelikler için akma gerilimi ve uzama gibi mekanik özellikleri tahmin etmeyi amaçlamıştır. Bunun için 129 farklı veri örneği üzerinde çalışılmış ve Makine Zekâsı tabanlı bir model önerilmiştir. Modeli elde ederken Çoklu Lineer Regresyon ve Destek Vektör Regresyonu algoritmaları test edilmiş ve elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Xiong ve arkadaşları [6], Japonya Ulusal Malzeme Bilimi Enstitüsü veri tabanında yer alan karbon çelikler ve düşük alaşımlı çelikler ile ilgili 360 adet veri üzerinde çalışmıştır. Veride yorulma dayanımı, çekme gerilimi, kopma gerilimi ve sertlik olmak üzere dört adet mekanik özellik seçilmiştir. 360 veri örneğini temsil eden malzemelerin mekanik özelliklerini tahmin etmek için Rastgele Orman, K-En Yakın Komşu, Yapay Sinir Ağı, Doğrusal En Küçük Kareler ve Sembolik Regresyon olmak üzere beş adet Makine Öğrenmesi algoritması kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, Rastgele Orman Regresyonu en iyi tahmin performansını göstermiştir.

Azimi ve arkadaşları [7], düşük karbonlu çeliğin belirli örneklerinde mikroyapısal sınıflandırma yapmayı amaçlamıştır. Bunun için Derin Öğrenme yöntemi olan Maksimum Oylamalı Tamamen Evrişimsel Sinir Ağı yöntemi geliştirilmiş ve çalışmada sınıflandırma yapmak için kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar literatürdeki farklı çalışmalarla kıyaslanmış ve önerilen modelin çelik kalitesi değerlendirmesi için daha başarılı olduğu gösterilmiştir.

Muñoz-Rodenas ve arkadaşları [8], çelik mikroyapılarının görüntü sınıflandırması için farklı Makine Öğrenmesi tekniklerini ele almıştır. Tavlama, su verme ve temperleme olmak üzere üç adet ısı işleme yapılan çelik örnekleri çalışmada kullanılmıştır. Öğrenme modelleri, ilgili ısı işlemlere göre sınıflandırma yapmaktadır. Topluluk Öğrenmesi Yöntemleri, Karar Ağacı, Destek Vektör Makinesi, Naif Bayes, K-En Yakın Komşu ve Lojistik Regresyon Çekirdeği olarak 6 adet Makine Öğrenmesi modeli kullanılmıştır. Bunlara ek olarak Derin Öğrenme tabanlı GoogLeNet ve ResNet50 modelleri de değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, Derin Öğrenme yöntemlerinin klasik Makine Öğrenmesi yöntemlerine göre daha yüksek performans sergilediği gösterilmiştir.

Cheloe Darabi ve arkadaşları [9], deneysel mikroyapılara dayalı olarak Faz Alanı Modelleme kullanmış ve çift fazlı çelik mikroyapılarından oluşan bir veri seti oluşturmuştur. Bu veri seti farklı ısı işlem koşullarında mekanik davranışları içermektedir. Tüm veri seti çift fazlı çeliklerin yeni işlem koşullarında çekme gerilimi, akma gerilimi ve kopma gerilimi olmak üzere üç mekanik özellikle etiketlenmiştir. Mekanik özelliklerin tahmini için VGG16 ve ResNet50 olarak adlandırılan iki transfer öğrenme yaklaşımı hibrit model olarak kullanılmıştır. Bu çalışma farklı alaşım veri setlerine uygulanarak araştırmacılara metal

özellikleri hakkında daha farklı bir bakış sunabilecek durumdadır.

Kibrete ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada [10], yapay zekanın farklı türdeki kompozitlerin mekanik özelliklerini tahmin etmedeki uygulamaları yer almaktadır. Çalışmada yapay zekanın genel bir değerlendirmesi yapılmış ve ardından malzeme özelliklerinin tahmin edilme süreci açıklanmıştır. Kompozit malzemelerin mekanik özelliklerini tahmin etmede kullanılan çeşitli Makine Öğrenmesi ve Derin Öğrenme teknikleri değerlendirilmiştir. Araştırmacılar, bulgulara dayanarak malzeme özellikleri tahmin alanında karşılaşılan temel zorlukları tartışmakta ve gelecekteki araştırma yönleri hakkında öneriler sunmaktadır.

Literatürde mikroyapı resimlerinden doğrudan mekanik özelliklerin tahminine yönelik deneysel çalışmaların oldukça az olmasından dolayı bu çalışmada yaygın kullanılan bir karbon çeliğinde mekanik özellik değerlerinin mikroyapı resimlerinden Derin Öğrenme ile tahmin edilebilirliği araştırılmıştır. Bu amaç doğrultusunda AISI 1040 karbon çeliğinin hadde yönünde ve haddeye dik incelenen mikroyapı resimleri ile mekanik özellikler arasında ilişki kurulmaya çalışılmıştır. Hazırlanan veri seti üzerinde Derin Öğrenme algoritması olan Evrişimsel Sinir Ağı

eğitilip, test edilmiştir. Yapılan deneyler sonucunda akma, çekme ve kopma gerilimi tahmin edilmiştir.

2. MATERYAL VE METOD (MATERIAL AND METHODS)

Çalışmanın metodolojisi Şekil 1’de gösterilmektedir. Çalışmada ilk olarak çekme testi yapıp numuneler belirli gerilim altında kopma eylemi gerçekleştirmiştir. Test sonucunda akma, çekme ve kopma gerilimi değerleri ölçülmüştür. Sonrasında mikroyapı resimlerinin eldesi için metalografik numune hazırlama süreci gerçekleştirilmiştir. Metalografik numunenin hazırlandıktan sonra mikroskop altında görüntüleri alınıp, ferrit oranlarının analizi yapılmıştır. Elde edilen resimler ve analiz verilerinden veri seti hazırlanmıştır. Veri setinde üzerinde ferrit hacim oranına göre ayıklama ve görüntülerin artırımı işlemleri yapılmıştır. Veri seti hazır hale getirildikten sonra Evrişimsel Sinir Ağı algoritmasına giriş olarak verilmiş ve üzerinde eğitim yapılmıştır. Evrişimsel Sinir Ağı kullanılarak akma, çekme ve kopma gerilimi değerleri tahmin edilmiştir.



Şekil 1. Deneysel metodoloji (Experimental methodology)

2.1. Malzeme (Material)

American Iron and Steel Institute (AISI) 1040 çeliği, karbon içeriği açısından sertleşmeye uygun ve ısıtma işlemi sonunda belirli yükler altında yeterli dayanım ve tokluk sergileyen endüstride yaygın

kullanılan karbon çeliklerdir. AISI 1040 çeliği sıcak haddelenmiş olarak 10 mm çapında 6 metre boyunda silindirik halde Aydınlar Makine ve Metal Ltd. Şti. firmasından temin edilmiştir. Çalışmalarda kimyasal bileşimi Tablo 1’de verilmiş, AISI 1040 karbon çeliği kullanılmıştır.

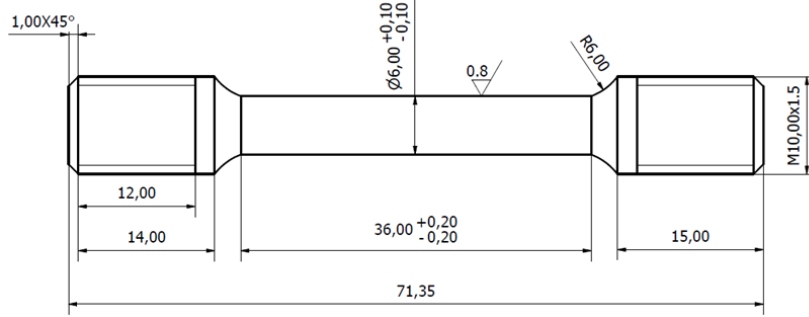
Tablo 1. AISI 1040 çeliğinin kimyasal kompozisyonu (ağırlıkça %) (Chemical composition of AISI 1040 steel (by weight %))

C	Si	Mn	P	S	Cu
0,395	0.251	0.6	0.025	0.015	0.012

2.2. Çekme Testi (Tensile Test)

Çekme testi, bir numunenin kopana kadar o numune üzerinde gerilimin uygulandığı bir malzeme bilimi testidir. Bu test sonucunda numunenin akma, çekme, kopma gerilimi ve toplam uzama gibi mekanik özellikleri belirlenir [11]. Çekme testleri

Instron 3369 model çekme test cihazı ile 1mm/dk hızla çekilerek veriler elde edilmiştir. Toplam 12 adet AISI 1040 çeliği test edilmiş olup çekme deneylerinde kullanılan çekme numunesinin boyutları Şekil 2’de verilmiştir.



Şekil 2. Deneylerde kullanılan çekme numunesinin boyutları (Dimensions of the tensile sample used in the experiments)

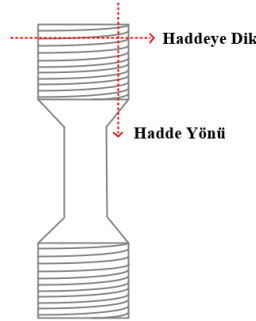
2.3. Metalografik Numune Hazırlığı ve

Mikroyapı İnceleme (Metallographic Sample

Preparation and Microstructure Analysis)

Her bir numunenin mikroyapılarının resimlerinin alınması için metalografik numuneler hazırlanması gerekmektedir. Bu numunelerin hazırlanması görüntülerin doğru bir şekilde alınması için önem

taşımaktadır. İlk olarak numunelerin hadde yönü ve haddeye dik kesitleri belirlenmiştir. Bu incelenen kesitler Şekil 3’te gösterilmiştir.



Şekil 3. Metalografik incelemelerde hadde yönü ve haddeye dik bölgelerin çekme numunesi üzerinde şematik gösterimi (Schematic representation of the rolling direction and transverse sections on the tensile sample in metallographic examination)

Şekil 3’te gösterildiği gibi numunelere karşıdan bakıldığında enine doğru olan kesit haddeye dik, boyuna olan kesit hadde yönü olmaktadır. Bu kesitlere göre kesme işlemi uygulanmıştır. Kesilmiş kısımlar alınıp bakalite alma işlemiyle kalıplanmıştır. Kalıplama yapıldıktan sonra zımparalama ve parlatma işlemi uygulanmıştır. Bu işlemlerin hemen ardından mikroyapıların açığa çıkarılması amacıyla %2 Nital çözeltisiyle dağlama yapılmıştır. Numunelerin, mikroyapıları Leica DFC 460 dijital kamera bağlantılı Leica DMI5000M optik mikroskop ile görüntülenmiş ve JPEG formatında mikroyapı resimleri kaydedilmiştir.

2.4. Veri Setinin Hazırlanması (Dataset Preparation)

Veri setinin hazırlanması sürecinde, mikroskoptan elde edilen görüntüler, alındıkları numunenin bölgelerine göre isimlendirilmiştir. İsimlendirme işlemi, dikey ve yatay eksenler dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir. Dikey eksende yer alan bölgeler, isimlerinin önüne 'D' harfi eklenerek; yatay eksende yer alan bölgeler ise 'Y' harfi ile başlayacak şekilde adlandırılmıştır.

Alınan her bir 198 görüntünün boyutu 2560x1920 pikseldir. Görüntü sayısının az olması ve

boyutlarının büyük olması sebebiyle her bir görüntü 224x224 piksellere ayrılıp veri artırımı yapılmıştır. Görüntüler 224x224 piksel boyutlarını bölündüğünde bir görüntüden 108 görüntü oluşmaktadır. Veri artırımı yapıldığında toplamda 21384 görüntü elde edilmiştir.

Daha sonrasında elde edilen görüntüler, ferrit oranlarına göre ayıklanmıştır. Öncelikle 9 bölgenin ferrit oranlarının ortalaması alınmıştır ve denklem (1)'de belirtilmiştir.

$$\bar{x} = \frac{1}{9} \sum_{i=1}^9 x_i \quad (1)$$

\bar{x} : 9 bölgenin ferrit oranlarının ortalaması

x_i : i'nci bölgenin ferrit oranı

Histeresiz prensibi kullanılarak histeresiz marjı %0,3 seçilmiştir ve bu değere göre bir histeresiz bandı aralığı elde edilmiştir. Denklem (2)'de gösterilmiştir.

$$HBA = [\bar{x} - hm, \bar{x} + hm] \quad (2)$$

HBA : Histeresiz bandı aralığı

hm : Histeresiz marjı

9 bölgede gerçekleştirilen ferrit oranı analizinde, sonuçlara en çok katkıda bulunacak bölgelerin seçimi kombinasyonlar yardımıyla yapılmıştır. Bu kombinasyonlar yapılırken hem kombinasyon sayısının hem de kombinasyonda bulunan bölge adedinin en fazla olması amaçlanmıştır. Böylece, analiz süreci boyunca elde edilen verilerin genişliği

ve derinliği artırılarak, ferrit oranı üzerindeki etkilerin daha kapsamlı bir şekilde değerlendirilmesi sağlanmıştır. Bundan dolayı 9 bölgenin 5'li kombinasyonları alınıp bu kombinasyonlarda bulunan bölgelerin tamamının ferrit oranlarının ortalaması alınmıştır ve denklem (3)'te gösterilmiştir.

$$\bar{x}_C = \frac{1}{5} \sum_{j \in C} x_j \quad (3)$$

\bar{x}_C : Kombinasyonlardaki bölgelerin ferrit oranlarının ortalaması

x_j : Kombinasyona dahil olan her bir bölgenin ferrit ortalaması

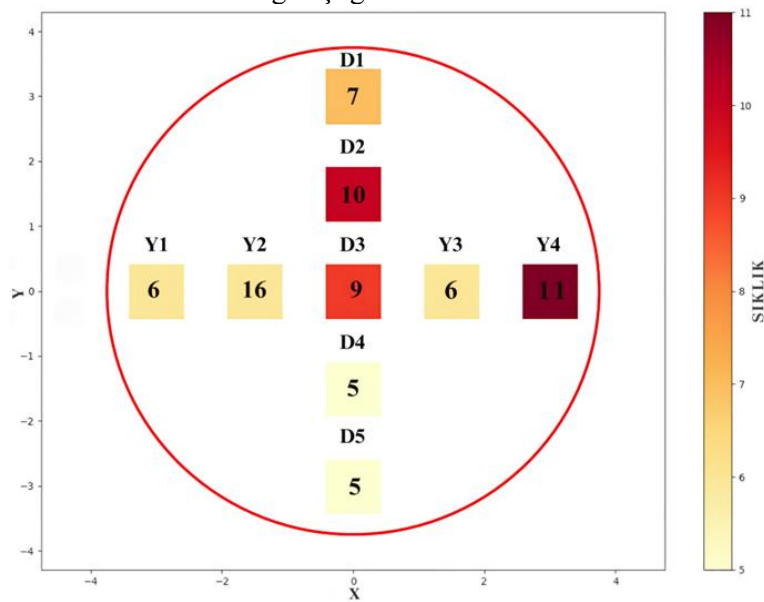
C : 5 bölgeyi içeren her bir kombinasyon

Kombinasyonlardaki bölgelerin ferrit oranlarının ortalaması; belirlenen histeresiz bandı aralığına dahilse her bir bölge 1 olarak, dahil değilse her bir bölge 0 olarak işaretlenmiştir ve bu işleme dair indikatör fonksiyonu (4)'te gösterilmiştir.

$$I(\bar{x}_C) = \begin{cases} 1, & \bar{x}_C \in HBA \\ 0, & \bar{x}_C \notin HBA \end{cases} \quad (4)$$

$I(\bar{x}_C)$: İndikatör fonksiyonu

İsı haritasında 1 olan bölgeler belirtilmiş ve 1 olarak işaretlerin bölgelerin adedi o bölgelerin üzerinde sayı ile belirtilmiştir. Örneğin 3. numunenin haddeye dik kesitindeki bölgelerin ısı haritası Şekil 4'te verilmiştir.



Şekil 4. 3. numunenin haddeye dik kesitinden elde edilen ısı haritası (Heat map obtained from the transverse section of the third sample)

Isı haritasındaki en çok 1 ile işaretlenen bölgelerin adedine göre bu 9 bölgeden adedi en fazla olan 3 bölge seçilmiştir. Bu seçilen bölgelerdeki görüntüler veri setinin boyutunu belirlemiştir. Ferrit

oranına göre ayıklandığında toplam 7128 görüntü kalmıştır. Veri setindeki görüntü sayıları Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2. Veri artırımı yapıldıktan sonra ferrit oranına göre elde edilen görüntü sayıları (The number of images obtained according to the ferrite ratio after data augmentation)

	Ferrit Oranına Bakılmadan Görüntü Sayısı	Ferrit Oranına Göre Görüntü Sayısı
Numune Başına Görüntü Sayısı	1944	648
Toplam Görüntü Sayısı	21384	7128

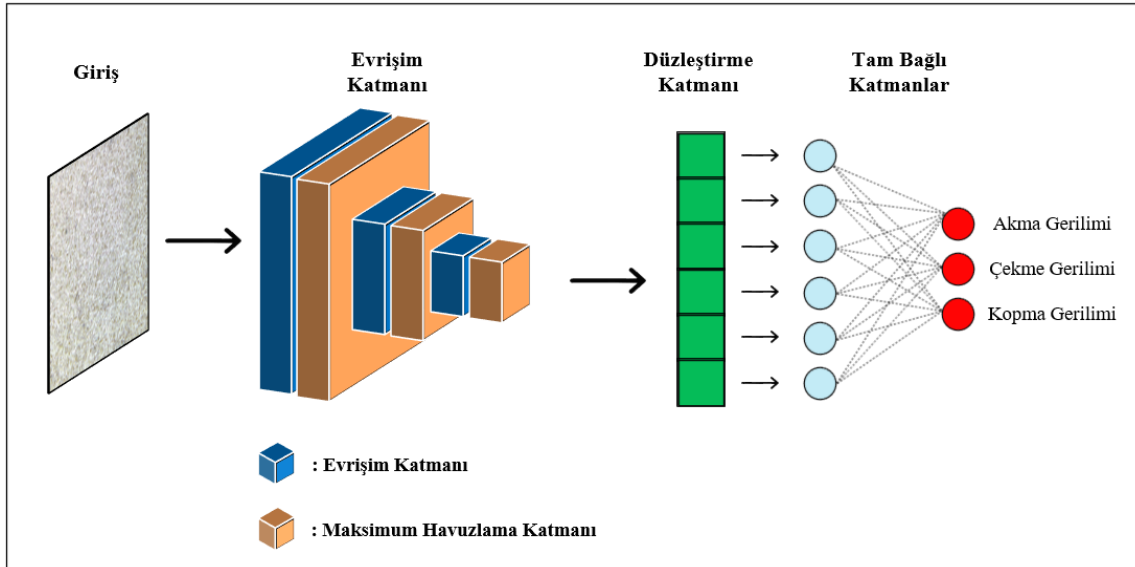
2.5. Evrişimsel Sinir Ağı (CNN) (Convolutional Neural Network (CNN))

Evrişimsel Sinir Ağı Derin Öğrenme alanındaki en önemli ağlardan biri olup ileri beslemeli bir sinir ağıdır. Sınıflandırma ve regresyon amaçlı kullanılabilir. Konvolüsyon yapılarıyla verilerden öznitelikler çıkarabilirler [12]. Evrişimsel Sinir Ağı birden fazla katmandan oluşur. Evrişim Katmanı, Havuzlama Katmanı ve Tam Bağlı Katmanlar’dır [13-14].

Evrişim Katmanı, Evrişimsel Sinir Ağının birinci katmanıdır. Amaç görüntülerden öznitelikleri çıkarmaktır. Bu öznitelikleri çıkartırken filtreler kullanılmaktadır. Havuzlama Katmanı bilgi kaybı olmadan verilerin boyutunu indirgeyerek hesaplama karmaşıklığını azaltır. Maksimum Havuzlama, Ortalama Havuzlama, Stokastik havuzlama gibi yöntemler bulunmaktadır. Tam Bağlı katmanlar ise normal bir Sinir Ağındaki gibi

nöronlardan oluşmaktadır. Tam Bağlı Katmanlar’daki her düğüm kendinden hem önceki hem de sonraki katmandaki her düğüme bağlıdır [15-16].

Yapılan çalışmada 32, 64, 128’lik filtrelerle sahip Evrişim Katmanı ve bu katmanların ardından 2x2’lik Maksimum Havuzlama Katmanı kullanılmıştır. Ayrıca Tam Bağlı Katmanlar’dan önce Düzleştirme uygulanmıştır. Bu işlem çok boyutlu öznitelik haritalarını tek boyutlu bir vektöre dönüştürerek Tam Bağlı Katmanlar’da kullanılabilir hale getirmektedir [17]. Düzleştirme işleminden sonra 128 nöronun bulunduğu Tam Bağlı Katmanlar bulunmaktadır. Bu katmanda Düzeltmiş Doğrusal Birim aktivasyon fonksiyonu kullanılmaktadır. Çıktı olarak akma, çekme ve kopma gerilimi tahmin edilmektedir. Evrişimsel Sinir Ağı’na ait katmanların görseli Şekil 5’te verilmiştir.



Şekil 5. Evrişimsel sinir ağı’nın katmanları (Layers of the convolutional neural network)

2.6. Test Ortamı (Test Environment)

Google Colab veya Colaboratory Makine Öğrenmesi ve Derin Öğrenme için kullanılabilir, kurulum gerektirmeyen bir Jupyter Notebook ortamıdır [18]. Deneyler bu ortamda Python programlama dili kullanılarak yapılmıştır.

2.7. Performans Metrikleri (Performance Metrics)

Bu çalışmada Evrişimsel Sinir Ağı modelinin performansını değerlendirmek için regresyon problemlerinde kullanılan, Ortalama Kare Hatası (Mean Square Error-MSE), Kök Ortalama Kare Hatası (Root Mean Square Error-RMSE), Ortalama Mutlak Hata (Mean Absolute Error-MAE) ve R-Kare (R2) metrikleri kullanılmıştır. Kullanılan metriklerin denklemleri sırasıyla (5), (6), (7) ve (8)'de verilmiştir.

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (5)$$

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

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

$$R2 = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (8)$$

y_i : Gerçek değerler

\hat{y}_i : Modelin tahmin ettiği değerler

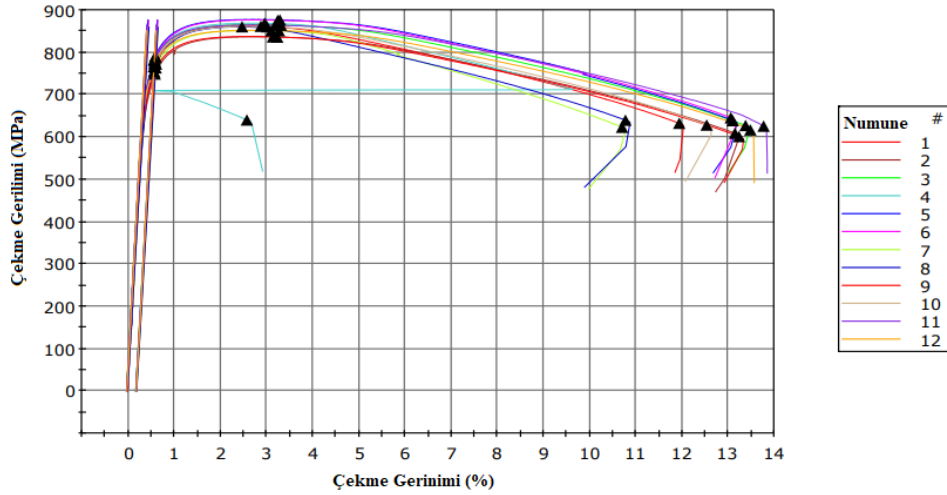
n : Örnek sayısı

\bar{y} : Gerçek değerler toplamının örnek sayısına bölünmesiyle elde edilen değer

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

3.1 Çekme Deneyi Sonuçları (Tensile Test Results)

Çekme testi sonucunda elde edilen verilerin çekme grafikleri Şekil 6'da gösterilmiştir. Şekil 6'daki grafikte çekme gerinimi yüzdelik uzamayı temsil ederken çekme gerilimi ise numunenin birim kesit alanına düşen yük miktarının MPa cinsinden gösterimidir. Grafığe bakılırsa 4. numunenin diğer numunelere göre erken bir kopma gerçekleştirdiği gözlemlenmektedir. Bu yüzden 4. numune deneylerde kullanılmamıştır. Çekme testi sonucunda elde edilen mekanik özellikler de Tablo 3'te gösterilmiştir.



Şekil 6. Çalışmalarda kullanılan toplam 12 numunenin çekme eğrileri (Tensile curves of the 12 samples used in the studies)

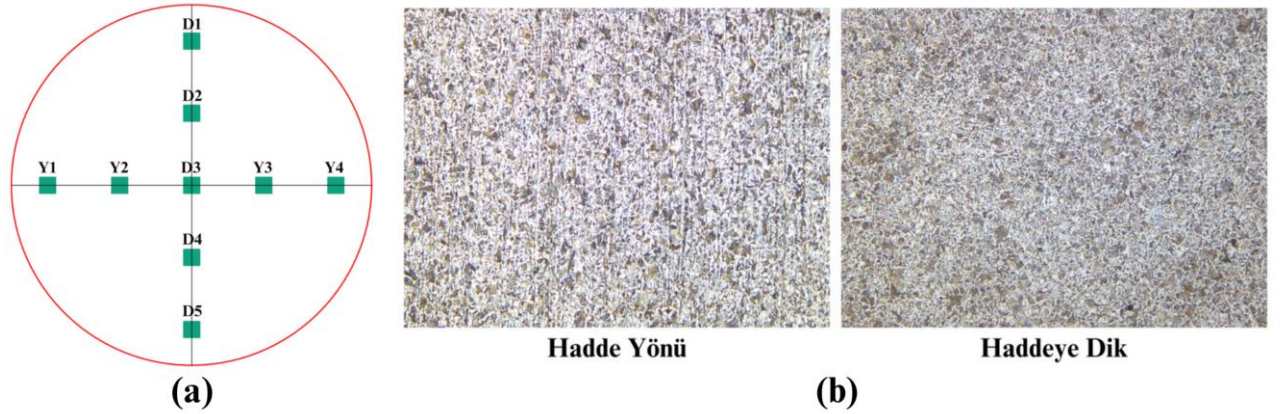
Tablo 3. Çekme testi sonucunda elde edilen mekanik özellik verileri (Mechanical properties data obtained from the tensile test)

Numune	Akma Gerilimi (MPa)	Çekme Gerilimi (MPa)	Kopma Gerilimi (MPa)
1	775.792	861.043	632.402
2	748.917	835.493	608.987
3	781.585	864.121	627.203
4	782.307	868.122	640.007
5	790.801	876.114	638.682
6	787.567	875.252	645.256
7	763.500	850.832	623.157
8	772.354	859.763	639.402
9	753.853	836.325	601.120
10	773.675	859.831	628.430
11	781.448	863.430	625.805
12	765.745	850.719	616.821

3.2 Mikroyapı Görüntülerinin Analizi (Tensile Test Results)

Mikroyapı resimleri Şekil 7 (a)'da gösterildiği gibi alınmıştır. Her bir numuneden 9 adet haddeye dik, 9 adet hadde yönü olmak üzere toplamda 18 adet

mikroyapı resmi alınmıştır. Tüm numunelerde haddeye dik ve hadde yönü dahil olmak üzere 198 adet görüntü elde edilmiştir. Her bir görüntünün boyutu 2560x1920 pikseldir. Hadde yönü ve haddeye dik kesitlerin örnek görüntüleri Şekil 7 (b)'de verilmiştir.



Şekil 7. a) Haddeye dik ve hadde yönünde mikroyapı alınan bölgelerin şematik gösterimi ve b) Hadde yönü ve haddeye dik kesitlerden alınan mikroyapı resimleri ((a) Schematic illustration of the sections taken for microstructure analysis in the rolling and transverse directions, and b) microstructure images from the rolling direction and transverse sections)

Çeliklerin mekanik özelliklerinin belirlenmesinde çelikteki ferrit ve perlit miktarları önemli bir rol oynamaktadır. Bu iki yapının akma gerilimi, çekme gerilimi ve kopma gerilimi üzerinde büyük etkileri vardır. Ferrit yumuşak bir faz olduğundan ferrit miktarı arttıkça akma, çekme ve kopma gerilimi azalacaktır. Bunun aksine perlit miktarı arttıkça akma, çekme ve kopma geriliminde artış olacaktır. Perlit ise ferrite göre daha sert bir yapıdır [19-20].

Mikroyapı görüntüleri üzerinden akma, çekme, kopma gerilimi bulmak için ferrit hacim oranı, bu mekanik özelliklerin tahmininde yardımcı olacaktır. Her bir mikroyapı resmindeki ferrit hacim oranını bulmak için Leica Application Suite Versiyon 4.6 görüntü analiz yazılımı kullanılmıştır. Bu yazılımda resimler önce gri tonlamaya çevrilmiştir. Daha sonrasında ise ferrit ve perlit olan bölgeler kontrast farkıyla ayırt edilmiştir. Her numune ve her bölge için ferrit hacim oranları Tablo 4 ve Tablo 5'te verilmiştir.

Tablo 4. Hadde yönü kesitindeki resimlerin ferrit hacim oranları (%) ve ortalamaları (Ferrite volume fractions (%) and averages of the images in the rolling direction section)

Bölge\Numune	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	66,424	65,427	63,625	61,503	62,932	56,067	56,397	51,689	58,067	70,076	60,883
2	68,082	66,061	64,820	57,192	55,671	62,481	55,841	57,996	57,137	59,438	54,238
3	68,910	63,403	64,359	60,049	61,865	61,022	55,076	57,770	56,306	63,766	56,640
4	67,848	63,271	63,290	61,223	66,582	56,443	53,095	58,397	54,208	63,738	60,402
5	70,502	62,127	60,491	75,143	70,349	50,539	51,859	59,177	54,865	67,539	59,146
6	68,143	66,286	67,205	64,165	59,006	59,707	60,304	58,500	55,496	62,735	56,922
7	61,472	65,371	66,212	61,467	71,171	61,769	60,610	55,549	56,722	71,834	52,311
8	70,108	65,168	62,206	56,944	58,466	56,383	55,185	57,490	59,724	67,144	60,183
9	68,625	61,712	61,205	60,557	54,798	61,494	52,990	55,807	58,335	65,130	53,423
Ortalama	67,790	64,314	63,713	62,027	62,316	58,434	55,706	56,931	56,762	65,711	57,128

Tablo 5. Haddeye dik kesitindeki resimlerin ferrit hacim oranları (%) ve ortalamaları (Ferrite volume fractions (%) and averages of the images in the transverse section)

Bölge\Numune	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	71,225	62,587	59,360	60,685	57,699	47,772	54,153	50,480	75,897	73,912	51,122
2	60,094	63,388	68,373	62,555	54,366	54,338	56,393	50,373	72,180	64,416	51,222
3	71,221	65,566	70,068	66,132	57,862	56,243	52,413	55,138	71,142	73,074	50,198
4	63,613	62,786	62,980	58,767	63,354	55,132	54,113	57,194	74,103	69,124	57,483
5	64,219	65,446	62,518	64,108	73,895	46,253	57,029	58,497	72,079	62,504	59,746
6	66,014	64,538	60,365	68,725	63,062	58,349	60,276	53,427	72,568	73,006	55,737
7	63,639	64,249	60,744	73,754	67,730	51,383	59,646	59,460	74,777	74,005	50,875
8	57,415	62,658	71,399	63,255	63,950	57,396	54,911	55,287	72,132	67,069	59,900
9	65,035	65,508	57,072	66,017	69,408	54,707	51,783	55,264	74,820	65,325	53,525
Ortalama	64,719	64,081	63,653	64,889	63,481	53,508	55,635	55,013	73,300	69,159	54,423

Bu çalışmada, AISI 1040 çeliği çekme testi sonuçlarına göre akma, çekme, kopma gerilimi değerleri ile bu çeliğin mikroyapı resimleri kullanılarak Evrişimsel Sinir Ağı üzerinde eğitim yapılmıştır. Eğitimler sırasında A100 Grafik İşlem

Birimi kullanılmıştır. Eğitim sonucunda çıktı olarak akma, çekme ve kopma gerilimi değerleri tahmin edilmiştir. Evrişimsel Sinir Ağı'na ait hiper-parametreler ve açıklamalar Tablo 6'da verilmiştir.

Tablo 6. Evrişimsel Sinir Ağı'nda kullanılan hiper-parametreler, değerleri ve açıklamaları

Hiper-parametreler	Değer	Açıklama
Optimizer	adam	Ağırlık güncellemelerinde daha düzgün bir ilerleme yaparak eğitim sırasında kayıp fonksiyonunu en az indirmeyi amaçlar.
loss_function	mse	Modelin tahmin ettiği değerler ile gerçek değerlerin farklarının karesinin ortalamasıdır.

Evrişimsel Sinir Ağı eğitilmeden önce veri setinin %80'i eğitim, %20'si ise test için ayrılmıştır. Veri setinde toplamda 7128 örnek bulunmaktadır. Buna

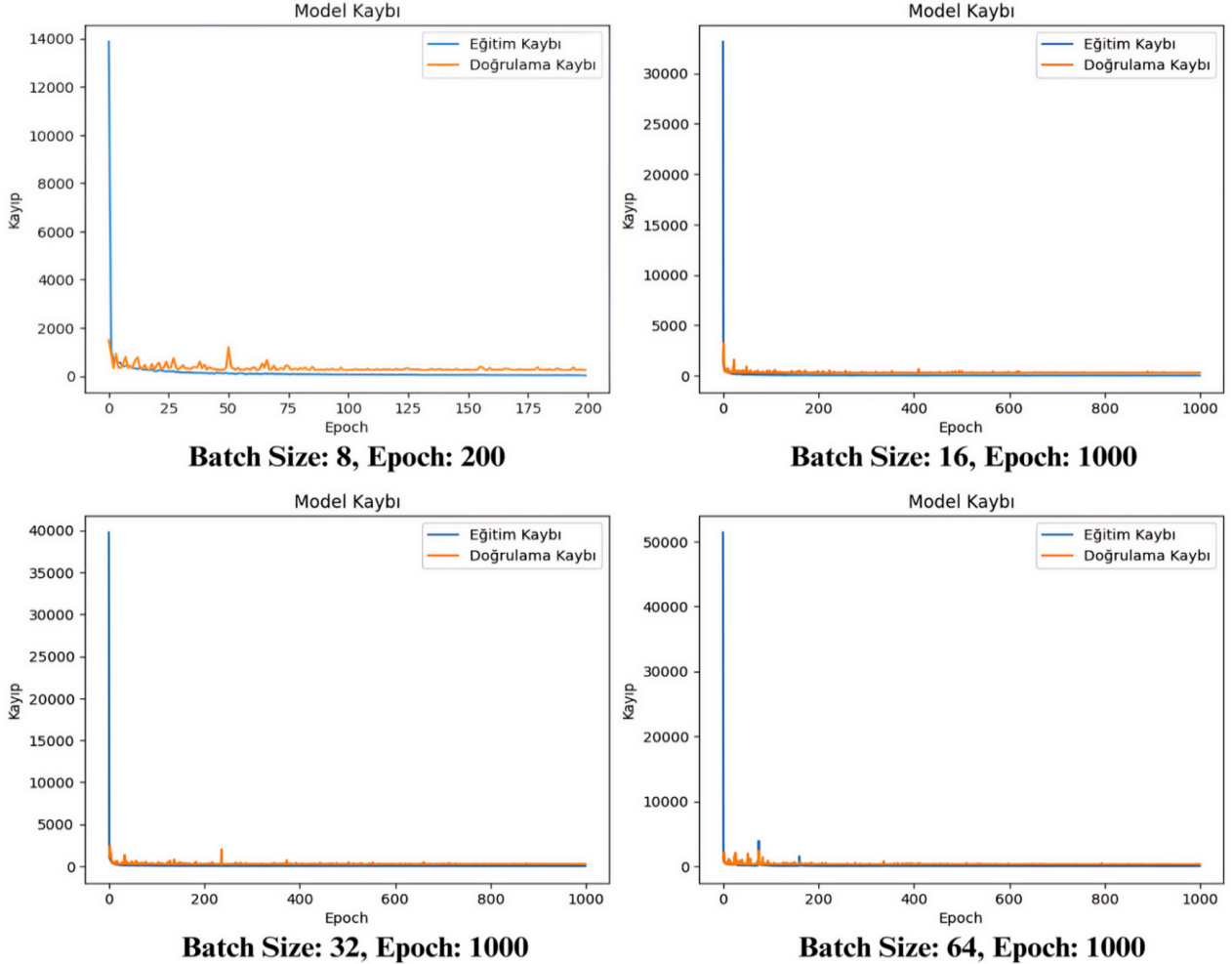
göre 5702 örnek eğitim, 1426 örnek de test olarak ayrılmıştır. Yapılan deneylerde farklı batch size ve epoch değerler kullanılmıştır (Tablo 7).

Tablo 7. Farklı batch size ve epoch değerlerinde elde edilen sonuçlar (Results obtained with different batch sizes and epoch values)

Batch Size/Epoch	50	100	200	500	1000
8	MSE: 95,97 RMSE: 9,79 MAE: 7,63 R2: 0,98	MSE: 69,74 RMSE: 8,35 MAE: 6,42 R2: 0,99	MSE: 25,15 RMSE: 5,01 MAE: 3,89 R2: 0,99	MSE: 27,56 RMSE: 5,25 MAE: 4,11 R2: 0,99	MSE: 30,42 RMSE: 5,51 MAE: 4,35 R2: 0,99
16	MSE: 94,57 RMSE: 9,72 MAE: 7,66 R2: 0,98	MSE: 37,51 RMSE: 6,14 MAE: 4,77 R2: 0,99	MSE: 44,64 RMSE: 6,68 MAE: 5,17 R2: 0,99	MSE: 13,07 RMSE: 3,61 MAE: 2,80 R2: 0,99	MSE: 10,10 RMSE: 3,17 MAE: 2,52 R2: 0,99
32	MSE: 176,94 RMSE: 13,30 MAE: 10,35 R2: 0,98	MSE: 112,28 RMSE: 10,59 MAE: 8,28 R2: 0,98	MSE: 37,39 RMSE: 6,11 MAE: 4,87 R2: 0,99	MSE: 17,89 RMSE: 4,23 MAE: 3,36 R2: 0,99	MSE: 13,35 RMSE: 3,65 MAE: 2,74 R2: 0,99
64	MSE: 130,17 RMSE: 11,40 MAE: 8,98 R2: 0,98	MSE: 62,59 RMSE: 7,91 MAE: 5,97 R2: 0,99	MSE: 32,43 RMSE: 5,69 MAE: 4,38 R2: 0,99	MSE: 19,53 RMSE: 4,41 MAE: 3,39 R2: 0,99	MSE: 4,36 RMSE: 2,08 MAE: 1,66 R2: 0,99

Buna göre sonuçlar incelendiğinde 8 batch size değerinde en başarılı sonuçlar tüm metriklerde 200 epoch'ta alınmıştır. 16, 32 ve 64 batch size değerlerinde ise tüm metriklerde en başarılı sonuçlar 1000 epoch sonunda alınmıştır. Farklı batch size değerlerinde en başarılı sonuçlar arasında

sırasıyla 64 batch size ve 1000 epoch, 16 batch size ve 1000 epoch ile eğitim gerçekleştirildiğinde elde edilmiştir. En başarılı sonuçların eğitimi sırasında ortaya çıkan eğitim ve doğrulama kaybı fonksiyonlarının grafiği Şekil 8'de gösterilmiştir.

**Şekil 8.** Eğitim ve doğrulama kaybı fonksiyonlarının grafiği (Graph of the training and validation loss functions)

64 batch size ve 1000 epoch eğitim sonucunda MSE: 4,36; RMSE: 2,08; MAE: 1,66; R2: 0,99 değerlerini almıştır. 16 batch size ve 1000 eğitim sonucunda ise MSE: 10,10; RMSE: 3,17; MAE: 2,52; R2: 0,99 değerlerini almıştır. Dikkat çeken sonuçlar ise R2 metriğinde olmuştur. Tüm batch size ve epoch değerlerinde R2 metriği yakın sonuçlar vermiştir.

4. SONUÇ (RESULT)

Bu çalışmada, endüstride yaygın olarak kullanılan AISI 1040 çeliğinin mikroyapısından bir Derin Öğrenme algoritması olan Evrişimsel Sinir Ağı ile akma, çekme ve kopma gerilimi tahmin edilmeye çalışılmıştır. AISI 1040 çeliğine çekme testi uygulanmış, test sonucunda akma, çekme ve kopma değerleri elde edilmiştir. 100x büyütmede optik

mikroyapı resimleri haddeye dik ve haddeye paralel olarak alınmış ve çekme testi sonucunda elde edilen değerler ile etiketlenmiştir. 7128 adet görüntüden oluşan veri seti literatüre kazandırılmıştır. Bu veri seti kullanılarak Evrişimsel Sinir Ağı ile deneyler gerçekleştirilmiştir. Deneyler sonucunda MSE'de 4,36; RMSE'de 2,08; MAE'de 1,66 ve R2'de 0,99'luk başarı oranı elde edilerek metalurji ve malzeme mühendisliğinde gelecekteki çalışmalara ışık tutmaktadır. Gelecekte yapılacak olan çalışmalarda; veri setindeki görüntü miktarının ve çelik türlerinin artırılması, transfer öğrenme modellerinin kullanılmasıyla birlikte başarı oranının artırılması sağlanabilir. Geliştirilen model yüksek performanslı gerçek zamanlı bir sisteme entegre edilerek üretim süreci dinamik hale getirilebilir ve ürün güvenilirliği artırılabilir.

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)

Rıdvan SERT: Veri arttırımı yaptı, veri setini oluşturdu. Modeli tasarladı ve deneylerde kullanıp sonuçlarını analiz etti. Makaleyi yazdı.

He performed data augmentation, created the dataset, designed the model, used it in experiments, and analyzed the results. He wrote the manuscript.

Ömer ŞAHİN: Çekme testlerini yaptı, numuneleri hazırladı. Numunelerin analizini yaptı.

He performed the tensile tests, prepared the samples, and analyzed the samples.

Volkan KILIÇLI: Çekme testlerini yaptı, analizlerini gerçekleştirdi. Makaleyi düzenledi ve eksik yerleri ekledi.

He performed the tensile tests and conducted the analyses. He edited the manuscript and added the missing sections.

Fecir DURAN: Modeli tasarladı, deneylerin sonuçlarını analiz etti. Makaleyi yazdı ve süpervizörlük yaptı.

He designed the model, analyzed the results of the experiments, wrote the manuscript, and supervised 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] S. Wang, J. Li, X. Zuo, N. Chen, and Y. Rong, "An optimized machine-learning model for mechanical properties prediction and domain knowledge clarification in quenched and tempered steels," J. Mater. Res. Technol., vol. 24, pp. 3352–3362, 2023.
- [2] G. Xu, J. He, Z. Lü, M. Li, and J. Xu, "Prediction of mechanical properties for deep drawing steel by deep learning," Int. J. Miner. Metall. Mater., vol. 30, no. 1, pp. 156–165, 2023.
- [3] M. A. Shaheen, R. Presswood, and S. Afshan, "Application of Machine Learning to predict the mechanical properties of high strength steel at elevated temperatures based on the chemical composition," Structures, vol. 52, pp. 17–29, 2023.
- [4] Y. Diao, L. Yan, and K. Gao, "A strategy assisted machine learning to process multi-objective optimization for improving mechanical properties of carbon steels," J. Mater. Sci. Technol., vol. 109, pp. 86–93, 2022.
- [5] A. Choudhury, "Prediction and analysis of mechanical properties of low carbon steels using machine learning," J. Inst. Eng. (India) Ser. D, vol. 103, no. 1, pp. 303–310, 2022.

- [6] J. Xiong, T. Zhang, and S. Shi, "Machine learning of mechanical properties of steels," *Sci. China Technol. Sci.*, vol. 63, no. 7, pp. 1247–1255, 2020.
- [7] S. M. Azimi, D. Britz, M. Engstler, M. Fritz, and F. Mücklich, "Advanced steel microstructural classification by Deep Learning methods," *Sci. Rep.*, vol. 8, no. 1, pp. 1–14, 2018.
- [8] J. Muñoz-Rodenas, F. García-Sevilla, J. Coello-Sobrinho, A. Martínez-Martínez, and V. Miguel-Eguía, "Effectiveness of machine-learning and deep-learning strategies for the classification of heat treatments applied to low-carbon steels based on microstructural analysis," *Appl. Sci. (Basel)*, vol. 13, no. 6, p. 3479, 2023.
- [9] A. C. Cheloe Darabi, S. Rastgordani, M. Khoshbin, V. Guski, and S. Schmauder, "Hybrid data-driven deep learning framework for material mechanical properties prediction with the focus on dual-phase steel microstructures," *Materials (Basel)*, vol. 16, no. 1, p. 447, 2023.
- [10] F. Kibrete, T. Trzepieciński, H. S. Gebremedhen, and D. E. Woldemichael, "Artificial intelligence in predicting mechanical properties of composite materials," *J. Compos. Sci.*, vol. 7, no. 9, p. 364, 2023.
- [11] D. Pandya and D. Shah, "Experimentation and its prediction of process parameters effects on elongation in tensile test of AISI 1008 steel using ANN model," *Procedia Technol.*, vol. 14, pp. 282–289, 2014.
- [12] Z. Li, F. Liu, W. Yang, S. Peng, and J. Zhou, "A survey of convolutional neural networks: Analysis, applications, and prospects," *IEEE Trans. Neural Netw. Learn. Syst.*, vol. 33, no. 12, pp. 6999–7019, 2022.
- [13] S. Albawi, T. A. Mohammed, and S. Al-Zawi, "Understanding of a convolutional neural network," in *2017 International Conference on Engineering and Technology (ICET)*, 2017, pp. 1–6.
- [14] A. Gülcü and Z. Kuş, "Konvolüsyonel Sinir Ağlarında Hiper-Parametre Optimizasyonu Yöntemlerinin İncelenmesi," *Gazi Üniv. Fen Bilim. Derg. C Tasar. ve Teknol.*, vol. 7, no. 2, pp. 503–522, 2019.
- [15] N. Aloysius and M. Geetha, "A review on deep convolutional neural networks," in *2017 International Conference on Communication and Signal Processing (ICCSP)*, 2017, pp. 0588–0592.
- [16] A. Dhillon and G. K. Verma, "Convolutional neural network: a review of models, methodologies and applications to object detection," *Prog. Artif. Intell.*, vol. 9, no. 2, pp. 85–112, 2020.
- [17] R. H. Abiyev and A. Ismail, "COVID-19 and pneumonia diagnosis in X-ray images using Convolutional Neural Networks," *Math. Probl. Eng.*, vol. 2021, pp. 1–14, 2021.
- [18] "Google colab," *Google.com*. [Online]. Available: <https://colab.research.google.com/notebooks/welcome.ipynb>. [Accessed: 02-Apr-2024].
- [19] M. Ishtiaq, A. Inam, S. Tiwari, and J. B. Seol, "Microstructural, mechanical, and electrochemical analysis of carbon doped AISI carbon steels," *Appl. Microsc.*, vol. 52, no. 1, 2022.
- [20] X. Tu et al., "Enhancing strain capacity by the introduction of pearlite in bainite and polygonal ferrite dual-phase pipeline steel," *Materials (Basel)*, vol. 14, no. 18, p. 5358, 2021.

Efficiency Optimization of Multiple Coil Wireless Power Transfer System based on Adaptive Impedance Matching Network

Fatih ISSI* 

¹Cankiri Karatekin University, Vocational High School, Electronics and Automation Department, Cankiri, Turkey

Article Info

Research article
Received: 31/03/2024
Revision: 29/04/2024
Accepted: 09/05/2024

Keywords

Multi-Coil Transmitter
Wireless Power Transfer
Wireless Power
Transmission Efficiency

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 31/03/2024
Düzeltilme: 29/04/2024
Kabul: 09/05/2024

Anahtar Kelimeler

Çok Bobinli Verici
Kablosuz Güç Aktarımı
Kablosuz Güç Aktarım
Verimi

Graphical/Tabular Abstract (Grafik Özet)

A study on wireless energy transfer using a system with multiple coils and a full bridge inverter at 85 kHz showed efficiency improvements with an adaptive capacity array, achieving 87.5-91.9% efficiency. Efficiency increased in five locations and decreased in three others after impedance matching. / Birden fazla verici bobine sahip, 85 kHz'de tam köprü invertör kullanılarak hazırlanan bir kablosuz enerji aktarımı sistemi için, adaptif kapasite dizisi kullanılarak %87,5-91,9 aralığında verim elde edilen bir verimlilik iyileştirme çalışması sunulmuştur. Çalışmada, kapasite ayarlamasından sonra verim, alıcı bobinin yerleştirildiği beş konumda artmış ve diğer üç konumda ise azalmıştır.

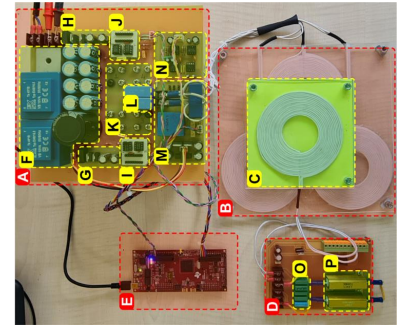
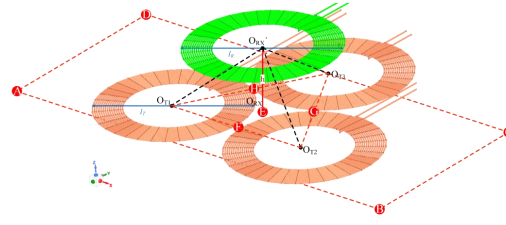


Figure A: Ansys Maxwell receiver coil layout with transmitter coils and main parts of the experimental set / **Şekil A:** Ansys Maxwell alıcı bobin ve verici bobinlere ait yerleşim düzeni ve deney setinin ana bileşenleri.

Highlights (Önemli noktalar)

- An innovative wireless power transfer system employing multiple transmitter coils / Birden fazla verici bobini kullanan yenilikçi bir kablosuz güç aktarım sistemi
- Simulation and experimental study for wireless power transmission efficiency change analysis/ Kablosuz güç aktarım verim değişim analizi için benzetim ve deneysel çalışma
- Importance of receiver coil placement in wireless power transfer systems / Kablosuz güç aktarım sistemlerinde alıcı bobin yerleşiminin önemi

Aim (Amaç): The aim of the document is to assess the impact of a adaptive capacity array on the efficiency of a wireless energy transfer system for various receiver coil placements. / Çalışmanın amacı, çeşitli alıcı bobin konumları için adaptif kapasite dizisinin kablosuz enerji aktarım sisteminin verimliliği üzerindeki etkisini değerlendirmektir.

Originality (Özgünlük): Adaptive impedance matching for a multi-coil wireless energy transfer system using adaptive capacity array is the unique aspect of this study / Adaptif kapasite dizisi kullanılarak çoklu bobinli kablosuz enerji aktarım sistemi için adaptif empedans uyumlamasının yapılması bu çalışmanın özgün tarafıdır.

Results (Bulgular): The simulation and experimental study both showed efficiency ranging from 87.5% to 91.5%. The tuned capacity array was used in both studies, resulting in efficiency ranging between 89.3% and 92.8% in the simulation and between 89.5% and 93.1% in the experimental study. / Benzetim ve deneysel çalışmalarının her ikisi de %87,5 ile %91,5 arasında değişen verimlilik göstermiştir. Her iki çalışmada da adaptif kapasite dizisi kullanılmış, bu da simülasyonda %89,3 ile %92,8 arasında ve deneysel çalışmada %89,5 ile %93,1 arasında değişen verimlilikle sonuçlanmıştır.

Conclusion (Sonuç): In cases where the adaptive capacity array was used, the efficiency increased in some coil positions and decreased in others. It was concluded that the resolution of the capacity array should be increased. / Adaptif kapasite dizisinin kullanıldığı durumlarda bazı bobin konumlarında verim artmış, bazı konumlarda ise verim azalmıştır. Kapasite dizisinin çözünürlüğünün artırılması gerektiği sonucuna varılmıştır.



Efficiency Optimization of Multiple Coil Wireless Power Transfer System based on Adaptive Impedance Matching Network

Fatih ISSI^{1*}

¹Cankiri Karatekin University, Vocational High School, Electronics and Automation Department, Cankiri, Turkey

Article Info

Research article
Received: 31/03/2024
Revision: 29/04/2024
Accepted: 09/05/2024

Keywords

Multi-Coil Transmitter
Wireless Power Transfer
Wireless Power
Transmission Efficiency

Abstract

A wireless energy transfer system was developed using multiple transmitting coils and a full bridge inverter at 85 kHz. The system consisted of three identical transmitter coils and one receiver coil. The study aimed to assess the impact of a tuned capacity array on the system's efficiency for various receiver coil placements. The experiment was conducted in eight different placements, with and without capacity tuning. The simulation showed that the efficiency ranged from 87.5% to 91.5%, while the experimental study showed efficiency between 87.8% and 91.9% under the same conditions. The tuned capacity array was utilized in both studies, resulting in efficiency ranging between 89.3% and 92.8% in the simulation and between 89.5% and 93.1% in the experimental study. The experiment revealed an increase in efficiency of 1.65%, 1.23%, 1.39%, 2.5%, and 1.28% in five different locations (A→E), respectively, while a decrease of 0.4%, 0.89%, and 0.45% was observed in three other locations (F→H), respectively.

Adaptif Empedans Eşleştirme Ağı Tabanlı Çok Bobinli Kablosuz Güç Aktarım Sisteminin Verimlilik Optimizasyonu

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 31/03/2024
Düzeltilme: 29/04/2024
Kabul: 09/05/2024

Anahtar Kelimeler

Çok Bobinli Verici
Kablosuz Güç Aktarımı
Kablosuz Güç Aktarım
Verimi

Öz

Çoklu verici bobine sahip, 85 kHz anahtarlama frekansında çalışan tam köprü invertör kullanılarak bir kablosuz enerji transfer sistemi geliştirilmiştir. Sistem, üç özdeş verici bobin ve bir alıcı bobinden oluşmaktadır. Çalışmada, adaptif kapasite dizisi kullanılarak, farklı alıcı bobin konumlarında sistemin verim değişimi analiz edilmiştir. Kapasite dizinin ayarlandığı ve ayarlanmadığı sekiz farklı bobin yerleşimi için benzetim ve deneysel çalışmalar yapılmıştır. Ayarlı kapasite dizisinin uygulanmadığı benzetim çalışması, verimin %87,5 ile %91,5 arasında değiştiğini gösterirken, deneysel çalışma aynı koşullar altında %87,8 ile %91,9 arasında değiştiğini göstermiştir. Ayarlı kapasite dizisinin uygulandığı durumda ise, benzetim çalışması için %89,3 ile %92,8 aralığında, deneysel çalışmada ise %89,5 ile %93,1 arasında değişen verim değerleri elde edilmiştir. Adaptif kapasite dizisi uygulandığında elde edilen deneysel çalışma sonuçları, beş farklı konumda (A→E) sırasıyla %1.65, %1.23, %1.39, %2.5 ve %1.28'lik bir verimlilik artışı ortaya koyarken, diğer üç konumda (F→H) sırasıyla %0.4, %0.89 ve %0.45'lik bir düşüş meydana geldiğini göstermiştir.

1. INTRODUCTION (GİRİŞ)

In typical two-coil wireless power transmission (WPT) systems, the maximum output power can be achieved at an optimal transmission distance that satisfies the critical connection condition between the transmitter (Tx) and receiver (Rx) coils [1]. However, the output power is significantly reduced outside the optimal transmission distance. Generally, wireless EV chargers can provide maximum load power in a center-aligned state, as this condition has maximum magnetic coupling [2-5]. Typical two-coil WPT systems are very responsive to the operating environment [6]. In an

over-connected situation where the distance between the coils is shorter than the optimal transfer distance, the system inevitably acquires unnecessary reactance components, which decreases the output power at the operating frequency [7]. However, the magnetic coupling between the transmitter (Tx) coil and the receiver (Rx) coil rapidly decreases due to misalignment between the Tx and Rx coils, resulting in a reduced power distribution capacity; therefore, conventional Tx and Rx coil sets often have tight misalignment tolerances. Simple two-coil groups are not preferred due to the very low misalignment tolerance and the significant reduction of the magnetic coupling due

to misalignment. Increasing the size of Tx and Rx coils based on the loop shape is just one of the methods to increase the tolerance for misalignment, but it is not practical due to the limitation of mounting areas for the coil set in vehicles[8]. The two most prominent misalignment problems observed in WPT systems are angular [9] and lateral[10] alignment. When studies are examined, automatically controlled alignment systems for central alignment can be used in EVs to guide EVs to charging stations, such as giant magnetoresistance (GMR) sensors or mobile communications [11, 12]. However, these guided systems require additional complex systems, and if the alignment systems fail, there may be a power distribution failure. To increase the tolerance for large misalignment, special coil structures can be used, for example, double D (DD), double D quadruple (DDQ), and bipolar (BP) pad [3-5, 13-15]. Although such coil structures can increase lateral misalignment tolerance, diagonal displacement becomes a significant issue as a potential worst-case scenario, as longitudinal and lateral displacements often occur simultaneously. Many studies focus on [16-21] to deal with misalignment problems. Although appropriate topologies are selected for specific operating conditions, reduced capacity to provide load power cannot be avoided if misalignments occur [16, 17]. Although the load power can be regulated under misalignment by various control methods such as frequency modulation[18, 19], variable switching capacitance [20, 21], the power efficiency inevitably decreases, which eventually reduces system efficiency and results in heat dissipation of the Tx coils.

This study investigates the effect of mutual inductance analysis and power transmission efficiency analysis on the solution of the alignment problem in cases where variable switching capacitance is applied and not applied for a wireless energy transfer system with a multi-coil simple transmitter (Tx) structure. The simple structure of the coil structure is investigated to determine whether the efficiency can be increased without any structural changes in existing systems. Keeping the cost of transformation to a minimum in existing systems is the main focus of the study. In the study, circuit analysis for a wireless energy transfer system with three transmitting coils was carried out in Section 2, the analysis of impedance in alignment problems by finite element method was carried out in Section 3, and the change analysis of transmission efficiency with variable switched

capacitance application was carried out in Section 4.

2. ANALYSIS (ANALİZ)

A wireless energy transfer system model with a simple coil structure involving three transmitter coils and one receiver coil has been studied. All three transmitter coils are identical to each other. The system has a high-frequency full-bridge inverter as a power source. The transmitter coils in the system are connected in series. The equivalent circuit of the system is given in Figure 1.

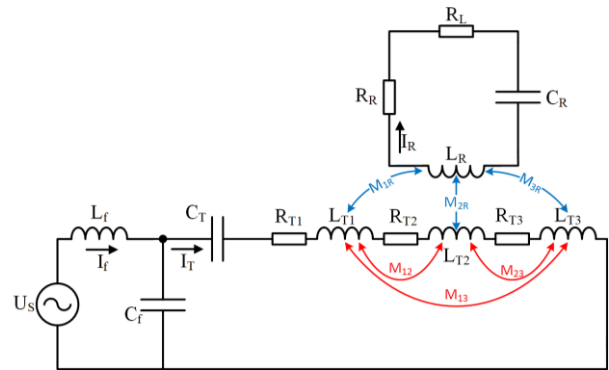


Figure 1. Equivalent circuit model of the wireless energy transfer system (Kablosuz enerji transfer sisteminin eşdeğer devre modeli)

L_f denotes the input impedance in the equivalent circuit, while C_f represents the capacitance in parallel. The transmitter coils are identified as L_{T1} , L_{T2} , and L_{T3} in the same circuit. The internal resistances of each transmitter coil are shown with R_{T1} , R_{T2} , and R_{T3} , respectively. C_T capacity is given to meet the resonance condition of the transmitting circuit. The input impedance of the transmitter circuit Z_f consists of the sum of the input inductance and parallel capacitance, which is given in Equation 1.

$$Z_f = j\omega L_f + \frac{1}{j\omega C_f} \quad 1$$

The total inductance of the transmitter coils is expressed by L_{Tsum} given in Equation 2. In addition to containing the self-inductance L_{Ti} of each coil in the total inductance; it also contains the mutual inductance between the coils, which is one of the most important parameters for wireless energy transfer. Here, the fact that the transmitter coils are in a fixed position remains constant by not changing the mutual inductance between the coils.

$$L_{Tsum} = \sum_{i=1}^3 L_{T_i} + 2 \sum_{i=1}^2 \sum_{h=i+1}^3 M_{T_h T_i} \quad 2$$

The equation expresses the mutual inductance as M_{ThTi} between the h and i 'th coils. It constitutes the sum of the mutual inductance values M_{12} between the first and second coils, M_{23} between the second and third coils, and M_{13} between the first and third coils, respectively. The sum of the internal resistances of the transmitter coils are expressed in R_{Tsum} and is calculated as given in Equation 3:

$$R_{Tsum} = \sum_{i=1}^3 R_{Ti} \quad 3$$

After the parameters in the equivalent circuit are calculated in this way, the equivalent impedance of the transmitter circuit is calculated as follows.

$$Z_T = \frac{1}{j\omega C_T} + \frac{1}{j\omega C_T} + j\omega L_{Tsum} + R_{Tsum} \quad 4$$

The transmitter circuit's equivalent impedance will be variable to create resonance conditions, regardless of whether the C_T capacity is constant or variable. In addition to the mutual inductance between transmitter coils, there is also mutual inductance between each transmitter and receiver coil. The mutual inductance between each i 'th coil and the receiving coil is expressed as M_{TiR} and is calculated as presented in Equation 5.

$$M_{TiR} = \sum_{i=1}^3 M_{TiR} + Z_{M_{TiR}} \quad 5$$

The equivalent impedance of the receiving circuit is expressed as Z_R as given in Equation 6. It consists of the sum of the self-inductance L_R of the receiving coil, the internal resistance R_R of the coil, the resonant capacity C_R and the receiver circuit load resistance R_L .

$$Z_R = j\omega L_R + \frac{1}{j\omega C_R} + R_R + R_L \quad 6$$

For the transmitter circuit to achieve the resonance requirement in the system, the sum of the serial capacity C_T , the sum of the self-inductances of the coils L_{Ti} and their mutual inductances M_{ThTi} , and the input inductance L_f must be equal to zero as given in Equation 7.

$$\frac{1}{j\omega C_T} + j\omega \left(\sum_{i=1}^3 L_{Ti} + 2 \sum_{i=1}^3 \sum_{h=i+1}^{i-1} M_{ThTi} - L_f \right) = 0 \quad 7$$

In this case, the source current I_T is equal to the ratio of the applied voltage U_s to the input impedance $j\omega L_f$.

$$I_T = \frac{U_s}{j\omega L_f} \quad 8$$

The I_R current passing through the receiving circuit varies depending on the transmitting circuit current. The I_T current flowing through the transmitting circuit induces a voltage in the receiving circuit depending on mutual inductance. The induced voltage passes the I_R current through the total resistance resistances of the receiving circuit ($R_R + R_L$). When the I_T current obtained in Equation 8 is written in place as in Equation 9, a current relationship is established between the transmitter circuit and the receiving circuit.

$$I_R = \frac{j\omega M_{TiR} I_T}{(R_R + R_L)} = \frac{U_s M_{TiR}}{L_f (R_R + R_L)} \quad 9$$

Receiving circuit power P_R is obtained as shown in Equation 10, depending on the current $I_T = U_s/j\omega L_f$ flowing through the transmitting circuit.

$$P_R = I_R^2 R_L = \frac{U_s^2 (\sum_{i=1}^3 M_{TiR})^2 R_L}{L_f^2 (R_R + R_L)^2} \quad 10$$

The total efficiency of the system η is given in Equation 11 by the ratio of the power transferred to the receiving circuit and the transmitter circuit power η .

$$\eta = \frac{|I_R|^2 R_L}{|I_T|^2 \sum_{i=1}^3 R_{Ti} + |I_R|^2 (R_R + R_L)} = \frac{\omega^2 (\sum_{i=1}^3 M_{TiR})^2 R_L}{(R_R + R_L)^2 \sum_{i=1}^3 R_{Ti} + \frac{\omega^2 (\sum_{i=1}^3 M_{TiR})^2}{(R_R + R_L)}} \quad 11$$

In this way, the efficiency η can be determined depending on the transmitter circuit power obtained due to the mutual inductance of each transmitter coil of the receiving circuit with the receiving coil M_{TiR} and the transmitter circuit power depending on the M_{TiR} . The efficiency analysis emphasized in Equation 4 is facilitated by the mutual inductance between the transmitter and receiver circuit. This allows for the variation analysis of M_{TiR} concerning the transmitter circuit's resonance capacity.

3. SIMULATION (BENZETİM)

Each self-inductance and mutual inductance value between the transmitter coils and the receiver coil was analyzed using the finite element method in Ansys Maxwell software. The analyzed coil layout

plan is given in Figure 2. In the analysis, the transmitter coil positions were fixed, and the receiver coil position was performed for eight positions from A to H points. The outer diameter of the coils used in the analysis is expressed as l_T , the

outer diameter of the receiver coil is l_R , the height between the plane of the transmitter coil and the receiver coil h , and the distances between each transmitter coil and the other transmitter coil are expressed as D_{12}, D_{23}, D_{13} , respectively.

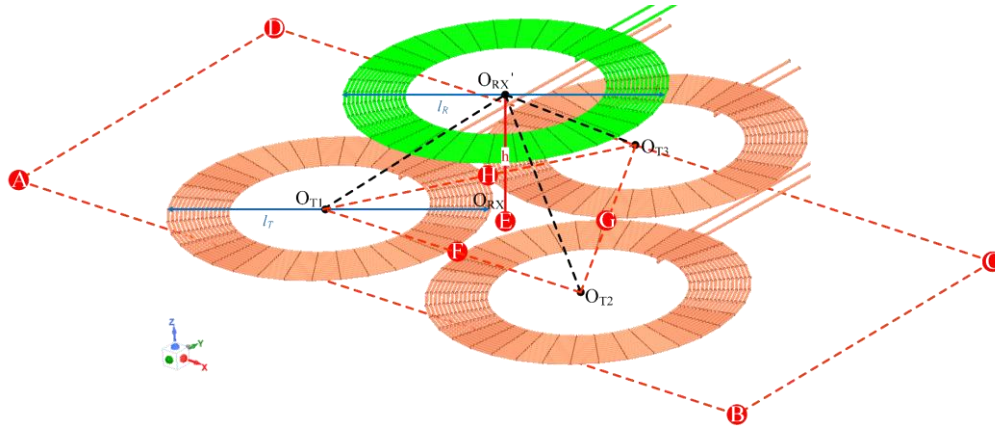


Figure 2. Ansys Maxwell receiver coil layout with transmitter coils (Verici bobinler ve Alıcı bobine ait Ansys Maxwell görünümü)

The center points of the transmitter coils are expressed as O_{T1}, O_{T2} , and O_{T3} , respectively, and the

center point of the receiver coil is expressed as O_{RX} . All the mentioned parameters are given in Table 1.

Table 1. Distances between coils, layout positions, and distances between A→H points (Bobinler arasındaki uzaklıklar, bobin konumları ve A→H konumları arasındaki uzaklıklar)

Parameter.	Distance (mm)						Position (x, y, z) (mm)			
	l_T	l_R	h	D_{12}	D_{13}	D_{23}	O_{T1}	O_{T2}	O_{T3}	O_{RX}'
Value	250	250	100	240	240	240	(0,0,0)	(250,0,0)	(250,200,0)	A(-100, -100, 100) B(-100, 350, 100) C(200, 350, 100) D(200, -100, 100) E(67.5, 120, 100) F(0, 120, 100) G(100, 200, 100) H(100, 50, 100)

The analysis was performed for each variable receiver coil position (A→H). The self-inductances and mutual inductances of the donor coils are presented in Table 2 and the magnetic flux change in the case of center alignments of the transmitter

coils and the receiver coil is shown in Figure 3. It is seen in the table that the self-inductance values of the transmitter coils and the receiver coil are constant.

Table 2. Self-inductance and mutual inductance values for A→H positions of the receiver coil (Alıcı bobinin A→H konumları için öz endüktans ve karşılıklı endüktans değerleri)

		Receiver Coil Positions							
		A	B	C	D	E	F	G	H
Self-Inductances(μH)	TX_1	57.315	57.165	57.028	57.165	57.031	57.029	57.031	57.026
	TX_2	57.187	57.026	57.170	57.026	57.035	57.029	57.029	57.035
	TX_3	56.442	56.429	56.430	56.429	56.427	56.427	56.428	56.427
	RX	57.035	57.167	56.176	57.167	57.008	57.069	57.008	57.021
Mutual Inductances(μH)	M_{12}	-2.419	-2.475	-2.475	-2.475	-2.482	-2.482	-2.482	-2.482
	M_{13}	-2.656	-2.664	-2.682	-2.664	-2.683	-2.683	-2.683	-2.683
	M_{23}	-2.748	-2.757	-2.739	-2.757	-2.758	-2.758	-2.758	-2.758
	M_{1R}	0.514	-1.868	-0.204	-1.918	-0.786	5.612	-2.058	3.919
	M_{2R}	-0.377	0.446	-1.797	-0.231	0.528	0.682	0.111	-1.977
	M_{3R}	-0.290	-0.668	-1.957	-2.122	-0.445	-2.168	-1.409	2.516

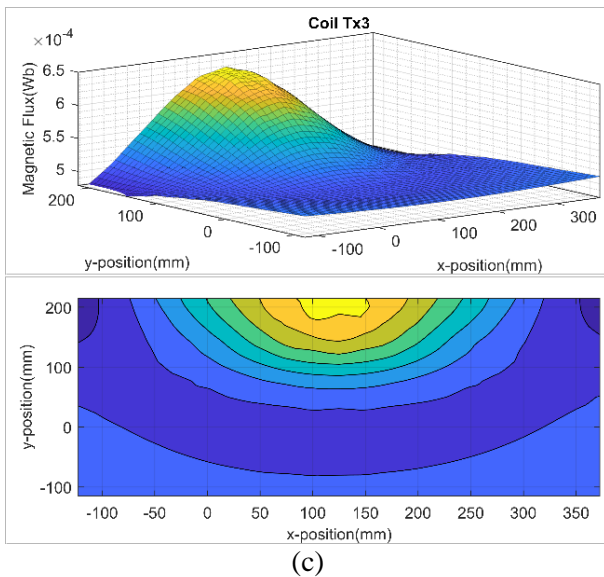
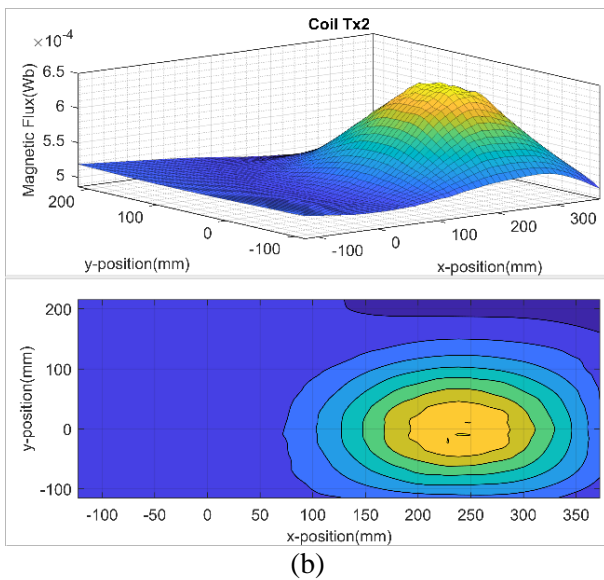
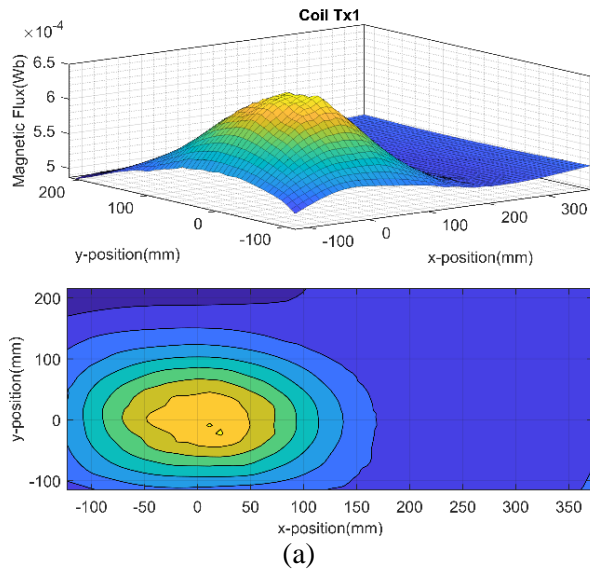


Figure 3. Magnetic flux change with the centers of the transmitter coils and the receiving coil aligned (Merkezleri hizalanmış, verici bobin ve alıcı bobine ait manyetik akı değişimi)

It is evident that the mutual inductances of the transmitter coils, M_{12} , M_{23} , and M_{13} , vary based on the position changes of the receiving coil. Again, it can be seen that the mutual inductance value of M_{1R} , M_{2R} , and M_{3R} between each transmitter coil and the receiving coil varies drastically. These mutual inductance values directly change the efficiency η value given in Equation 11 and affect the system's efficiency. It is possible to reduce this effect by changing the C_T capacity in the transmitting circuit.

The control of C_T capacity was done with the help of the algorithm presented in a previous study, and the efficiency analysis of the system was made in Section 4 [22]. The flow diagram of the algorithm used is given in Figure 4.

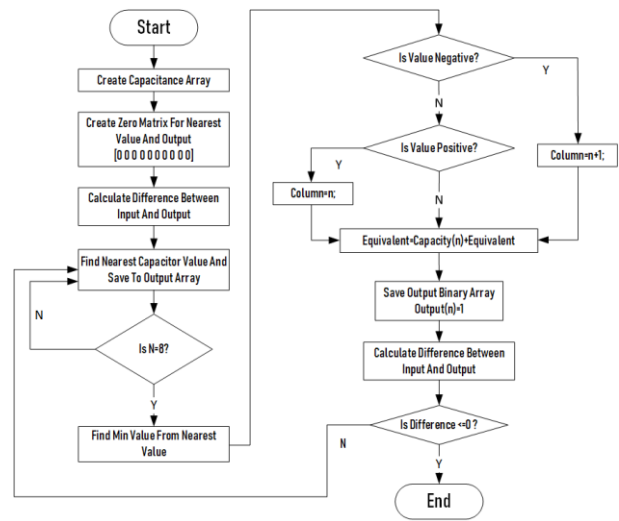


Figure 4. Capacity calculation algorithm(Kapasite hesaplama algoritması)[22]

Equivalent impedance calculations for the cases where the capacity array is applied and not applied are calculated as given in Figure 5. In the computation, equivalent impedance values were obtained for the resonant frequency of the system 85Khz. The impedance change for each coil position (A to H) was analyzed.

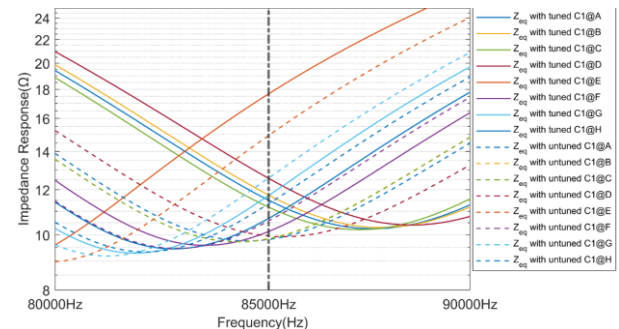


Figure 5. Equivalent impedance of WPT system with/without tuned capacitor array for positions A to H (A'dan H'ye kadar olan konumlar için adaptif kapasite

dizisi uygulanan/uygulanmayan WPT sisteminin eşdeğer empedansı)

By calculating the efficiency of the system according to the impedance change, the graph was obtained in Figure 6. In the chart, it is seen that the efficiency for points A, B, C, D, and E increased by 1.78%, 1.97%, 1.48%, 2.52%, and 1.30%, respectively. Adjusting the capacity array for positions F, G, and H resulted in a decrease in efficiency. The capacity array was underestimated because the mutual inductance was negative if the receiver coil was positioned at the midpoints of the transmitter coils with each other. For this reason, a decrease in efficiency has occurred at these points. Here, it is concluded that the algorithm used in capacitance array tuning cannot respond to the negative variation of mutual inductance.

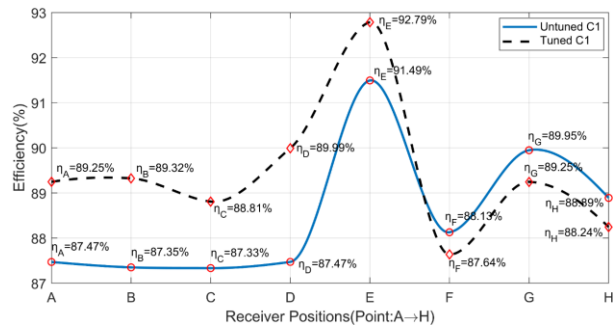


Figure 6. Efficiency analysis of tuned/untuned capacitor from A to H (A'dan H'ye ayarlanmış /ayarlanmamış kapasitenin verimlilik analizi)

4. EXPERIMENTAL RESULTS (DENEYSSEL SONUÇLAR)

The experimental study consists of five main parts, as given in Figure 7. The main parts are the power and control card (A), the transmitter coil group (B), the receiver coil (C), the receiving circuit power card (D) and the digital signal processor (DSP) that provides the control of the system. The grid voltage is rectified using the uncontrolled rectifier circuit (F) in the power and control card, and the high-frequency inverter DC bus voltage is produced. The DC Bus voltage is applied to the Mosfets (K) to create a high-frequency full bridge inverter with 85 kHz switching frequency. The drive circuits (I and J) are fed using the drive supply circuits (G and H) of the Mosfets. The switching signals of the drives are generated by the DSP and controlled operation of the inverter is ensured. High-frequency voltage is applied to the transmitter coil group (B) over the parallel capacity (L) at the inverter output. The measurement of the output current and voltage required to control the inverter is carried out by the measuring circuit (M). The obtained measurement signals are converted by amplification, filtering, and Zero-crossing detector circuit(N) to a level the DSP

can detect. Here, the Zero-Crossing detector circuit calculates the phase difference between current and voltage.

The energy transferred by the transmitter coil group is transferred by the receiver coil (C) to the receiving circuit power board (D). The energy is transferred to the receiver load (P) via the resonant capacitor (O) placed by the system's resonant frequency on the receiving circuit power board. Experimental studies were carried out using this mechanism.

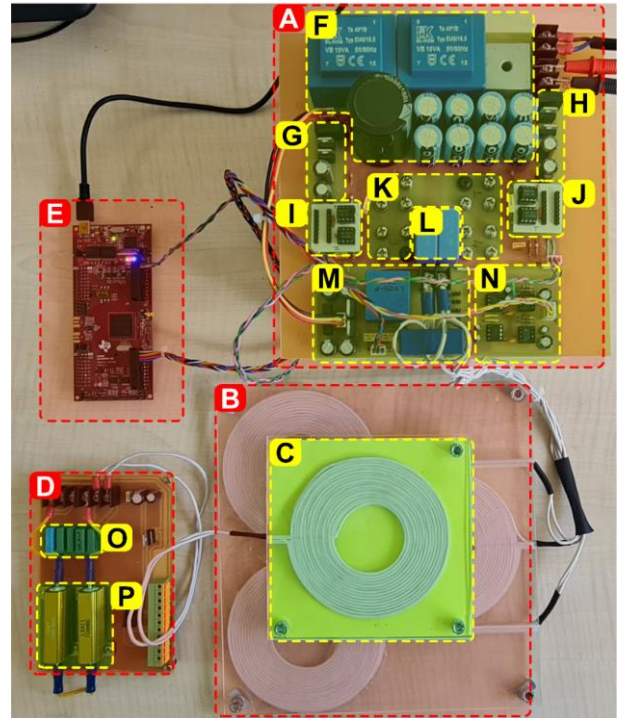


Figure 7. Main parts of the experimental set (Deney setinin ana bileşenleri)

In the first experimental study, the receiver coil was positioned in position A, and current, voltage, and phase difference measurements were performed. The results presented in Figure 8 were obtained.

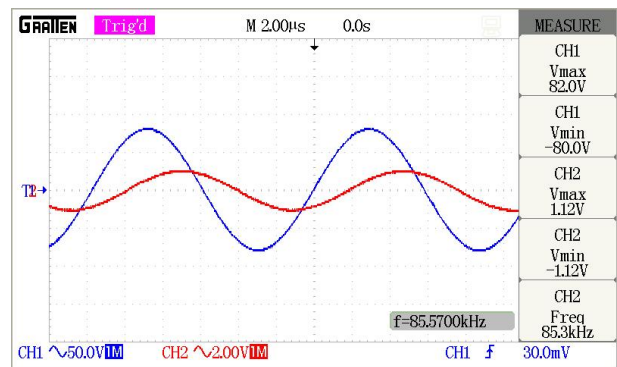


Figure 8. Voltage-current graph for positions A and B (A ve B konumları için gerilim-akım grafiği)

In this experiment, the transmitted power was realized as 660.23W, and the phase difference was

measured as 43.94° . The same experiment was performed in position B; the transmitted power was 659.34W, and the phase difference was 44.21° .

The test was repeated by bringing the receiver coil to the C position. The power obtained at this position was 556.48W, and the phase difference was 41.99° . When the receiver coil is turned to the D position, 553.32W power, and 42.08° phase difference are obtained. The same results were obtained at both locations, and the voltage-current graphs are presented in Figure 9.

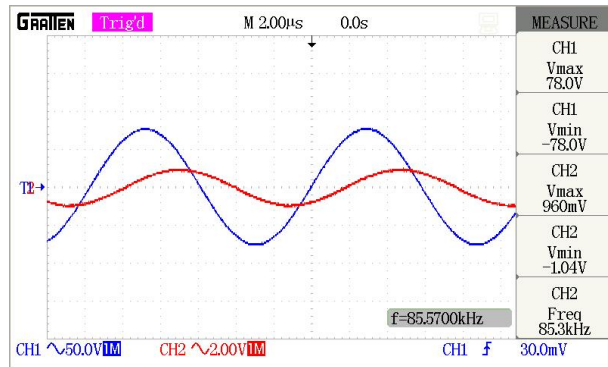


Figure 9. Voltage-current graph for positions C and D (C ve D konumları için gerilim-akım grafiği)

The receiver coil position has been moved to the E position at the center point of the transmitter coils. At this position, 864.90W of power was transmitted with a phase difference of 39.44° . The voltage and current graph of the experiment are given in Figure 10.

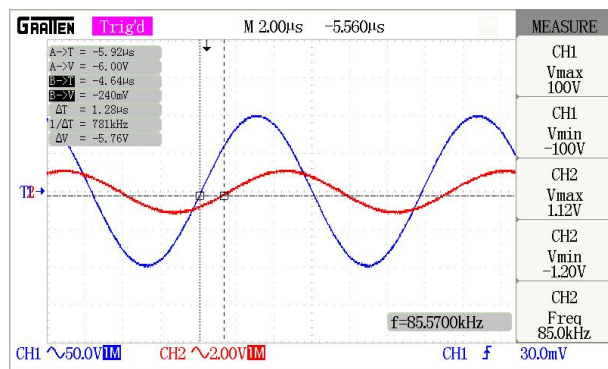


Figure 10. Voltage-current graph for position E (E konumu için gerilim-akım grafiği)

Here, unlike previous experiments (A-D positions), it was observed that the transferred power increased and the phase difference decreased. The better alignment of the transmitter coil group and the receiving coil increased the flowing energy, and the phase difference decreased due to the approximately equal mutual inductance between the coils.

When the receiver coil is moved to the F position, the transmitted power is obtained as 961.87W, and the phase difference is 30.81° . The obtained voltage-current graphs are given in Figure 11. Here, the transferred power increased and the phase difference decreased because of the mutual inductance both of the transmitter coils was positive and the mutual inductance between the other coil was negative.

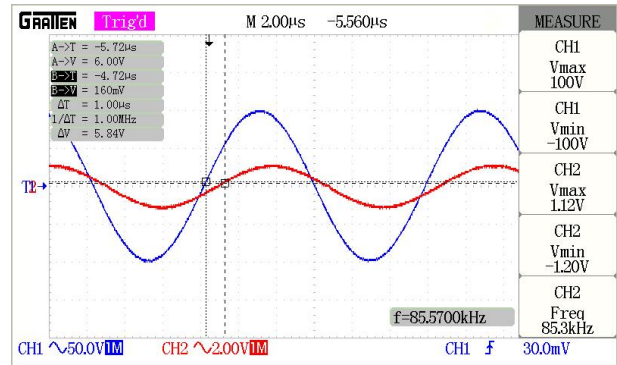


Figure 11. Voltage-current graph for position F (F konumu için gerilim-akım grafiği)

When the coil position is brought to the G-point, the transmitted power is 594.60W, and the phase difference is 57.93° . The voltage-current graphs of the experiment are presented in Figure 12.

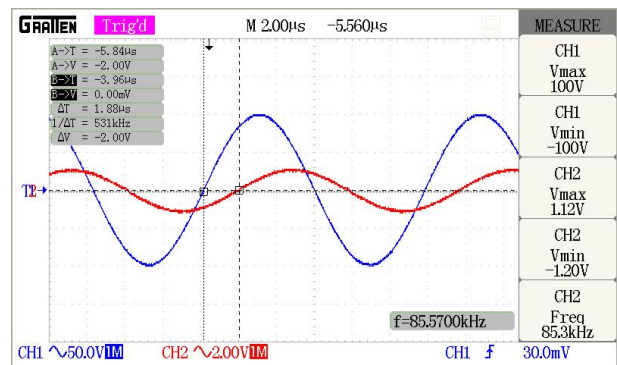


Figure 12. Voltage-current graph for position G (G konumu için gerilim-akım grafiği)

In the experiment, the mutual inductance between two of the transmitter coils was negative, and the mutual inductance with the other coil was positive, which disrupted the inverter load match, so the transferred power decreased.

In the last experiment, the power transferred in the receiving coil brought to the H position was 553.22W, and the phase difference was obtained as 60.93° . Because the receiver coil position is similar to the situation in position G, the transferred power and phase difference values remained approximately equal. The obtained voltage-current graphs are presented in Figure 13.

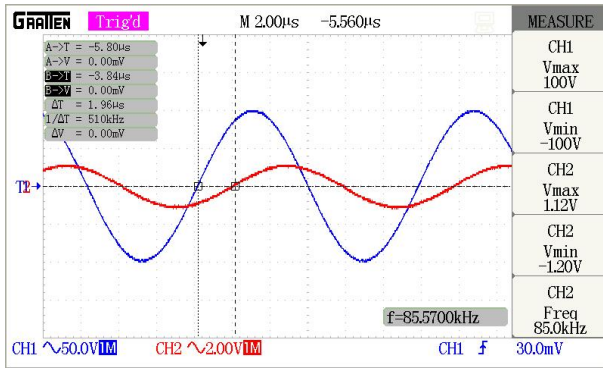


Figure 13. Voltage-current graph for position H (H konumu için gerilim-akım grafiği)

In the experiments carried out so far, the transmitter circuit capacity has not been tuned and has been kept constant. In the experiments at constant capacity value, the highest power transferred according to the receiver coil position was 961.87W, and the lowest was 553.22W. The experimental study was tested by repositioning the receiver coil to the E position, which is the center point of the transmitter coils, and applying the tuned capacity. The adjusted capacity application was carried out with the capacity calculation application, the flow diagram of which is presented in Figure 4, and results are presented in Figure 14.

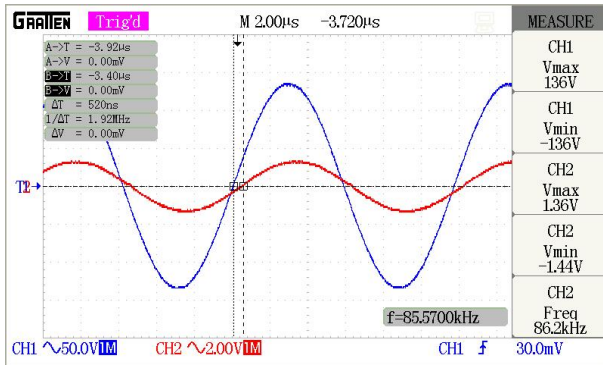


Figure 14. Voltage-current graph using tuned capacitor for position E (E konumu için adaptif kapasite dizisi uygulandığında gerilim-akım grafiği)

As a result of the application, the power value transferred at point E increased from 864.90W to 1307.15W. In addition, the phase difference obtained in the application without capacity adjustment was reduced from 39.44° to 16.02° . It has been achieved to increase the value of transmitted power by approximately 33%. All experiments were repeated for A to H positions, data were obtained, and the efficiency calculation of the system was made according to Equation 12. The measured efficiency and the efficiency values obtained in the simulation study are compared in Figure 15.

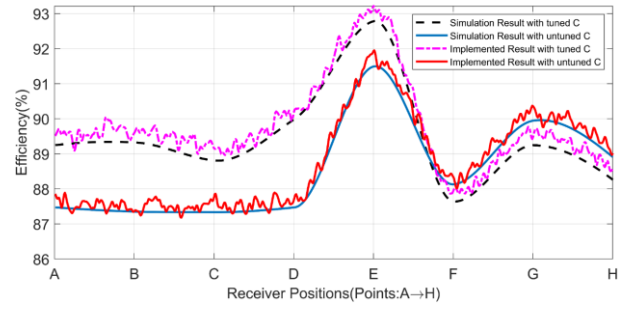


Figure 15. Efficiency analysis with/without tuned capacitor from A to H (A'dan H'ye adaptif kapasite dizisi uygulanmış/uygulanmamış durumlar için verimlilik analizi)

In the simulation results without capacity tuning, the efficiency varied between the lowest, 84.95%, and the highest, 91.49%. In experiments conducted without capacity tuning for the exact locations, the efficiency was calculated as the lowest at 87.36% and the highest at 91.93%. In the simulation results where capacity tuning was made, the efficiency varied between the lowest, 88.13%, and the highest, 92.79%. In the experiments where capacity tuning was made for the same positions, the efficiency was calculated as the lowest at 89.51% and the highest at 93.11%. Approximately the same rates of change were obtained. The calculated and obtained efficiency values overlap when all the simulation and experimental study results are evaluated.

5. CONCLUSIONS (SONUÇLAR)

A wireless energy transfer system with multiple transmitting coils uses a full bridge inverter with an operating frequency of 85Khz. Three transmitters and one receiver coil used in the system were modeled and applied. The situations in which the tuned capacity array is used and not used in the system are discussed, and its effect on the system's efficiency is investigated. Simulation and application studies were carried out for eight different receiver coil placements. In the simulation studies, efficiency analysis was performed for the situations where there was and no capacity tuning. In the simulation results, the efficiency was obtained between the lowest, 87.5%, and the highest, 91.5%. Under the same conditions, efficiency analysis was performed in the experimental study. The lowest was 87.8%, and the highest was 91.9%. Simulation and experimental studies were repeated with the tuned capacity array. In the simulation study, the efficiency was between the lowest 89.3% and the highest 92.8%, and in the experimental study, the lowest 89.5% and the highest 93.1%. As a result of the experimental study, it was seen that the efficiency was increased by 1.65%, 1.23%, 1.39%, 2.5%, and 1.28% for five different locations (A→E), respectively, while it

decreased by 0.4%, 0.89% and 0.45% for three other locations (F→H), respectively. In cases of reduced efficiency, it was concluded that the resolution of the capacities in the tuned capacity application was not sensitive enough. In future studies, it is necessary to conduct comprehensive studies such as capacity tuning with higher resolution and using different control algorithms.

ACKNOWLEDGMENTS (TEŞEKKÜR)

This study was supported by the Cankiri Karatekin University Research Projects Unit with the code 2023/MYO240223B08.

Bu çalışma Çankırı Karatekin Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından 2023/MYO240223B08 kodu ile desteklenmiştir.

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)

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

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

CONFLICT OF INTEREST (ÇIKAR ÇATIŞMASI)

There is no conflict of interest in this study.

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

REFERENCES (KAYNAKLAR)

[1] H. L. Li, A. P. Hu, G. A. Covic, and C. S. Tang, "Optimal coupling condition of IPT system for achieving maximum power transfer," (in English), *Electron Lett*, vol. 45, no. 1, pp. 76-78, Jan 1 2009, doi: 10.1049/el:20091886.

[2] A. Mahesh, B. Chokkalingam, and L. Mihet-Popa, "Inductive Wireless Power Transfer Charging for Electric Vehicles—A Review," *Ieee Access*, vol. 9, pp. 137667-137713, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3116678.

[3] G. R. Nagendra, G. A. Covic, and J. T. Boys, "Sizing of Inductive Power Pads for Dynamic Charging of EVs on IPT Highways," *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, vol. 3, no. 2, pp. 405-417, 2017, doi: 10.1109/TTE.2017.2666554.

[4] S. Kim, A. Zaheer, G. Covic, and J. Boys, "Tripolar pad for inductive power transfer systems," in *IECON 2014 - 40th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, 29 Oct.-1 Nov. 2014 2014, pp. 3066-3072, doi: 10.1109/IECON.2014.7048947.

[5] J. Deng, W. Li, T. D. Nguyen, S. Li, and C. C. Mi, "Compact and Efficient Bipolar Coupler for Wireless Power Chargers: Design and Analysis," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 30, no. 11, pp. 6130-6140, 2015, doi: 10.1109/TPEL.2015.2417115.

[6] A. Bharadwaj, A. Sharma, and C. R. Chandupatla, "A Switched Modular Multi-Coil Array Transmitter Pad With Coil Rectenna Sensors to Improve Lateral Misalignment Tolerance in Wireless Power Charging of Drone Systems," *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 24, no. 2, pp. 2010-2023, 2023, doi: 10.1109/TITS.2022.3220793.

[7] A. P. Sample, D. A. Meyer, and J. R. Smith, "Analysis, Experimental Results, and Range Adaptation of Magnetically Coupled Resonators for Wireless Power Transfer," (in English), *Ieee Transactions on Industrial Electronics*, vol. 58, no. 2, pp. 544-554, Feb 2011, doi: 10.1109/Tie.2010.2046002.

[8] E. S. Lee, D. Kim, and S. Y. Jeong, "Triangular DQ Tx Coils of Wireless EV Chargers for Large Misalignment Tolerances," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 72, no. 11, pp. 14179-14188, 2023, doi: 10.1109/TVT.2023.3288553.






[9] V. K. Srivastava and A. Sharma, "Optimized 3-D Polarized-Field Forming for Orientation-Insensitive Wireless Power Transfer Systems," (in English), *Ieee Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 69, no. 8, pp. 4999-5007, Aug 2021, doi: 10.1109/Tap.2021.3060140.

[10] K. Aditya, V. K. Sood, and S. S. Williamson, "Magnetic Characterization of Unsymmetrical Coil Pairs Using Archimedean Spirals for Wider Misalignment Tolerance in IPT Systems," (in English), *Ieee Transactions on Transportation Electrification*, vol. 3, no. 2, pp. 454-463, Jun 2017, doi: 10.1109/Tte.2017.2673847.

[11] C. C. Huang, C. L. Lin, J. J. Kao, J. J. Chang, and G. J. Sheu, "Vehicle Parking Guidance for Wireless Charge Using GMR

- Sensors," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 67, no. 8, pp. 6882-6894, 2018, doi: 10.1109/TVT.2018.2827069.
- [12] J. Liu, "Research and Implementation of Electric Vehicle Fast Charging Station Parking Guidance System Based on Mobile Terminal," in *2017 9th International Conference on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics (IHMSC)*, 26-27 Aug. 2017 2017, vol. 1, pp. 230-233, doi: 10.1109/IHMSC.2017.60.
- [13] T. S. Lee, S. J. Huang, S. H. Dai, and J. L. Su, "Design of Misalignment-Insensitive Inductive Power Transfer via Interoperable Coil Module and Dynamic Power Control," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 35, no. 9, pp. 9024-9033, 2020, doi: 10.1109/TPEL.2020.2972035.
- [14] Y. Chen et al., "A Hybrid Inductive Power Transfer System With Misalignment Tolerance Using Quadruple-D Quadrature Pads," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 35, no. 6, pp. 6039-6049, 2020, doi: 10.1109/TPEL.2019.2954906.
- [15] B. Yang, Y. Chen, W. Ruan, H. Liu, Y. Ren, and R. Mai, "Current Stress Optimization for Double-Sided CLLLC Topology-Based IPT System With Constant Output Current Tolerating Pad Misalignments," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 58, no. 1, pp. 1032-1043, 2022, doi: 10.1109/TIA.2021.3125281.
- [16] J. L. Villa, J. Sallan, J. F. S. Osorio, and A. Llombart, "High-Misalignment Tolerant Compensation Topology For ICPT Systems," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 59, no. 2, pp. 945-951, 2012, doi: 10.1109/TIE.2011.2161055.
- [17] J. Kim, D. H. Kim, and Y. J. Park, "Analysis of Capacitive Impedance Matching Networks for Simultaneous Wireless Power Transfer to Multiple Devices," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 62, no. 5, pp. 2807-2813, 2015, doi: 10.1109/TIE.2014.2365751.
- [18] J. M. Miller, O. C. Onar, and M. Chinthavali, "Primary-Side Power Flow Control of Wireless Power Transfer for Electric Vehicle Charging," (in English), *Ieee Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 3, no. 1, pp. 147-162, Mar 2015, doi: 10.1109/Jestpe.2014.2382569.
- [19] E. S. Lee, "Frequency-Modulation-Based IPT With Magnetic Communication for EV Wireless Charging," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 70, no. 2, pp. 1398-1408, 2023, doi: 10.1109/TIE.2022.3158027.
- [20] E. S. Lee, B. G. Choi, J. S. Choi, D. T. Nguyen, and C. T. Rim, "Wide-Range Adaptive IPT Using Dipole-Coils With a Reflector by Variable Switched Capacitance," (in English), *Ieee Transactions on Power Electronics*, vol. 32, no. 10, pp. 8054-8070, Oct 2017, doi: 10.1109/Tpel.2016.2637931.
- [21] W. V. Wang, D. J. Thrimawithana, and M. Neuburger, "An Si MOSFET-Based High-Power Wireless EV Charger With a Wide ZVS Operating Range," (in English), *Ieee Transactions on Power Electronics*, vol. 36, no. 10, pp. 11163-11173, Oct 2021, doi: 10.1109/Tpel.2021.3071516.
- [22] F. Issi and O. Kaplan, "Manyetik Rezonans Kuplajlı Kablosuz Enerji Transfer Sistemi için Empedans Analizi ve Değişken Kapasite Dizisi Uygulaması," *Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology*, vol. 8, no. 4, pp. 1005-1020, December 2020, doi: 10.29109/gujsc.817922.

Geliştirilmiş EfficientNet-B0 mimarisi ile Helikobakter Pilorinin Teşhisi

Demet ALICI KARACA^{1*}  Bahriye AKAY^{2,3}  Derviş KARABOĞA^{2,3}  Alper BAŞTÜRK^{2,3}  Ö.Ufuk NALBANTOĞLU^{2,3} 

¹Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Erzincan, Türkiye

²Erciyes Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Kayseri, Türkiye

³Yapay Zekâ ve Büyük Veri Uygulama ve Araştırma Merkezi, Kayseri, Türkiye.

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 22/02/2024
Düzeltilme: 20/05/2024
Kabul: 30/05/2024

Anahtar Kelimeler

Helikobakter pilori
Derin öğrenme
Dikkat mekanizmaları
Histopatoloji

Article Info

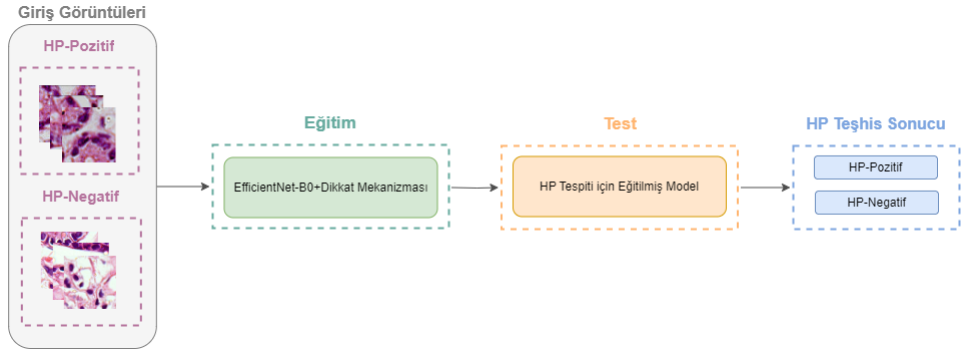
Research article
Received: 22/02/2024
Revision: 20/05/2024
Accepted: 30/05/2024

Keywords

Helicobacter pylori
Deep learning
Attention mechanism
Histopathology

Grafik Özet (Graphical/Tabular Abstract)

Bu çalışmada derin öğrenme modellerinden EfficientNet-B0 mimarisi, dikkat mekanizmaları ile geliştirilerek helicobakter pilorinin tespitinde kullanılmıştır. (In this study, EfficientNet-B0 architecture, one of the deep learning models, was developed with attention mechanisms and used to detect helicobacter pylori.)



Şekil A: Helikobakter pilorinin teşhis akış şeması / Figure A: The diagnosis flow chart of Helicobacter pylori

Önemli noktalar (Highlights)

- Helikobakter pilorinin tespiti için etkin bir model önerilmiştir. (An effective model for the detection of Helicobacter pylori is proposed.)
- EfficientNet-B0 ile farklı dikkat mekanizmalarının sınıflandırma performansları analiz edilmiştir. (Classification performances of different attention mechanisms were analyzed with EfficientNet-B0.)
- Patoloğlara yardımcı bir sistem olarak EfficientNet-B0 ve FCA birleşimi uygulanabilir. (The combination of EfficientNet-B0 and FCA can be applied as an auxiliary system for pathologists.)

Amaç (Aim): Bu çalışmada EfficientNet-B0 mimarisiyle birlikte kullanılan çeşitli dikkat mekanizmalarının sınıflandırma performansına etkisinin gözlenmesi ve en etkili modelin belirlenmesi amaçlanmıştır. (In this study, it was aimed to observe the effects of various attention mechanisms used with the EfficientNet-B0 architecture on classification performance and to determine the most effective model.)

Özgünlük (Originality): Çalışma helicobakter pilorinin tespitinde EfficientNet-B0 mimarisine çeşitli dikkat mekanizmaları entegre edilerek sınıflandırma performanslarının incelenmesi ile literatüre katkı sağlamıştır. / (The study contributed to the literature by examining the classification performances by integrating various attention mechanisms into the EfficientNet-B0 architecture in the detection of Helicobacter pylori.)

Bulgular (Results): Frekans Kanal Dikkat Ağı entegre edilen EfficientNet-B0 mimarisi, histopatolojik görüntü üzerinde helicobakter pilorinin tanısında 0.99835 doğrulukla en iyi değere ulaşmıştır. / (EfficientNet-B0 architecture, which integrated the Frequency Channel Attention Network, reached the best value with an accuracy of 0.99835 in the diagnosis of helicobacter pylori on the histopathological image.)

Sonuç (Conclusion): Helikobakter pilorinin tanısında EfficientNet-B0 ve Frekans Kanalı Dikkat Ağı ile birleşimi patoloğlara yardımcı bir sistem olarak kullanılabilir. (Its combination with EfficientNet-B0 and Frequency Channel Attention Network can be used as an assistive system for pathologists in the diagnosis of Helicobacter pylori.)



Geliştirilmiş EfficientNet-B0 mimarisi ile Helikobakter Piloninin Teşhisi

Demet ALICI KARACA^{1*} Bahriye AKAY^{2,3} Derviş KARABOĞA^{2,3} Alper BAŞTÜRK^{2,3} Ö.Ufuk NALBANTOĞLU^{2,3}

¹Erzincan Binalı Yıldırım Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Erzincan, Türkiye

²Erciyes Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Kayseri, Türkiye

³Yapay Zeka ve Büyük Veri Uygulama ve Araştırma Merkezi, Kayseri, Türkiye.

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 22/02/2024
Düzeltilme: 20/05/2024
Kabul: 30/05/2024

Anahtar Kelimeler

Helikobakter pilori
Derin öğrenme
Dikkat mekanizmaları
Histopatoloji

Öz

Kansere bağlı ölümlerde önde gelen türlerden olan mide kanserine çevresel ve genetik birçok faktör sebebiyet verebilir. Başlıca risk faktörlerinden birisi ise midede gastrit ve ülser neden olan helicobakter pilori bakterisi virüsüdür. Bu virüsün tespit edilebilmesi için histopatolojik değerlendirme yapılmaktadır. Manuel yapılan bu işlem iş yükü, zaman kaybı ve subjektif değerlendirmeden kaynaklı patolojiler arası görüş ayrılıklarına sebebiyet vermektedir. Tanı sürecini hızlandırmak ve hastaya zamanında tedavi uygulayarak yaşam süresini uzatmak amacıyla otomatik sistemlere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu çalışmada son yıllarda başarıyı artarak devam eden derin öğrenme mimarisi histopatolojik tam slayt görüntüden helicobakter pilorinin varlığını teşhis etmek için kullanılmaktadır. Mide biyopsi görüntülerini içeren halka açık DeepHP veri seti kullanılarak Helicobakter pilorinin tanısında uçtan-uca bir derin öğrenme modeli olan EfficientNet-B0 uygulanmıştır. Ayrıca, ağın özellik çıkarma yeteneğini geliştirmek amacıyla son zamanlarda literatüre sunulan çeşitli dikkat mekanizmaları (Etkili Kanal Dikkat, Frekans Kanal Dikkat, Kapılı Kanal Dönüşümü, Evrişimsel Blok Dikkat Modülü ve Basit, Parametresiz Dikkat Modülü) derin modele entegre edilerek model başarımlarındaki etkileri incelenmiştir. Yapılan analizler sonucunda, Frekans Kanal Dikkat Ağı entegre edilen EfficientNet-B0 mimarisinin, histopatolojik görüntülerden helicobakter pilorinin tanısında 0.99835 doğruluğa ulaştığı görülmüştür. Buna göre, önerilen model literatürde yer alan modellerin DeepHP veri seti üzerinde ürettiği sonuçlardan çok daha üstün bir sonuç üretmiştir ve hastalığın tanısında umut vaat edicidir.

The diagnosis of Helicobacter Pylori with the improved EfficientNet-B0 architecture

Article Info

Research article
Received: 22/02/2024
Revision: 20/05/2024
Accepted: 30/05/2024

Keywords

Helicobacter pylori
Deep learning
Attention mechanism
Histopathology

Abstract

Gastric cancer is among the leading cancers in cancer-related deaths. Many environmental and genetic factors can cause gastric cancer. However, one of the main risk factors is the helicobacter pylori bacterial virus, which causes gastritis and ulcers in the stomach. Diagnosis of helicobacter pylori is conducted by histopathological evaluation. However, this manual process creates differences of opinion among pathologists from subjective assessment in addition to workload and time loss. Automated systems are needed to speed up the diagnosis process and increase survival time by providing timely treatment to the patient. In recent years, deep learning models, which have proven successful in extracting meaningful results from images, have been used to diagnose the presence of helicobacter pylori from histopathological whole slide images. In this study, an end-to-end deep learning model, EfficientNet-B0, was applied in diagnosing Helicobacter pylori by using DeepHP, which contains gastric biopsy images, a public dataset. Various attention mechanisms introduced in recent years to improve the feature extraction ability of the network (Effective Channel Attention, Frequency Channel Attention Network, Gated Channel Transform, Convolutional Block Attention Module, and Simple, Parameter-Free Attention Module) were integrated into the deep model and their performances were examined. As a result of the analysis, the Frequency Channel Attention Network integrated into the EfficientNet-B0 architecture reached an accuracy of 0.99835 in diagnosing helicobacter pylori in the histopathological image. The result in the literature on the DeepHP dataset has been surpassed, and the proposed model is promising in diagnosing the disease.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Mide kanseri, genellikle malignitenin en yaygın bölgelerinden biri olan mide mukozasında başlayan anormal hücrelerden oluşan bir malignite veya tümördür [1]. Kanser sebebiyle ölümlerde dördüncü sırada yer almaktadır ve dünyada en yaygın beşinci kanserdir. GLOBOCAN 2020 verilerine göre, 2020 yılında tahmin edilen yeni vaka sayısı 1 milyon üzerindedir ve tahmin edilen ölüm sayısı ise 700 bini geçmektedir [2].

Mide kanserine bağlı ölümlerin azaltılması için hastalığın erken teşhisi ve hastaya en uygun tedavi planının yapılması hayati derecede önemlidir. Kanserın erken evrede tespit edilmesiyle 5 yıllık hayatta kalma oranı %90 üzerindeyken, kanserin ileri evrede teşhisiyle bu oran %30'a düşmektedir [3-5]. Mide kanserinin yaş, cinsiyet, genetik, sigara, diyet, alkol, obezite vb. risk faktörleri olsa da başlıca risk faktörlerinden biri ülser ve gastrite neden olan *Helicobacter pylori* (HP) bakterisi virüsüdür [6]. Mide kanseri patogenezi, HP'nin neden olduğu kronik yüzeysel gastrit ile başlayan, atrofik gastrit, bağırsak metaplazisi, displazi ve sonunda mide kanserine doğru ilerleyen bir dizi olayı içerir [7]. HP'nin teşhisi için histolojik inceleme altın standart olarak tanımlanmakta ve patoloji laboratuvarında alınan her biyopsi HP açısından değerlendirilmektedir. Yüksek büyütme oranlarında yapılan tanıda bir veya daha fazla organizmanın tespiti yapılmaktadır. Bu organizmalar tespit edilirken Hematoksilin&Eozin (H&E) boyamanın etkisi ve büyütme oranının etkisiyle kolaylıkla tanımlanmaktadır [8, 9]. HP Histolojik tanısı aracılığıyla HP enfeksiyonunun tanımlanmasının yanı sıra inflamasyonun derecesi, atrofik gastrit, bağırsak metaplazisi gibi ilişkili patolojiler hakkında da bilgi sağlanmaktadır [10]. Ancak yüksek maliyet, uzun geri dönüş süresi ve patoloğun yeteneğine bağımlılık gibi sınırlamalar mevcuttur [11]. Ayrıca patolog gözlemlerinde ve değerlendirmesinde farklılıklar oluşabileceğinden subjektif bir değerlendirme söz konusudur [12].

Dünyada yaklaşık 4,4 milyar insanın etkilendiği en yaygın bakteriyel enfeksiyon olan HP'nin teşhisi için otomatik sistemlerin geliştirilmesi ihtiyaç haline gelmiştir [13]. Manuel tanıdaki dezavantajları kaldırmak ve daha doğru, hızlı teşhis koymak için bilgisayar destekli sistemlerden yararlanmak mümkündür. Son yıllarda medikal görüntülerden yapay zekâ ile hastalık tanısı yaygın bir şekilde yapılmaktadır [14-18]. Dijital patoloji,

yapay zekanın yaygın kullanıldığı alanlardan biridir. Özellikle yapay zekanın alt dalı olan derin öğrenmeyle patolojik görüntüden kanser teşhisinin yapıldığı çok sayıda çalışma mevcuttur [19, 20]. Derin öğrenmenin derin katmanlar aracılığıyla görüntüdeki ayırt edici özellikleri öğrenme yeteneğinden faydalanılarak insan gözüyle tam slayt görüntülerde (Whole Slide Image, WSI) tespit edilmesi zor olan dokuların tanımlayabilmektedir.

HP'nin tespiti için patolojik görüntüler üzerinde derin öğrenme uygulayarak literatürde yapılan bazı çalışmalar incelenmiştir. Gonçalves ve ark. [21], HP'nin sınıflandırılması için DeepHP adında yeni, açık veri seti sunmuşlardır. 394.926 histopatolojik yama görüntüsünden oluşan DeepHP veri seti üç evrişimli sinir ağı (Convolutional Neural Network, CNN) olarak VGG16, Inception-V3 ve ResNet-50 modelleri ile eğitilmiştir. Bu ağlarda ince ayar ve transfer öğrenme yaklaşımları kullanılarak sınıflandırma sonuçları analiz edilmiştir. En iyi sınıflandırma sonucunu 0.98 doğruluk ile ince ayar yaklaşımı kullanan VGG16 üretmiştir. Klein ve ark. [22] mide biyopsisinin HP içerip içermediğine karar vermeye yardımcı olmak için bir derin öğrenme algoritması uygulamışlardır. VGG mimarisi kullanılarak yapılan yama tabanlı sınıflandırmada hem Giemsa boyalı hem de H&E boyalı görüntüler kullanılarak ağın genelleme yeteneğinin geliştirilmesi amaçlanmıştır. Aday HP bölgeleri görüntüden morfolojik işlemlerle çıkarılarak uzman patoloğlar tarafından etiketlenmiştir. Görüntü işleme ve veri artırma uygulanan görüntüler, potansiyel bölgeleri belirlemek için önerilen modele beslenmiş ve HP'nin var olma olasılığına göre sıralanmıştır. Önerilen model, 0.81'lik bir AUC (eğri altında kalan alan) değeri elde etmiştir. Zhou ve ark. [23] H&E ile boyanmış mide biyopsilerinde derin öğrenmenin HP tanısı koymadaki doğruluğunu ve hızını ne kadar artırdığını araştırmıştır. Bir WSI'de HP'nin bulunup bulunmadığını belirlemek için üç DenseNet-121 ve üç ResNet-18 mimarisini içeren bir topluluk mimarisi kullanmışlardır. Önerilen yöntem, 47 WSI'dan 1024x1024 boyutlarında çıkarılan yamaları girdi olarak kullanarak eğitilmiş ve ardından HP'nin var olma olasılığını çıktı olarak üretmiştir. WSI düzeyinde nihai tahmin, en yüksek olasılığa sahip ilk 10 yamanın ortalamasının binarizasyonu ile belirlenmiş ve test setinde 0.965 AUC elde edilmiştir. Yang ve ark. [24] HP'nin tespiti için semantik segmentasyon çözümünü önermiştir. Önerilen çözüm HP ile enfekte olan

alanları piksel düzeyinde etiketlemek yerine kabaca etiketleyen poligon etiketlemelerine ihtiyaç duymaktadır. Zayıf denetimli öğrenmeyi temel olarak segmentasyon yapan yeni zayıf denetimli çok görevli öğrenme çerçevesi (WSMLF) sunulmuştur. Önerilen çerçeve, segmentasyon performansını artırmak için çıkarılan birden fazla hatalı hedefin ağırlıklı özetinden otomatik olarak öğrenebilen algoritmaya sahiptir. Böylece, yazarlar Warthin-Starry ile boyanmış biyopsi doku slaytında HP'nin tespitinde %6'lık bir oranda artış sağladıklarını raporlamıştır. Martin et al. [25], HP ile ilişkili gastrit, reaktif gastropati ve normal mide mukozası tanısı olan mide biyopsi görüntülerini sınıflandırmak için derin öğrenme uygulamıştır. Yazarlar CNN kullanarak geliştirdikleri HALO-AI yazılımı ile birinci fazda her sınıf için 100 örnek içeren veri setinde sınıfların ayırt edilmesini sağlamışlardır. Normal, HP ve reaktif gastropati için sırasıyla %99.7, %100 ve %99.9 AUC değeri elde edilmiştir. İkinci fazda, birinci fazda eğitilen HALO-AI algoritması kullanılmıştır. Ek olarak 106 görüntü içeren test grubunda algoritma test edilmiştir: Normal mukoza (n=57); HP gastrit (n=23); ve reaktif gastropati (n=26). Normal, HP ve reaktif gastropati için sırasıyla %91.9, %100 ve %94.0 AUC değeri elde edilmiştir. Lin ve ark. [26] HP gastritin teşhisi için iki aşamalı, derin öğrenme tabanlı model geliştirmiştir. Geliştirilen tam slayt model, zayıf denetimli CNN model (ResNet-50), sadece pozitif veya negatif etikete sahip 885 WSI üzerinde eğitilmiştir. Yardımcı model (lojistik regresyon ve gradyan artırıcı karar ağaçları yaklaşımları) ise HP'nin lokalizasyonu için 9 pozitif WSI ve 446 negatif WSI kullanarak 824 HP içeren alan üzerinde eğitilmiştir. Tam slayt model 0.9739 AUC, %93.3 duyarlılık ve %90.1 özgüllük elde ederken yardımcı model lokalizasyon haritasında vurgulanan alanlarda ortalama 0.5796 duyarlılık elde etmiştir.

Mide biyopsisinde HP'nin varlığını veya yokluğunun tespiti hayati önem taşımaktadır. Tam slayt görüntülerinin doğası gereği yüksek boyutlu görüntülerde HP'nin küçük boyutu nedeniyle teşhis koymak zorlayıcıdır. Bu çalışmada, histopatolojik görüntü üzerinde derin öğrenme modeli uygulayarak HP'nin teşhisi için uçtan-uca bir sistem önerilmektedir. CNN'in öğrenme kabiliyetinden yararlanmak amacıyla EfficientNet mimarisi

kullanılmıştır. Model öğrenimini iyileştirmek için EfficientNet modeline entegre ettiğimiz dikkat mekanizması, Frekans Kanalı Dikkat Ağı (Frequency Channel Attention Networks, FCA), ile model doğruluğu artırılarak %99.835 doğruluk elde edilmiştir ve patolojlara yardımcı bir sistem olarak sunulmuştur.

Makalenin bölüm organizasyonu şu şekildedir: "Materyal ve Metod" bölümü, çalışmada uygulanan derin öğrenme modelini, dikkat mekanizmalarını ve önerilen yöntemi sunmaktadır. "Bulgular ve Tartışma" bölümünde, kullanılan veri seti, deneysel kurulum, değerlendirme ölçütleri, önerdiğimiz geliştirilmiş derin öğrenme sisteminin deneysel sonuçları ve performans analizleri yer almaktadır. "Sonuç" bölümü, çalışmamızı sonuçlandırmaktadır.

2. MATERYAL VE METOD (MATERIALS AND METHODS)

2.1. EfficientNet Mimarisi (EfficientNet Architecture)

CNN modellerinden biri olan EfficientNet mimarisi, Tan ve Le tarafından 2019 yılında sunulmuştur [27]. EfficientNet mimarileri verimlilik sağlamak amacıyla bir sinir ağının üç boyutunu (derinlik, genişlik ve çözünürlük) bir bileşik katsayı kullanarak kontrollü olarak genişletir ve elde ettiği verimlilik ile sınıflandırma görevlerinde güncel mimarilerden öne çıkmaktadır [28].

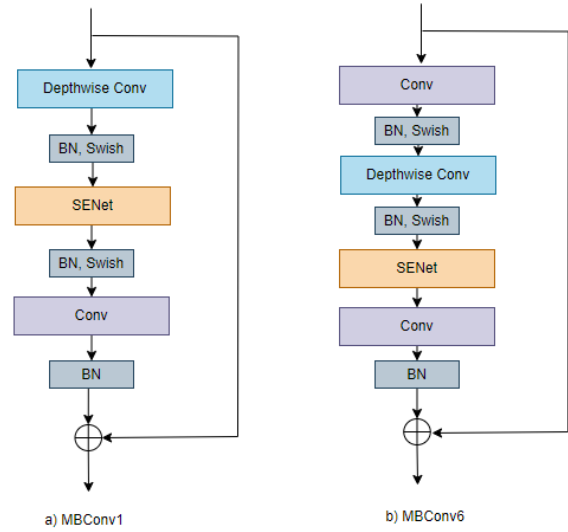
Araştırmaların ana odağı, ağın hesaplama maliyetini artırmadan sinir ağının boyutunun genişletilirken doğruluğun artırılmasıdır. Sinir ağının açgözlü (greedy) bir yaklaşımla genişletilmesi, gradyan kaybına neden olmaktadır. EfficientNet bu sorunun çözümü için her boyuttaki artış arasındaki ilişkiyi keşfederek boyutları belli bir kaynak kısıtlaması altında ızgara araması (grid search) ile optimize eder. Bileşik ölçekleme (compound scaling) yöntemi ve kaynak kısıtlamaları Eşitlik 1'de gösterilmiştir [28].

$$\begin{aligned} d &= \alpha^\varphi \\ w &= \beta^\varphi \\ r &= \gamma^\varphi \\ \alpha \cdot \beta \cdot \gamma^2 &\approx 2 \\ \alpha \geq 1, \beta \geq 1, \gamma \geq 1 \end{aligned} \quad (1)$$

d , w ve r değişkenleri sırasıyla ağın derinliğini, genişliğini ve çözünürlüğünü belirtir. Küresel

ölçeklendirme faktörü φ , mevcut kaynakların kapsamını belirleyerek ağdaki kaynakların tahsisini düzenler. α , β ve γ sabitleri, veri hiper parametre ayarında ızgara arama tekniği yoluyla oluşturulur. φ 'yi 1'e ayarlamak ve ızgara aramayı kullanmak, belirli bir evrişim mimarisi için α , β ve γ 'nın belirlenmesine olanak tanıyarak doğruluğu artırır. Bu sabitler, ek kaynakların ağ içindeki farklı boyutlara tahsis edilmesinde çok önemli bir rol oynar. Sonuç olarak, α , β ve γ tanımları oluşturulduktan sonra, φ 'nin kademeli olarak artırılması, daha iyi doğruluk için ağ boyutlarının genişletilmesine olanak sağlar. Bu ölçeklendirme yaklaşımı, tekrarlayan katmanlarla karakterize edilen herhangi bir evrişim mimarisine uygulanabilir [27].

EfficientNet mimarisinin B0'dan B7'ye sekiz farklı varyantı bulunmaktadır. EfficientNet-B0 mimarisinde bileşik katsayı aracılığıyla ağın derinlik, genişlik ve çözünürlüğünü artırılarak EfficientNet-B7'ye kadar mimariler oluşturulabilir. EfficientNet mimarisi 5.3 milyon parametreye sahipken EfficientNet-B7 mimarisi 66 milyon parametreye sahiptir [27]. EfficientNet mimarisinin temeli, MobileNet-v2 mimarisinde tanımlanan ters çevrilmiş artık blok (MBConv) yapısıdır. Şekil 1'de EfficientNet-B0 mimarisinde yer alan MBConv yapıları detaylı olarak sunulmuştur. Bu blokların tekrarlı olarak kullanılmasıyla oluşturulan EfficientNet-B0 mimarisi Tablo 1'de verilmiştir.



Şekil 1. a) MBConv1 ve b) MBConv6 bloklarının yapısı. (Structure of blocks a) MBConv1 and b) MBConv6)

2.2. Dikkat Mekanizmaları (Attention Mechanisms)

Dikkat mekanizmaları, bir görüntüdeki ilgisiz kısımları göz ardı ederek önemli kısımlara odaklanılmasını sağlayan yöntemleri ifade eder. İnsan görsel sisteminin karmaşık görüntüleri verimli olarak analiz etme yeteneğinden ilham alınarak bilgisayarlı görü sistemlerine entegre edilmiştir. Bir görme sisteminde dikkat mekanizması, girdinin önemine göre öznitelikleri adaptif bir şekilde ağırlıklandırarak gerçekleştirilen dinamik bir seçim süreci olarak rol alır. Son on yılda, dikkat mekanizması bilgisayarlı görüde giderek daha önemli bir rol oynamıştır. Dikkat mekanizmalarının kullanımı, görüntü sınıflandırma, nesne tespiti, semantik segmentasyon, yüz tanıma, tıbbi görüntü işleme, görüntü oluşturma, süper çözünürlük gibi çeşitli görsel görevlerde fayda sağlamıştır [29].

Tablo 1. EfficientNet-B0 mimarisinin temel ağ yapısı [27] (The main network structure of EfficientNet-B0 architecture)

Adım i	Operator F_i	Çözünürlük $H_i \times W_i$	Kanal C_i	Katman L_i
1	Conv 3x3	224x224	32	1
2	MBConv1, k3x3	112x112	16	1
3	MBConv6, k3x3	112x112	24	2
4	MBConv6, k5x5	56x56	40	2
5	MBConv6, k3x3	28x28	80	3
6	MBConv6, k5x5	14x14	112	3
7	MBConv6, k5x5	14x14	192	4
8	MBConv6, k3x3	7x7	320	1
9	Conv 1x1, Pooling, FC	7x7	1280	1

Mevcut dikkat mekanizmaları dört temel türü kapsayan altı farklı gruba kategorize edilmiştir: kanal (channel) dikkati, uzamsal (spatial) dikkat, zamansal (temporal) dikkat ve dal (branch) dikkati. Ek olarak kanal-uzamsal (channel&spatial) dikkat ve uzamsal-zamansal (spatial&temporal) dikkat olmak üzere iki hibrit kategori vardır [29]. Tablo 2’de dikkat mekanizmalarının sınıflandırılması özetlenmiştir.

2.2.1. Kanal dikkati (Channel attention)

Neye dikkat edilmeli sorusundan yola çıkarak bir görüntüde istenen özelliklerin seçim sürecinde özelliklerin ait olduğu kanalları adaptif bir şekilde ağırlıklandırarak özellikleri vurgular. Hu ve ark. tarafından ilk defa bu amaçla ortaya atılan kanal dikkati, EfficientNet mimarisinden MBConv bloklarında da yer alan SENet’dir [30].

2.2.2. Kanal&uzamsal dikkat (Spatial&channel attention)

Bu dikkat modelinde hem kanal dikkati hem de uzamsal dikkati bir arada kullanılmaktadır. Böylece görüntüden hem önemli nesnelere hem de önemli bölgelerin vurgulanması sağlanır. Tek sistem üzerinden iki dikkat mekanizmasının avantajından yararlanılmış olur. Artık dikkat ağı (Residual attention network, RAN) [31] bu alanda öncü çalışmadır ve sonrasında Evrimsel Blok Dikkat Modülü (Convolutional block attention module, CBAM) [32], Darboğaz Dikkat Modülü (Bottleneck Attention Module, BAM) [33] ve Basit, Parametresiz Dikkat Modülü (A Simple, Parameter-Free Attention Module, SimAM) [34] gibi hibrit dikkat mekanizmaları literatüre sunulmuştur.

2.3. Önerilen Mimari (The Proposed Architecture)

Bu çalışmada, histopatolojik görüntülerden HP’nin teşhisi amacıyla görüntü sınıflandırma çalışmalarında başarıyı kanıtlanmış olan CNN mimarisini kullanılmıştır. CNN mimarisine son yıllarda sıklıkla kullanılan dikkat mekanizması entegre edilmiş ve deneysel çalışmalar

yürütülmüştür. CNN mimarileri arasında etkili ve hafif mimarilerden biri olan EfficientNet-B0 mimarisini görüntü sınıflandırma için seçilmiştir. Tablo 1’de mimari yapısı sunulan EfficientNet-B0 mimarisini oluşturan MBConv blokları Şekil 1’de görüldüğü üzere SENet bloğu içermektedir. SENet bloğunun dezavantajlarını ortadan kaldırmak için önerilen FcaNet, ECANet, GCT, CBAM ve SimAM gibi çeşitli dikkat mekanizmaları çalışmamızda sınıflandırma doğruluğunu geliştirmek üzere EfficientNet-B0 mimarisine entegre edilerek tanıtılmıştır. MBConv blokta yer alan her SENet bloğu yeni bir dikkat mekanizmasıyla yer değiştirilerek HP’nin tespitindeki başarıyı incelenmiştir.

EfficientNet-B0+FcaNet, EfficientNet-B0+ECANet, EfficientNet-B0+GCT, EfficientNet-B0+CBAM ve EfficientNet-B0+SimAM sistemlerinin teşhis performansları analiz edilmiştir. Her bir mimari DeepHP veri seti, eğitim verisi üzerinde ayrı ayrı eğitilmiş ve test verisi ile test edilmiştir. HP’nin teşhisi için çalışmada uygulanan metodoloji Şekil 2’de özetlenmiştir.

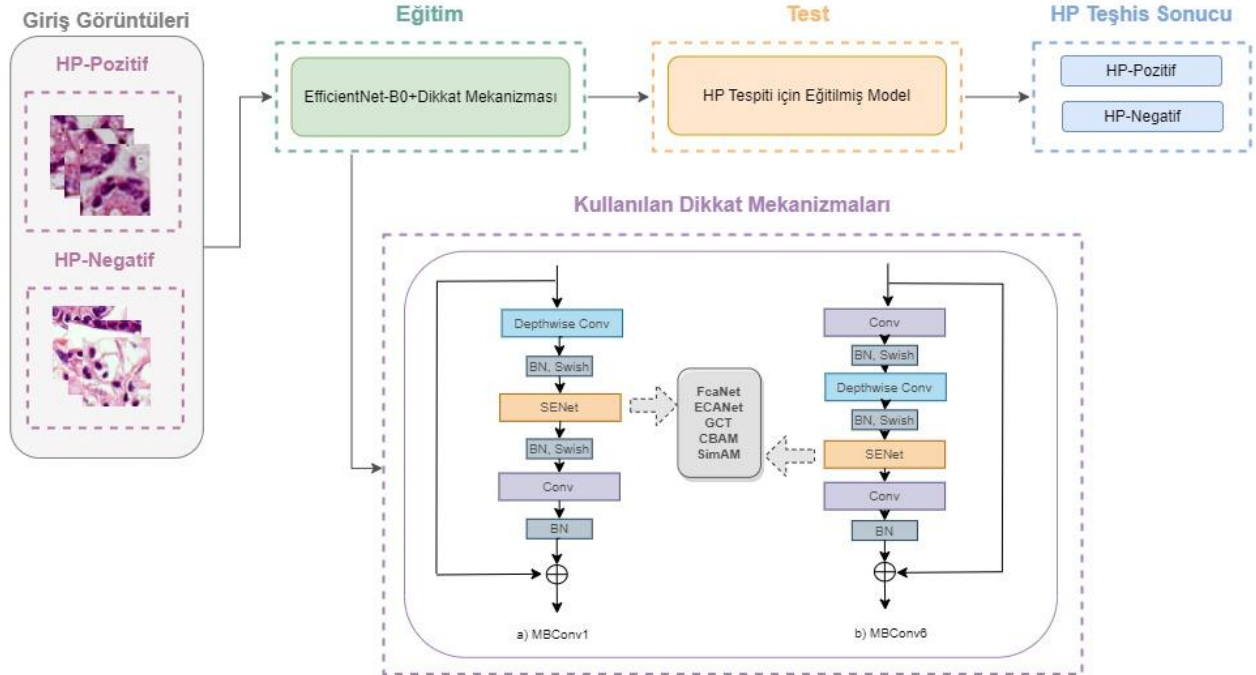
2.3.1. Kanal dikkat mekanizmaları (Channel attention mechanisms)

2.3.1.1. SENet (Sıkıştırma ve uyarma ağı, squeeze-and-excitation network)

Kanal dikkat mekanizmalarının öncülerinden olan SENet, kanal bazında ilişkileri yakalamak için sıkıştırma ve uyarma (Squeeze-and-Excitation, SE) bloklarından oluşmaktadır. Sıkıştırma kısmında küresel havuzlama katmanı (global average pooling, GAP) her kanala uygulanır ve ardından uyarma kısmında tam bağlantılı (FC) katman, swish, FC ve sigmoid blok sırasıyla uygulanır. Her adımda kanaldan elde edilen bilgi geliştirilir ve son olarak elde edilen çıktı orijinal girdi ile çarpılır [30]. Şekil 3-a’da SENet dikkat mekanizmasının iç yapısı gösterilmiştir.

Tablo 2. Dikkat mekanizmalarının sınıflandırılması [29] (The classification of attention mechanisms)

Dikkat Mekanizmaları	Kanal Dikkati	Uzamsal Dikkat	Zamansal Dikkat	Dal Dikkati
Temel Sorusu	Neye dikkat edilmeli?	Nereye dikkat edilmeli?	Ne zaman dikkat edilmeli?	Hangisine dikkat edilmeli?
Örnek	SENet, FcaNet, ECANet, SRM, GCT vb.	DRAW, DCN, DETR, ViT vb.	TAM, GLTR vb.	SKNet, ReNest vb.
Hibrit	Kanal&Uzamsal		Uzamsal&Zamansal	



Şekil 2. HP'nin teşhis metodolojisi (The diagnosis methodology of HP)

SENet bloğu önemli kanalları vurgularken bazı dezavantajlara sahiptir. SENet bloğunda tam bağlı katmanların kullanımı model karmaşıklığını artırmaktadır. Karmaşıklığı azaltmak ve kanal dikkatini artırmak için geliştirilmiş kanal dikkat mekanizmaları önerilmiştir. FcaNet, ECANet, GCT mekanizmaları geliştirilen kanal dikkat mekanizmalarına örnek olarak verilebilir.

2.3.1.2. FcaNet (Frekans kanalı dikkat ağı, frequency channel attention network)

Qin ve ark. tarafından önerilen FcaNet, SENet bloğundaki sıkıştırma modülünü geliştirerek etkili kanal dikkati elde etmeyi amaçlamaktadır [35]. Frekans alanında küresel ortalama havuzlama işlemini analiz ederek, küresel ortalama havuzlama işleminin ayrık kosinüs dönüşümünün (discrete cosine transform, DCT) özel bir durumu olduğunu göstermişlerdir. Bu fikirden yola çıkarak SENet bloğunda yer alan GAP adımının yerine DCT kullanılmış ve yeni frekans kanalı dikkat ağını önerilmiştir. DCT, FC katman, ReLU aktivasyon fonksiyonu, FC katman ve sigmoid aktivasyon fonksiyonu sırasıyla uygulanır ve giriş ile çarpılarak çıktı oluşturulur. Bu işlem adımları Şekil 3-b'de sunulmuştur.

2.3.1.3. ECANet (Etkili kanal dikkat ağı, efficient channel attention)

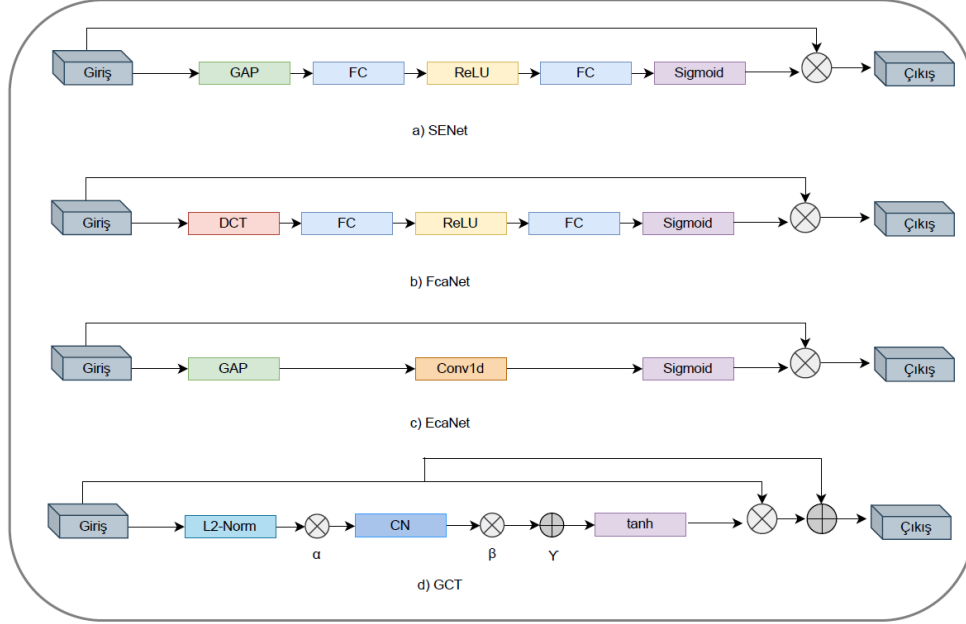
SENet bloğunda yer alan uyarma modülünü geliştirmeyi amaçlayan bir kanal dikkat yaklaşımıdır. Wang ve ark. tarafından önerilen Etkili Kanal Dikkat Ağı (Efficient Channel Attention, ECA), SENet'in model karmaşıklığını hafifletmeyi ve hesaplama maliyetinden kaynaklı dezavantajını elimine etmeyi amaçlar [36]. ECA bloğu, SENet bloğunun uyarma modülündeki tam bağlı katmanlar ve ReLU aktivasyon fonksiyonunu kaldırarak yerine 1-boyutlu evrişim kullanır. Bu evrişim işleminde k adet komşuluk dikkate alınır ve k boyutlu filtre kullanılarak çapraz kanal etkileşimi sağlanır. k parametresi adaptif olarak ayarlanabilen bir parametredir. Özetle, Şekil 3-c'de görüldüğü üzere GAP, 1-boyutlu evrişim ve sigmoid aktivasyon fonksiyonu sırasıyla uygulanır ve giriş ile çarpılarak çıktı üretilir.

2.3.1.4. GCT (Kapılı kanal dönüşümü, gated channel transformation)

SENet bloğunun hem sıkıştırma hem uyarma modülünü geliştirmeye yönelik önerilen yaklaşımlardan birisidir. SENet bloğunda kullanılan tam bağlı katmanların sebep olduğu hesaplama maliyetini azaltmak ve kanal ilişkilerinin yüksek verimde ve daha açık bir şekilde bağlamsal modellenmesini sağlamak için Yang ve ark. tarafından Kapılı Kanal Dönüşümü (Gated Channel

Transformation, GCT) sunulmuştur [37]. GCT, diğer yöntemlerden farklı olarak küresel bilgileri toplamak için ek parametre içermeyen L2-normalizasyonu kullanır. Sonrasında ölçekleme vektörü (α), kanal normalizasyonu ve yeniden ölçekleme (β ve γ) sırasıyla uygulanır. Burada yine

önceki yöntemlerde kullanılan sigmoid aktivasyon fonksiyonu yerine tanh aktivasyon fonksiyonu seçilmiştir ve giriş ile çarpılarak oluşturulan çıktı tekrar giriş ile toplanarak çıktı hesaplanır [29], [37]. GCT dikkat mekanizmasının iç yapısı Şekil 3-d'de gösterilmiştir.



Şekil 3. Kanal dikkat mekanizmaları (GAP: küresel ortalama havuzlama, FC: Tam bağlı katman, DCT: Ayrık kosinüs dönüşümü, Conv1d: 1-boyutlu evrişim, CN: Kanal normalizasyonu.) (Channel attention mechanisms (GAP: global average pooling, FC: Fully connected layer, DCT: Discrete cosine transform, Conv1d: 1-dimensional convolution, CN: Channel normalization))

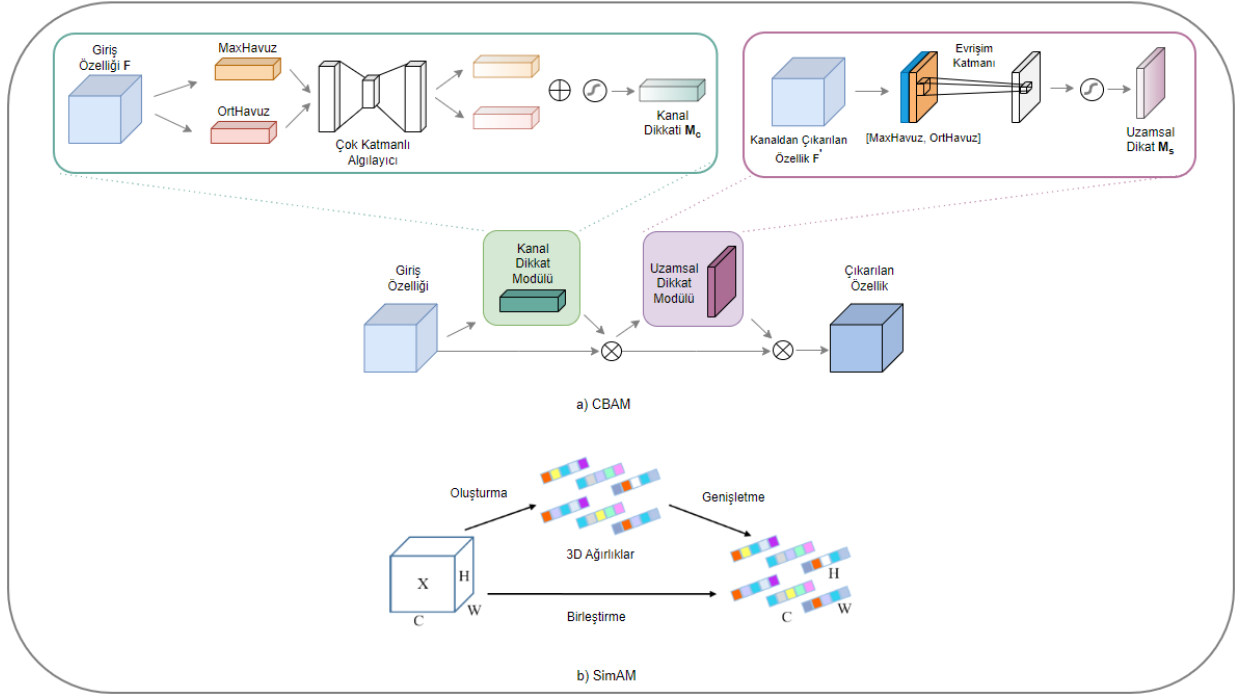
2.3.2. Kanal&uzamsal dikkat mekanizmaları (Channel&spatial attention mechanism)

2.3.2.1. CBAM (Evrişimsel blok dikkat modülü, convolutional block attention module)

Kanal dikkati ve uzamsal dikkati sıralı olarak uygulayan dikkat yaklaşımıdır. Woo ve ark. tarafından önerilen CBAM, iki ayrı boyutta dikkat haritalarını çıkarır [32]. Dolayısıyla, CBAM iki alt modül içerir: kanal dikkat modülü ve uzamsal dikkat modülü. Kanal dikkati, özellikleri sağlamak için maksimum havuzlamayı ve ortalama havuzlamayı kullanır ve Çok Katmanlı Algılayıcı kanal dikkat alt modülünü tamamlamak için onları birleştirir. Çok Katmanlı Algılayıcıda yer alan tam bağlı katmanların çıktısı piksel bazında toplanarak sigmoid aktivasyon fonksiyonuna iletilir ve kanal dikkat haritası elde edilir. Uzamsal dikkat alt modülü, MLP olmadan maksimum havuzlamayı ve ortalama havuzlamayı sırasıyla uygular ve bunları kanal sayısını azaltmak amacıyla evrişim katmanına iletir. Sonrasında sigmoid aktivasyon fonksiyonundan geçirilerek uzamsal dikkat haritası elde edilir. Özetle, kanal dikkati ile neye odaklanılacağını, uzamsal dikkat ile nereye

odaklanılacağını bulmak için kanallar arası ve uzamsal ilişkileri kullanır [32]. Şekil 4-a CBAM dikkat mekanizmasının işleyişini adım adım göstermektedir.

SimAM dikkat mekanizması, sinirbilim teorisinden yararlanan bir yaklaşımdır. İnsanlardaki görsel işlemede olduğu gibi kanal ve uzamsal özellik çıkarımını eş zamanlı olarak uygulamayı amaçlar. Yang ve ark. tarafından önerilen SimAM dikkat mekanizması her nörona benzersiz bir ağırlık atanmasını sağlamak için hem kanal hem uzamsal dikkati 3 boyutlu ağırlıklandırılmış dikkat modülüne entegre eder [34]. Yazarlar dikkati başarılı olarak uygulamak için bireysel nöronların önemi nasıl tahmin edilir sorusuna cevaplamak için görsel sinirbilimde yer alan en bilgilendirici nöronlar genellikle çevredeki nöronlardan farklı ateşleme deseni gösteren nöronların olduğu bilgisinden yararlanırlar. Dolayısıyla her bir nöron için enerji fonksiyonu tanımlayarak ağa yeni parametre eklemeden basit bir şekilde önemli bilgilere odaklanmayı sağlarlar. Çeşitli görsel görevlere enerji fonksiyonu kullanarak 3 boyutlu



Şekil 4. Kanal&Uzamsal dikkat mekanizmaları (MaxHavuz: Maksimum Havuzlama Katmanı; OrtHavuz: Ortalama Havuzlama Katmanı; C, W ve H görüntü boyutlarını (Kanal, genişlik ve yükseklik temsil eder.) (Channel&Spatial attention mechanisms (MaxHavuz: Max. Pooling Layer; OrtHavuz: Avg. Pooling Layer; C, W and H represent image dimensions (Channel, width and height)))

ağırlıkları tahsis etme süreci Şekil 4-b’de görselleştirilmiştir [34, 38].

3. BULGULAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

3.1. Veri Seti (Dataset)

Bu çalışmada HP’nin tanısı için halka açık veri seti olan DeepHP veri seti kullanılmıştır [21]. DeepHP veri seti H&E boyanmış mide biyopsi histopatolojik incelemelerinden elde edilen görüntüleri içermektedir. Toplamda 394.926 görüntü yaması

içeren DeepHP veri setinde görüntülerin 283.921’i HP enfeksiyonu açısından negatif, 111.005’i ise HP enfeksiyonu açısından pozitifdir. Görüntü yamaları 256x256 boyutundadır.

Görüntüler EfficientNet-B0 mimarisinin girişine uygun olarak 224x224 boyutuna yeniden boyutlandırılarak deneysel çalışmalarda kullanılmıştır. Veri setinin rasgele olarak belirlenen %70’i model eğitiminde, %15’i doğrulamada ve kalan %15’i ise testte kullanılmıştır. Tablo 3’te veri setinin ayrımı ve yama sayıları sunulmuştur.

Tablo 3. Deneysel çalışmalarda kullanılan DeepHP veri setinin dağılımı (The distribution of the DeepHP dataset used in experimental studies)

Sınıf	Eğitim	Validasyon	Test	Toplam
Negatif HP	198.744	42.589	42.588	283.921
Pozitif HP	77.703	16.652	16.650	111.005
Toplam	276.447	59.241	59.238	394.926

3.2. Deneysel Kurulum (Experimental Settings)

Çalışmada uygulanan modeller Python dili kullanılarak TensorFlow kütüphanesiyle Keras paketi kullanılarak geliştirildi. Deneyleri gerçekleştirmek için yüksek performanslı bilgisayar kullanılmıştır. İşletim sistemi Linux’un 20.04.4 LTS’dir. Bilgisayar CPU Intel (R) Core (TM) i7-7820X, 3.60 GHz, 64 GB DDR4 RAM ve GPU

NVIDIA Quadro RTX 8000 gibi donanımsal özelliklere sahiptir. Giriş görüntüleri EfficientNet-B0 mimarisine uygun olarak 224x224 piksele yeniden boyutlandırılmıştır. Her koşmada rasgele alınan örnek sayısı 32’dir ve model parametrelerini güncellemek için 0.001 öğrenme oranına sahip Adam optimizasyon algoritması [39] kullanılmıştır. Tüm modeller için eğitim 20 koşmada

tamamlanmıştır ve önceden elde edilmiş ağırlıklar kullanılmadan sıfırdan eğitilmiştir. Veri setinde sınıflara ait yama sayısı yeterli olduğundan dolayı veri artırma uygulanmamıştır. Modellerin parametre sayıları Tablo 4’te verilmiştir.

Tablo 4. Modellerin parametre sayıları (The parameter numbers of the models)

Model	Parametre Sayısı (Milyon, M)
EfficientNet-B0	5.3 M
EfficientNet-B0+GCT	3.4 M
EfficientNet-B0+ECA	3.4 M
EfficientNet-B0+FCA	4.3 M
EfficientNet-B0+CBAM	18.5 M
EfficientNet-B0+SimAM	4.3 M

3.3. Değerlendirme Ölçütleri (Evaluation Metrics)

Figure Sınıflandırma görevlerinde modellerin performansında kullanılan değerlendirme ölçütleri mevcuttur. Şekil 5’te sunulan karmaşıklık matrisi bu çalışmada test verileri üzerinde modellerin

Tahmin \ Gerçek	Pozitif Sınıf	Negatif Sınıf
Pozitif Sınıf	Doğru Pozitif (DP)	Yanlış Negatif (YN)
Pozitif Sınıf	Yanlış Pozitif (YP)	Doğru Negatif (DN)

performansını değerlendirmek amacıyla kullanılmıştır. Gerçek sınıf tablodaki satırda, tahmin edilen sınıf ise sütunda gösterilmektedir. Karmaşıklık matrisine uygun olarak, DP ve DN sırasıyla doğru şekilde tahmin edilen pozitif ve negatif örneklerin sayısını belirtirken, YP ve YN hatalı olarak tahmin edilen negatif ve pozitif örneklerin sayısını gösterir.

Doğruluk, tüm örnekler arasındaki doğru tahminlerin oranını gösterir. Kesinlik, pozitif sınıflardan kaçının pozitif olarak tahmin edildiğini verir. Doğru şekilde sınıflandırılan pozitif vakaların yüzdesi duyarlılıkla, doğru şekilde sınıflandırılan negatif vakaların yüzdesi ise özgüllükle sağlanır. Hassasiyet (Recall), duyarlılık ile aynıdır. F1-skor, duyarlılık ve kesinlik değerlerinin harmonik ortalaması ile bulunur [40]. Matthews korelasyon katsayısı (MCC) gerçek değer ve tahmin edilen değer arasındaki bir korelasyon katsayısıdır. -1 ve +1 arasında değer alır ve +1 katsayısı iyi bir tahmini, 0 ortalama rastgele tahmini ve -1 ise kötü tahmini temsil eder.

$$\text{Doğruluk} = \frac{DP+DN}{DP+DN+YN+YP}$$

$$\text{Kesinlik} = \frac{DP}{DP+YP}$$

$$\text{Özgüllük} = \frac{DN}{DP+YP}$$

$$\text{Duyarlılık} = \frac{DP}{DP+YN}$$

$$\text{F1-Skor} = 2x \frac{\text{Kesinlik} \times \text{Duyarlılık}}{\text{Kesinlik} + \text{Duyarlılık}}$$

$$\text{MCC} = \frac{(DP \times DN - YP \times YN)}{\sqrt{(DP + YP) \times (DP + YN) \times (DN + YP) \times (DN + YN)}}$$

Şekil 5. Karmaşıklık matrisi ve kullanılan diğer değerlendirme ölçütleri (Confusion matrix and used other evaluation metrics)

3.4. Deneysel Sonuçlar ve Tartışma (Experimental Results and Discussion)

Bu bölümde halka açık veri seti DeepHP’nin içerdiği histopatolojik görüntü yamaları kullanılarak HP’nin varlığını tespit etmek amacıyla eğitilen modellerin deneysel sonuçları sunulmaktadır. EfficientNet-B0, EfficientNet-B0+FcaNet, EfficientNet-B0+ECANet, EfficientNet-B0+GCT, EfficientNet-B0+CBAM ve EfficientNet-B0+SimAM modelleri HP’nin teşhisinde kullanılmıştır. Modeller eşit koşullarda aynı eğitim ve validasyon verileri kullanılarak eğitilmiş ve aynı test veri seti üzerinde performansları test edilmiştir. Tablo 5 karşılaştırılan

modellerin eğitim, validasyon ve test doğruluklarını sunmaktadır.

Modellerin performansı DeepHP veri setinin paylaşıldığı temel çalışmada alınan en iyi sonuç ile kıyaslanmıştır [21]. Temel çalışmada HP’nin tespiti için transfer öğrenme ve ince-ayar yaklaşımları kullanılarak analizler yapılmıştır ve en iyi sonuç ince-ayar yaklaşımı kullanılan VGG16 ile 0.98 doğruluk elde edilmiştir. Bu çalışmada, temel çalışmada elde edilen doğruluk değerinden daha iyi doğruluk elde etmek amacıyla dikkat mekanizmaları kullanılan EfficientNet-B0 ile elde edilen sonuçlar Tablo 6’da sunulmuştur ve en iyi değerler koyu yazılmıştır. Bu sonuçlara göre en iyi test doğruluğu EfficientNet-B0 mimarisi ile kanal

tabanlı dikkati geliştiren FCA'nın birlikte kullanılmasıyla 0.99835 doğruluk değeri elde edilmiştir ve temel çalışmada sunulan VGG16'dan daha iyi performans göstermektedir. Ayrıca MCC değerinin 1'oldukça yakın olması elde edilen tahmin doğruluğunu desteklemektedir. VGG16 mimarisi yaklaşık 140 milyon parametreye sahipken EfficientNet-B0 ve dikkat mekanizmalarıyla birleştirilen versiyonları Tablo 4'te sunulduğu üzere daha az parametreye sahiptir. Dolayısıyla önerilen mimari daha düşük parametreyle daha az maliyetlidir. Önerilen mimariler veri setinde hiçbir değişiklik yapmadan eğitilen uçtan uca sistemlerdir ve önceden eğitilmiş ağırlıklara ihtiyaç duymadan veriyi öğrenebilmekte ve HP'yi teşhis edebilmektedir.

Genel olarak EfficientNet-B0 mimarisinin dikkat mekanizmalarıyla birleştirilmesiyle oluşturulan versiyonları HP'nin teşhisinde özellikleri ayırt etmede oldukça başarılıdır. Burada dikkat mekanizmalarının ağırlık çıkarma yeteneğini güçlendirdiği görülmektedir. Doğruluk dışındaki

metrikler incelendiğinde kesinlik metriğinde en yüksek değeri 0.99982 ile EfficientNet-B0+ECA kombinasyonu almıştır. Özgüllük metriğinde de aynı şekilde en yüksek değer olan 0.99993 EfficientNet-B0+ECA kombinasyonu ile elde edilmiştir. Model performansını değerlendirme güçlü metriklerden biri olan F1-Skor'da ise en yüksek değere 0.99706 ile EfficientNet-B0+FCA kombinasyonu sahiptir.

Dikkat mekanizmaları ile kombinasyonları yapılan EfficientNet-B0 mimarilerinin kombinasyonlarına ait karmaşıklık matrisleri Tablo 7'de verilmiştir. Kanal ve uzamsal dikkati geliştirmek adına kullanılan GCT, ECA, FCA, CBAM ve SimAM dikkat mekanizmalarından toplam yanlış oranının en düşük EfficientNet-B0+FCA sistemine ait olduğu görülmektedir. Özellikle en düşük yanlış pozitif sayısına sahip olması gerçek hayat değerlendirmelerinde önemli bir ölçüttür.

Tablo 5. EfficientNet-B0 ile entegre edilen dikkat mekanizmalarının eğitim, validasyon ve test doğrulukları (Train, validation and test accuracy of attention mechanisms integrated with EfficientNet-B0)

Model	Eğitim Doğruluğu	Validasyon Doğruluğu	Test Doğruluğu
EfficientNet-B0	0.99901	0.98695	0.98592
EfficientNet-B0+GCT	0.99931	0.99320	0.99372
EfficientNet-B0+ECA	0.99855	0.99537	0.99494
EfficientNet-B0+FCA	0.99872	0.99843	0.99835
EfficientNet-B0+CBAM	0.99632	0.98351	0.98413
EfficientNet-B0+SimAM	0.99872	0.99224	0.99230

Tablo 6. Çeşitli dikkat mekanizmaları entegre edilen EfficientNet-B0 mimarilerinin test verisi üzerinde diğer performans metriklerinin karşılaştırılması (The comparison of other performance metrics on test data of EfficientNet-B0 architectures with integrated various attention mechanisms)

Model	Doğruluk	Kesinlik	Hassasiyet	Özgüllük	F1-Skor	MCC
VGG16 [21]	0.98	0.94	0.99	0.98	0.96	0.95
EfficientNet-B0	0.98592	0.98899	0.96060	0.99582	0.97459	0.9651
EfficientNet-B0+GCT	0.99372	0.99279	0.98480	0.99721	0.98878	0.9844
EfficientNet-B0+ECA	0.99494	0.99982	0.98216	0.99993	0.99091	0.9875
EfficientNet-B0+SimAM	0.99230	0.97529	0.99790	0.99011	0.98646	0.9812
EfficientNet-B0+CBAM	0.98413	0.99359	0.94413	0.99760	0.97113	0.9607
EfficientNet-B0+FCA	0.99835	0.99557	0.99856	0.99826	0.99706	0.9958

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Mide kanseri dünyada en yaygın beşinci kanserdir. Yaşam süresini ve kalitesini artırmak için erken teşhis hayati derecede önemlidir. Patologlar tarafından laboratuvar ortamında yapılan

histopatolojik tanı zorlayıcı olmaktadır. Görüntü büyüklüğü, patologların artan iş yükü, tanı doğruluğundaki şüphe ve zaman kaybı gibi faktörler tanı için otomatik sistemlerin gerekliliğini ortaya çıkarmıştır. Dolayısıyla teşhis için histopatolojik görüntüleri kullanarak hızlı tanı koyan otomatik

Tablo 7. Performans analizi yapılan modellerin karmaşıklık matrisleri (Confusion matrix of models made performance analysis)

EfficientNet-B0 (Doğruluk: 0.98592)				EfficientNet-B0+GCT (Doğruluk: 0.99372)			
Gerçek Sınıf	Negatif	42410	178	Gerçek Sınıf	Negatif	42469	119
	Pozitif	656	15994		Pozitif	253	16397
		Negatif	Pozitif			Negatif	Pozitif
Tahmini Sınıf				Tahmini Sınıf			
EfficientNet-B0+ECA (Doğruluk: 0.99494)				EfficientNet-B0+FCA (Doğruluk: 0.99835)			
Gerçek Sınıf	Negatif	42585	3	Gerçek Sınıf	Negatif	42514	74
	Pozitif	297	16353		Pozitif	24	16626
		Negatif	Pozitif			Negatif	Pozitif
Tahmini Sınıf				Tahmini Sınıf			
EfficientNet-B0+SimAM (Doğruluk: 0.99230)				EfficientNet-B0+CBAM (Doğruluk: 0.98413)			
Gerçek Sınıf	Negatif	42569	19	Gerçek Sınıf	Negatif	42486	102
	Pozitif	135	16515		Pozitif	838	15812
		Negatif	Pozitif			Negatif	Pozitif
Tahmini Sınıf				Tahmini Sınıf			

sistemler son yıllarda yapay zekanın alt dalı olan derin öğrenmeyi kullanmaktadır. Derin öğrenme görüntüdeki en temsil edici özelliklerin öğrenilmesini mümkün kılar ve medikal görüntülerde tanı koymak için doktorlara yardımcı sistemler oluşturulmasını sağlar. Bu çalışmada derin öğrenmenin görüntü üzerindeki avantajlarından yararlanmak ve mide kanserinin başlıca nedenlerinden biri olan HP'yi teşhis etmek amacıyla evrişimli sinir ağlarından EfficientNet-B0 mimarisi kullanılmıştır. Daha etkili teşhis ve daha hafif bir mimari için EfficientNet-B0 mimarisine yeni dikkat mekanizmaları entegre edilmiş ve performansları analiz edilmiştir. EfficientNet-B0, EfficientNet-B0+FCA, EfficientNet-B0+ECA, EfficientNet-B0+GCT, EfficientNet-B0+CBAM ve EfficientNet-B0+SimAM mimarilerinin test verisi üzerinde sınıflandırma başarımları karşılaştırılmıştır. Halka açık histopatolojik mide görüntüleri içeren DeepHP veri seti üzerinde en iyi sonuç alınan birleşim olan EfficientNet-B0+FCA sistemiyle 0.99835 test doğruluğu elde edilerek literatürde sunulan en iyi doğruluk değeri geçilmiştir. Önerilen sistem HP'nin teşhisi için

patoloğlara veya doktorlara yardımcı bir sistem olarak 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)

Bu çalışmada yazarlar eşit oranda katkı sağlamıştır.

The authors contributed equally to this study.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

There is no conflict of interest in this study.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] P. Bhardwaj, G. Bhandari, Y. Kumar, and S. Gupta, "An Investigational Approach for the Prediction of Gastric Cancer Using Artificial Intelligence Techniques: A Systematic Review," *Archives of Computational Methods in Engineering*. Springer Science and Business Media B.V., 2022. doi: 10.1007/s11831-022-09737-4.
- [2] H. Sung *et al.*, "Global Cancer Statistics 2020: GLOBOCAN Estimates of Incidence and Mortality Worldwide for 36 Cancers in 185 Countries," *CA Cancer J Clin*, vol. 71, no. 3, pp. 209–249, May 2021, doi: 10.3322/caac.21660.
- [3] T. Nishida *et al.*, "Impact of time from diagnosis to chemotherapy in advanced gastric cancer: A Propensity Score Matching Study to Balance Prognostic Factors," *World J Gastrointest Oncol*, vol. 11, no. 1, pp. 28–38, 2019, doi: 10.4251/wjgo.v11.i1.28.
- [4] R. Suzuki *et al.*, "Aberrant methylation of microRNA-34b/c is a predictive marker of metachronous gastric cancer risk," *J Gastroenterol*, vol. 49, no. 7, pp. 1135–1144, 2014, doi: 10.1007/s00535-013-0861-7.
- [5] M. A. Satolli, L. Buffoni, R. Spadi, and I. Roato, "Gastric Cancer: The Times they are a-changin'," *World J Gastrointest Oncol*, vol. 7, no. 11, pp. 303–316, 2015, doi: 10.4251/wjgo.v7.i11.303.
- [6] P. Rawla and A. Barsouk, "Epidemiology of gastric cancer: Global trends, risk factors and prevention," *Przegląd Gastroenterologiczny*, vol. 14, no. 1, pp. 26–38, 2019. doi: 10.5114/pg.2018.80001.
- [7] T. Matysiak-Budnik and F. Mégraud, "Helicobacter pylori infection and gastric cancer," *Eur J Cancer*, vol. 42, no. 6, pp. 708–716, 2006, doi: 10.1016/j.ejca.2006.01.020.
- [8] J. Y. Lee and N. Kim, "Diagnosis of Helicobacter pylori by invasive test: Histology," *Ann Transl Med*, vol. 3, no. 1, pp. 1–8, 2015, doi: 10.3978/j.issn.2305-5839.2014.11.03.
- [9] D. O. Faigel, M. Childs, E. E. Furth, A. Alavi, and D. C. Metz, "New Noninvasive Tests for Helicobacter pylori Gastritis: Comparison with Tissue-Based Gold Standard," *Digestive Diseases and Sciences*, vol. 41, no. 4. Kluwer Academic/Plenum Publishers, pp. 740–748, 1996. doi: 10.1007/BF02213130.
- [10] O. Aydin, R. Egilmez, T. Karabacak, and A. Kanik, "Interobserver variation in histopathological assessment of Helicobacter pylori gastritis," *World J Gastroenterol*, vol. 9, no. 10, pp. 2232–2235, 2003, doi: 10.3748/wjg.v9.i10.2232.
- [11] W. Dickey, B. Kenny, and J. McConnell, "Effect of proton pump inhibitors on the detection of," *Aliment Pharmacol Ther*, vol. 10, no. 3, pp. 289–293, 1996.
- [12] O. C. Aktepe, I. H. Çiftçi, B. Şafak, I. Uslan, and F. H. Dilek, "Five methods for detection of Helicobacter pylori in the Turkish population," *World J Gastroenterol*, vol. 17, no. 47, pp. 5172–5176, 2011, doi: 10.3748/wjg.v17.i47.5172.
- [13] J. K. Y. Hooi *et al.*, "Global Prevalence of Helicobacter pylori Infection: Systematic Review and Meta-Analysis," *Gastroenterology*, vol. 153, no. 2, pp. 420–429, 2017, doi: 10.1053/j.gastro.2017.04.022.
- [14] J. Potočnik, S. Foley, and E. Thomas, "Current and potential applications of artificial intelligence in medical imaging practice: A narrative review," *J Med Imaging Radiat Sci*, vol. 54, no. 2, pp. 376–385, 2023, doi: 10.1016/j.jmir.2023.03.033.
- [15] M. Rana and M. Bhushan, "Machine learning and deep learning approach for medical image analysis: diagnosis to detection," *Multimed Tools Appl*, vol. 82, no. 17, pp. 26731–26769, 2023, doi: 10.1007/s11042-022-14305-w.
- [16] S. Shafi and A. V. Parwani, "Artificial intelligence in diagnostic pathology," *Diagn Pathol*, vol. 18, no. 1, pp. 1–12, 2023, doi: 10.1186/s13000-023-01375-z.
- [17] X. Jiang, Z. Hu, S. Wang, and Y. Zhang, "Deep Learning for Medical Image-Based

- Cancer Diagnosis,” *Cancers (Basel)*, vol. 15, no. 14, 2023, doi: 10.3390/cancers15143608.
- [18] Y. DOĞAN, “Derin Öğrenme Yöntemleriyle Çapraz Veri Seti Değerlendirmesi Altında COVID-19 Tespiti,” *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, vol. 11, no. 3, pp. 813–823, 2023, doi: 10.29109/gujsc.1210343.
- [19] S. Banerji and S. Mitra, “Deep learning in histopathology: A review,” *Wiley Interdiscip Rev Data Min Knowl Discov*, vol. 12, no. 1, pp. 1–13, 2022, doi: 10.1002/widm.1439.
- [20] C. L. Srinidhi, O. Ciga, and A. L. Martel, “Deep neural network models for computational histopathology: A survey,” *Med Image Anal*, vol. 67, p. 101813, 2021, doi: 10.1016/j.media.2020.101813.
- [21] W. G. e. Gonçalves *et al.*, “DeepHP: A New Gastric Mucosa Histopathology Dataset for Helicobacter pylori Infection Diagnosis,” *Int J Mol Sci*, vol. 23, no. 23, 2022, doi: 10.3390/ijms232314581.
- [22] S. Klein *et al.*, “Deep learning for sensitive detection of Helicobacter Pylori in gastric biopsies,” *BMC Gastroenterol*, vol. 20, no. 1, pp. 1–11, 2020, doi: 10.1186/s12876-020-01494-7.
- [23] S. Zhou *et al.*, “Deep learning assistance for the histopathologic diagnosis of Helicobacter pylori,” *Intell Based Med*, vol. 1–2, no. August, p. 100004, 2020, doi: 10.1016/j.ibmed.2020.100004.
- [24] Y. Yang, Y. Yang, Y. Yuan, J. Zheng, and Z. Zhongxi, “Detecting helicobacter pylori in whole slide images via weakly supervised multi-task learning,” *Multimed Tools Appl*, vol. 79, no. 35–36, pp. 26787–26815, 2020, doi: 10.1007/s11042-020-09185-x.
- [25] D. R. Martin, J. A. Hanson, R. R. Gullapalli, F. A. Schultz, A. Sethi, and D. P. Clark, “A deep learning convolutional neural network can recognize common patterns of injury in gastric pathology,” *Arch Pathol Lab Med*, vol. 144, no. 3, pp. 370–378, 2020, doi: 10.5858/arpa.2019-0004-OA.
- [26] Y. J. Lin, C. C. Chen, C. H. Lee, C. Y. Yeh, and Y. M. Jeng, “Two-tiered deep-learning-based model for histologic diagnosis of Helicobacter gastritis,” *Histopathology*, vol. 83, no. 5, pp. 771–781, 2023, doi: 10.1111/his.15018.
- [27] M. Tan and Q. V. Le, “EfficientNet: Rethinking model scaling for convolutional neural networks,” *36th International Conference on Machine Learning, ICML 2019*, vol. 2019-June, pp. 10691–10700, 2019.
- [28] A. Kallipolitis, K. Revelos, and I. Maglogiannis, “Ensembling efficientnets for the classification and interpretation of histopathology images,” *Algorithms*, vol. 14, no. 10, 2021, doi: 10.3390/a14100278.
- [29] M. H. Guo *et al.*, “Attention mechanisms in computer vision: A survey,” *Computational Visual Media*, vol. 8, no. 3. Tsinghua University, pp. 331–368, Sep. 01, 2022. doi: 10.1007/s41095-022-0271-y.
- [30] J. Hu, L. Shen, and G. Sun, “Squeeze-and-excitation networks,” *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*, pp. 7132–7141, 2018, [Online]. Available: http://openaccess.thecvf.com/content_cvpr_2018/html/Hu_Squeeze-and-Excitation_Networks_CVPR_2018_paper.html
- [31] F. Wang *et al.*, “Residual attention network for image classification,” in *Proceedings - 30th IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, CVPR 2017*, 2017, pp. 6450–6458. doi: 10.1109/CVPR.2017.683.
- [32] S. Woo, J. Park, J. Y. Lee, and I. S. Kweon, “CBAM: Convolutional block attention module,” in *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 2018, pp. 3–19. doi: 10.1007/978-3-030-01234-2_1.
- [33] J. Park, S. Woo, J. Y. Lee, and I. S. Kweon, “BAM: Bottleneck attention module,” in *British Machine Vision Conference 2018, BMVC 2018*, BMVA Press, 2019.

- [34] L. Yang, R. Y. Zhang, L. Li, and X. Xie, "SimAM: A Simple, Parameter-Free Attention Module for Convolutional Neural Networks," in *Proceedings of Machine Learning Research*, 2021, pp. 11863–11874. [Online]. Available: <https://proceedings.mlr.press/v139/yang21o>
- [35] Z. Qin, P. Zhang, F. Wu, and X. Li, "FcaNet: Frequency Channel Attention Networks," in *Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision*, 2021, pp. 763–772. doi: 10.1109/ICCV48922.2021.00082.
- [36] Q. Wang, B. Wu, P. Zhu, P. Li, W. Zuo, and Q. Hu, "ECA-Net: Efficient channel attention for deep convolutional neural networks," in *Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2020, pp. 11531–11539. doi: 10.1109/CVPR42600.2020.01155.
- [37] Z. Yang, L. Zhu, Y. Wu, and Y. Yang, "Gated Channel Transformation for Visual Recognition," in *Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2020, pp. 11791–11800. doi: 10.1109/CVPR42600.2020.01181.
- [38] L. Liang, Y. Zhang, S. Zhang, J. Li, A. Plaza, and X. Kang, "Fast Hyperspectral Image Classification Combining Transformers and SimAM-Based CNNs," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 61, pp. 1–19, 2023, doi: 10.1109/TGRS.2023.3309245.
- [39] D. P. Kingma and J. L. Ba, "Adam: A method for stochastic optimization," in *3rd International Conference on Learning Representations, ICLR 2015 - Conference Track Proceedings*, International Conference on Learning Representations, ICLR, 2015.
- [40] H. M and S. M.N, "A Review on Evaluation Metrics for Data Classification Evaluations," *International Journal of Data Mining & Knowledge Management Process*, vol. 5, no. 2, pp. 01–11, 2015, doi: 10.5121/ijdkp.2015.5201.

ROS-Based Path Planning for Autonomous Underwater Vehicles Using Deep Q-Networks Algorithm

Emre GÖZÜTOK¹ , Fecir DURAN^{2*} 

¹Gazi Üniversitesi, Bilişim Enstitüsü, Bilişim Sistemleri Bölümü, Çankaya/ANKARA

²Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Yenimahalle/ANKARA

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 04/04/2024
Düzeltilme: 08/05/2024
Kabul: 10/05/2024

Anahtar Kelimeler

Pekiştirmeli Öğrenme
Robot İşletim Sistemi
Simülasyon
Su Altı Otonom Araçları
Yapay Zeka

Article Info

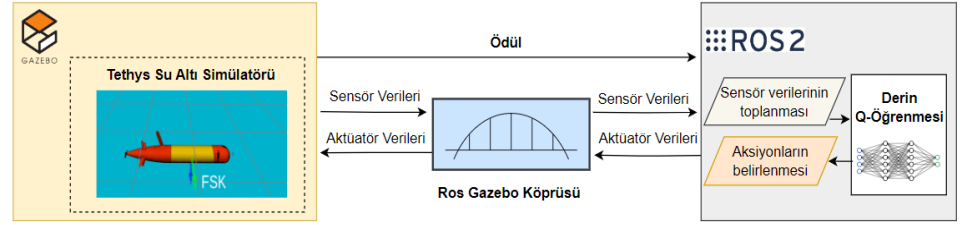
Research article
Received: 04/04/2024
Revision: 08/05/2024
Accepted: 10/05/2024

Keywords

Reinforcement Learning
Robot Operating System
Simulation
Artificial Intelligence
Autonomous Underwater
Vehicles

Grafik Özet (Graphical/Tabular Abstract)

Bu çalışmada otonom su altı araçlarında yol planlamanın otomatize olarak gerçekleştirilebilmesi için ROS tabanlı çevrim içi Derin Q-Öğrenmesi metodu geliştirilmiştir. / A ROS-based online Deep Q-Learning method has been developed to automate path planning in autonomous underwater vehicles.



Şekil A: ROS tabanlı çevrim içi Derin Q-Öğrenmesi ile otonom su altı yol planlama mimarisi / **Figure A:** Autonomous underwater path planning architecture with ROS-based online Deep Q-Learning

Önemli noktalar (Highlights)

- Çevrim içi Derin Q-Öğrenmesi metodu kullanılarak, Uzun Menzilli Otonom Su Altı Araçlarında otonom yol planlaması gerçekleştirilmiştir. / Autonomous path planning in Long-Range Autonomous Underwater Vehicles has been accomplished using the online Deep Q-Learning method.
- Veri akışının sınırlı olduğu durumlar simüle edilerek Derin Q-Öğrenmesi yöntemi ile bu koşullar altında otonom yol planlamanın mümkün olduğu gözlemlenmiştir. / Simulation-based scenarios with limited data flow were simulated, and it was observed that autonomous path planning is possible using the Deep Q-Learning method.
- ROS ve Gazebo entegrasyonu gerçekleştirilerek simülasyon tabanlı bir çevrim içi öğrenme platformu elde edilmiştir. / ROS and Gazebo integration has been achieved, resulting in a simulation-based online learning platform.

Amaç (Aim): Bu çalışmanın amacı, su altı otonom araçları için geleneksel kontrol yöntemleri yerine pekiştirmeli öğrenme tabanlı otonom yol planlama algoritmasının etkinliğini ve potansiyel avantajlarını araştırmaktır. / The aim of this study is to investigate the effectiveness and potential advantages of a reinforcement learning-based autonomous path planning algorithm for underwater autonomous vehicles, as opposed to traditional control methods.

Özgünlük (Originality): Aktif olarak görev yapan bir su altı aracına ait simülasyon üzerinde veri akışının sınırlı olduğu bir senaryo simüle edilerek, bu şartlarda uzun menzilli otonom su altı araçlarında yol planlama için Derin Q-Öğrenmesi metodunun etkin eğitilmesinin mümkün olduğu gözlemlenmiş ve pekiştirmeli öğrenme tabanlı yol planlama algoritmasının performansı ve uygulanabilirliği değerlendirilmiştir. / By simulating a scenario with limited data flow on a simulation of an actively operating vehicle, it was observed that effective training of the Deep Q-Learning method for path planning in long-range autonomous underwater vehicles is possible under these conditions. The performance and applicability of the reinforcement learning-based path planning algorithm were evaluated.

Bulgular (Results): Çalışma Derin Q-Öğrenmesi metodunun otonom su altı araçlarının yol planlamasındaki etkinliğini gösterirken, hiperparametrelerin algoritma performansı üzerindeki kritik etkisini vurgulamaktadır. / The study highlights the effectiveness of Deep Q-Learning in the path planning of underwater autonomous vehicles, emphasizing the critical impact of hyperparameters on algorithm performance.

Sonuç (Conclusion): Sonuç olarak Derin Q-Öğrenmesi yöntemi ile otonom su altı araçlarında yol planlamanın mümkün olduğu görülmüştür. / As a result, it has been observed that path planning in autonomous underwater vehicles is possible with the Deep Q-Learning algorithm.



Su Altı Otonom Araçlarda Derin Q-Ağları Algoritması Kullanılarak ROS Tabanlı Yol Planlama

Emre GÖZÜTOK¹ , Fecir DURAN^{2*}

¹Gazi Üniversitesi, Bilişim Enstitüsü, Bilişim Sistemleri Bölümü, Çankaya/ANKARA

²Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Yenimahalle/ANKARA

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 04/04/2024
Düzeltilme: 08/05/2024
Kabul: 10/05/2024

Anahtar Kelimeler

Elektro Deşarj
İşleme
Ti-6Al-4V Alaşım
Kama Yuvası
Ölçüm Doğruluğu

Öz

Su altı araçları genellikle sınırlı hareket kabiliyetine sahiptir. Suyun yoğunluğu, viskozitesi, kaldırma kuvveti ve akıntı gibi çevresel faktörler su altı araçlarının manevra kabiliyetini kısıtlamaktadır. Bu çalışma, bu problemin çözümüne odaklanmaktadır. Geleneksel denetleyicilerin yerine gerçek zamanlı olarak Pekiştirmeli Öğrenme algoritmalarının kullanılması incelenmiştir. Uzun Menzilli Su Altı Otonom Araçları'nın (UMOSA) yörüngesini belirlemek için Derin Q-Ağları algoritması kullanılmıştır. Gazebo simülasyon ortamındaki su altı aracının kontrolü Robot İşletim Sistemi kullanılarak sağlanmıştır. Sonuçlar geleneksel denetleyicilere kıyasla Pekiştirmeli Öğrenme tabanlı algoritmaların potansiyel avantajlarını göstermektedir. Çalışma sonucunda UMOSA modellerinde Derin Q-Ağları algoritmasının gerçek zamanlı kontrol için verimli olarak kullanılabileceği ve simülasyon ortamında Derin Q-Ağları için gereken eğitim ortamının gerçekleştirilebileceği gözlenmiştir.

ROS-Based Path Planning for Autonomous Underwater Vehicles Using Deep Q-Networks Algorithm

Article Info

Research article
Received: 04/04/2024
Revision: 08/05/2024
Accepted: 10/05/2024

Keywords

Electro Discharge
Machining
Ti-6Al-4V Alloy
Keyseat
Measurement Accuracy

Abstract

This study focuses on addressing the limited maneuverability typically associated with underwater vehicles. The maneuverability of underwater vehicles is restricted by environmental factors such as the density, viscosity, buoyancy, and currents of water. RL algorithms were examined in real-time, replacing traditional controllers. The Deep Q-Networks algorithm was employed to determine the trajectory of LRAUV. Control of the Gazebo underwater vehicle was facilitated using the Robot Operating System. Results indicate the potential advantages of RL-based algorithms compared to traditional controllers. The study concludes that the Deep Q-Networks algorithm can be efficiently utilized for real-time control of LRAUV models, and the training environment required for Deep Q-Networks can be achieved in the simulation environment.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Uzun Menzilli Su Altı Otonom Araçları (UMOSA), denizaltı keşif ve gözlem görevlerinde, deniz çevresinin izlenmesinde, okyanus ekosistemlerinin araştırılmasında ve sismik araştırmalarda kullanılmaktadır. Bu araçlar genellikle insan müdahalesi olmadan uzun süreler boyunca görev yapabilme yeteneğine sahiptirler. Ancak, bu tür araçların kontrolü, çevresel faktörlerin yanı sıra yerine getirilmesi gereken görev gereksinimlerini de dikkate alarak oldukça karmaşık hale gelebilmektedir [1].

Phillips ve diğerleri (2023), "Autosub Long Range 1500: A continuous 2000 km field trial" başlıklı makalelerinde, Tethys'in Monterey Bay Aquarium Araştırma Enstitüsü (MBARI) tarafından geliştirilen bir Uzun Menzilli Otonom Su Altı Aracı (LRAUV) platformu olduğunu belirtmişlerdir [2]. Bu platform, 120 kg ağırlığında, 0,3 metre çapında ve 2 metre uzunluğundadır. Derinlik derecesi 300 metreye kadar olan bu araç, 0,5 ila 1 m/s hız aralığına sahiptir [2]. Tethys, fitoplankton çiçeklerini izlemek [3], yükselme akıntılarını incelemek [4] ve Arktik ortamlardaki petrol

sızıntılarını değerlendirmek [5] gibi kullanım alanlarına sahiptir.

Su altı otonom araçları ve deniz araçları için yol planlama ve navigasyon üzerine yapılan çeşitli çalışmalar literatürde bulunmaktadır. Qu ve diğerleri tarafından yapılan bir çalışmada, otonom deniz araçları için Pekiştirmeli Öğrenme (Reinforcement Learning - RL) tabanlı bir yol takibi kontrol şeması sunulmaktadır. Surge-heading birleşik rehberlik yöntemi, aracın istenen yolu doğru bir şekilde takip etmesini sağlamaktadır. TD3 algoritması kullanılarak, model belirsizlikleri ve ortam bozulmaları dikkate alınarak yol takip eylemleri üretilir. LSTM-TD3 (Long Short Term Memory – Twin Delayed Deep Deterministic Policy Gradient) tabanlı kontrol şemasının etkinliği ve üstünlüğü, simülasyon sonuçları ve kapsamlı karşılaştırmalarla gösterilmiştir [6].

Ma ve diğerleri tarafından yürütülen araştırma kapsamında, otonom su altı araçları için hassas navigasyonu sağlamak amacıyla derin öğrenme tabanlı bir adaptif navigasyon algoritması önerilmiştir. Algoritma, navigasyon sistemlerinin hata birikimini düzeltmek için derin öğrenme kullanmış ve Doppler Hız Logu (Doppler Velocity Log - DVL) ölçümünün başarısız olup olmadığını belirlemek için χ^2 kuralını benimsemiştir. Ayrıca, navigasyon doğruluğunu daha da artırmak için değişken Bayesian (VB) yöntemine dayalı bir adaptif filtre kullanılmıştır. OSA (Otonom Su Altı Aracı) alan verilerine dayanan deneyler, önerilen algoritmanın sağlam navigasyon performansı ve pozisyon doğruluğunu önemli ölçüde artırdığını göstermiştir [7].

Liu ve diğerleri tarafından gerçekleştirilen çalışmada otonom su altı araçlarında navigasyon için Derin Pekiştirmeli Öğrenme için Derin Deterministik Politika Gradyanı (DDPG) yöntemi kullanılmıştır. Çalışmada sadece iç sensörlerden elde edilen bilgilerle çalışan bir algoritma geliştirilerek çevresel etkileşimler yoluyla davranışların öğrenilmesi amaçlanmıştır. Algoritmanın etkinliğini değerlendirmek için simülasyon ortamında bir dizi deney gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlarla DDPG algoritmasının su altı araçlarının kontrol sistemlerinde uygulanabilirliğini ve karmaşık uygulama ortamlarında pontansiyeli doğrulanmıştır [8].

Zhang ve diğerleri bilinmeyen aktüatör doyumluğu ve çevresel bozulmalar yaşayan az eylemsiz denizaltı araçları için yaklaşım açısı tabanlı üç boyutlu yol-takip kontrol şeması önermişlerdir. Az

eylemsiz denizaltı terimi, aktüatörlerin veya itici güçlerin sayısının aracı hareketlerini tam olarak kontrol etmek için yetersiz olduğu otonom deniz araçlarını tanımlamaktadır [9].

Tian ve ekibinin çalışmasında, OSA'lardaki rota izleme problemini çözmek için kinematik ve dinamik modellere dayanan bir bulanık denetleyici geliştirilmiştir. Bulanık denetleyicinin etkin performansı için, rota uzunluğu, düzgünlük ve çapraz iz pozisyon hatası gibi çoklu optimizasyon performans göstergeleri belirlenmiştir. Üyelik fonksiyonlarının parametrelerini belirlemek için Parçacık Sürü Optimizasyonu (Particle Swarm Optimisation - PSO) algoritması kullanılmıştır. Önerilen algoritmanın performansını test etmek için düz çizgi, sinüs eğrisi, yarım ay şekli, Arşimed spirali ve pratik rotaları içeren çeşitli senaryolar sunulmuştur [10].

Jian ve ekibinin araştırmasında, OSA'lar için geliştirilen bir planlayıcı, hem büyük ölçekli bilinen statik ortamlarda hem de dinamik engellerin bulunduğu ortamlarda çarpışma olmadan bir yol belirleme yeteneği hedeflenmiştir. Bu çalışmada, dinamik engellerin varlığı durumunda OSA'lar için yerel iz ve global yol planlamak için değiştirilmiş ve birleştirilmiş Dinamik Pencere Yaklaşımı (Dynamic Window Approach - DWA) ve Hızlı Keşfedilen Rastgele Ağaç (Rapidly Exploring Random Tree - RRT) yöntemleri kullanılmıştır. Önerilen hibrit yaklaşımda, planlayıcı otomatik olarak çarpışma riskini değerlendirip ve gerektiğinde Dinamik Pencere Yaklaşımı ile arasında geçiş yaparak, dinamik engellemekte ortadan kalktıktan sonra ise tekrar Rastgele Orman yöntemine geçmektedir [11].

Fang ve ekibinin yürüttüğü çalışmada, otonom denizaltı araçları için engel kaçınma amacıyla kendini ayarlayan bir bulanık denetleyici kullanarak basit bir arama tekniği önerilmiştir. Denizaltı aracının hidrodinamik katsayılarını belirlemek için Planar Hareket Mekanizması (Planar Movement Mechanism - PMM) testi kullanılmış ve bu veriler denetim sistemi için önemli veri girişleri olarak kullanılmıştır. Kendini ayarlayan bulanık denetleyici, denizaltı araçlarının itişini yönlendirmek için benimsenmiştir. Engelden kaçınma fonksiyonu, sualtı görüntü tespit yöntemiyle birlikte BK üçgen alt ürünü kullanılarak belirlenmiştir. Yapılan simülasyonlar, kendini ayarlayan kontrol, görünürlük, güvenlik ve akıntı etkisi olmak üzere dört tür hareket kontrol faktörünün manevra performansını incelemek için kullanılmıştır [12].

Bu çalışma, Robot İşletim Sistemi (ROS) çevresinde Gazebo simülasyon ortamında gerçekleştirilen araştırmaya dayanmaktadır. Çalışmada Monterey Körfezi Akvaryumu Araştırma Enstitüsü tarafından geliştirilen Tethys UMOSA [13] Pekiştirmeli Öğrenme algoritmasının kullanılması incelenmiştir. Deneyler Gazebo simülasyon ortamında [14] gerçekleştirilmiştir. Yapılan deneylerde, Paper ve arkadaşları tarafından geliştirilen Tethys UMOSA'nın modellendiği Gazebo su altı simülasyon ortamı [15] kullanılmıştır.

Su altı otonom araçları farklı kategorilerde ele alınmakta olup, UMOSA'lar yapısal farklılıklarından kaynaklanan farklı kinematik yapıya sahiptirler [16]. Bu çalışmada, bu farklılık göz önünde bulundurularak bir UMOSA modeli kullanılmış ve çevrim içi bir kontrol mekanizması kullanılarak aracın su altı gibi dinamik bir ortamda yol planlama yetisini kazanması amaçlanmıştır. Çalışmada, ortamdaki elde edilen sensör verilerinin kısıtlı olduğu senaryolarda dahi (örneğin kamera verisinin suyun bulanıklığı nedeniyle kullanılmadığı) kullanılan yol planlama mekanizmasının geçerli olması hedeflenmiştir. Ayrıca, su altında aktif olarak faaliyet gösteren bir UMOSA modeli üzerinde simülasyon ortamında deneyler yapılarak, geliştirilecek çevrim içi algoritmanın maliyet etkin bir şekilde geliştirilmesi ve test edilmesi amaçlanmıştır.

Monterey Körfezi tarafından oluşturulan Tethys UMOSA simülasyon modeli üzerinde yapılan deneyler, Pekiştirmeli Öğrenme tabanlı bir kontrol yaklaşımının potansiyel avantajlarını değerlendirmektedir. Bu çalışmanın amacı, OSA'nın yörüngesini belirlemek için Derin Q-Ağları algoritmasını kullanarak, Pekiştirmeli Öğrenme tabanlı bir kontrol yaklaşımının etkinliğini göstermektir.

Yapay zeka ve özellikle de Pekiştirmeli Öğrenme algoritmaları, OSA'ların kontrolünde yeni bir yaklaşım sunmaktadır. Pekiştirmeli Öğrenme, denizaltı araçlarının çeşitli denizaltı görevleri için otomatik kontrolünü sağlamak için güçlü bir potansiyele sahiptir. Bu bağlamda, bu çalışmada, geleneksel denetleyicilerin yerine gerçek zamanlı olarak Pekiştirmeli Öğrenme algoritmalarının kullanılmasıyla OSA'ların kontrolüne dair yapay zeka temelli bir yaklaşım sunulmaktadır.

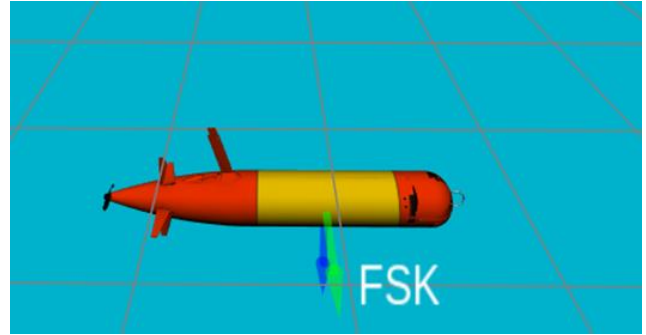
2. MATERYAL VE METOD (MATERIALS AND METHODS)

2.1. Materyal (Material)

Çalışmada, su altı ortamının simüle edilmesi için Gazebo kullanılmıştır. Su altı aracının kontrolü ve veri akışı ise ROS aracılığıyla sağlanmıştır. Tethys UMOSA modeline ait dört adet sensör (manyetometre sensörü, IMU sensörü, navigasyon uydusu sensörü ve batarya sensörü) ile dört adet aktüatör (itici, yatay kanatlar, dikey kanatlar ve kaldırma kuvveti motoru) kullanılmıştır.

2.1.1. Gazebo (Gazebo)

Çalışmada, su altı ortamının simüle edilmesi için Gazebo kullanılmıştır. Su altı aracının kontrolü ve veri akışı ise ROS aracılığıyla sağlanmıştır. Tethys UMOSA modeline ait dört adet sensör (manyetometre sensörü, IMU sensörü, navigasyon uydusu sensörü ve batarya sensörü) ile dört adet aktüatör (itici, yatay kanatlar, dikey kanatlar ve kaldırma kuvveti motoru) kullanılmıştır.



Şekil 1. Gazebo simülasyon ortamında tethys modeli [3] (The tethys model in gazebo simulation environment)

2.1.2. Robot işletim sistemi (ROS) (Robot operating system (ROS))

Çalışmanın uygulanmasında kullanılan su altı aracı kontrol algoritmasının geliştirmek için açık kaynaklı ROS2 Humble sürümü kullanılmıştır. ROS, çeşitli robotik uygulamaları kolayca entegre etmek için geliştirilmiş bir dizi araç ve kütüphaneden oluşmaktadır. ROS barındırdığı iletişim modeli ile düğümler (nodes) ve konular (topics) aracılığı ile dağıtık sistemlerde veri paylaşımını sağlamaktadır.

2.1.3. Sensörler (Sensors)

Manyetometre Sensörü: Manyetik alanı ölçmek için kullanılan bir sensördür. Tethys UMOSA modelinde manyetometre, çevresel manyetik alanı ölçmek ve konum belirleme için kullanılır.

IMU (Inertial Measurement Unit) Sensörü: Hız, ivme ve açısal hız gibi hareket bilgilerini ölçmek için kullanılan bir sensördür. Tethys UMOSA modelinde IMU, denge ve yönlendirme için kullanılır.

Navigasyon Uydu Sensörü: Uydu sinyallerini alarak konum belirleme ve navigasyon için kullanılan bir sensördür. Tethys UMOSA modelinde navigasyon uydu sensörü, hassas konum belirleme ve rota takibi için kullanılır.

Batarya Sensörü: Batarya gerilimi, akımı ve sıcaklığını ölçmek için kullanılan bir sensördür. Tethys UMOSA modelinde batarya sensörü, enerji tüketimini izlemek ve pil güvenilirliğini sağlamak için kullanılır.

2.1.4. Aktüatörler (Actuators)

İtici: Su altında hareket etmek için kullanılan bir aktüatördür. Tethys UMOSA modelinde itici, ilerleme ve manevra yeteneklerini sağlamak için kullanılır.

Yatay Kanatlar: Yüzeyde dengeyi sağlamak ve yönlendirmek için kullanılan aktüatörlerdir. Tethys UMOSA modelinde yatay kanatlar, dengeyi sağlamak ve dalış/açılma işlemlerini kontrol etmek için kullanılır.

Dikey Kanatlar: Dikey hareketi sağlamak ve dalış/açılma işlemlerini kontrol etmek için kullanılan aktüatörlerdir. Tethys UMOSA modelinde dikey kanatlar, derinlik kontrolü ve manevra yeteneklerini artırmak için kullanılır.

Kaldırma Kuvveti Motoru: Sualtı yüzeyinde kalma ve yüzmeyi sağlamak için kullanılan bir aktüatördür. Tethys UMOSA modelinde kaldırma kuvveti motoru, dalış/açılma işlemlerini kontrol etmek ve su üstünde kalma yeteneğini sağlamak için kullanılır.

2.2. Metod (Method)

Simülasyon ortamındaki su altı aracında yol planlamasının gerçekleştirilmesinde bir Pekiştirmeli Öğrenme algoritması olan Derin Q-Ağları algoritması kullanılmıştır.

Pekiştirmeli Öğrenme, yapay zeka alanında önemli bir konudur ve bir ajanın çevresiyle etkileşime girerek öğrenmesini sağlayan bir öğrenme paradigmasıdır [17]. Pekiştirmeli Öğrenme, geniş

bir uygulama yelpazesine sahiptir ve otomatik kontrol, oyunlar ve robotik gibi alanlarda kullanılmaktadır.

Pekiştirmeli Öğrenme, bir ajanın bir çevre içinde bir dizi durumda hareket ederek toplam ödülü maksimize etmeye çalıştığı bir çerçeve sağlar. Pekiştirmeli Öğrenme, Markov Karar Süreci (Markov Decision Process - MDP) modeliyle temsil edilir, burada ajanın hareketlerine dayanarak bir durumdan diğerine geçme olasılıkları ve bu geçişlerin sonuçları belirlenir.

Bellman denklemi, Pekiştirmeli Öğrenme alanında merkezi bir kavramdır ve bir durumun değerini diğer durumların değerleri ile ilişkilendirir. Bellman denklemi, ajanın kararlarını optimize etmek için kullanılan değer fonksiyonunu iteratif bir şekilde günceller.

Bellman denklemi genellikle Eşitlik (1)'deki şekilde ifade edilir:

$$V(s) = \max_a \sum_{s'} P(s'|s, a) (R(s, a, s') + \gamma V(s')) \quad (1)$$

Bu denklemde, $V(s)$ bir durumun değerini, s geçerli durumu, a bir eylemi, s' sonraki durumu, $P(s'|s, a)$ durum geçiş olasılığını, $R(s, a, s')$ ise durumdan duruma bir ödül fonksiyonunu, ve γ ise indirim faktörünü (discount factor) temsil eder.

Derin Q-Ağları, Q-öğrenme algoritmasını derin öğrenme teknikleriyle birleştirerek karmaşık durum-uzaylarında etkili bir şekilde çalışabilen bir Pekiştirmeli Öğrenme algoritmasıdır. Derin Q-Ağları, deneyim tekrarlarını kullanarak bir ağı parametrelerini günceller ve hedef Q değerlerini tahmin etmek için yapay sinir ağlarını kullanır [18].

Pekiştirmeli Öğrenme alanında, Q-öğrenme algoritması belirgin bir şekilde önem taşır; özellikle bir ajanın karar alma sürecindeki eylem-durum değerlerini güncellemek için zaman farkı (TD) hatasını kullanır. Bu yöntem, eylem-değer fonksiyonu $Q(s, a)$ üzerinde iteratif olarak iyileştirmeler yapar ve bunu Eşitlik (2) ile gerçekleştirir. Burada, α öğrenme oranını, r ise anlık ödülü simgeler. Eşitlik (3), zaman farkı hatasını özlü bir şekilde ifade eder, anlık ödül ile tahmin edilen gelecek ödül arasındaki farkı vurgular. Bu denklemler, ajanın ortamındaki optimal karar alma stratejisini belirlemek için temel oluşturur.

$$Q(s, a) \leftarrow Q(s, a) + \alpha [r + \gamma \max_{a'} Q(s', a') - Q(s, a)] \quad (2) \quad [18]$$

$$TD = r + \gamma \max Q(s', a') - Q(s, a) \quad (3) \quad [19]$$

3. DERİN Q-AĞLARI ALGORİTMASI İLE SU ALTI ARACININ YÖNLENDİRİLMESİ (NAVIGATION OF AN UNDERWATER VEHICLE USING DEEP Q-NETWORK ALGORITHM)

Oluşturulan algoritma yapısında, her bir zaman birimi içerisinde alınan aksiyonlarla birlikte, bir önceki pozisyona göre hedefe yaklaşma durumuna göre algoritmanın beslenmesi sağlanmıştır. Bu beslenme süreci, Derin Q-Ağları algoritmasıyla bir sonraki aksiyonun aracın sensörlerinden gelen verilere göre seçilmesini sağlamıştır.

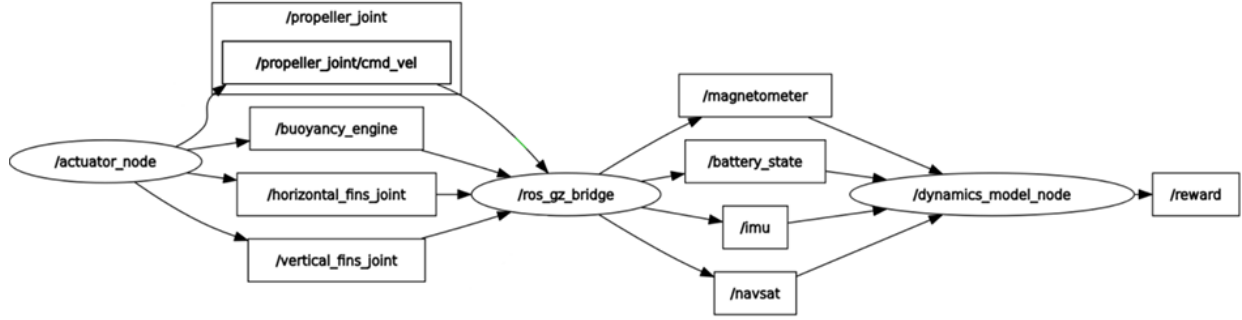
Algoritma: ROS-Gazebo Derin Q-Ağları Tabanlı Kontrol'de ifade edildiği gibi, algoritma simülasyon başlatma, veri akışı ve kontrol adımlarını içermektedir. Başlangıçta, Tethys UMOSA modeliyle birlikte Gazebo simülasyonu başlatılır ve ROS-Gazebo köprüsüyle veri alışverişi sağlanır. Ardından, rastgele bir hedef nokta seçilir ve pekiştirmeli öğrenme algoritması başlatılır. Bu aşamada, durum ve eylem boyutları belirlenir, hiperparametreler ayarlanır ve ortamdan gelen veriler gözlemlenir. Derin Q-Ağları algoritması, bu verileri kullanarak durumlar arasındaki ilişkileri günceller ve optimal kontrol stratejisini belirler. Son olarak, belirlenen sonlanma koşulları kontrol edilir ve gerekirse simülasyon yeniden başlatılır.

Algoritma: ROS-Gazebo Derin Q-Ağları Tabanlı Kontrol

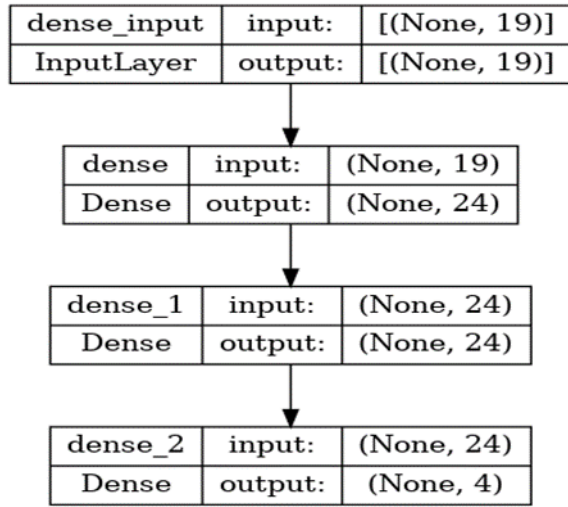
- 1 Gazebo simülasyonunu Tethys UMOSA modeli ile başlat
- 2 ROS-Gazebo köprüsü ile Gazebo ve ROS arasındaki veri akışını başlat
- 3 Simülasyon içerisinde rastgele bir noktayı hedef olarak belirle.
- 4 Pekiştirmeli Öğrenme algoritmasını başlat
- 5 | Durum (state) ve eylem (action) boyutları belirlenir
- 6 | Hiperparametereler (öğrenme oranı, indirim faktörü) ayarlanır
- 7 Bölüm sonlanana kadar ve sonlanma koşulları karşılaşılanaya kadar:
- 8 | Ortamdan mevcut durumu gözlemler
- 9 | | Sensör verilerini vektörel olarak kaydet ve sonraki durumu oluştur
- 10 | Hedef noktaya olan mesafedeki değişime bağlı olarak ortamdan ödül al
- 11 | Derin Q-Ağları algoritmasını (durum, eylem, ödül, sonraki durum) demeti ile güncelle.
- 12 | Sonlanma koşullarını kontrol et:
- 13 | **Eğer** sonlanma koşulları sağlandıysa veya bölüm uzunluğu aşıldıysa:
- 14 | | Yeniden Başla

Tethys UMOSA üzerindeki sensörler ve aktüatörlerin Robot İşletim Sistemi'ne yansıtılması için Gazebo Simülasyon sistemi ve ROS_Gazebo_Köprüsü kullanılarak bir deney düzeneği oluşturulmuştur. Bu şekilde Robot İşletim

Sistemi ile oluşturulan algoritma tarafından belirlenen aksiyonların simülasyon sistemine, sensör verilerinin ise simülasyon sisteminden Robot İşletim Sistemi'ne doğru aktığı Şekil-2'deki yapı elde edilmiştir.



Şekil 2. ROS-Gazebo köprüsü ile elde edilen iletişim grafiği (Communication graph obtained with ROS-Gazebo bridge)



Şekil 3. Yapay sinir ağları mimarisi (Artificial neural network architecture)

Durum uzayı ile beslenen bu model yapısında çıktı olarak 4 boyutlu bir aksiyon uzayı elde edilmiş ve bu aksiyon uzayında her bir aktüatör için elde edilen değer Robot İşletim Sistemi üzerinden Gazebo simülasyon sistemine iletilerek batch eğitiminde geri dönüşüm (feedback) kontrolü sağlanmıştır.

Derin Q-Ağları algoritması için kullanılan hiperparametreler ise aşağıdaki gibidir:

- durum boyutu (state size): 19
- eylem boyutu (action size): 4
- öğrenme oranı (learning rate): 0,1
- indirim faktörü: 0,99
- keşif oranı (exploration rate): 1,0
- keşif azalma oranı (exploration decay rate): 0,99

4. BULGULAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND CONCLUSION)

Elde edilen sonuçlar, bu belirlenen hiperparametrelerin algoritmanın performansı üzerinde belirgin bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Özellikle, düşük öğrenme oranlarının daha istikrarlı ancak yavaş bir öğrenme sürecine yol açtığı, yüksek indirim faktörlerinin uzun vadeli ödülleri daha fazla vurguladığı ve belirlenen keşif oranı ve keşif azalma oranının dengeli bir performans sağladığı gözlenmiştir.

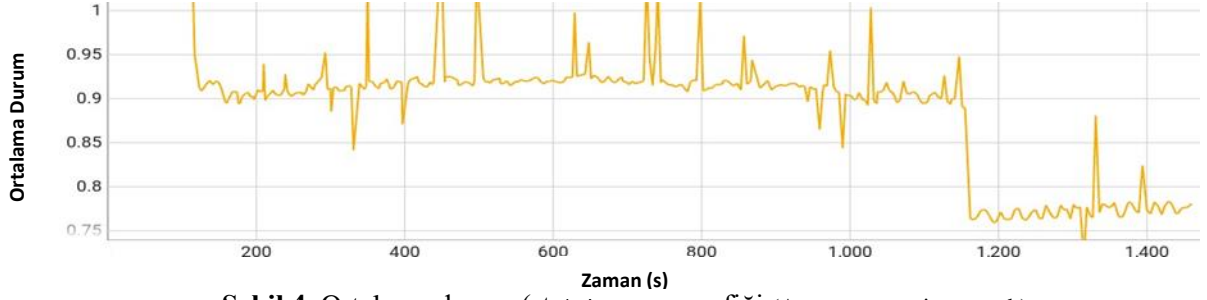
Öncelikle, öğrenme oranı parametresinin, algoritmanın konverjans hızı ve istikrarı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu gözlenmiştir. Düşük öğrenme oranları daha istikrarlı ancak yavaş bir öğrenme sürecine yol açarken, yüksek öğrenme oranları daha hızlı ancak daha değişken bir öğrenme sürecine neden olmuştur.

Ayrıca, indirim faktörü parametresinin, algoritmanın uzun vadeli ödülleri dikkate alma yeteneği üzerinde kritik bir rol oynadığı gözlenmiştir. Yüksek indirim faktörleri uzun vadeli ödülleri daha fazla vurgularken, düşük indirim faktörleri daha fazla anlık ödüllere odaklanmaya neden olmuştur.

Keşif ve kıyaslama dengesini sağlamak için belirlenen keşif oranı ve keşif azalma oranı parametrelerinin, algoritmanın başlangıçta keşif yapmasını ve daha sonra kıyaslama yapmasını sağlayarak dengeli bir performans sağladığı gözlenmiştir.

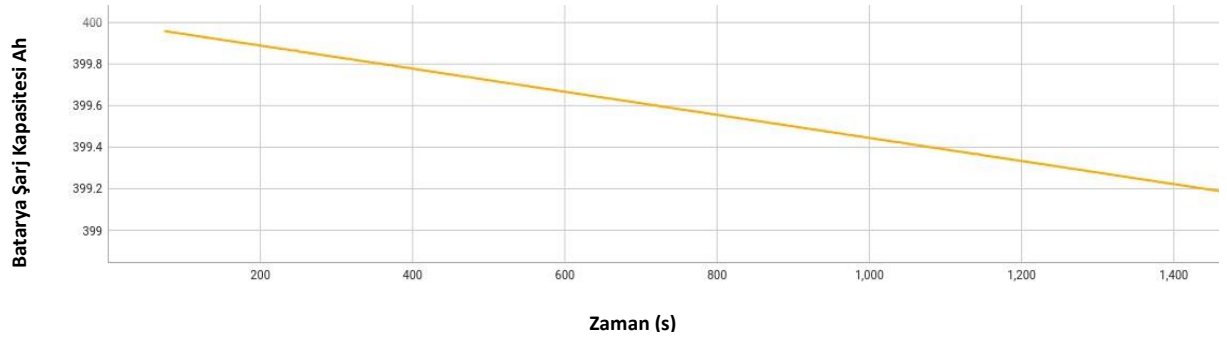
Durum uzayında alınabilecek değerler sensörlerin en küçük ve en büyük değerleri arasındadır. Durum uzayı 0-1 aralığında normalize edildiğinde durum demetindeki değerlerin ortalamasının zamana bağlı değişimi Şekil-4'te verilmiştir. Epsilon-greedy

yaklaşımı ile simülasyon başlangıcında iken simülasyon hedefe yaklaşılması ile gözlemlenen ortalama durum 0,9 ve 1,0 aralığında gözlemlenen ortalama durum 0,75 bandındadır.

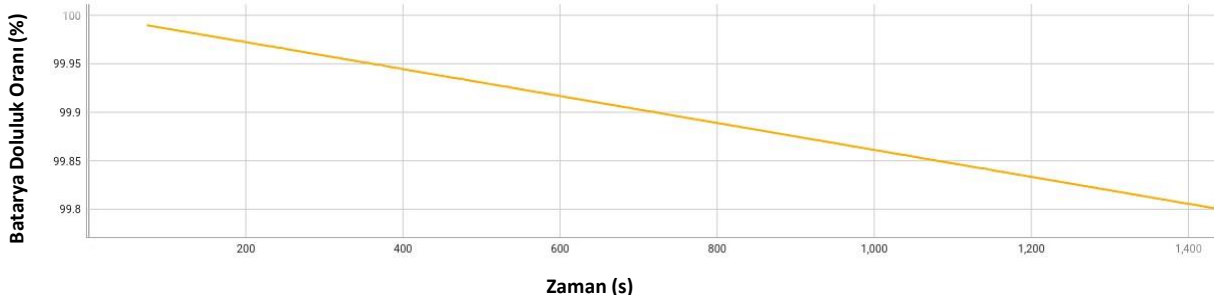


Şekil 4. Ortalama durum (state) zaman grafiği (Average state time graph)

Şekil-5 ve Şekil-6'da gösterilen batarya doluluk gözlenmiştir. Başlangıçtaki batarya şarj kapasitesi oranında zamana bağlı olarak linear bir düşüş 400 Ah'tır.



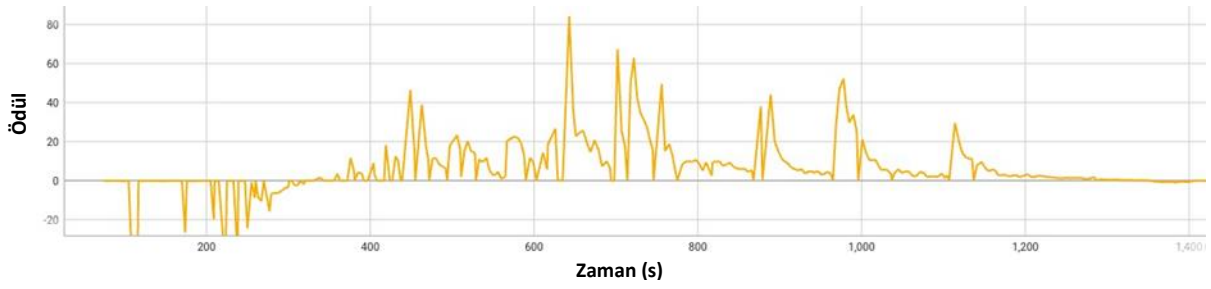
Şekil 5. Batarya şarj kapasitesi zaman grafiği (Battery charge capacity over time graph)



Şekil 6. Batarya doluluk yüzdesi grafiği (Battery capacity percentage graph)

Epsilon-greedy yaklaşımı ile başlangıçta çevreyi keşfetmesi amacı ile rastgele eylemleri seçen su altı aracında alınan ödüllerin başlangıçta negatif olduğu ancak keşfetme oranının düşmesi ve Derin Q-Ağlarında önceki aksiyon-durum değerleri baz

alınarak aksiyon alındığında alınan ödüllerin arttığı Şekil-7'de görülmektedir. Hedefe olan uzaklığa orantılı olarak negatif ödül verildiğinde verilen ödüllerin (-20,50) aralığında olduğu gözlenmiştir.



Şekil 7. Ödül, zaman grafiği (Reward, time graph)

Şekil-8’de görülebileceği gibi başlangıçta 700 metre olan hedefe olan uzaklık, ilk 200 saniye

içinde 1100 metreye kadar artmış, sonrasında ise hedefe 100 metreye kadar yaklaşmıştır.



Şekil 8. Hedefe uzaklık zaman grafiği (Distance to target over time graph)

Elde edilen sonuçlar, Derin Q-Ağları tabanlı yol planlama yönteminin su altı araçlarında başarılı bir şekilde uygulanabileceğini göstermektedir. Derin Q-Ağları, çeşitli su altı ortamlarında görevlerin başarılı bir şekilde tamamlanması için etkili rotalar belirleme yeteneğine sahiptir.

Ayrıca, bu çalışma, Derin Q-Ağları algoritmasının su altı yol planlama problemlerindeki performansını etkileyen anahtar hiperparametrelerin belirlenmesine odaklanmıştır. Özellikle, öğrenme oranı, indirim faktörü ve keşif oranı gibi hiperparametrelerin, Derin Q-Ağları algoritmasının başarımı ve konverjansı üzerinde belirgin bir etkisi olduğu gözlenmiştir. Bu hiperparametrelerin dikkatlice ayarlanması, Derin Q-Ağları tabanlı su altı yol planlama algoritmalarının en iyi performansı sergilemesini sağlamak için kritik öneme sahiptir.

Yapılan deneyler sonucunda, hiperparametrelerin yanı sıra tercih edilen öğrenme mekanizması ve ödül verme algoritmasının yol planlaması üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu gözlenmiştir. Epsilon-greedy öğrenme stratejisinin kullanılmasıyla, Şekil-7’de görüldüğü gibi simülasyon başlangıcında hedefe olan uzaklık artmıştır. Ancak, çevrenin keşfedilmesi ve toplanan ödül verilerinin kullanılmasıyla birlikte hedefe olan uzaklıkta bir düşüş gözlenmiştir.

Ayrıca, ödül mekanizmasının geliştirilmesinde robotun hareketsizlik durumunun da göz önünde

bulundurulmasının önemli olduğu görülmüştür. Uzaklığa bağlı olarak ödül verilmesi durumunda, robotun negatif ödülü tercih etmemesi ve sıfır aksiyon almasına bağlı olarak durması, eğitim süresinin uzamasına neden olabilir. Bu nedenle, hareketsizlik durumu da dikkate alınarak ödül mekanizması geliştirilmelidir.

Bu sonuçlar, belirtilen hiperparametrelerin dikkatlice seçilmesinin, Derin Q-Ağları algoritmasının başarıyla uygulanmasında kritik öneme sahip olduğunu vurgulamaktadır.

5. SONUÇ (RESULT)

Sonuç olarak, bu çalışma, UMOSA’ların yol planlaması için Derin Q-Ağları algoritmasının etkinliğini ROS2 çevresinde Gazebo simülasyon ortamında değerlendirmiştir. Yapılan deneyler, Derin Q-Ağları tabanlı kontrol yaklaşımının, geleneksel denetleyicilere kıyasla potansiyel avantajlar sunduğunu göstermektedir. Özellikle, öğrenme oranı, indirim faktörü ve keşif oranı gibi hiperparametrelerin, algoritmanın performansını belirgin bir şekilde etkilediği gözlenmiştir. Ayrıca, ödül mekanizmasının ve öğrenme stratejisinin yol planlaması üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu tespit edilmiştir. Bu bulgular, Derin Q-Ağları ağlarının su altı araçlarının gelecekteki görevlerinde önemli bir rol oynayabileceğini ve daha etkili, verimli ve güvenilir bir şekilde hareket etmelerine katkıda bulunabileceğini öne sürmektedir. Ancak, farklı mimarilerin karşılaştırılması ve

hiperparametrelerin etkisi gibi konular daha detaylı araştırmaya ihtiyaç duyabilir. Ayrıca, su altı ortamındaki belirsizliklerin daha iyi modellenmesi için Derin Q-Ağları algoritmalarının iyileştirilmesi gerekmektedir. Bu yönde yapılabilecek çalışmalar, su altı görevlerinin daha güvenilir ve etkili bir şekilde gerçekleştirilmesine katkı sağlayabilir.

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)

Emre GÖZÜTOK: Deneyleri yapmış, sonuçlarını analiz etmiş ve maklenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

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

Fecir DURAN: Deneyleri yapmış, sonuçlarını analiz etmiş ve maklenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

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

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

There is no conflict of interest in this study.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] [Watson, S.; Duecker, D.A.; Groves, K. Localisation of Unmanned Underwater Vehicles (UUVs) in Complex and Confined Environments: A Review. Sensors 2020
- [2] Phillips, A.B., vd. (2023). "Autosub Long Range 1500: A continuous 2000 km field trial." Ocean Engineering, 280, 114626.
- [3] Godin, M.A., vd. (2011). "Real-time sensing of upwelling from a moving autonomous platform." Limnology and Oceanography: Methods, 9(1), 1-13.

- [4] Zhang, Y., vd. (2012). "Using AUVs to study frontal dynamics." Journal of Field Robotics, 29(6), 1035-1048.
- [5] Kukulya, A., vd. (2016). "AUVs in the Arctic: A platform for interdisciplinary science." OCEANS 2016 MTS/IEEE Monterey.
- [6] Qu, Xingru, et al. "A Deep Reinforcement Learning-Based Path-Following Control Scheme for an Uncertain Under-Actuated Autonomous Marine Vehicle." Journal of Marine Science and Engineering 11.9 (2023): 1762.
- [7] Ma, Hui, Xiaokai Mu, and Bo He. "Adaptive navigation algorithm with deep learning for autonomous underwater vehicle." Sensors 21.19 (2021): 6406.
- [8] Liu, Tao, Yuli Hu, and Hui Xu. "Deep reinforcement learning for vectored thruster autonomous underwater vehicle control." Complexity 2021 (2021): 1-25.
- [9] Zhang, Jialei, et al. "Approach-angle-based three-dimensional indirect adaptive fuzzy path following of under-actuated AUV with input saturation." Applied Ocean Research 107 (2021): 102486.
- [10] Ma, H.; Mu, X.; He, B. Adaptive Navigation Algorithm with Deep Learning for Autonomous Underwater Vehicle. Sensors 2021, 21, 6406
- [11] Tian, Q.; Wang, T.; Song, Y.; Wang, Y.; Liu, B. Autonomous Underwater Vehicle Path Tracking Based on the Optimal Fuzzy Controller with Multiple Performance Indexes. J. Mar. Sci. Eng. 2023, 11, 463
- [12] Fang, Ming-Chung, et al. "Applying the self-tuning fuzzy control with the image detection technique on the obstacle-avoidance for autonomous underwater vehicles." Ocean Engineering 93 (2015): 11-24.
- [13] B. W. Hobson, J. G. Bellingham, B. Kieft, R. McEwen, M. Godin, and Y. Zhang, "Tethys-class long range AUVs - extending the endurance of propeller-driven cruising AUVs from days to weeks," in 2012 IEEE/OES Autonomous Underwater Vehicles (AUV), 2012, pp. 1-8

- [14] Open Source Robotics Foundation, "Gazebo." [Çevrimiçi]. Erişim: <https://gazebosim.org>
- [15] Player, T. R., Chakravarty, A., Zhang, M. M., Raanan, B. Y., Kieft, B., Zhang, Y., & Hobson, B. (2023, May). From Concept to Field Tests: Accelerated Development of Multi-AUV Missions Using a High-Fidelity Faster-than-Real-Time Simulator. In 2023 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA) (pp. 3102-3108). IEEE.
- [16] Panda JP, Mitra A, Warrior HV. A review on the hydrodynamic characteristics of autonomous underwater vehicles. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment*. 2021;235(1):15-29.
- [17] Tonkal, Ö., & Polat, H. (2021). Traffic Classification and Comparative Analysis with Machine Learning Algorithms in Software Defined Networks. *Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology*, 9(1), 71-83.
- [18] Dayan, Peter, and C. J. C. H. Watkins. "Q-learning." *Machine learning* 8.3 (1992): 279-292.
- [19] Tesauro, Gerald. "Td-gammon: A self-teaching backgammon program." *Applications of neural networks*. Boston, MA: Springer US, 1995. 267-285.

Current-mode Universal Filter using Fin type Field Effect Transistor (FinFET) - Based Multioutput Current Controlled Current Conveyor Transconductance Amplifiers

Hüseyin DEMİREL^{1*} 

¹Ankara Yıldırım Beyazıt University, Business School, Management Information Systems, Ankara, Turkey

Article Info

Research article
Received: 20/05/2024
Revision: 25/05/2024
Accepted: 30/05/2024

Keywords

fin tip Alan Etkili
Transistör (FinFET)
M.O.C.C.C.C.T.A.
akım-modu
filtre

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 20/05/2024
Düzeltilme: 25/05/2024
Kabul: 30/05/2024

Anahtar Kelimeler

fin tip Alan Etkili
Transistör (FinFET)
M.O.C.C.C.C.T.A.
akım-modu
filtre.

Graphical/Tabular Abstract (Grafik Özet)

The 7nm finfet's specifications were used to replicate the finfet transistors used in the suggested design. The corresponding M.O.C.C.C.C.T.A. circuit topologies utilized in the simulations are displayed in Fig. 3. / 7nm FinFET'in özellikleri, önerilen tasarımda kullanılan FinFET transistörlerini kopyalamak için kullanıldı. Simülasyonlarda kullanılan ilgili M.O.C.C.C.C.T.A. devre topolojileri Şekil 3'te gösterilmektedir.

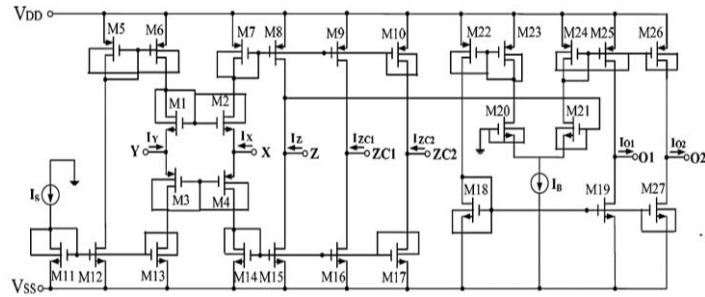


Figure A: A potential use of CCCCTA that was employed FinFET transistor. / **Şekil A:** FinFET transistörünün kullanıldığı CCCCTA'nın potansiyel bir kullanımı.

Highlights (Önemli noktalar)

- For single digit nanometric dimensions, the fin type Field Effect Transistor (FinFET) transistor is a promising technology / Tek haneli nanometrik boyutlar için, FinFET transistörleri çok umut verici bir teknolojidir.
- FinFETs are utilized to reduce power consumption and boost performance since the two gate voltages may be regulated independently or dependently / FinFET'ler, iki kapı gerilimi bağımsız veya bağımlı olarak kontrol edilebildiği için güç tüketimini azaltmak ve performansı artırmak amacıyla kullanılır.
- The FinFET 7 nm PTM-MG model is used in LT-spice to simulate the suggested active filter circuit. / Önerilen aktif filtre devresini simüle etmek için LTspice'ta FinFET 7 nm PTM-MG modeli kullanılmıştır.

Aim (Amaç): The purpose of this study is to investigate the design of multioutput current-controlled current conveyor transconductance amplifiers (M.O.C.C.C.C.T.A.s) to perform all standard operations such as low-pass (LP), high-pass (HP), band-stop (BS), band-pass (BP), and all-pass (AP) filtering. / Bu çalışmanın amacı, tüm standart işlemleri (düşük geçiren, yüksek geçiren, bant durduran, bant geçiren ve tüm geçiren) gerçekleştirmek için çok çıkışlı akım kontrollü akım konveyör transkonduktans amplifikatörlerinin (M.O.C.C.C.C.T.A.) tasarımını araştırmaktır.

Originality (Özgünlük): In the study where the FinFET 7 nm PTM-MG model was used in LTspice to simulate the active filter circuit with new technology, the findings are in good agreement with the theoretical predictions. / Yeni bir teknolojiye sahip olan aktif filtre devresini simüle etmek için LTspice'ta FinFET 7 nm PTM-MG modeli kullanılan çalışmada elde edilen bulgular teorik tahminlerle iyi bir uyum içindedir.

Results (Bulgular): It is understood that the quality factor can be changed without adversely affecting the change in pole frequency corresponding to different bias currents. / Farklı beyz akımlarına karşılık gelen kutup frekansının değişiminde kalite faktörünün olumsuz etkilenmeden değiştirebileceği anlaşılmaktadır.

Conclusion (Sonuç): Due to its favorable characteristics, the proposed circuit stands out as a strong candidate for development into a monolithic chip, suitable for integration into battery-operated, portable electronic devices like components for wireless communication systems. / Olumlu özellikleri nedeniyle, önerilen devre monolitik bir çipe geliştirme için güçlü bir aday olarak öne çıkmaktadır ve kablosuz iletişim sistemleri gibi bataryalı taşınabilir elektronik cihazlara entegrasyon için uygun bir halife olarak değerlendirilebilir.



Current-mode Universal Filter using Fin type Field Effect Transistor (FinFET) - Based Multioutput Current Controlled Current Conveyor Transconductance Amplifiers

Hüseyin DEMİREL^{1*}

¹Ankara Yıldırım Beyazıt University, Business School, Management Information Systems, Ankara, Turkey

Article Info

Research article
Received: 20/05/2024
Revision: 25/05/2024
Accepted: 30/05/2024

Keywords

fin tip Alan Etkili
Transistör (FinFET)
M.O.C.C.C.C.T.A.
akım-modu
filtre.

Abstract

For single digit nanometric dimensions, the fin type Field Effect Transistor (FinFET) transistor is a promising technology. FinFETs are utilized to reduce power consumption and boost performance since the two gate voltages may be regulated independently or dependently. This work investigates the design of multioutput current-controlled current conveyor transconductance amplifiers, or M.O.C.C.C.C.T.A.s. to carry out all standard operations, such as LP, HP, BS, BP, and AP. One of the circuit's features is its capacity to change the pole frequency electrically and independently by applying the proper input bias currents based on the quality factor. There are merely two grounded capacitors and two M.O.C.C.C.C.T.A.s in the simple circuit design. The recommended design is perfect for further development into an integrated circuit because it only contains grounded components and does not require any external resistors. The FinFET 7 nm PTM-MG model is used in LT-spice to simulate the suggested active filter circuit. The obtained findings are in good agreement with the theoretical prediction.

Fin tipi Alan Etkili Transistör (FinFET) Tabanlı Çok Çıkışlı Akım Kontrollü Akım Konveyörü Transiletkenlik Amplifikatörlerini kullanan Akım Modlu Evrensel Filtre

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 20/05/2024
Düzeltilme: 25/05/2024
Kabul: 30/05/2024

Anahtar Kelimeler

fin type Field Effect
Transistor (FinFET)
M.O.C.C.C.C.T.A.
current-mode
filter.

Öz

Tek haneli nanometrik boyutlar için, FinFET transistörleri çok umut verici bir teknolojidir. FinFET'ler, iki kapı gerilimi bağımsız veya bağımlı olarak kontrol edilebildiği için güç tüketimini azaltmak ve performansını artırmak amacıyla kullanılır. Bu çalışma, tüm standart işlemleri (düşük geçiren, yüksek geçiren, bant durdurucu, bant geçiren ve tüm geçiren) gerçekleştirmek için çok çıkışlı akım kontrollü akım konveyör transkonduktans amplifikatörlerinin (M.O.C.C.C.C.T.A.) tasarımını araştırmaktadır. Devrenin temel özelliklerinden biri, kutup frekansını elektriksel olarak ve kalite faktörüne göre bağımsız olarak uygun giriş akımlarını uygulayarak değiştirebilme kapasitesidir. Basit devre tasarımı yalnızca iki topraklanmış kapasitör ve iki M.O.C.C.C.C.T.A. içermektedir. Önerilen tasarım, sadece topraklanmış bileşenler içerdiğinden ve harici direnç gerektirmediğinden, entegre devre olarak daha fazla geliştirme için idealdir. Önerilen aktif filtre devresini simüle etmek için LTSpice'ta FinFET 7 nm PTM-MG modeli kullanılmıştır. Elde edilen bulgular teorik tahminlerle iyi bir uyum içindedir.

1. INTRODUCTION (GİRİŞ)

Analogue filters are now crucial building elements that are frequently used in real-time signal processing. They are used in a variety of industries, including control systems, electronics measurement, and communication. Among the most often used analogue filters is the universal biquadratic filter, which performs many tasks at once without changing the circuit design. These

days, voltage-mode universal filters are becoming less common than current-mode ones. Over the past 20 years, a lot of work has gone towards, lowering the supply voltage. This is because there is a need for equipment that is battery-operated and portable. When low-voltage operational circuits are required, the current-mode approach serves as a suitable substitute [1-6]. A circuit that employs the current-mode approach can provide more benefits, such as reduced power consumption, increased linearity,

better bandwidth, bigger dynamic range, and simpler circuitry. A reported active element with five terminals, the current conveyor transconductance amplifier, was presented in 2005. It appears to be a flexible part that may be used to realize a variety of circuits for processing analogue signals, particularly systems that are current-mode or voltage-mode. Furthermore, it is possible to control the output current gain. Nevertheless, it's crucial to emphasize that the current-controlled transconductance amplifier (CCTA) remains unaffected by parasitic resistances at the current input port [7-15]. The updated version of the C.C.T.A was recently introduced by Jaikla and Siripruchyanun. It could be controlled by an input bias current (IB). It has two current input ports with adjustable parasitic resistances. The new name for it is the C.C.C.C.T.A. A C.C.C.C.T.A. appears to be a valuable foundational active block as it can serve as a basis for the development of various circuits and systems. According to literature assessments, many suggested current-mode universal filters need many active and passive components, necessitating changes to the circuit architecture to accomplish several goals. A lot of floating capacitors are used in some of them, which is inappropriate for use as a monolithic device. Additionally, many circuits that are provided only offer BP, HP, and LP transfer functions. This paper's goal is to suggest a current-mode (C.M) universal biquadratic active filter with a focus on using Finfet transistors that are based on M.O.C.C.C.C.T.A.s. The following are the characteristics of the suggested circuit: supplying all common transfer functions, including BP, BR, LP, and HP. Because the circuit architecture is so straightforward and only uses grounded capacitors

as passive parts, it may be manufactured as a monolithic chip. Electronic modification of the pole frequency and quality factor is achievable. The LT-SPICE 7nm transistor simulations demonstrate the characteristics of the suggested circuits and demonstrate a strong conformance with the theoretical presumptions [15-27].

2. MATERIALS AND METHODS (MATERİYAL VE METOD)

2.1. Active Filter (M.O.C.C.C.C.T.A.) (Aktif Filtre)

A M.O.C.C.C.T.A. with multiple outputs (M.O.C.C.T.A.) is an analog active component featuring six terminals. The symbols for the input and output terminal names are x, y, z1, z2, o, and o2. The y terminal is the voltage input port with the highest impedance. The current input port, usually known as the x terminal, has a controlled parasitic resistance (Rx). The parasitic resistance is tuned electronically (Rx). These terminals are the high-impedance equivalents of the current output port, designated as z1, z2, o1, and o2. It is optimal for the current to be equal at the z and x terminals. The M.O.C.C.C.C.T.A.'s equivalent circuit and symbol are illustrated in Fig. 1. The matrix below can be used to describe the qualities of the idea M.O.C.C.C.C.T.A [28].

$$\begin{bmatrix} I_y \\ V_x \\ I_{z1}, I_{z2}, I_{zc} \\ I_{o1} \\ I_{o2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ R_x & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \pm g_{m1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \pm g_{m2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_x \\ V_y \\ V_{z1} \\ V_{o1} \\ V_{o2} \end{bmatrix} \tag{1}$$

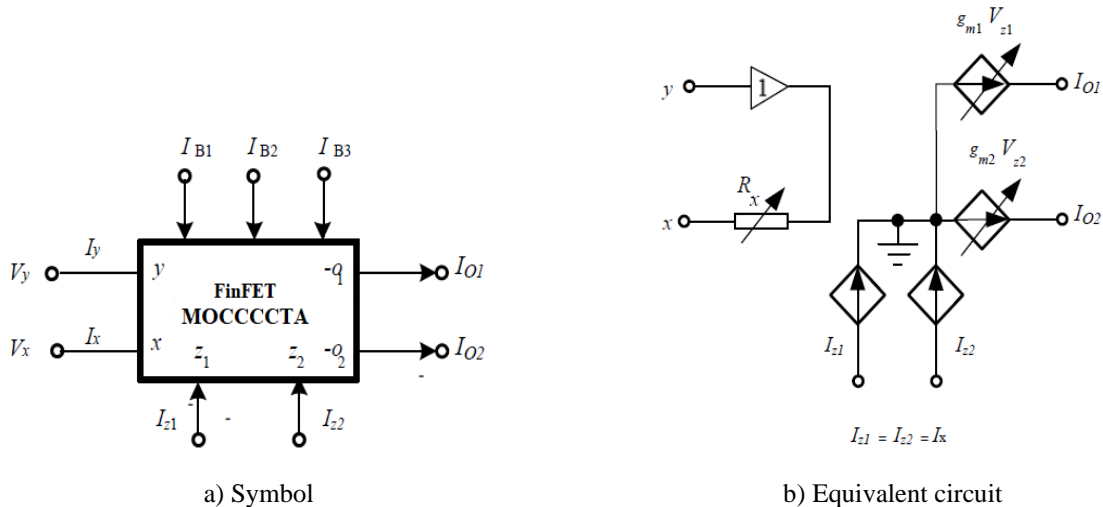


Figure 1. FinFET M.O.C.C.C.C.T.A.'s corresponding circuit and symbol (FinFET M.O.C.C.C.C.T.A. karşılık gelen devre ve sembol)

Where:

$$\begin{aligned}
 V_x &= I_x R_x + V_y, I_{z1} = I_x = I_{z2} = I_{zc} \\
 I_{o1} &= g_{m1} \cdot V_{z1}, I_{o2} = g_{m2} \cdot V_{z2} \\
 R_x &= \frac{V_T}{2I_{B1}}, g_{m1} = \frac{I_{B2}}{2V_T}, g_{m2} = \frac{I_{B3}}{2V_T}
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

The thermal voltage of 26 mV is called V_T [29]. I_{B2} and I_{B3} govern the transconductance gain of the gm in a line, while I_{B1} controls the parameter R_x , according to Eq. (2).

A universal filter with current mode proposed.
(Akım moduyla önerilen evrensel bir filtre)

Fig. 2 depicts the suggested current-mode universal active filter., where I_{B1} , I_{B2} , and I_{B3} represent the bias currents of M.O.C.C.C.T.A.1 and M.O.C.C.C.T.A.2, respectively [5]. A simple study of the circuit in Fig. 2 using the characteristics of M.O.C.C.C.T.A. in Sections 2.1 results in the transfer functions listed below.

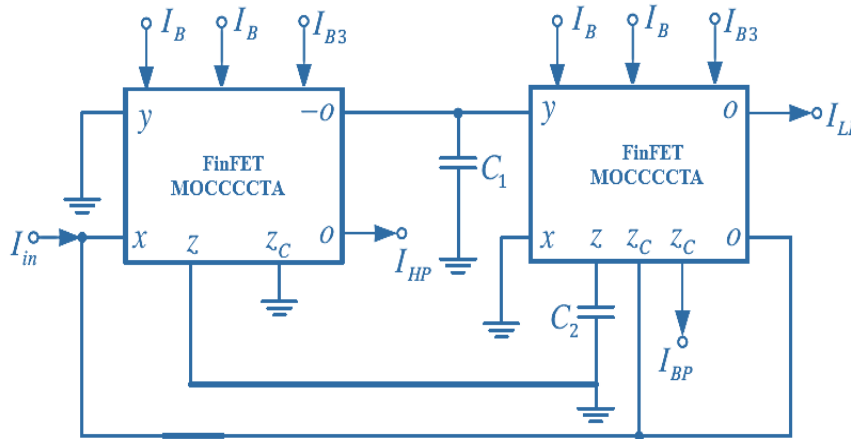


Figure 2. A universal filter with current mode proposed (Akım moduyla önerilen evrensel bir devre)

$$\frac{I_{HP}}{I_{in}} = \frac{Ks^2}{s^2 + s \frac{K}{R_{x2}C_1} + \frac{Kg_{m2}}{R_{x2}C_1C_2}}
 \tag{3}$$

$$\frac{I_{BS}}{I_{in}} = \frac{K(\frac{g_{m2}}{R_{x2}C_1C_2} + s^2)}{s^2 + s \frac{K}{R_{x2}C_1} + \frac{Kg_{m2}}{R_{x2}C_1C_2}}
 \tag{6}$$

$$\frac{I_{BP}}{I_{in}} = \frac{\frac{K}{R_{x2}C_1}s}{s^2 + s \frac{K}{R_{x2}C_1} + \frac{Kg_{m2}}{R_{x2}C_1C_2}}
 \tag{4}$$

$$\frac{I_{AP}}{I_{in}} = \frac{K(\frac{g_{m2}}{R_{x2}C_1C_2} - \frac{1}{R_{x2}C}s + s^2)}{s^2 + s \frac{K}{R_{x2}C_1} + \frac{Kg_{m2}}{R_{x2}C_1C_2}}
 \tag{7}$$

$$\frac{I_{LP}}{I_{in}} = \frac{\frac{Kg_{m2}}{R_{x2}C_1C_2}s}{s^2 + s \frac{K}{R_{x2}C_1} + \frac{Kg_{m2}}{R_{x2}C_1C_2}}
 \tag{5}$$

The quality of factor (Q_0) and pole of frequency (ω_0), respectively, are given by the formulae.

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{Kg_{m2}}{R_{x2}C_1C_2}}
 \tag{8}$$

$$Q_0 = \sqrt{\frac{C_1R_{x2}g_{m2}}{KC_2}}
 \tag{9}$$

where $K=0.5g_{m1}R_{x1}$. Moreover, by combining the currents $I_{BS} = I_{LP} + I_{HP}$ and $I_{AP} = I_{BP} - I_{BR}$, the BS and AP functions may be obtained, respectively,

where,

If $R_{xi} = V_T / (2I_{Bi})$ and $g_{mi} = I_{Bi} / (2V_T)$ from Equ. 8 and 9 can obtain.

$$\omega_0 = \frac{1}{V_T} \sqrt{\frac{I_{B2} I_{B3}}{8C_1 C_2}} \tag{10}$$

$$Q_0 = I_{BQ} \sqrt{\frac{4C_1}{C_2 I_{B2} I_{B3}}} \tag{11}$$

2.3. Sensitivities of the Finfet active filter (Finfet aktif filtrenin hassasiyetleri)

The suggested circuit's sensitivities may be determined using Eqs. (10)– (11).

$$S_{I_{B2}, I_{B3}}^{w_0} = 0.5; \quad S_{C_1, C_2, I_{B1}}^{w_0} = -0.5; \quad S_{V_T}^{w_0} = -1 \tag{12}$$

$$S_{I_{B2}, I_{B3}}^{Q_0} = 0.5, \quad S_{I_{B2}, I_{B3}, C_2}^{Q_0} = -0.5 \tag{13}$$

$$S_{I_{B2}, I_{B3}}^{BW} = 1, \quad S_{V_T, C_1, I_{B1}}^{BW} = -0.5 \tag{14}$$

As a result, the circuit exhibits commendable sensitivity, where all passive and active

sensitivities are equal to or smaller than unity. Simulation of the active filter and its outcomes are presented.

An analysis of the suggested circuit's performance was done using an LT-SPICE simulation [30-31]. The 7nm finfet's specifications were used to replicate the finfet transistors used in the suggested design. The corresponding M.O.C.C.C.T.A. circuit topologies utilized in the simulations are displayed in Fig. 3. The circuits were biased with voltages supply (VEE) of $\pm 0.1V$, $C_1=C_2=1pF$, $I_{B1}=170nA$, $I_{B2}=172nA$, and $I_{B3}=175nA$. This resulted in a pole frequency of 406kHz, which is different from the theoretical value of 532kHz (deviated by 5.31%) obtained from Eq. (11). This variation is brought about by the parasitic elements of the active devices that are utilised in the circuit. Figure 4 depicts the simulated gain frequency responses of the universal filter proposed in Figure 3. It vividly illustrates the circuit's capability to deliver concurrent functionality. transfer functionalities without altering the circuit design, such as BP, HP, and LP.

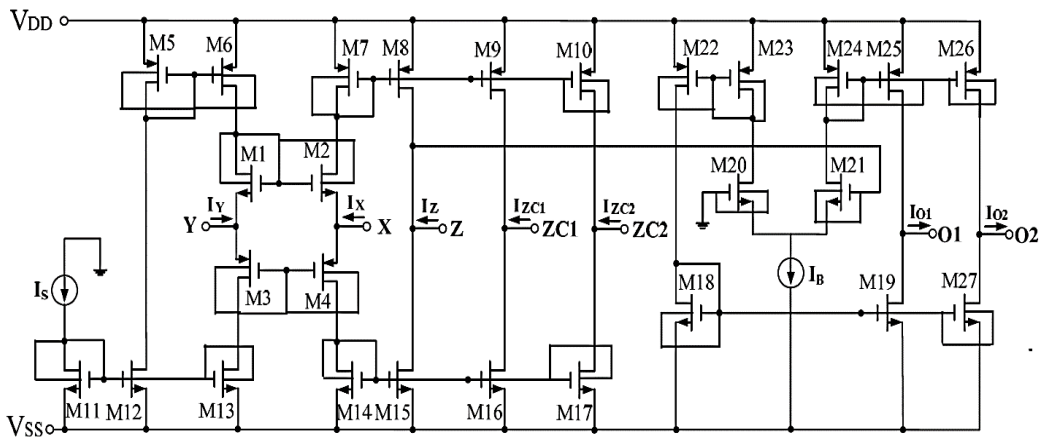


Figure 3. A potential use of CCCCTA that was employed FinFET transistor. (FinFET transistörünün kullanıldığı CCCCTA'nın potansiyel bir kullanımı)

The band-pass function's gain responses are displayed in Fig. 5 when I_B is set to 50 nA, 100 nA, and 400 nA, respectively. As indicated by Eqs. (10)

and (11), This outcome shows that it is possible to alter the pole frequency without sacrificing the quality factor.

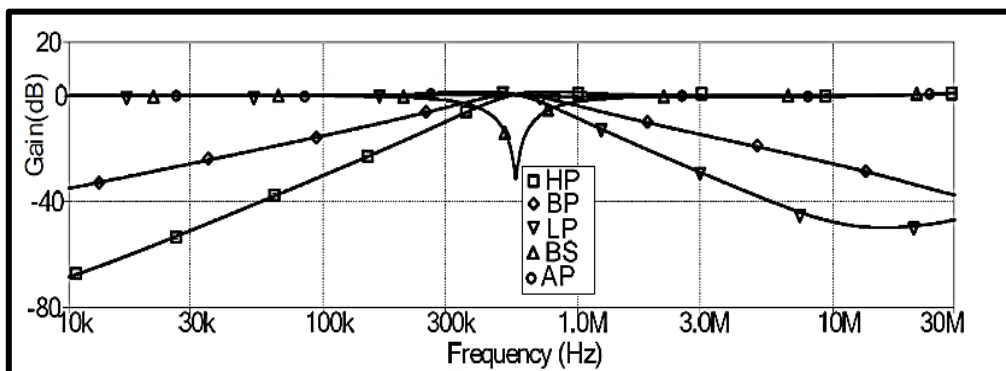
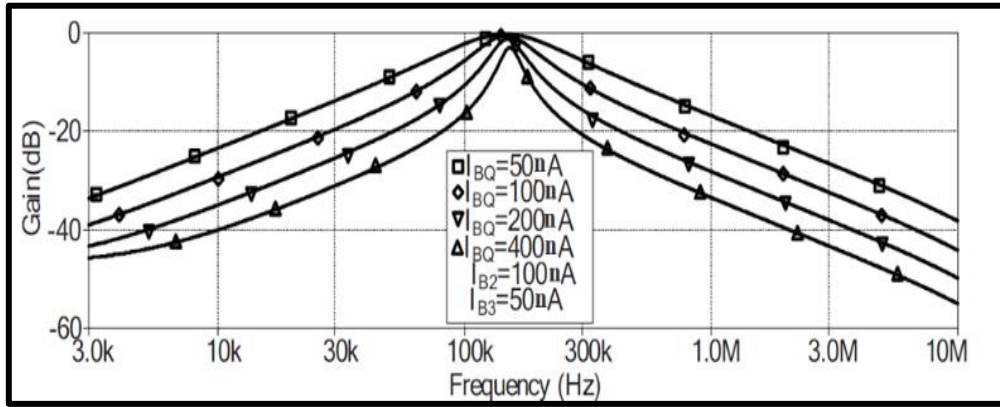


Figure 4. Proposed active circuit responses gain.**Figure 5.** Responses on band passes for varying I_{BQ} levels.

3. CONCLUSIONS (SONUÇLAR)

The Finfet active filter M.O.C.C.C.T.A.s-based current-mode universal biquadratic active filter has been introduced. The following are the planned circuit's benefits: The distinct circuit arrangement can yield the whole set of conventional transfer functions. A microcontroller may be used to readily modify the quality factor, but it is also possible to electronically tune the pole frequency using bias currents. The circuit layout is appealing for IC implementation since it just has two grounded capacitors and two M.O.C.C.C.T.A. Due to its favorable characteristics, the proposed circuit stands out as a strong candidate for development into a monolithic chip, suitable for integration into battery-operated, portable electronic devices like components for wireless communication systems.

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 eder.

AUTHORS' CONTRIBUTIONS (YAZARLARIN KATKILARI)

Hüseyin DEMİREL: He conducted the analyzed the results and performed the writing process.

CONFLICT OF INTEREST (ÇIKAR ÇATIŞMASI)

There is no conflict of interest in this study.

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

REFERENCES (KAYNAKLAR)

- [1] Mohammed AA, Mahmood, Z.K. and Demirel, H., New Z copy-current differencing transconductance amplifier active filter using FinFET transistor based current Mode Universal Filter. *Global Journal of Engineering and Technology Advances*, 18(02), pp.001-005, (2024).
- [2] Demirel H and Ahmed A, "New FinFet Transistor Implementation of Floating and Grounded Inductance Simulator Based on Active Elements", *Gazi Journal of Engineering Sciences*, vol. 9, no. 3, pp. 647–653, (2024).
- [3] Mohammed AA, Demirel H, Mahmood ZK., Analysis fin field-effect transistor design with high-k insulators. *Nexo Revista Científica*. 31;36(06):892-905, (2023).
- [4] Mohammed AA and Demirel H., Integration of Quadrature Oscillator and Floating Inductor in FinFET Transistor Design: Innovations and Applications. *Iranian Journal of Electrical & Electronic Engineering*, 19(04), p.1., (2023).
- [5] Shakir AM, Design of Voltage Mode 6th Order Elliptic Band-pass Filter Using Z-Copy Current Follower Transconductance Amplifier) ZC-CFTA. *Kirkuk University Journal-Scientific Studies*, 12(2), pp.271-285, (2017).
- [6] Ahmed A and Demirel H, Design Third order Sinusoidal Oscillator Employing Current Differencing Cascaded Trans conductance Amplifiers. *Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology*, 11(3), pp.735-743, (2023).
- [7] Demirel H and Ahmed A, A Low-Power

- 30MHz, 6th Order Bandpass Differential Gm-C Filter on Chip Utilizing Floating Current Source. *Kastamonu University Journal of Eng. and Sciences*, 9(2), pp. 96-103, (2023).
- [8] Feng J, Wang C, Zang M, & Ren Y, Realization of current-mode general nth-order filter based on current mirrors. *3rd International Conference on Advanced Computer Control. IEEE*, 367-370, (2011).
- [9] Senani R, Bhaskar DR, Singh VK, Sharma RK, Sinusoidal Oscillators and Waveform Generators Using Modern Electronic Circuit Building Blocks; *Springer: Cham, Switzerland*, (2016).
- [10] Bhaskar DR, Sharma VK, Monis M, Rizvi SMI, New current-mode universal biquad filter. *Microelectron. J.* 30, 837–839, (1999).
- [11] Prommee, P.; Khateb, F., High-performance current-controlled CDCCC and its applications. *Indian J. Pure Appl. Phys.* 1999, 52, 708–716, (2014).
- [12] Lahiri AD, (MO)(I)CCCII based second-order sinusoidal oscillators, *Radioeng.*, 20, 349–353, (2011).
- [13] Horng JW, Current differencing buffered amplifiers based single resistance controlled quadrature oscillator employing grounded capacitors. *IEICE Trans. Fundam. Electron. Commun. Comput. Sci.*, 8, 1416–1419, (2002).
- [14] Lahiri A, Explicit-current-output quadrature oscillator using second-generation current conveyor transconductance amplifier. *Radio engineering*, 18, 522–526, (2009).
- [15] Birolek D, Keskin AU, Biolkova, V. Grounded capacitor current mode single resistance - controlled oscillator using single modified current differencing trans conductance amplifier. *IEE Proc. Circuits Devices Syst.*, 4, 496–502, (2010).
- [16] Kumngern M, Lamun P, Dejhan K, Current-mode quadrature oscillator using current differencing transconductance amplifiers. *Int. J. Electron.*, 99, 971–986, (2012).
- [17] Jaikla W, Lahiri A, Resistor-less current-mode four-phase quadrature oscillator using CCCDTAs and grounded capacitors. *AEÜ–Int. J. Electronics Communication*, 66, 214–218, (2012).
- [18] Sa-Ngiamvibool W, Jantakun A, Quadrature oscillator using CCCCTAs and grounded capacitors with amplitude controllability. *Int. J. Electron.* 101, 1737–1758, (2014).
- [19] Prasad D, Srivastava M, Bhaskar DR, Electronically controllable fully uncoupled explicit current-mode quadrature oscillator using VDTAs and grounded capacitors. *Circuits Syst.* 4, 169–172, (2013).
- [20] Prommee P, Dejhan K, An integrable electronic controlled sinusoidal oscillator using CMOS operational transconductance amplifier, *Int. J. Electron.* 89, 365–379. (2002).
- [21] Maheshwari S, Khan IA, Current controlled third order quadrature oscillator. *IEE Proc. Circuits Devices Syst.* 152, 605–607, (2005).
- [22] Lawanwisut S, Siripruchyanun M, High output-impedance current-mode third-order quadrature oscillator based on CCCCTAs. *In Proceedings of the IEEE Region 10 Conference (TENCON '09)*, Singapore, 23–26 November; pp. 1–4, (2009).
- [23] Maheshwari S., Quadrature oscillator using grounded components with current and voltage outputs. *IET Circuits Devices Syst.* 2009, 3, 153–160.
- [24] Horng JW, Lee H, Wu JY, Electronically tunable third-order quadrature oscillator using CDTAs. *Radio engineering*, 19, 326–330, (2010).
- [25] Horng JW, Current/voltage-mode third order quadrature oscillator employing two multiple outputs CCIs and grounded capacitors. *Indian J. Pure Applied Physics*, 49, 494–498, (2011).
- [26] Chaturvedi B, Maheshwari S, Third-order quadrature oscillator circuit with current and voltage outputs. *ISRN Electron*, 385062, (2013).
- [27] Pandey R, Pandey N, Komanapalli G, Anurag R, OTRA based voltage mode third order quadrature oscillator. *ISRN Electron.*, 126471, (2014).
- [28] Pandey N, Approach for third order uadrature oscillator realization. *IET Circuits Devices Syst.*, 9,161–171, (2015).
- [29] Maheshwari S, Singh SV, Chauhan DS, Electronically tunable low-voltage mixed-mode universal biquad filter. *IET Circuits Devices Syst.*, 5, 149–158, (2011).
- [30] Jaikla W, Siripongdee S, Suwanjan P, MISO current-mode biquad filter with independent control of pole frequency and quality factor, *Radio engineering*, 21, 886–891, (2012).
- [31] Razavi B, A study of phase noise in CMOS oscillators. *IEEE J. Solid State Circuits*, 31, 331–343, (1996).

NiTi+Nd Tozlarının Mekanik Öğütme Sonrası Boro-Sinterleme Yöntemi İle Numune Üretimi ve Karakterizasyonu

Ceylan KARABUDAK^{1*}  Nimet KARDEŞ SEVER²  Sinan AKSÖZ¹ 

¹Pamukkale University, Faculty of Technology, Department of Metallurgical and Materials Engineering, 20160, Pamukkale/DENİZLİ

²Pamukkale University, Faculty of Technology, Department of Automotive Engineering, 20160, Pamukkale/DENİZLİ

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 05/01/2024
Düzeltilme: 28/02/2024
Kabul: 02/03/2024

Anahtar Kelimeler

Şekil Hafızalı Alaşımlar
NiTi Alaşımları
Boro-Sinterleme
Neodymium
Mekanik Alaşımlama

Article Info

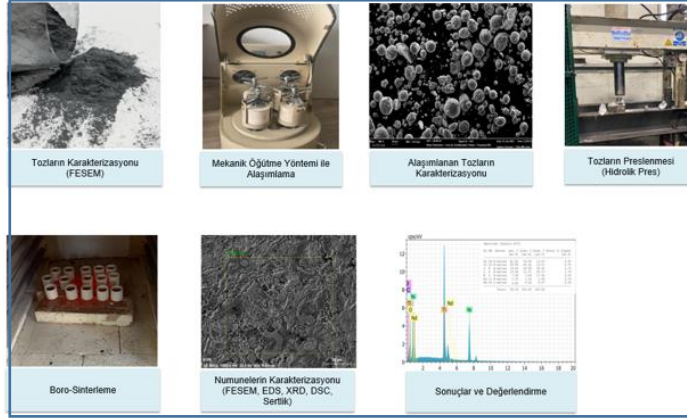
Research article
Received: 05/01/2024
Revision: 28/02/2024
Accepted: 02/03/2024

Keywords

Shape Memory Alloys
NiTi Alloys
Boro-Sintering
Neodymium
Mechanical Alloying

Grafik Özet (Graphical/Tabular Abstract)

Bu çalışmada nadir toprak elementi grubundan olan Neodymium (Nd) elementi ağırlık %7, %10 ve %13 oranlarında önalaşım NiTi tozuna mekanik alaşımlama yöntemi ile eklenmiştir. / In this study, Neodymium (Nd), a rare earth element, was added to the prealloyed NiTi powder at the rates of 7, 10 and 13 wt.% by mechanical alloying (MA) method.



Şekil A: Deneysel Çalışmalar / Figure A: Experimental Studies

Önemli noktalar (Highlights)

- NiTi Şekil Hafızalı Alaşımlar/ NiTi Shape Memory Alloys
- Boro-Sinterleme / Boro-Sintering
- Neodymium/ Neodymium

Amaç (Aim): Bu çalışmada NiTi alaşımına Nd elementi eklenerek mekanik ve metalografik özelliklerin geliştirilmesi hedeflenmiştir. / In this study, it was aimed to improve mechanical and metallographic properties by adding Nd element to NiTi alloy.

Özgünlük (Originality): NiTi ön alaşım tozuna Nd elementi mekanik alaşımlama yöntemi ile ilk kez eklenmiştir. / Nd element was added to NiTi pre-alloyed powder for the first time by mechanical alloying method.

Bulgular (Results): Martenzit ve östenit dönüşüm sıcaklıkları ve sertlik değerlerinde artış gözlemlenmiştir. / An increase in martensite and austenite transformation temperatures and hardness values was observed.

Sonuç (Conclusion): NiTi alaşımına eklenen Nd elementi ile mekanik ve metalografik özelliklerinin geliştirilebileceği gözlemlenmiştir. / It has been observed that the Nd element added to the NiTi alloy contributes positively to the mechanical and metallographic properties.



NiTi+Nd Tozlarının Mekanik Öğütme Sonrası Boro-Sinterleme Yöntemi İle Numune Üretimi ve Karakterizasyonu

Ceylan KARABUDAK^{1*} Nimet KARDEŞ SEVER² Sinan AKSÖZ¹

¹Pamukkale Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, 20160, Pamukkale/DENİZLİ

²Pamukkale Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Otomotiv Mühendisliği Bölümü, 20160, Pamukkale/DENİZLİ

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 05/01/2024
Düzeltilme: 28/02/2024
Kabul: 02/03/2024

Anahtar Kelimeler

Şekil Hafızalı Alaşımlar
NiTi Alaşımları
Boro-Sinterleme
Neodymium
Mekanik Alaşımlama

Öz

Bu çalışmada, ön alaşımlı NiTi tozuna, mekanik alaşımlama (MA) yöntemi ile ağırlıkça %7, %10 ve %13 oranlarında nadir toprak elementlerinden Neodymium (Nd) ilave edilmiştir. Alaşımlama işlemi planeter öğütücü kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Alaşımlı tozlar, oda sıcaklığında preslenmiştir. Presleme işlemi tamamlandıktan sonra, numuneler Boro-Sinterleme (B/S) yöntemi kullanılarak kademeli olarak sinterlenmiştir. Bu yöntemde bor kaynağı olarak boraks tuzu ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$) kullanılmıştır. Numuneler havayla temas etmeyecek şekilde boraks tuzu içerisine yerleştirilerek homojen olarak ve oksidasyona uğramadan sinterlenmiştir. Numunelerin üretim süreci tamamlandıktan sonra optik mikroskop, FESEM (Alan Emisyon Taramalı Elektron Mikroskobu), EDS (Enerji Dispersiyon Spektrometresi), XRD (X-Işını Kırınımı), DSC (Diferansiyel Tarama Kalorimetrisi) kullanılarak malzemelerin mikroyapı analizleri ve karakterizasyon işlemleri gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak %'ce artan Nd oranı ile numunelerde sertlikte artış gözlenmiştir. Ayrıca NiTi+Nd numunelerinde eklenen Nd miktarı arttıkça martenzit başlangıç ve östenit bitiş sıcaklıklarında da artış gözlenmiştir.

Sample Production and Characterization of NiTi+Nd Powders By Boro-Sintering Method After Mechanical Milling

Article Info

Research article
Received: 05/01/2024
Revision: 28/02/2024
Accepted: 02/03/2024

Keywords

Shape Memory Alloys
NiTi Alloys
Boro-Sintering
Neodymium
Mechanical Alloying

Abstract

In this study, Neodymium (Nd), a rare earth element, was added to the prealloyed NiTi powder at the rates of 7, 10 and 13 wt.% by mechanical alloying (MA) method. The alloying process was carried out using a planetary grinder. The alloyed powders were pressed at room temperature. After the pressing process was completed, the samples were gradually sintered using the Boro-Sintering (B/S) method. In this method, borax salt ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$) was used as the boron source. The samples were placed in borax salt in a way that they would not come into contact with air and were sintered homogeneously and without oxidation. After the production process of the samples was completed, microstructure analysis and characterization of the materials were carried out using optical microscope, FESEM (Field Emission Scanning Electron Microscopy), EDS (Energy Dispersive Spectrometry), XRD (X-Ray Diffraction), DSC (Differential Scanning Calorimetry). As a result, an increase in hardness was observed in the samples with increasing wt. % ratio of Nd. In addition, an increase in martensite start and austenite finish temperatures was observed as the amount of added Nd increased in NiTi+Nd samples.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Günümüzde gelişen ve değişen teknoloji ile birlikte, üretilen ürünlerden beklenen performans ve özellikler de değişiklik göstermektedir. Bir üründen beklenen düşük maliyet, kalite, performans ve hassas parça üretimi gibi özellikleri sağlamak amacıyla farklı üretim yöntemleri geliştirilmiştir.

1950'li yıllardan beri çeşitli alanlarda gelişen ve büyüyen Toz Metalürjisi (T/M) yöntemi de bu yöntemlerden birisidir. İki veya daha fazla sayıda metal tozunu birleştirerek; alaşımlandırma yöntemi ile ileri seviyede ve yüksek mukavemete sahip malzeme üretimine olanak sağlayan bu yöntem, geleneksel yöntemlere göre daha hassas bir yöntem olarak bilinmektedir [1]. T/M uygulamalarından

olan ve yaygın olarak kullanılan Nikel-Titanyum (NiTi) alaşımları değişen oranlarda ve farklı metal tozlarıyla birleştirilerek, birçok uygulama alanında yarar sağlamaktadır. Neredeyse eşit atomik oranlarda birleştirilerek oluşan NiTi alaşımları; Şekil Hafızalı Alaşımlar (ŞHA) olarak da adlandırılır ve belirli sıcaklıklar arasında dönüşüm gösteren bu alaşımlar akıllı metalik malzeme grubunu oluşturmaktadır. Düşük sıcaklıkta plastik olarak deformasyona uğratılmış bu alaşımlar daha yüksek sıcaklıklara çıkıldığında şekil hafıza özellikleri sayesinde ilk şeklini hatırlayarak dönüşüm gösterme eğilimindedir [2, 3].

Nadir toprak elementlerinden olan Neodimyum (Nd) elementi, daha çok mıknatıs uygulamalarında kullanılmaktadır. Bu mıknatıslar günümüzde bilgisayarların sabit disklerinde, elektrikli ev aletlerinde, elektronik cihazlarda, telefonlarda, mikrofonlarda, hibrit ve elektrikli araçların motorlarında, rüzgar türbinlerinde kullanılmaktadır [4].

Borlama işlemi T/M uygulamalarında, parçaların sinterlenme aşaması sonrasında uygulanan bir işlemdir. Parçaların sinterleme aşamasının borlama ile birlikte hem yüzey kaplama hem de sinterleme işlemleri (Boro-Sinterleme-(B/S)) aynı anda gerçekleştirebilmektedir. Bu yöntemde bor; katı, sıvı veya gaz olarak kullanılabilir. B/S yöntemi mekanik özelliklere olumlu yönde iyileştirmek için; sinterleme ve borlama işleminin ayrı ayrı yapılması yerine tek seferde yapılabilen bir sürece çevirerek yenilikçi bir yaklaşım sağlamaktadır. [5, 6, 7].

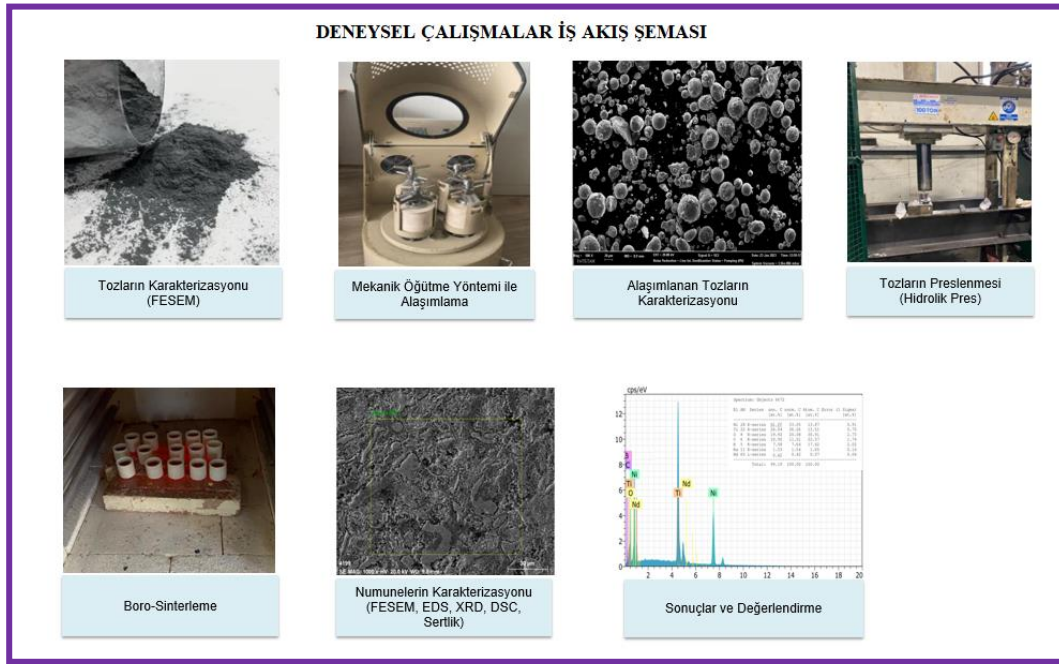
MA yöntemi, T/M üretim yöntemleri içerisinde kendisine büyük ölçüde yer edinen bir yöntemdir. Farklı yapılara sahip tozların bir araya getirilerek, alaşımlama işleminin gerçekleştirilmesi için en uygun yöntemlerden bir tanesidir [8]. MA yöntemi, ŞHA'da Ni ve Ti elementlerinin farklı oranlarda

kullanılarak farklı alaşım elementlerinin yapıya homojen bir şekilde eklenmesinde yüksek verimlilik sağladığı için yaygın olarak kullanılmaktadır [9, 10]. MA yöntemi, homojen bir alaşımlama gerçekleştirilmesi, malzeme sentezinin kolay olması ve üretim süreci olarak kolaylık sağlaması sebebiyle ön plana çıkan bir yöntemdir. Bu teknik, istenilen partikül boyutunu elde etme ve malzemede istenen benzersiz kimyasal, mekanik, fiziksel özellikler elde etmeye oldukça elverişlidir [11].

Bu çalışmada B/S yöntemi kullanılarak; ön alaşımlı NiTi tozlarına, Nd tozu mekanik öğütme yöntemi ile yapıya ilave edilmiştir. Çalışma yapılırken boraks tuzu kullanılmış olup formülasyonu $Na_2B_4O_7$ şeklindedir. Alaşımın B/S aşaması sonrasında; numunelerin karakterizasyon işlemleri için FESEM (Alan Emisyonlu Tarama Mikroskobu), EDS (Elementel Dağılım Analizi), XRD (X-Ray Işınları Analizi), DSC (Diferansiyel Taramalı Kalorimetre) analizleri gerçekleştirilmiştir ve artan %Nd oranının sertliğe etkisinin incelenmesi için numunelerden sertlik verileri alınmıştır.

2. MATERYAL VE YÖNTEMLER (MATERIALS AND METHODS)

Numune üretimi için gaz atomizasyonu yöntemiyle üretilmiş, ortalama 41,3 mikron tane boyutuna sahip, neredeyse eşit atomik oranlara sahip ön alaşımlı NiTi tozu kullanılmıştır. Ön alaşımlı NiTi tozuna 74 mikron tane boyutuna sahip Nd elementi ağırlıkça %7, %10, %13 oranlarında mekanik alaşımlama yöntemi ile eklenmiştir. NiTi tozları Nanoval (NANOVAL GmbH&Co. KG Kienhorststraße 61-65 D-13403-Berlin) isimli firmadan ön alaşımlı olarak temin edilmiştir. Nd tozları ise ISM Dış Ticaret Pazarlama Ltd. Şti'den temin edilmiştir. Deneysel sürece ait iş akış şeması Şekil 1'de verilmektedir.



Şekil 1. Numune üretimi iş akış şeması (Sample production work flow chart)

Tablo 1’de, ağırlıkça %7, %10, %13 oranlarında eklenen Nd için ağırlıkça toz miktarları verilmektedir.

Tablo 1. NiTi+Nd alaşımına ait toz oranları (Powder ratios of NiTi+Nd Alloy)

% Oranlar	NiTi Toz Miktarı (gr)	Nd Toz Miktarı (gr)
%7 Nd	9,3 gr	0,7 gr
%10 Nd	9,0 gr	1,0 gr
%13 Nd	8,7 gr	1,3 gr

Tozların öğütme ve alaşımlama işlemi için Pamukkale Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Mekatronik Mühendisliği Bölümü’nde bulunan SFM-1 Desk-Top Planetary Ball Miller markalı gezegen tipi öğütücü kullanılmıştır. Öğütücü 400 rpm devirde iki yönlü olarak çalışmıştır. MA işlemi, oda sıcaklığında 30dk, 60dk, 120dk, 180dk, 240dk, 300dk, 360dk sürelerde gerçekleştirilmiştir. Yapılan öğütme sonrasında; numunelerin vakum ortamında FESEM ve EDS analizi gerçekleştirilerek, optimum öğütme süresi 300dk olarak belirlenmiştir. Optimum öğütme

süresi, numunelerden FESEM ve EDS verileri baz alınarak belirlenmiştir.

Her bir numune 2,5 gr olacak şekilde tartılmış ve 10 mm çapa sahip kalıpta yağlayıcı olarak çinko stearat tozu kullanılarak oda sıcaklığında soğuk presleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Presleme işlemi Er-Bakır şirketinde bulunan Hürsan markalı 100 tonluk pres ile yapılmıştır. Öğütülmüş NiTi+Nd tozlarının presleme basıncı yaklaşık olarak 600 (± 50) MPa’dır.

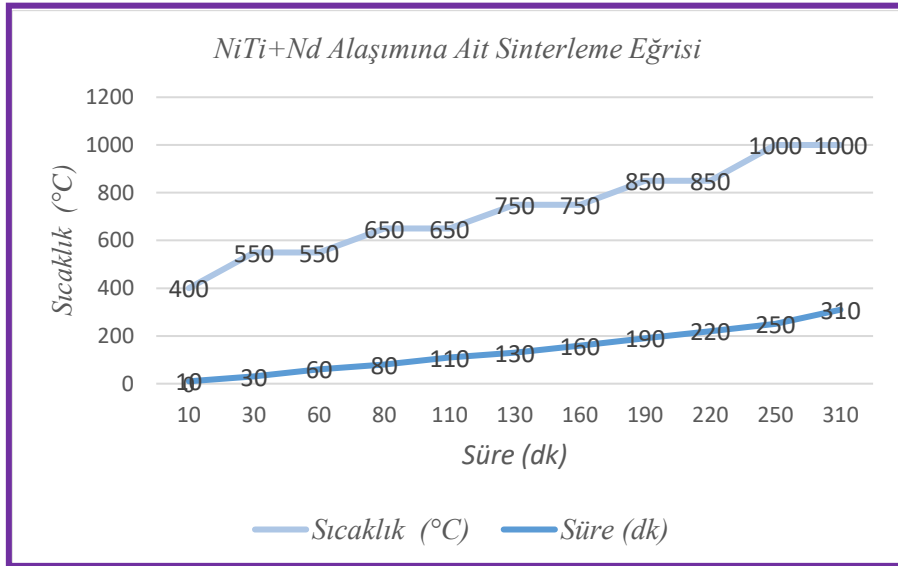
B/S için Denizli Pamukkale Üniversitesi Teknoloji Fakültesi’nde bulunan PLF 120/27 Protherm markalı fırın kullanılmıştır. Fırın

başlangıçta oda sıcaklığında bulunmaktadır ve ayarlanabilir sıcaklık artış kontrol ünitesine sahip olup, 1300°C sıcaklığa kadar sinterleme işlemine uygundur. Numuneler Şekil 2’de görüldüğü gibi boraks tuzunun içine hava almayacak şekilde konumlandırılarak fırına yerleştirilmiştir. Şekil 3’te verilmiş olan B/S reçetesine göre sinterlenmiştir. İlk etapta seramik krozelerin nemi uzaklaştırılarak, numuneler seramik krozelere yerleştirilmiştir ve fırının sıcaklığı 400°C’den 550°C’ye 20 dk’da çıkarılmıştır. 550°C’de numuneler 30dk bekletilmiştir. 550°C’den

650°C’ye 20dk’da çıkılmış, numuneler 650°C’de 30dk bekletilmiştir. Fırının sıcaklığı 650°C’den 750°C’ye 20dk’da çıktıktan sonra, 30dk 750°C’de bekletilmiştir. Numuneler, 750°C’den 850°C’ye 30dk çıkartılarak, 850°C’de 30dk bekletilmiştir. Nihai işlem olarak 850°C’den 1000°C’ye 30dk süresince sıcaklık yükselmiş, 1000°C’de 60dk bekletilerek nihai sinterleme işlemi tamamlanmıştır. Numuneler, fırın 300°C sıcaklığa düştükten sonra fırından çıkarılarak oda sıcaklığına soğutulmuştur.



Şekil 2. Numunelerin Boro-Sinterleme süreci(Boro-Sintering process of samples) a) Numunelerin krozeğe yerleşimi(Placement of the samples in the crucible) b) Numunelerin bor tuzu ile üzerinin kapatılması (Covering the samples with the boron salt) c)Boro-Sinterleme öncesi (Before Boro-Sintering) d) Boro-Sinterleme sonrası (After Boro-Sintering)



Şekil 3. NiTi+Nd numunelerine ait Boro-Sinterleme eğrisi(Boro-Sintering curve of NiTi+Nd samples)

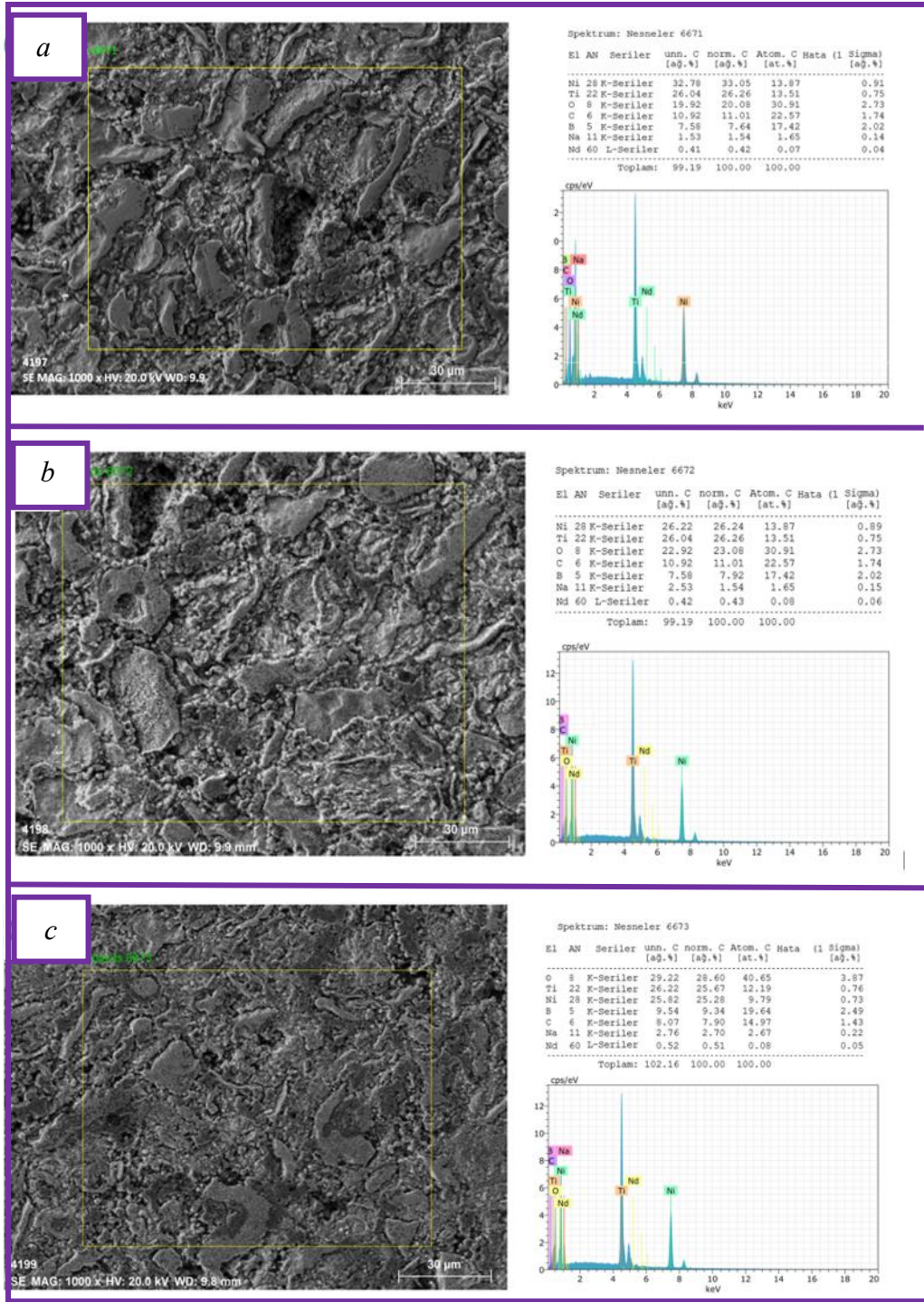
Numune üretimi gerçekleştirildikten sonra, numuneler metalografik analizler için bakalite alınmıştır. Sonrasında zımparalama ve parlatma işlemleri gerçekleştirilmiştir. Bu işlemler için Pamukkale Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Metalografi Laboratuvarında bulunan Metkon markalı cihaz kullanılmıştır. Zımparalama işlemi için kullanılan kağıtlar sırasıyla 180, 240, 400, 600, 800, 1200 mesh'dir. Yüzey parlatma işlemleri için 3 mikron parlatma solüsyonu ve 3 mikron parlatma çuhası kullanılmıştır. Numune yüzeyi incelemesi yapmak için %3 HCl, %5 HNO₃, ve %90 dağlayıcı solüsyon karışımı ile dağlama işlemi gerçekleştirilmiştir. 30 saniye süre ile dağlama yapılmıştır.

Numunelerin metalografik işlemler sonrasında sertlik ölçümü, Pamukkale Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Metalurji ve Malzeme Laboratuvarı'nda yer alan Matsuzawa Rockwell Type Hardness Tester marka ve model Rockwell Sertlik Cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Oda sıcaklığında her bir

numuneden beş adet sertlik değeri alınmış ve ortalama sertlik değerleri hesaplanmıştır.

3. BULGULAR (RESULTS)

MA yöntemi ile öğütülen tozların nihai ölçülerde presleme sonrasında, B/S yöntemi uygulanarak üretimi gerçekleştirilmiş, sonrasında numunelerin metalografik hazırlık sonrasındaki FESEM görüntüleri ve EDS analiz verilerine Şekil 4'te yer verilmiştir. Şekil 4.a'da ağ. %7Nd, Şekil 4.b'de ağ. %10Nd, Şekil 4.c'de ağ. %13Nd içeren NiTi+Nd alaşımlarına ait FESEM görüntüleri yer almaktadır. FESEM görüntüleri incelendiğinde, alaşımlandırmanın homojen bir şekilde gerçekleştiği anlaşılmıştır. Yapıda oluşması beklenen muhtemel fazlar görülmektedir. Görüntüler genel itibarı ile merkezden alınmış olup, doğrudan oluşması muhtemel NiTi+Nd alaşımı ile oluşacak, NiTi_M, NiTi_A, NiTi₂, NiNd fazlarına ait olduğu düşünülmektedir. Çalışmada FESEM görüntüleri üzerinden alınan EDS analiz verilerinde yer alan elementlerin oluşturduğu bileşiklerin tespiti amaçlı XRD analizi yapılmıştır.



Şekil 4. NiTi+Nd alaşımlarına ait FESEM görüntüsü ve EDS analizi (FESEM images and EDS analysis of NiTi+Nd alloys) a) ağ. %7 Nd (wt. %7 Nd) b) ağ. %10 Nd içeren (wt. %10 Nd) c) ağ. %13 Nd (wt. %13 Nd)

Tablo 2. Şekil 4’de bulunan NiTi+Nd alaşımına ait element oranları (Element ratios of the NiTi+Nd alloy in Figure 4)

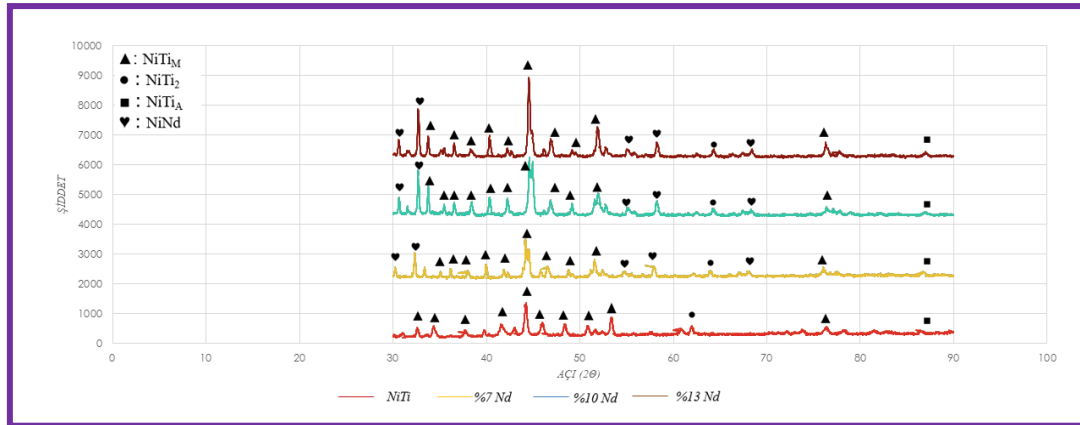
% NiTi+Nd Alaşımı	%Ni	%Ti	%Nd	%B
NiTi+ %7Nd (Şekil 4.a)	32,78	26,04	0,41	7,58
NiTi+ %10Nd (Şekil 4.b)	26,22	26,04	0,42	7,58
NiTi+ %13Nd (Şekil 4.c)	25,82	26,22	0,52	9,54

Önalışım NiTi tozlarına ilave edilen eklentilerin karakterizasyon sürecinde FESEM görüntüleri ve EDS analizleri önemli yer teşkil etmektedir [12, 13]. Alaşımlarda bulunan elementlerin ağırlık oranları Tablo 2’de verilmektedir. Yapıdaki Ni ve Ti elementleri ön alaşımlı NiTi içeriğinden gelmekte olup, diğer Na ve B elementlerinin bor kaynağı olarak kullanılan boraks tuzu sebebiyle oluştuğu anlaşılmaktadır. Bu yapıların tespiti için XRD verileri alınmıştır. Gerekli veriler için, Gazi Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği’nde bulunan APD 2000 PRO markalı XRD analiz cihazı kullanılmıştır.

Üretimi gerçekleştirilen numunelerdeki faz oluşumunu görebilmek için XRD analizleri NiTi alaşımlandırma sistemlerinde önemli bir yere sahiptir [12, 14]. Şekil 5’te gösterilen grafik incelendiğinde, NiTi_M, NiTi_A, NiTi₂ ve NiNd fazlarının oluştuğu görülmüştür. Yapıda oluşturulmak istenen NiNd alaşımı, Nd elementinin yapıya difüze olduğunu göstermektedir.

NiTi alaşımına Nd elementinin geleneksel yöntemler ile ilavesinin zor olduğu bilinmekte olup, ilave için genel itibari ileri üretim yöntemleri tercih edilmektedir. Bu çalışmada

önalışım NiTi tozlarına Nd ilavesinin gerçekleştirilmesi amaçlı, öncelikle mekanik öğütme işlemi uygulanarak ana faz yapısının bozulması [14] ve bu sayede Ni+Ti+Nd yapısına ait ikincil fazların oluşması hedeflenmiştir [15]. Literatürde NiTi alaşımına, %0,1, %0,3, %0,5 ve %0,7 oranlarında Nd elementi ark ergitme yöntemi ile eklenmiştir. Bu yöntemde homojenlik sağlamak için yapı dört kez ergitilmiştir. Çalışma sonucunda XRD grafikleri incelendiğinde NiTi_M, NiTi_A, NiTi₂ ve NiNd fazları görülmüştür. Nd oranı arttıkça, martenzit fazı pik şiddetlerinde azalma gözlemlenmiştir. [16] EDS analiz verilerinde elde edilen element içerikleri genel itibari yüzeyden veya yüzeye yakın bölgelerden alınmıştır. Üretim işleminde tercih edilen B/S yönteminde kullanılan bor tuzunun içine yer alan elementler EDS analiz verilerinde görülmektedir. Ancak XRD analiz verileri için alınan örneklem (toz hale getirilmiştir / küçük boyutlu), numunenin tam merkezinden alınmış olup, XRD verilerinde elde edilen bileşik yapılarında bor tuzundan gelen içeriklere ait bileşikler görülmemiştir. Bu durum istenen bir durum olup, yapılan yüzeysel ısıl işlem sürecinin istenilen koşullarda gerçekleştirilebildiğini göstermektedir.



Şekil 5. NiTi+Nd alaşımına ait XRD analizi verileri (XRD analysis data of NiTi+Nd alloy)

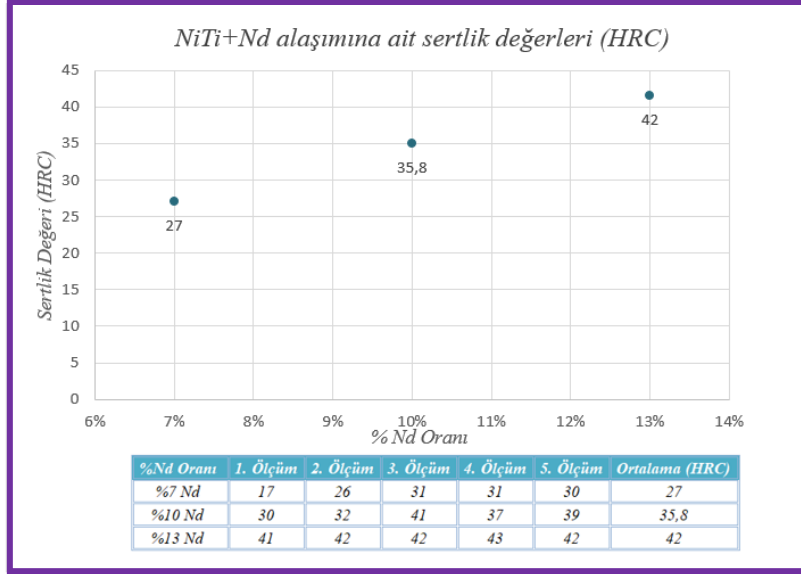
Zımparalama ve parlatma işlemi sonrasında gerçekleştirilen sertlik ölçümü değerleri HRC cinsinden verilmiş olup, ilave edilen Nd elementinin

sertliğe etkisi Şekil 6’da yer almaktadır. Artan Nd oranı ile birlikte, sertlikte artış olduğu görülmektedir. En yüksek sertlik değeri %13 Nd

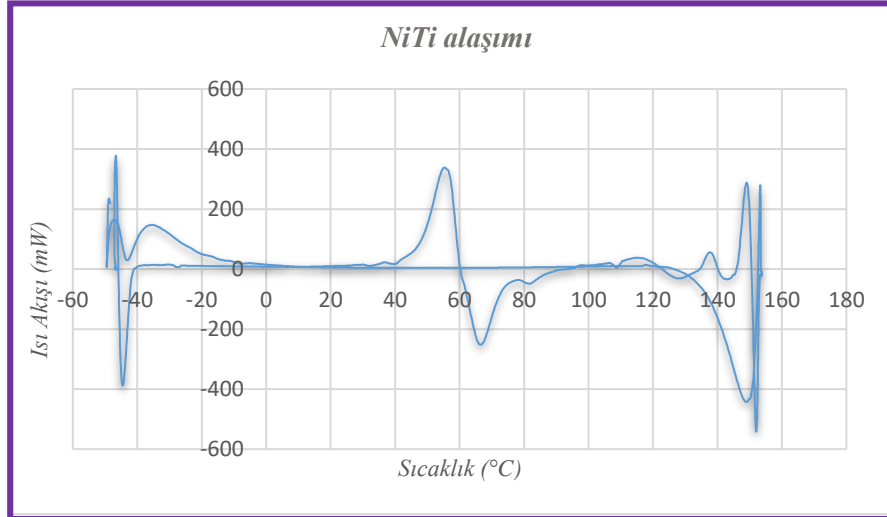
oranı ilavesi sonrasında 42 HRC, en düşük sertlik değeri ise %7 Nd ilavesi sonrasında 27 HRC olarak elde edilmiştir. Literatürde sinterlenmiş NiTi+Nd alaşımına ait sertlik değeri bulunmamaktadır. Ancak, NiTi alaşımına ilave edilen Nd elementi ile elde edilen sertlik değeri, NiTi alaşımı sertlik değerine göre çok daha yüksek olduğu görülmüştür. [5].

NiTi alaşımlarında ilave edilen eklentilerin faz dönüşümlerine etkilerini belirlemek için DSC

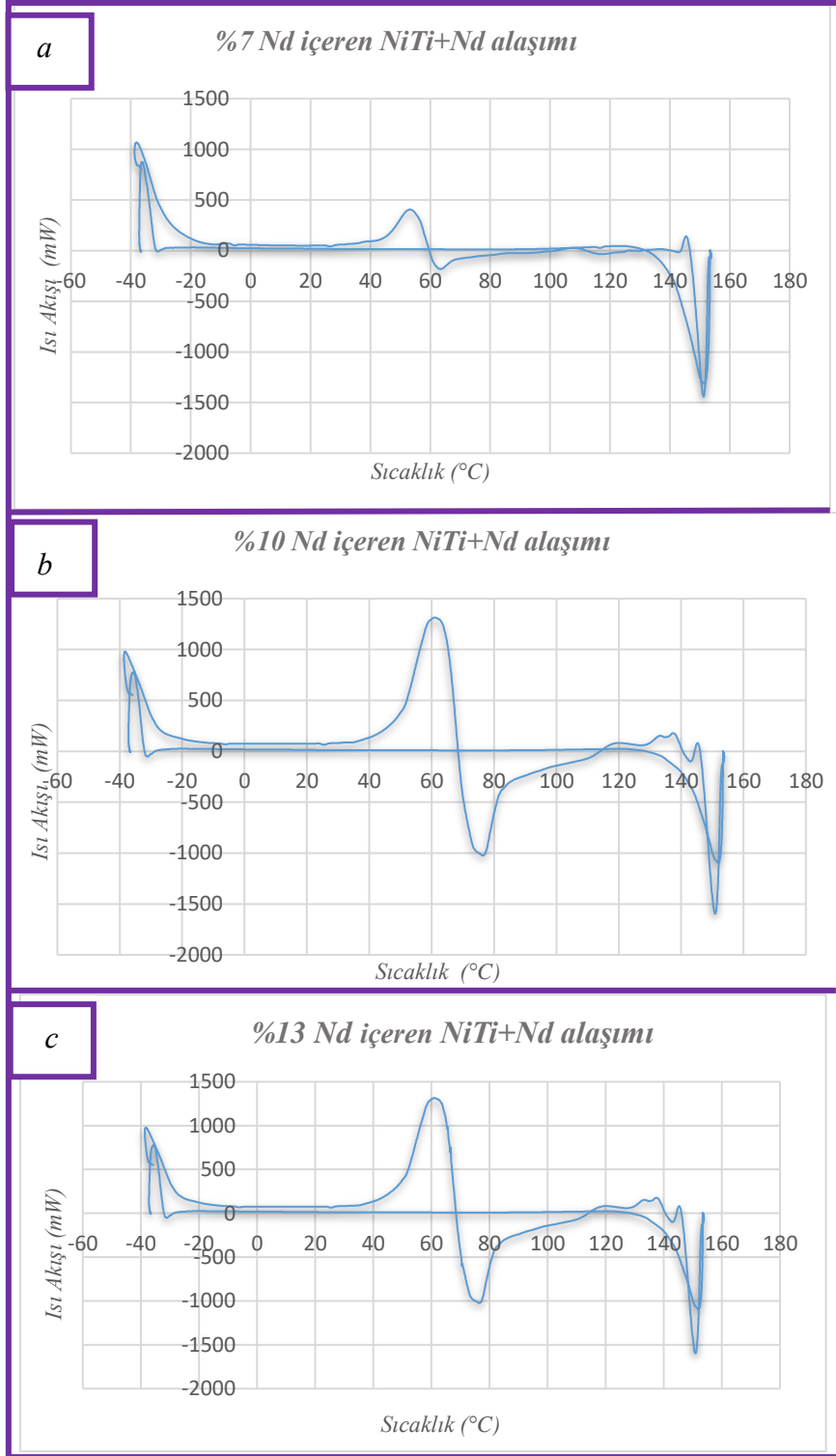
analizleri önemli bir yere sahiptir [15]. Bu çalışmada Gazi Üniversitesi Temel ve Mühendislik Bilimleri Merkez Laboratuvarı Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde bulunan ve -150/+600°C arasında N, Ar ve hava atmosferlerinde ölçüm yapma kabiliyetine sahip DSC cihazı kullanılmıştır. Bu çalışmada üretilen numunelerin, -50°C ile +150°C sıcaklık aralığında, 10 °C/dk hızda ısıtma ve soğutma işlemleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 7'de NiTi ŞHA'na ait DSC grafiği verilmiştir.



Şekil 6. NiTi+Nd alaşımına ait sertlik değerleri (HRC) (Hardness values (HRC) of NiTi+Nd alloy)



Şekil 7. a) NiTi ŞHA'na ait DSC grafiği (DSC chart of NiTi SMA)



Şekil 8. NiTi+Nd alaşımına ait DSC verileri (DSC chart of NiTi+Nd alloy) a) ağ. %7 Nd (wt. %7 Nd) b) ağ. %10 Nd içeren (wt. %10 Nd) c) ağ. %13 Nd (wt. %13 Nd)

Tablo 3. Şekil 7 ve Şekil 8’de bulunan NiTi+Nd alaşımına ait martenzit ve östenit faz dönüşümü sıcaklıkları (Martensite and austenite phase transformation temperatures of the NiTi+Nd alloy in Figure 7 and Figure 8)

Alaşım	M _f (°C)	M _s (°C)	A _s (°C)	A _f (°C)
NiTi	40	60	61	78
NiTi+ %7 Nd	45	60	61	68
NiTi+ %10 Nd	45	69	69	83
NiTi+ %13 Nd	45	70	71	85

NiTi ve NiTi+ Nd alaşımlarının M_f, M_s, A_f, A_s sıcaklıkları Tablo 3'te verilmektedir. Artan % ağ. Nd fraksiyonu ile birlikte, yaklaşık olarak M_s sıcaklığında 10 °C, A_s sıcaklığında 10 °C artış olduğu gözlenmiştir. Bununla beraber, A_f sıcaklığında yaklaşık olarak 17 °C artış görülmüştür. DSC eğrileri incelendiğinde M_f sıcaklığının oda sıcaklığına yakın olduğu gözlemlenmektedir ve martenzit dönüşümü bu sıcaklıkta tam olarak tamamlanamamaktadır. Bu sebeple M_f sıcaklığında bir değişiklik olmadığı düşünülmektedir. Yapılan önceki çalışmalarda artan Nd oranı ile birlikte M_s sıcaklığının arttığı gözlemlenmiştir [16]. Şekil 8'de bulunan DSC sonuçları ile, NiTi alaşımına Nd ilavesinin M_f, M_s, A_f, A_s dönüşüm sıcaklığını artan % ağ. ile birlikte arttırdığı gözlemlenmiştir. NiTi alaşımı için M_f sıcaklığı 40 °C iken, artan Nd ilavesi ile birlikte 45 °C sıcaklığa yükseldiği gözlemlenmiştir.

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada ön alaşımlı NiTi tozlarına mekanik öğütme yöntemi ile ilave edilen Nd tozlarına presleme sonrasında B/S yöntemi ile numune üretilmiş ve aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir;

NiTi+Nd tozlarına uygulanan MA yöntemi ile ağ. %7, %10 ve %13 oranlarında Nd tozlarının homojen bir şekilde dağılımı sağlanabilmiştir. Tozların presleme sonrasında uygulana B/S yöntemi ile istenilen formda numuneler üretilebilmiştir.

Üretilen tozlara ait FESEM görüntüleri ve EDS analizleri incelendiğinde %2.06 Nd oranıyla 300dk öğütme sonrasında homojen alaşımlamanın elde edilebildiği görülmüştür.

Üretilen tozlara, presleme sonrası B/S uygulandığında numunelerin yüzey kısmında bor tozundan gelen elementlere rastlanıldığı, için bölgelerde ise Ni+Ti+Nd fazlarına ait bileşiklerin eldesi sağlanmıştır. Bu yapı içerikleri EDS analizi ile ve XRD piklerinde görülmüştür.

XRD analizleri incelendiğinde yapıda NiTi_M, NiTi_A, NiTi₂ ve NiTiNd fazları gözlenmiştir. Bu fazlar literatürde yer alan fazlarla birlikte, uygulanan borlama sayesinde yüzey katmanı oluşturabileceği görülmüştür. Literatürde B/S yönteminde numune üzerinde 5-10 µm bor tabakası oluşabileceği bilgisi bulunmaktadır. [5] Üretilen numunelerde dış katmandan iç katmana doğru sertliğin azaldığı görülmüştür. Üretilen numunede 5 µm bor tabakası oluşmuştur.

Alaşımında Nd oranı artışıyla birlikte, sertlikte de artış olduğu görülmüştür. En yüksek sertliğin 42HRC ile ağ. %13 oranında Nd ilavesinde olduğu saptanmıştır.

B/S yapılan numunelere ait DSC analizleri incelendiğinde, artan Nd oranına bağlı olarak M_f, M_s, A_f, A_s sıcaklığının arttığı görülmüştür. Nd ilavesinin, dönüşüm sıcaklıklarına artış olarak etki ettiği görülmüştür.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

Yazarlar, 2022FEBE025 Kodlu Projeye verdiği katkıları için Pamukkale Üniversitesi, BAP birimine teşekkürlerini sunmaktadır.

The authors would like to thank Pamukkale University, BAP unit for their contribution to the Project Coded 2022FEBE025.

ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

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

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

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

Sinan AKSÖZ: Deney tasarımlarını yapmış, sonuçları analiz etmiş ve makale yazım işlemine katkıda bulunmuştur.

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

Ceylan KARABUDAK: Deneylemleri yapmıştır ve makalenin yazım işlemlerini gerçekleştirmiştir.

She conducted the experiments, and performed the writing process.

Nimet KARDEŞ SEVER: Deney sonuçlarını analiz etmiş ve makalenin yazım işlemlerini gerçekleştirmiştir.

She analyzed the experiments 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] Kaya, M. "Toz metalurjisi ile üretilen NiTi şekil hatırlamalı alaşımların metalürjik ve mekanik karakteristiklerinin incelenmesi", Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, (2008).

[2] Reddy, B. S. B., Karabi D., Pabi, S. K., Siddhartha, D., "Mechanical-thermal synthesis of Al-Ce/Al₂O₃ nanocomposite powders". Materials Science and Engineering, A 445-446 341-346, (2007).

[3] Dilibal, S., "Nikel-Titanyum Şekil Bellekli Alaşım Üretimi ve Şekil Bellek Eğitimi". Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, (2005).

[4] Gupta, C. K. ve Krishnamurthy, N., "Extractive metallurgy of rare earths", CRC Press,(2004).

[5] Aksöz, S., Kaplan, Y., & Tan, E. (2019). Boro-sinterleme işleminin ham T/M parçaların mikroyapı ve sertlik özelliklerine etkilerinin incelenmesi. Journal of Boron, 4(2), 77-84

[6] Günen A., Koç V., Kanca E., Gök M. S., Kurt B., Kırar E., Demir M. Effect of boro-sintering process on microstructure and phase formations of P/M AISI 1010 Steel" The Int. Conf. on Mater. Sci., Mech. Auto. Eng. Techno. in Çeşme-İzmir (IMSMATEC'18), 10-12 Nisan, 2018.

[7] Azmi Erdogan, Bilal Kursuncu, Ali Günen, Müge Kalkandelen, M. Sabri Gok (2020). "A new

approach to sintering and boriding of steels "Boro-sintering": Formation, microstructure and wear behaviors", Surface & Coatings Technology, 386, 12548

[8] Aksöz S., Özdemir A.T, Bostan B., "Alloyed AA2014 Aluminium Powders Synthesised With Carbon and Determined Properties" J. Fac. Eng. Arch. Gazi Univ., Vol 27., No 1, 109-115, (2012).

[9] Aksöz S., Demir Ü., Ada H., Gökmeşe H., Bostan B., "NiTi Şekil Bellekli Alaşım Tozlarına Mekanik Alaşımlama Yöntemi Kullanılarak Elementel Ni ve Ti Tozlarının İlavesinin Mikroyapısal İncelenmesi", GU J Sci, Part C, 5 (1): 99-106, (2017).

[10] Takasaki A., "Mechanical alloying of the Ti-Ni system", Phys. Stat. Sol. 169A, 183 – 191, (1998).

[11] Karolus M., Panek J., "Nanostructured Ni-Ti alloys obtained by mechanical synthesis and heat treatment", Journal of Alloys and Compounds, 658 : 709 – 715, (2016)

[12] Aksöz, S., & Bostan, B. (2018). Mekanik olarak sentezlenen NiTi+ Zn tozlarının karakterizasyonu ve sinterlenebilirliğinin araştırılması. Politeknik Dergisi, 21(2), 437-443.

[13] Aksöz, S., & Bostan, B. (2014, April). Characteric Properties of NiTi Shape Memory Alloy Powders with Powder Injection Molding. In International Multidisciplinary Microscopy Congress: Proceedings of InterM, Antalya, Turkey, October 10–13, 2013 (pp. 129-141). Cham: Springer International Publishing.

[14] Aksöz, S., Altınışık, G., Elverişli, E., & Bostan, B. (2018). Investigation of the Synthesizing Effects of Prealloyed NiTi Pure Al (2, 4, 6, 8 wt.) Powders by MA and Sintering. Biological and Chemical Research, 5(5).

[15] Paula, A. S., J. P. H. G. Canejo, N. Schell, and FM Braz Fernandes. "Structural evolution on thermal cycling in Ti-rich NiTi SMA." Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms 238, no. 1-4 (2005): 111-114.

[16] Maashaa, D., Dorj, U. O., Lee, M., Lee, M. H., Zhao, C., Dashjav, M., & Woo, S. M. (2016). Investigation on microstructure and martensitic transformation of neodymium-added NiTi shape

memory alloys. *Modern Physics Letters B*, 30(28), 1650286.

Özgün Bir Kafes (Lattice) Yapı Tasarımının Auxetic Davranışının İncelenmesi

Nuriye Nur KAYA^{1*}, İhsan TOKTAŞ²

¹ Department of Industrial Product Design, Fırat University, 23300 Ankara, Turkey

² Ankara Yıldırım Beyazıt University, Faculty of Architecture And Fine Arts, Industrial Design Department, Ankara, Turkey

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 20/05/2024
Düzeltilme: 24/06/2024
Kabul: 25/06/2024

Anahtar Kelimeler

Negatif Poisson Oranı
Ökzetik yapılar
Kafes yapı
Stravaski hücre

Article Info

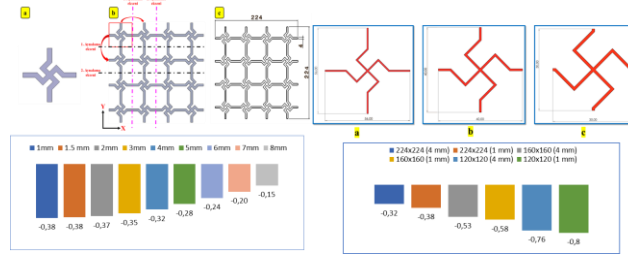
Research article
Received: 20/05/2024
Revision: 24/06/2024
Accepted: 25/06/2024

Keywords

Negative Poisson's Ratio
Auxetic Structure
Lattice Structures
Stravaski Cell

Grafik Özet (Graphical/Tabular Abstract)

Bu çalışmada, mimari desenden esinlenerek oluşturulan özgün yapıya "Stravaski" adı verilerek ökzetik özelliği incelenmiştir. Ayrıca çalışılan latis yapının geometrik iç kalınlık değişkeni ile dikey ve yatay uzantıların kısaltılmasıyla oluşan birim hücre ile meydana gelen latis yapılarının negatif poisson oranı değerleri incelenmiştir. / In this study, the original structure inspired by the architectural pattern was named "Stravaski" and its auxetic property was analyzed. In addition, the geometric internal thickness variable of the lattice structure and the negative Poisson's ratio values of the lattice structures formed by the unit cell formed by shortening the vertical and horizontal extensions were analyzed.



Şekil A: Tasarlanan latis yapıların geometrik iç kalınlık ile Poisson oranı ilişkisi. / **Figure A:** The geometric internal thickness and Poisson's ratio of specified lattice systems are related.

Önemli noktalar (Highlights)

- Literatürde bulunmayan özgün bir ökzetik latis yapı geometrisi tasarlanmış ve modellenmiştir. / A novel auxetic lattice structure geometry, not previously seen in the literature, has been created and modeled.
- İncelenen kafes yapı tasarımların hepsi negatif Poisson oranına sahiptir. / All of the designs examined have a negative Poisson's ratio. /
- İncelenen ökzetik yapı tasarımlarda geometrik iç kalınlığı arttıkça, Poisson oranı değerleri negative yönde sıfır değerine yaklaşmıştır. / In the examined auxetic structure designs, as the geometric inner thickness increases, the Poisson's ratio values approach zero in the negative direction

Aim (Amaç): Bu çalışmanın amacı, literatürde özgün bir ökzetik yapı tasarlayıp analizlerini gerçekleştirerek negatif poisson oranına sahip olduğunu belirlemektir. / The purpose of this work is to design, examine, and establish the existence of a novel auxetic structure with a negative poisson's ratio.

Originality (Özgünlük): Bu çalışmada literatürde olmayan özgün bir ökzetik kafes yapı tasarlanarak literatüre kazandırılmıştır. / A novel auxetic lattice structure, not previously seen in the literature, was constructed and introduced in this study.

Results (Bulgular): Dikey ve yatay uzantılarda yapılan kısaltmaların ve geometrik iç kalınlığın poisson oranı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu görülmüştür. Birim hücreler birbirlerine yaklaştıkça ve geometrik iç kalınlık azaldıkça kafes yapılarının ökzetiklik özelliği artmıştır. / It was observed that the shortening of the vertical and horizontal extensions and the geometric internal thickness have a significant effect on the Poisson's ratio. The euxetic property of the lattice structures increased as the unit cells approached each other and the geometric internal thickness decreased.

Conclusion (Sonuç): Analiz sonuçlarına göre geometrik iç kalınlık azaldıkça ve birim hücreler birbirlerine yaklaştıkça tasarımların auxetilik özelliği artmıştır. Tasarlanan latis yapının analiz sonuçları literatürdeki diğer yapılarla kıyaslanmıştır. / According to the results of the analysis, as the geometric inner thickness decreases and the unit cells get closer to each other, the auxetics of the designs increase. The analysis results of the designed lattice structure are compared with other structures in the literature.



Özgün Bir Kafes (Lattice) Yapı Tasarımının Ökzetik Davranışının İncelenmesi

Nuriye Nur KAYA^{1*}, İhsan TOKTAŞ²

¹Department of Industrial Product Design, Fırat University, 23300 Ankara, Turkey

²Ankara Yıldırım Beyazıt University, Faculty of Architecture And Fine Arts, Industrial Design Department, Ankara, Turkey

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 20/05/2024
Düzeltilme: 24/06/2024
Kabul: 25/06/2024

Anahtar Kelimeler

Negatif Poisson oranı
Ökzetik yapılar
Kafes yapı
Stravaski hücre

Öz

Ökzetik (Ing.Auxetic) yapılar, geleneksel malzemelere göre geometrik tasarımlarından dolayı negatif poisson oranına sahip özel yapılardır. Bu yapılara çekme kuvveti uygulandığında enine genişlemeler izlenirken, basma kuvveti uygulandığında ise daralmalar gözlenmektedir. Bu yapılara çekme kuvveti uygulandığında enine genişlemeler izlenirken, basma kuvveti uygulandığında daralmalar gözlenmektedir. Örnek olarak kiral, ok ucu, re-entrant gibi birçok farklı birim hücre tasarımları mevcuttur. Bu çalışmada, mevcut literatürde yer almayan özgün olarak tasarlanmış ve Stravaski adı verilmiş bir hücre yapısının ökzetiklik özelliği araştırılmıştır. Farklı geometrik iç kalınlık ölçüleri verilerek tasarlanan kafes yapının sonlu elemanlar analizleri gerçekleştirilmiş ve negatif poisson oranına sahip olduğu bulunmuştur. Geometrik iç kalınlığın negatif poisson oranına etkisi incelendiğinde 224×224 mm, 160×160 mm ve 120×120 mm'lik ölçüde tasarlanan Stravaski kafes hücre yapılarının, 1, 1.5, 2, 3, 5, 6, 7, 8 mm kalınlıklardan 1,0 mm geometrik iç kalınlıklarında en iyi ökzetik özellik davranışı sergilediği tespit edilmiştir. Üç farklı ölçüdeki Stravaski hücre yapılarından 120×120 mm'lik ölçüye sahip Stravaski kafes yapısının diğer yapılara göre en yüksek ökzetik özellik gösterdiği bulunmuştur.

Investigation of the Auxetic Behavior of an Original Lattice Structure Design

Article Info

Research article
Received: 20/05/2024
Revision: 24/06/2024
Accepted: 25/06/2024

Keywords

Negative Poisson's Ratio
Auxetic Structure
Lattice Structures
Stravaski Cell

Abstract

Auxetic structures are special structures with a negative Poisson's ratio due to their geometric design compared to conventional materials. Transverse expansions are observed when a tensile force is applied to these structures, while contractions are observed when the compressive force is applied. Transverse expansions are observed when tensile force is applied to these structures, while contractions are observed when compressive force is applied. For example, there are many different unit cell designs, such as chiral, arrowhead, and re-entrant. In this study, the auxetic property of a uniquely designed cell structure called Stravaski, which is not included in the existing literature, was investigated. Finite element analysis of the lattice structure designed by giving different geometric internal thickness dimensions was performed, and it was found to have a negative Poisson's ratio. When the effect of geometric internal thickness on the negative Poisson's ratio was examined, it was found that Stravaski lattice cell structures designed in 224×224 mm, 160×160 mm, and 120×120 mm dimensions exhibited the best auxetic property behaviour at 1.0 mm geometric internal thickness. Among the Stravaski lattice cell structures with three different dimensions, it was found that the Stravaski lattice structure with a dimension of 120×120 mm showed the highest auxetic properties compared to the other structures.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Ökzetik yapılar, geleneksel malzelerin pozitif poisson oranına sahip olmasının tam tersine, kendine özgün geometrik yapıların olmasından ötürü negatif poisson oranı özelliği göstermektedir. Ökzetik yapılara çekme kuvveti uygulandığında

enine genişlerken, basma kuvveti uygulandığında enine daralma özelliği göstermektedir [1]. Bu nedenle bu yapılar enerji sönmüleme kabiliyeti [2], kopma dayanımı [3], akustik davranış [4], kırılma tokluğu [5] gibi üstün özelliklere sahiptirler. Sahip oldukları bu özelliklerinden ötürü otomotiv,

havacılık, savunma ve medikal gibi sektörlerde oldukça tercih edilmeye başlanmıştır [6].

Tüm ökzetik yapılarda birim hücre tasarımı esastır [7]. Birim hücrede yapılan yenilikler ile yapıların özellikleri iyileştirilmektedir. Ökzetik yapılar çalışmaya başlandığı günden bugüne kadar birçok iki boyutlu ve üç boyutlu ökzetik yapılar geliştirilmiştir [8]. Bal peteği ve re-entrant yapılar en kapsamlı incelenen ökzetik yapılar olmuştur. Bal peteği ve re-entrant yapılarıdaki düşük sertlik ve düşük mukavemet gibi olumsuzluklara yönelik bu yapılarda bir dizi yenilikler yapılmıştır [9,10]. Fu ve arkadaşları [11], re-entrant yapısının hücre duvarlarına, yatay ve dikey bağlantılar ekleyerek yapıyı daha mukavim hale getirmişlerdir. Ayrıca tek re-entrant birim hücrelerinin deformasyon noktalarını ve ezilme mukavemetini geliştirmek için farklı hücrelerden oluşan hibrit hücre konfigürasyonları da çalışmışlardır [9,12,13]. Hiyerarşik tasarımlar ile ökzetik yapıları geliştirmek etkili bir yöntem olmuştur. Kullanılan hücre yapılarının köşeleri ve duvarları gibi bazı parçalar daha küçük yapılarla değiştirilmektedir. Bu küçük alt yapılar ile deformasyon noktaları optimize edilerek, enerji emilimi ve ezilme mukavemeti önemli ölçüde artırılmıştır [14,15]. Su ve ekibi [16] ökzetik özelliğe sahip yeni bir hiyerarşik tüp tasarlamışlar ve Euler kiriş teorisine dayanarak negatif poisson oranlı hiyerarşik tüplerin küçük deformasyonlar altındaki eşdeğer elastik parametrelerini üretmişlerdir. Tan ve arkadaşları [14] re-entrant hücre yapısının hücre duvarlarını iki farklı hiyerarşik yapı ile tasarlayarak ezilme kuvvetini arttırdığını bulmuşlardır. Zhang ve arkadaşları [17], re-entrant hücre yapısını yeni bir dikey dikme ile birleştirerek yeni bir ökzetik yapı tasarlamış ve bu yapının mekanik davranışlarını inceleyerek, esnekliğin geleneksel re-entrant yapısına göre daha iyi olduğunu göstermiştir. Khan ve arkadaşları [18], benzer şekilde re-entrant yapısının değiştirilmiş formunun, geleneksel re-entrant yapısıyla kıyaslandığında negatif poisson oranının arttığını belirlemişlerdir. Ataalp ve Türkmen'in yaptıkları çalışmada re-entrant, antichiral ve bal peteği yapılarının darbe yüklemesi altında ökzetik özellik gösteren re-entrant ve antichiral yapıların geleneksel yapılara göre daha yüksek direnç gösterdiklerini bulmuşlardır [19]. Usta ve ekibi [20] re-entrant dolgu çarpışma kutularının dinamik çarpma yükü altında sergilediği davranış incelemiştir. Ökzetik yapılar dinamik yükler altında çarpışma tüplerinin

dayanımını ve enerji absorbe etme kapasitesini artırdığı görülmüştür [20].

Bu çalışmada, mimari eserdeki bir desenden esinlenerek Stravaski adında yeni bir kafes yapı tasarlanmıştır. Çalışmanın asıl amacı, mevcut literatürde daha önce çalışılmayan bir hücre tasarımının ökzetiklik özelliği saptanarak literatüre yeni bir ökzetik özellikli birim hücre yapısı kazandırılmasıdır. Bu nedenle 4×4 matrisli olarak çalışılan kafes yapı, ilk olarak 56×56 mm birim hücre ölçüsü ile 1 mm geometrik iç kalınlıktan başlayarak 1.5 mm, 2 mm, 3 mm, 4 mm, 5 mm, 6 mm, 7 mm, 8 mm'ye kadar tasarımlar gerçekleştirilmiş ve sonlu eleman analizleri yapılmıştır. 56×56 mm'lik birim hücre ile oluşan kafes yapının geometrik iç kalınlığı azaldıkça negatif poisson oranının arttığı gözlenmiştir. Birim hücrelerin ölçüsü değiştirilmeden sadece dikey ve yatay uzantılarından yapılan kısaltmalar ile 40×40 mm'lik ve 30×30 mm'lik birim hücrelerde 4×4 matrisli yapı olacak şekilde 4 mm ve 1 mm geometrik iç kalınlıklarda sonlu eleman analizleri gerçekleştirilmiştir. Analiz sonuçları irdelendiğinde dikey ve yatay uzantılar kısaltıldıkça yani birim hücreler birbirlerine yaklaştıkça negatif poisson oranının arttığı gözlenmiştir.

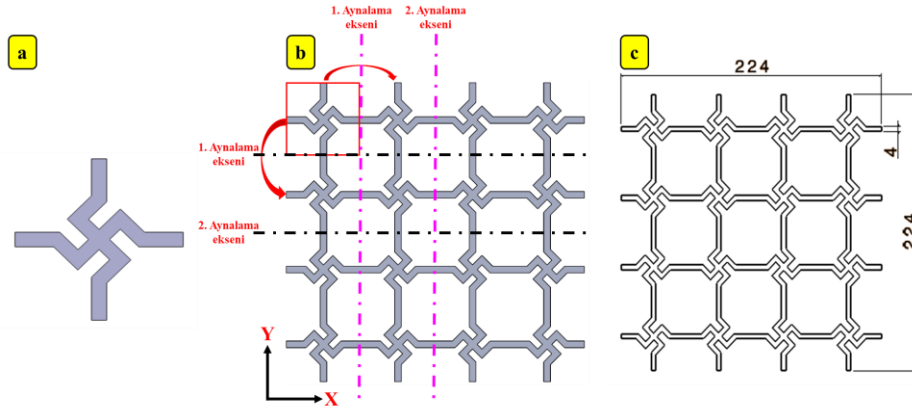
2. MATERYAL VE METOD (MATERIALS AND METHODS)

2.1. Birim Hücre Geometrisi (Birim Hücre Geometrisi)

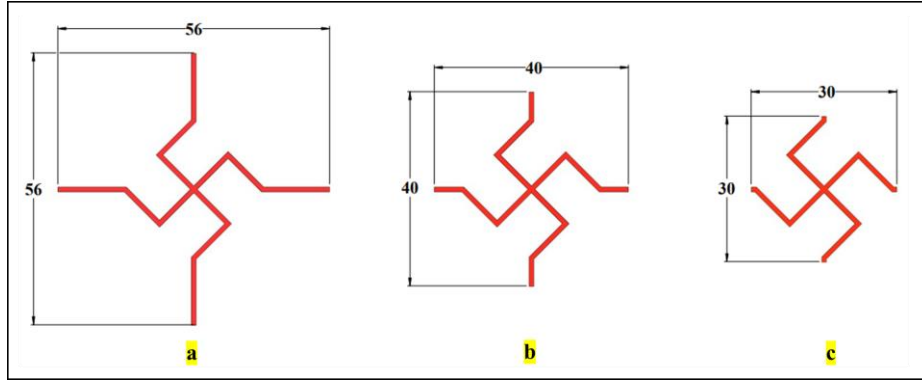
Birim hücre geometrisi bir mimari eserden esinlenerek ızgara yöntemi ile çizilmiştir [21]. Birim hücre tasarımları AUTOCAD yazılımı ile 2B olarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 1a). 2B olarak çizilen tasarımlar SOLIDWORKS çizim programı yardımıyla 3B haline çevrilmiştir. Tasarımı yapılan birim hücre, aynalama yöntemi ile çoğaltılarak matrisli yapılar oluşturulmuştur. Birim hücre, Şekil 1b'de ifade edildiği gibi ilk olarak X eksen yönünde 1. aynalama eksen ve ardından 2. aynalama eksen kullanılarak 4 matrisli hücre yapısı haline getirilir. Daha sonra X eksen yönünde aynalanan bu birim hücreler Y eksen yönünde sırasıyla 1. ve 2. aynalama eksenleri yardımıyla çoğaltılarak 4×4 matrisli kafes yapı elde edilmiştir. İlk olarak Şekil 1c'de görülen 224×224 mm'lik bir simetrik yapı oluşturulmuştur. Bu kafes yapı için 1 mm, 1.5 mm, 2 mm, 3 mm, 5 mm, 6 mm, 7 mm, 8 mm geometrik iç kalınlık ölçüleri değişken olarak kullanılmış ve poisson oranları hesaplanmıştır.

Diğer 4×4 matrisli yapıları oluşturmak için birim hücrenin dikey ve yatay uzantıları kısaltılarak elde

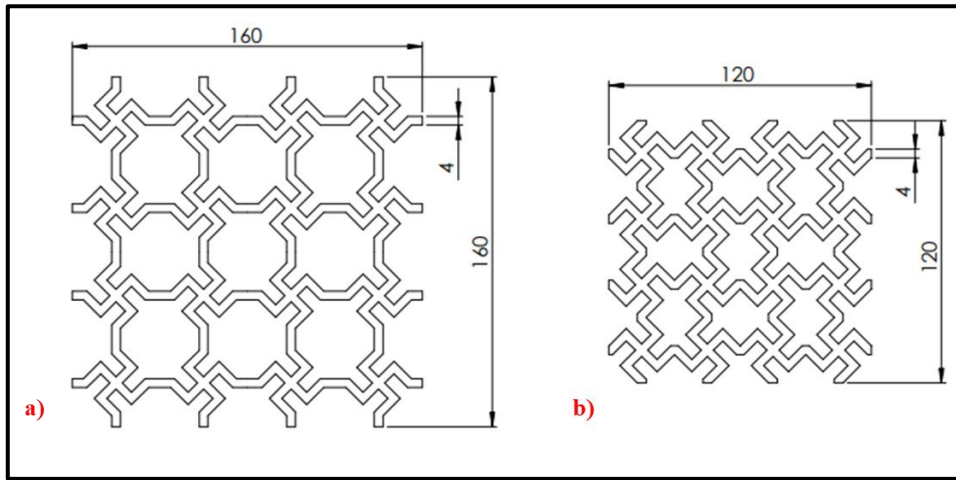
edilen yeni matrisli yapıların poisson oranı değişimi incelenmiştir (Şekil 2).



Şekil 1. a) Birim hücre, b) aynalama yöntemi, c) 4×4 matrisli kafes yapı (a) Unit cell, b) mirroring method, c) 4x4 matrix lattice structure)



Şekil 2. Birim hücrelerin dikey ve yatay uzantılarının kısaltılmış hali a) 56×56 mm'lik birim hücre, b) 40×40 mm'lik birim hücre, c) 30×30 mm'lik birim hücre (The shortened version of vertical and horizontal extensions of unit cells a) 56×56 mm unit cell, b) 40×40 mm unit cell, c) 30×30 mm unit cell)



Şekil 3. Stravaski kafes yapısının a) 160×160 mm'lik matrisli kafes yapısı, b) 120×120 mm'lik matrisli kafes yapısı (Stravaski lattice structure a) 160×160 mm matrix lattice structure, b) 120×120 mm matrix lattice structure)

Birim hücrenin dikey ve yatay uzantılarının kısaltılmasıyla oluşan 160×160 mm ile 120×120 mm'lik matrisli Stravaski kafes yapılarının 1 mm ve 4 mm geometrik iç kalınlıktaki poisson oranları incelenmiştir (Şekil 3).

2.2. Poisson Oranı Hesaplaması (Poisson's Ratio Calculation)

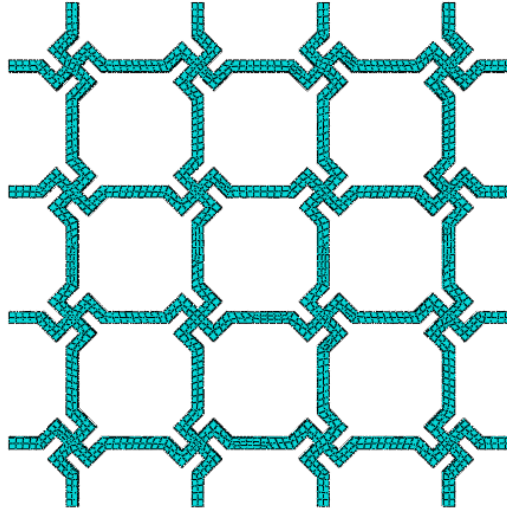
Poisson oranı enine gerilmenin boyuna gerilmeye oranıdır ve işareti negatiftir. Ancak bu negatif olma durumu formülden gelmektedir ve geleneksel malzemelerde çekme kuvveti yönünde, dikey artış olurken yatay yönde daralma meydana gelmektedir [22]. Buradaki daralmadan kaynaklı olarak ϵ_x 'in (-) işaretli olması ve iki eksi işaretin yan yana gelerek pozitif işarete dönüşmesinden ötürü pozitif poisson oranı elde edilmektedir. Negatif poisson oranı ise bu durumun tam tersi şeklinde olmaktadır. Ökzetik bir yapı çekme kuvvetine maruz kalınca dikey yönde artış olurken yatay yönde de genişleme görülmektedir. Bu durumda ϵ_x 'in (+) işaretli olmasıyla poisson oranı negatif olarak elde edilmektedir. Tasarımlarda 1, 2 ve 3 nolu denklemler kullanılarak poisson oranı hesaplamaları yapılmıştır.

$$v = -\frac{\epsilon_x}{\epsilon_y}, \quad v : \text{Poisson oranı} \quad (1)$$

$$\epsilon_x = \frac{\Delta L_x}{L_{x0}} = \frac{L_{x1} - L_{x0}}{L_{x0}}, \quad (2)$$

$$\epsilon_y = \frac{\Delta L_y}{L_{y0}} = \frac{L_{y1} - L_{y0}}{L_{y0}}, \quad (3)$$

Burada, v: Poisson oranı, ϵ_x : enine uzama, ϵ_y : boyuna uzama, L_0 : ilk boy, L_1 : son boy olarak tanımlanmıştır.



Şekil 4. Stravaski yapısının ağ elemanları görünümü (Mesh elements view of the Stravaski structure)

2.3. Sonlu Elemanlar Analizi (Finite Element Analysis)

Yeni kafes yapının negatif poisson oranına sahip olup olmadığını tespit etmek için sonlu elemanlar analizi kullanılmıştır. Solidworks tasarım programından x.t formatında kaydedilen tasarımlar ABAQUS CAE analiz programına aktararak analizleri gerçekleştirilmiştir. Sonlu elemanlar analiz çalışmalarında analiz sonuçlarının doğruluk hassasiyetini arttırmak için mesh kalitesi oldukça önem teşkil etmektedir. Bu sebeple mesh aşamasında düğüm noktaları ne kadar çok olursa, analizlerin sonuçlarının doğruluğuda bir o kadar fazla olacaktır. Bu nedenle tasarımlar Von mises gerilimi maksimum seviyeye ulaşana kadar meshlerdeki ağ modellerinde yapılan uygulamalarla mesh yakınsaması gerçekleştirilmiştir. Tasarımlarda 20 düğümlü kuadratik yapılı, azaltılmış entegrasyonlu altıgen elemanlarla ağ (mesh) haline getirilmiştir. Ağ boyutu, ABAQUS kontrolü tarafından herhangi bir uyarı veya hata bulunmayacak ve ayrıca yapının deformasyonuna uygun olacak şekilde seçilmiştir. Tasarıma ait mesh yapısı Şekil 4'te verilmiştir. Bütün tasarımlarda malzeme olarak yapı çeliği atanmıştır (Tablo 1). Toplamda 12 farklı analiz gerçekleştirilmiştir.

Table 1. Mechanical properties of AlSi10Mg aluminum alloy (AlSi10Mg alüminyum alaşımının mekanik özellikleri)

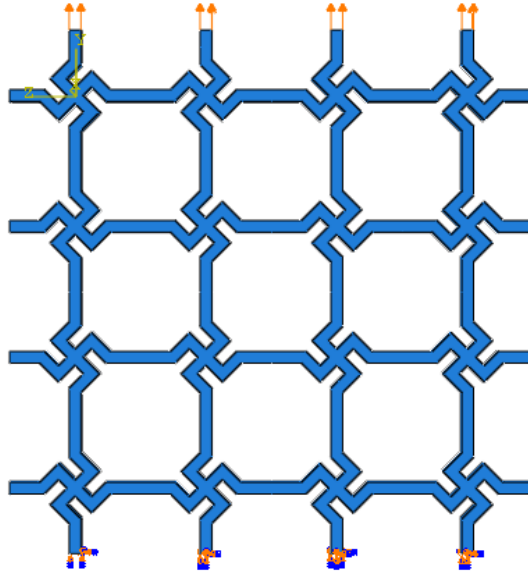
	Density (g/cm ³)	Poisson's ratio	Tensile Strength (Mpa)	Yield Strength (Mpa)	Young's Modulus (Gpa)
AlSi10Mg	2,67 g/cm ³	0,33	440	240	70

2.3.1. Sonlu elemanlar analizinde sınır koşulları

(Boundary conditions in finite element analysis)

Kafes yapıların analizlerini gerçekleştirmek için tasarımın sınır koşulları oluşturulmuştur (Şekil 5). Tasarım alt kısmından sabitlenerek y eksenini yönünde 1 mm'lik sabit uzama gerilmesi

uygulanmıştır. Kafes yapının ağırlığı ihmal edilerek analizler gerçekleştirilmiştir. Tasarımlarda sadece statik analiz yapılmış olup plastik bölgeye geçilmemiştir. Amacımız tasarladığımız yapının negatif poisson oranı hesaplamaktır. Bu nedenle tasarımların poisson oranını belirlemek için X ve Y yönündeki şekil değişimlerine bakılmıştır.



Şekil 5. Stravaski kafes yapısının sınır koşulları (Boundary conditions of Stravaski lattice structure)

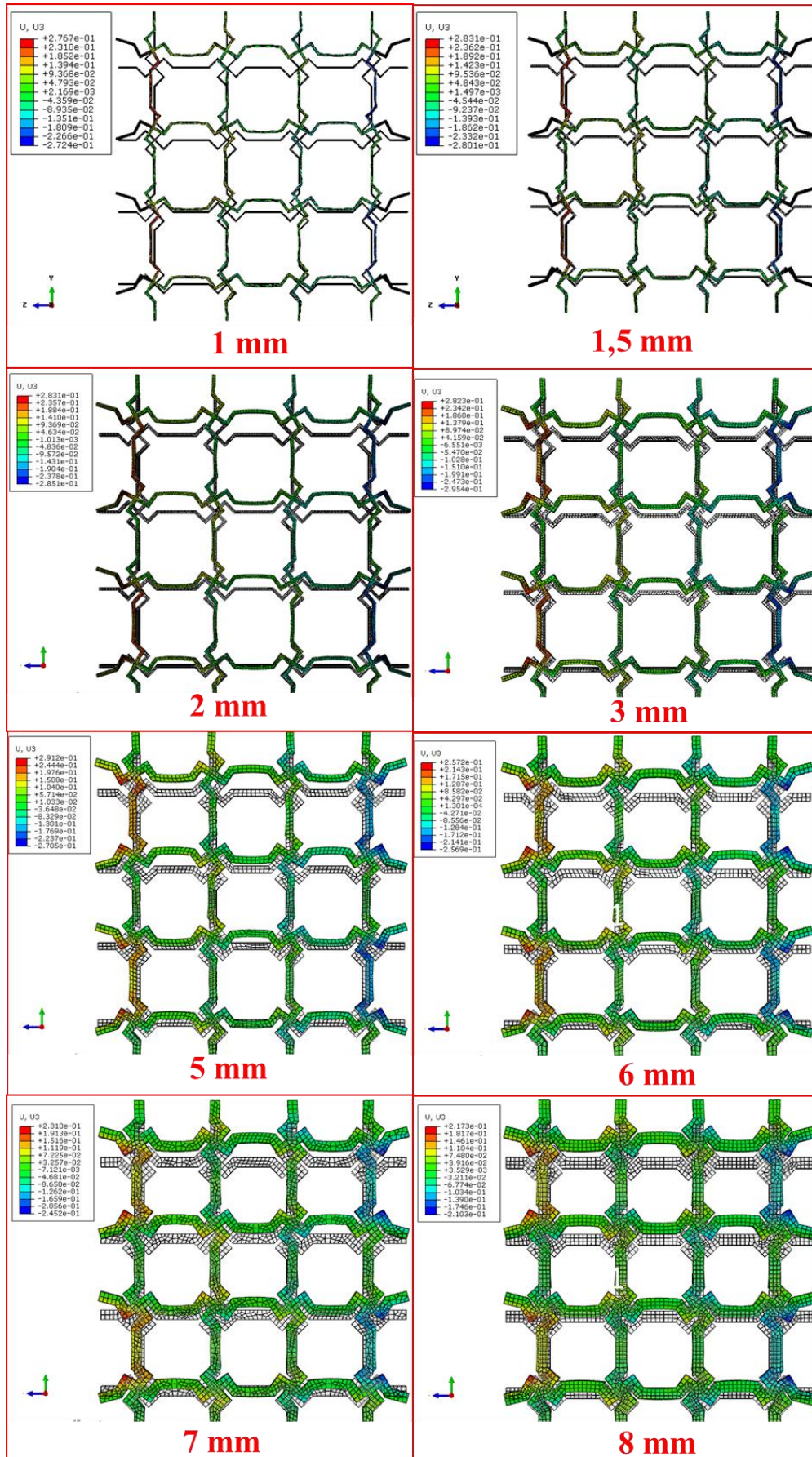
3. BULGULAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

Tasarlanan kafes yapıların, geometrik iç kalınlık ile poisson oranı ilişkisi incelenmiştir. 4×4 matrisli kafes yapılardan 224×224 mm ölçüye sahip olan yapıya 8 farklı geometrik iç kalınlık, 160×160 mm ile 120×120 mm matrisli kafes yapılara 1 mm ve 4 mm olmak üzere 2 farklı geometrik iç kalınlık atanarak toplam 12 farklı kafes yapı analiz edilmiştir. Tasarımların her birine aynı değerlerde çekme işlemi uygulanmıştır. Kafes yapıların, X ve Y eksenini yönündeki şekil değişim miktarları Şekil 6'da görüldüğü gibi denklemlerde yerine konularak poisson oranları hesaplanmıştır.

$$\begin{aligned}\epsilon_x &= \frac{\Delta L_x}{L_0} = \frac{L_1 - L_0}{L_0} = \frac{0.162 - (-0.160)}{224} = 0,00144 \\ \epsilon_y &= \frac{\Delta L_y}{L_0} = \frac{L_1 - L_0}{L_0} = \frac{1}{224} = 0,00446 \\ \nu &= -\frac{\epsilon_x}{\epsilon_y} = \frac{0,00144}{0,00446} \quad \nu : \text{Poisson oranı} = -0,323\end{aligned}$$

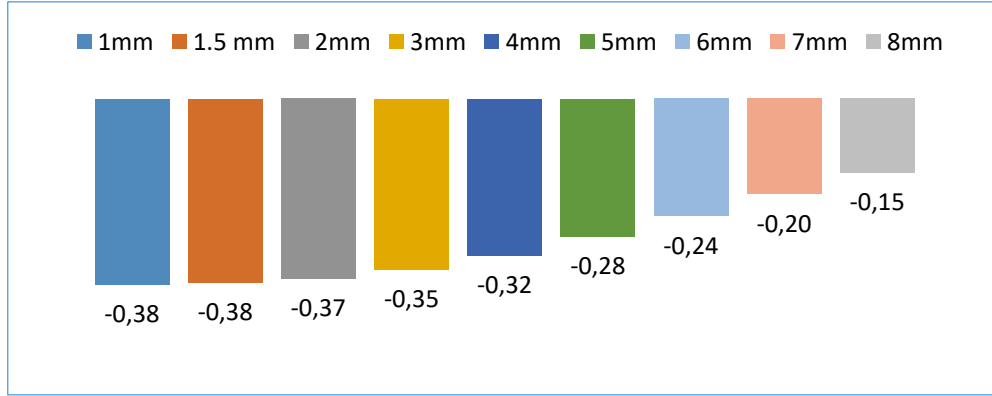
Şekil 6. 4 mm geometrik iç kalınlığa sahip kafes yapının poisson oranı hesaplaması (Poisson's ratio calculation of a lattice structure with 4 mm geometric internal thickness)

Poisson oranları 1 mm ile 8 mm aralığında 8 farklı geometrik iç kalınlığa göre hesaplanmıştır. Her bir kalınlık için deformasyon görüntüleri eklenmiştir (Şekil 7).



Şekil 7. 224×224 mm kafes yapının 1, 1.5, 2, 3, 5, 6, 7, 8 mm kalınlıklarda deformasyonu görüntüleri
(Deformation images of 224×224 mm lattice structure with thicknesses of 1, 1.5, 2, 3, 3, 5, 6, 7, 8 mm)

Aynı analiz, farklı kalınlıklar için tekrarlanırken, kalınlık azaldıkça yapının özetik davranışının arttığı gözlemlenmiştir (Şekil 8).

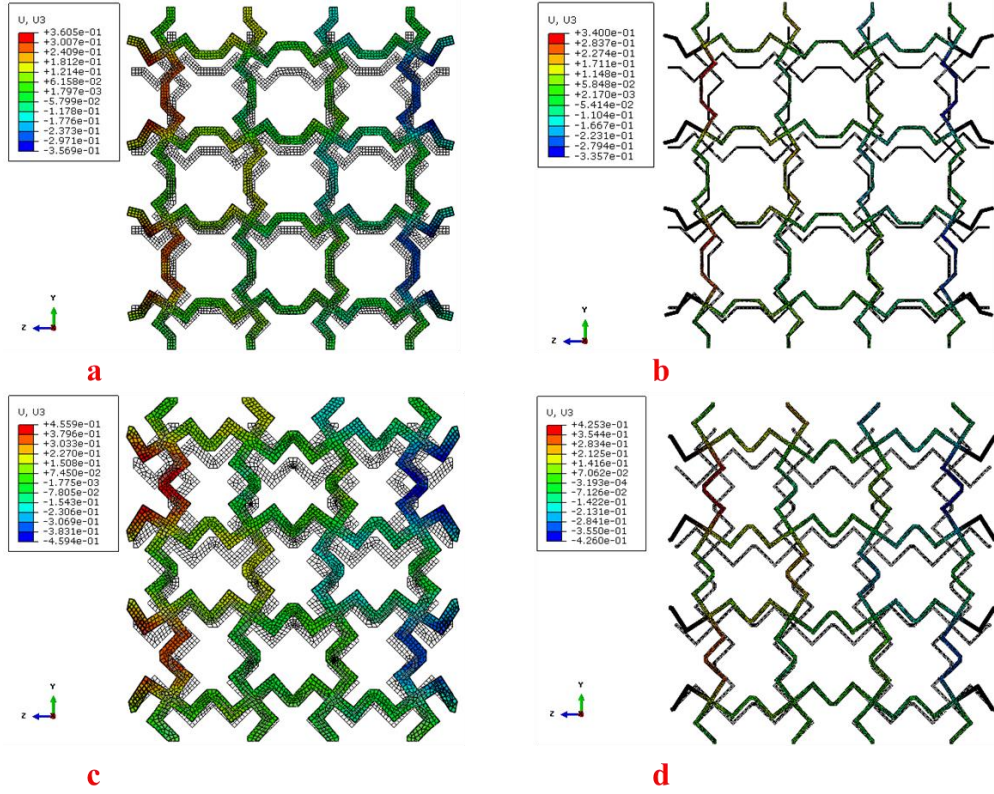


Şekil 8. 224×224 mm kafes yapının farklı geometrik iç kalınlıklarında poisson oranlarının karşılaştırılması (Comparison of Poisson's ratios of 224×224 mm lattice structure at different geometric internal thicknesses)

Şekil 8’de negatif poisson oranı, 1 mm geometrik iç kalınlıkta en yüksek değerde iken 8 mm geometrik iç kalınlıkta en küçük bulunmuştur. Geometrik iç kalınlık 1,5 mm’den 8 mm’ye doğru artıkça negatif poisson oranı doğrusal bir şekilde azalma sergilemiştir. Ancak, 1,5 mm’nin altında ki geometrik iç kalınlıklarda bir doygunluk noktasına ulaşmış ve negatif poisson oranında kayda değer bir değişiklik gözlemlenmemiştir. Farklı geometrik iç kalınlıklarda tasarlanan yapıların ekstrüzyon kalınlıkları 4 mm olarak sabit tutulmuştur. Zhang ve arkadaşları [24] re-entrant kiral yapısının analiz ve deney sonuçlarını incelemiştir. Tek yönlü uygulanan kuvvet yönünde deformasyon sırasında poisson oranı değerinin değiştiğini ve neredeyse -4’e kadar negatif poisson oranına ulaşarak özetik özellik gösterdiğini bulmuşlardır.

Bu çalışmada, dikey ve yatay uzantılarda yapılan kısaltmaların ve geometrik iç kalınlığın poisson oranı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu görülmektedir. Yapılan kısaltmalar poisson oranını belirlemede etkili olduğundan, bu kısaltmaların poisson oranı üzerindeki etkilerini incelemek amacıyla 160×160 mm ve 120×120 mm olarak tasarlanan kafes yapıların analizleri gerçekleştirilmiştir (Şekil 9).

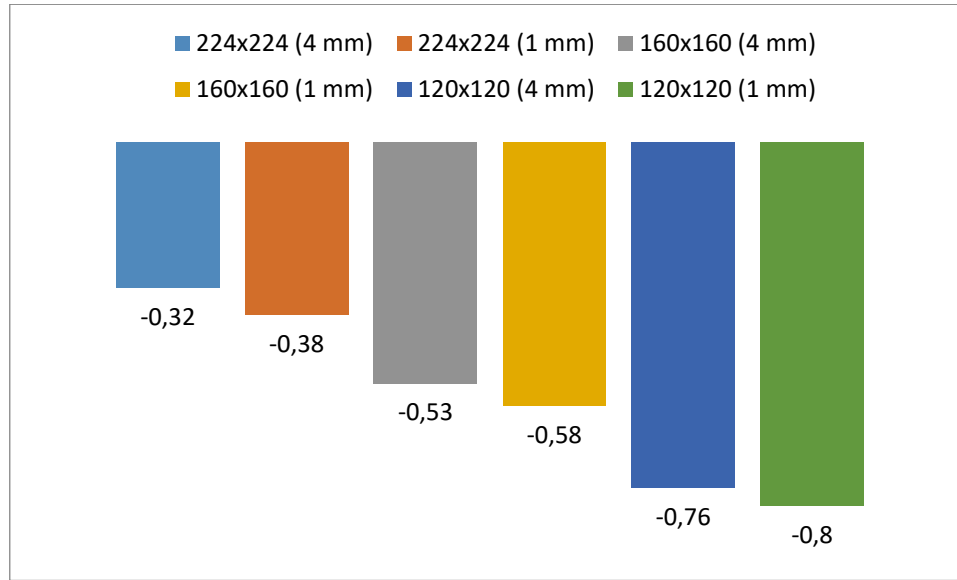
Şekil 9’da görüleceği üzere kafes yapılarda yapılan kısaltmalar artıkça negatif poisson oranı özelliği arttığı gözlenmiştir. 160×160 mm ölçüsündeki stravaski yapısında 4 mm ve 1 mm geometrik iç kalınlıkta X yönündeki genişleme ölçüsü yaklaşık olarak $\pm 3,500 e^{-1}$ bulunurken, 120×120 mm ölçüsündeki Stravaski yapısında ise aynı kalınlıklarda X yönündeki şekil değişimi yaklaşık olarak $\pm 4,500 e^{-1}$ olarak bulunmuştur.



Şekil 9. Farklı ölçülerdeki Stravaski kafes yapılarının deformasyon görüntüleri a) 160×160 mm 4 mm geometrik iç kalınlıktaki stravaski kafes yapısı, b) 160×160 mm 1 mm geometrik iç kalınlıktaki stravaski kafes yapısı, c) 120×120 mm 4 mm geometrik iç kalınlıktaki stravaski kafes yapısı, d) 120×120 mm 1 mm geometrik iç kalınlıktaki stravaski kafes yapısı (Deformation images of Stravaski lattice structures of different dimensions a) 160×160 mm 4 mm geometric internal thickness Stravaski lattice structure, b) 160×160 mm 1 mm geometric internal thickness Stravaski lattice structure, c) 120×120 mm 4 mm geometric internal thickness Stravaski lattice structure, d) 120×120 mm 1 mm geometric internal thickness Stravaski lattice structure)

Bu yeni yapılar, önceki durumda olduğu gibi aynı yöntem ve sıra ile analiz edilmiştir. Yapıların deformasyonu bir öncekine göre çok daha fazla ökzetik davranış göstermektedir. En yüksek negatif poisson oranı 120×120 mm kafes yapının 1 mm geometrik iç kalınlığında -0,80 olarak bulunmuştur. Aynı yapının 4 mm geometrik iç kalınlığında ise bu değer -0,76'ya gerilemiştir. 160 x 160 mm kafes yapıda da aynı durum meydana gelmiş ve 1 mm geometrik iç kalınlıkta negatif poisson oranı -0,58 bulunurken 4 mm geometrik iç kalınlıkta bu değer -0,53 olarak ölçülmüştür. Kısaltma yapılmamış

224×224 mm'lik yapı ise en düşük negatif poisson oranı sergilemiş ve değerler 1 mm geometrik iç kalınlıkta -0,38 iken 4 mm geometrik iç kalınlıkta -0,32 olarak bulunmuştur (Şekil 10). Bu durumun, yapıda ökzetik davranışa neden olan 16 çekirdek figürünün yapılan kısaltmalarla birbirlerine yaklaşmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Meena ve ekibi [25] tarafından çalışılan S şeklindeki birim hücre tasarımında ökzetik tepkilerinin re-entrant hücre yapısına göre daha iyi performans gösterdiği bulunmuştur.



Şekil 10. Dikey ve yatay uzantıların kısaltılmasıyla oluşan yapıların poisson oranı ilişkisi (Poisson's ratio relationship of structures formed by shortening vertical and horizontal extensions)

Genel olarak azalan geometrik iç kalınlığın yapıların negatif poisson oranlarında artışa neden olduğu gözlenmiştir. Gelecek çalışmalarda Stravaski yapısının deneysel çalışmaları literatürde

bulunan diğer geometrik tasarımlarla karşılaştırılarak birbirlerine göre avantaj ya da dezavantajları incelenebilir.

ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

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

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

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

Nuriye Nur KAYA: Modelleme, analiz ve makale yazım sürecini yapmıştır.

She has done the modeling, analysis and article writing process.

İhsan TOKTAŞ: Konu ve makale değerlendirmesine katkıda bulunmuştur.

Contributed to topic and article evaluation.

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. Yu, J. Zhou, H. Liang, Z. Jiang, L. Wu, Mechanical metamaterials associated with stiffness,

rigidity and compressibility: A brief review, Prog Mater Sci. 94 (2018) 114–173. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2017.12.003>.

[2] M. Xu, Z. Xu, Z. Zhang, H. Lei, Y. Bai, D. Fang, Mechanical properties and energy absorption capability of AuxHex structure under in-plane compression: Theoretical and experimental studies, Int J Mech Sci. 159 (2019) 43–57. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2019.05.044>.

[3] J. Banhart, Manufacture, characterisation and application of cellular metals and metal foams, Prog Mater Sci. 46 (2001) 559–632. [https://doi.org/10.1016/S0079-6425\(00\)00002-5](https://doi.org/10.1016/S0079-6425(00)00002-5).

[4] K.E. Evans, A. Alderson, Auxetic Materials: Functional Materials and Structures from Lateral Thinking!, Advanced Materials. 12 (2000) 617–628. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1521-4095\(200005\)12:9<617::AID-ADMA617>3.0.CO;2-3](https://doi.org/10.1002/(SICI)1521-4095(200005)12:9<617::AID-ADMA617>3.0.CO;2-3).

[5] C. Huang, L. Chen, Negative Poisson's Ratio in Modern Functional Materials, Advanced Materials. 28 (2016) 8079–8096. <https://doi.org/10.1002/adma.201601363>.

[6] A. Alderson, K.L. Alderson, Auxetic materials, Proc Inst Mech Eng G J Aerosp Eng. 221 (2007) 565–575. <https://doi.org/10.1243/09544100JAERO185>.

- [7] R. Gatt, L. Mizzi, J.I. Azzopardi, K.M. Azzopardi, D. Attard, A. Casha, J. Briffa, J.N. Grima, Hierarchical Auxetic Mechanical Metamaterials, *Sci Rep.* 5 (2015) 8395. <https://doi.org/10.1038/srep08395>.
- [8] C. Qi, F. Jiang, A. Remennikov, L.-Z. Pei, J. Liu, J.-S. Wang, X.-W. Liao, S. Yang, Quasi-static crushing behavior of novel re-entrant circular auxetic honeycombs, *Compos B Eng.* 197 (2020) 108117. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.108117>.
- [9] L. Yang, O. Harrysson, H. West, D. Cormier, Mechanical properties of 3D re-entrant honeycomb auxetic structures realized via additive manufacturing, *Int J Solids Struct.* 69–70 (2015) 475–490. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2015.05.005>.
- [10] C. Qi, F. Jiang, S. Yang, A. Remennikov, Multi-scale characterization of novel re-entrant circular auxetic honeycombs under quasi-static crushing, *Thin-Walled Structures.* 169 (2021) 108314. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2021.108314>.
- [11] M.-H. Fu, Y. Chen, L.-L. Hu, Bilinear elastic characteristic of enhanced auxetic honeycombs, *Compos Struct.* 175 (2017) 101–110. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.04.007>.
- [12] K.P. Logakannan, V. Ramachandran, Rengaswamy, Z. Gao, D. Ruan, Quasi-static and dynamic compression behaviors of a novel auxetic structure, *Compos Struct.* 254 (2020) 112853. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.112853>.
- [13] M. Xu, D. Liu, P. Wang, Z. Zhang, H. Jia, H. Lei, D. Fang, In-plane compression behavior of hybrid honeycomb metastructures: Theoretical and experimental studies, *Aerosp Sci Technol.* 106 (2020) 106081. <https://doi.org/10.1016/j.ast.2020.106081>.
- [14] H.L. Tan, Z.C. He, K.X. Li, E. Li, A.G. Cheng, B. Xu, In-plane crashworthiness of re-entrant hierarchical honeycombs with negative Poisson's ratio, *Compos Struct.* 229 (2019) 111415. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.111415>.
- [15] Y. Chen, T. Li, Z. Jia, F. Scarpa, C.-W. Yao, L. Wang, 3D printed hierarchical honeycombs with shape integrity under large compressive deformations, *Mater Des.* 137 (2018) 226–234. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.10.028>.
- [16] Y. Sun, N. Pugno, Hierarchical Fibers with a Negative Poisson's Ratio for Tougher Composites, *Materials.* 6 (2013) 699–712. <https://doi.org/10.3390/ma6020699>.
- [17] X. Zhang, R. Tian, Z. Zhang, G. Li, W. Feng, In-plane elasticity of a novel vertical strut combined re-entrant honeycomb structure with negative Poisson's ratio, *Thin-Walled Structures.* 163 (2021) 107634. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2021.107634>.
- [18] S.Z. Khan, F. Mustahsan, E.R.I. Mahmoud, S.H. Masood, A novel modified re-entrant honeycomb structure to enhance the auxetic behavior: Analytical and numerical study by FEA, *Mater Today Proc.* 39 (2021) 1041–1045. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.05.083>.
- [19] YL Tezi: Numerical and experimental investigation of the impact performance of 3d lattices with negative poisson's ratio / Negatif poisson oranlı 3 boyutlu latislerin çarpma dayanıklılığın deneysel ve sayısal İncelenmesi Yazar:Altuğ Ataalp Danışman: Prof. Dr. Halit Süleyman Türkmen
- [20] F.Usta, Ökzetik Dolgulu Çarpışma Tüplerinin Dinamik Çarpma Yükleri Altında Deneysel Ve Sayısal Olarak İncelenmesi. Conference: 8. Ulusal Havacılık Ve Uzay Konferansı (UHUK-2020) At: Türk Hava Kurumu Üniversitesi, Ankara
- [21] Jay Bonner, *Islamic geometric patterns*, New York, USA, 1999.
- [22] M. Lei, W. Hong, Z. Zhao, C. Hamel, M. Chen, H. Lu, H.J. Qi, 3D Printing of Auxetic Metamaterials with Digitally Reprogrammable Shape, *ACS Appl Mater Interfaces.* 11 (2019) 22768–22776. <https://doi.org/10.1021/acsami.9b06081>.
- [23] H. Ateş, N. Kaya, Mechanical and Microstructural Properties of Friction Welded AISI 304 Stainless Steel to AISI 1060 Steel AISI 1060,
- [24] J. Zhang, G. Lu, Z. Wang, D. Ruan, A. Alomarah, Y. Durandet, Large deformation of an auxetic structure in tension: Experiments and finite element analysis, *Compos Struct.* 184 (2018) 92–101. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.09.076>.
- [25] [25] K. Meena, S. Singamneni, Investigation of a Novel Chiral S-Shaped Auxetic Structure under Large Tensile Deformation, *Physica Status Solidi*

(b) 257 (2020).
<https://doi.org/10.1002/pssb.202000239>.

P-Tipi Bi_2Te_3 Yarıiletkenlerin 291-373K Sıcaklık Aralığındaki Termoelektrik Karakterizasyonu

Raşit AHISKA¹ , Günay ÖMER² , Ayfer AYDOĞAN^{1*} 

¹Gazi Üniversitesi, Fen Fakültesi, Fizik Bölümü, Yenimahalle, Ankara, Türkiye

²Ankara Medipol Üniversitesi, Sağlık Hizmetleri Meslek Yüksekokulu, Radyoterapi Programı, Ankara, Türkiye

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 22/10/2023
Düzeltilme: 10/12/2023
Kabul: 16/01/2024

Anahtar Kelimeler

P-tipi (Bi_2Te_3) Sb_2
yarıiletkeninin elde
edilmesi
P-Tipi (Bi_2Te_3) Sb_2
termoelektrik
karakterizasyonu
Eritilmiş ve preslenmiş
P-tipi (Bi_2Te_3) Sb_2
numunelerin Z
parametresinin
karşılaştırılması

Grafik Özet (Graphical/Tabular Abstract)

Bölge eritme ve pressleme yöntemi kullanılarak iki farklı P-tipi Bi_2Te_3 yarıiletkenleri elde edildi. Bu yarıiletken numunelerin termoelektrik özellikleri; Seebeck katsayısı, elektriksel iletkenlik, ısı iletkenliği ve Z parametreleri 291-393K sıcaklarında 10K aralıklarla Harman tekniği kullanılarak ölçümler yapıldı. Bunun için özel geliştirilen α - σ ölçüm aleti kullanıldı. Oda sıcaklığında Z parametresi bölge eritme yöntemi ile elde edilen numune için $4 \times 10^{-3} \text{K}^{-1}$, pressleme yöntemi ile elde edilen numune için $3,3 \times 10^{-3} \text{K}^{-1}$ olarak ölçüldü. / Two different P-type Bi_2Te_3 semiconductor samples; Seebeck coefficient, electrical conductivity, thermal conductivity and Z parameters were measured at temperatures of 291-393K at 10K intervals using the Harman technique. A specially developed α - σ measuring instrument was used for this purpose. At room temperature, the Z parameter was measured as $4 \times 10^{-3} \text{K}^{-1}$ for the sample obtained by zone melting method and $3.3 \times 10^{-3} \text{K}^{-1}$ for the sample obtained by pressing method.



Şekil A: Bölge eritme ve pressleme yöntemi ile elde edilen numunelerin α - σ ölçüm aleti ile parametreler tespit edildi / **Figure A:** The parameters of the samples obtained by zone melting and pressing method were determined with α - σ measuring instrument.

Article Info

Research article
Received: 22/10/2023
Revision: 10/12/2023
Accepted: 16/01/2024

Keywords

Obtaining P-Type
(Bi_2Te_3) Sb_2 semiconductor
Thermoelectric
characterisation of P-Type
(Bi_2Te_3) Sb_2
Comparison of the Z
parameter of melted and
pressed P-type (Bi_2Te_3) Sb_2
samples

Highlights (Önemli noktalar)

- P-tipi (Bi_2Te_3) Sb_2 numunelerinin Z parametrelerinin karşılaştırılması / Comparison of Z parameters of P-type (Bi_2Te_3) Sb_2 samples
- Düşük maliyetli ve yüksek kaliteli numune elde edilmesi / Low cost and high quality samples
- Bölge eritme yöntemi ile elde edilen yarıiletkenlerin pressleme yöntemine göre daha avantajlı olması / It has been determined that semiconductors obtained by zone melting method are more advantageous than pressing method.

Amaç (Aim): Bölge eritme ve pressleme yöntemi ile elde edilen Bi_2Te_3 yarıiletkeninin parametreleri ayrı ayrı ölçülerek Z parametresi yüksek olan numunenin tespiti sağlanmıştır. / The parameters of Bi_2Te_3 semiconductor obtained by zone melting and pressing method were measured separately and the sample with high Z parameter was determined.

Özgünlük (Originality): Geliştirilen α - σ ölçüm sistemi gerekirse her türlü yarıiletkenin hem yüksek hem de düşük sıcaklıklardaki parametrelerinin ölçülmesinde kullanılabileceği görülmüştür. / The developed measurement system can be used to measure the parameters of all kinds of semiconductors at both high and low temperatures if necessary.

Bulgular (Results): Oda sıcaklığında, Z parametresi iki numune için sırasıyla $4 \times 10^{-3} \text{K}^{-1} / 3,3 \times 10^{-3} \text{K}^{-1}$ olarak ölçüldü. Buna ek olarak ısı iletkenliği, termoemk ve elektrik iletkenliği ölçüldü ve alınan sonuçların literatürle karşılaştırıldığında verilen birbirine yakın olduğu tespit edildi. / At room temperature, the Z parameter was measured as $4 \times 10^{-3} \text{K}^{-1} / 3.3 \times 10^{-3} \text{K}^{-1}$ for the two samples, respectively. In addition, thermal conductivity, thermoemcs and electrical conductivity were measured and the results were found to be close to each other when compared with the literature.

Sonuç (Conclusion): İki farklı yöntem ile elde edilen numunelerin parametreleri kıyaslandığında bölge eritme yönteminin pressleme yöntemine göre daha yüksek Seebeck katsayısı ve düşük ısı iletkenlik sağlamasından dolayı bu yöntem pressleme yöntemine göre daha avantajlıdır. / When the parameters of the samples obtained by two different methods are compared, this method is more advantageous than the pressing method because the zone melting method provides higher Seebeck coefficient and lower thermal conductivity than the pressing method.



P-Tipi Bi_2Te_3 Yarıiletkenlerin 291-373K Sıcaklık Aralığındaki Termoelektrik Karakterizasyonu

Raşit AHISKA¹ , Günay ÖMER² , Ayfer AYDOĞAN^{1*}

¹Gazi University, Faculty of Science, Department of Physics, Yenimahalle, Ankara, Turkey

²Ankara Medipo University, Vocational Scholl of Health Services, Radiotherapy Program, Ankara, Turkey

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 22/10/2023
Düzeltilme: 10/12/2023
Kabul: 16/01/2024

Anahtar Kelimeler

P-tipi (Bi_2Te_3) Sb_2
yarıiletkeninin elde edilmesi
P-Tipi (Bi_2Te_3) Sb_2
termoelektrik karakterizasyonu
Eritilmiş ve preslenmiş
P-tipi (Bi_2Te_3) Sb_2
numunelerin Z parametresinin karşılaştırılması

Öz

Bölge eritme ve pressleme yöntemi kullanılarak iki farklı P-tipi Bi_2Te_3 yarıiletkenleri elde edildi. Bu yarıiletken numunelerin termoelektrik özellikleri; Seebeck katsayısı, elektriksel iletkenlik, ısı iletkenliği ve Z parametreleri 291-393K sıcaklarında 10⁰K aralıklarla Harman tekniği kullanılarak ölçümler yapıldı. Bunun için özel geliştirilen α - σ ölçüm aleti kullanıldı. Oda sıcaklığında Z parametresi bölge eritme yöntemi ile elde edilen numune için $4 \times 10^{-3} \text{K}^{-1}$, pressleme yöntemi ile elde edilen numune için $3,3 \times 10^{-3} \text{K}^{-1}$ olarak ölçüldü. Buna ek olarak ısı iletkenliği, termoemk ve elektrik iletkenliği ölçüldü ve alınan sonuçların literatürle karşılaştırıldığında verilen birbirine yakın olduğu tespit edildi.

Thermoelectric Characterization of P-type Bi_2Te_3 Semiconductors in the Temperature Range of 291-373K

Article Info

Research article
Received: 22/10/2023
Revision: 10/12/2023
Accepted: 16/01/2024

Keywords

Obtaining P-Type
(Bi_2Te_3) Sb_2 semiconductor
Thermoelectric
characterisation of P-Type
(Bi_2Te_3) Sb_2
Comparison of the Z
parameter of melted and
pressed P-type (Bi_2Te_3) Sb_2
samples

Abstract

Two different P-type Bi_2Te_3 semiconductors were obtained using zone melting and pressing method. The thermoelectric properties of these semiconductor samples; Seebeck coefficient, electrical conductivity, thermal conductivity and Z parameters were measured at temperatures of 291-393K at 10⁰K intervals using the Harman technique. A specially developed α - σ measuring instrument was used for this purpose. At room temperature, the Z parameter was measured as $4 \times 10^{-3} \text{K}^{-1}$ for the sample obtained by zone melting method and $3.3 \times 10^{-3} \text{K}^{-1}$ for the sample obtained by pressing method. In addition, thermal conductivity, thermoemulsion and electrical conductivity were measured and it was determined that the results obtained were close to each other when compared with the literature.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Bölge eritme ve pressleme yöntemi kullanılarak iki farklı P-tipi Bi_2Te_3 yarıiletkenleri elde edildi. Bu yarıiletken numunelerin termoelektrik özellikleri; Seebeck katsayısı, elektriksel iletkenlik, ısı iletkenliği ve Z parametreleri 291-393K

sıcaklarında 100K aralıklarla Harman tekniği kullanılarak ölçümler yapıldı. Bunun için özel geliştirilen α - σ ölçüm aleti kullanıldı. Oda sıcaklığında Z parametresi bölge eritme yöntemi ile elde edilen numune için $4 \times 10^{-3} \text{K}^{-1}$, pressleme yöntemi ile elde edilen numune için $3,3 \times 10^{-3} \text{K}^{-1}$ olarak ölçüldü. Buna ek olarak ısı iletkenliği,

termoemk ve elektrik iletkenliği ölçüldü ve alınan sonuçların literatürle karşılaştırıldığında verilen birbirine yakın olduğu tespit edildi.

2. MATERYALLER VE METODLAR (MATERIALS AND METHODS)

Bu çalışmada, bölge eritme (Travelling Heater Method, THM) ve pressleme yöntemi ile elde edilmiş P-tipi 2 farklı yarıiletken kullanılmıştır. Her yarıiletken numune, ayrı ayrı incelenmiş ve elde edilen parametrelerin gereken analizleri yapılmıştır. Bütün numunelerin elektrik iletkenliği (σ) ve termoemksi (α), oda sıcaklığından (18°C) 100°C'lik ortam sıcaklığına kadar, her 10°C'de bir, 10 kere ölçülmüş ve ortalama değerleri alınmıştır. Böylelikle P tipi eritilmiş (Er) ve P tipi presslenmiş (Pr) yarıiletkenlerinin ortalama σ ve α değerlerinin sıcaklığa göre değişimi tespit edilmiştir. Bu değerleri kullanarak ısı iletkenliği (χ) ve $Z(\frac{z=\alpha^2\sigma}{\chi})$ parametrelerinin sıcaklıkla değişimi bulunmuştur. Ayrıca $\sigma = \sigma(T)$ (Burada T = 273 °C + t °C Kelvin cinsinden sıcaklığı ifade etmektedir.) fonksiyonunun eğimini hesaplayarak her bir yarıiletken için yasak bölge değeri Eg (eV) ayrı ayrı bulunmuştur.

Bölge eritme (THM) yöntemi ile elde edilmiş P tipi yarıiletkenler için "%74 Bi₂Te₃ + %26 Sb₂Te₃" bileşimi kullanılmıştır. Kuvartz tüplerin iç çapına

göre üretilen malzemelerin kesitleri değişebilmektedir. Deneyde çapı 8mm olan yarıiletkenler kullanılmıştır. Bunlardan N tipi yarıiletkenlerin erime sıcaklığı 706°C iken P tipinin 711°C 'dir. Presleme yöntemi toz metalurji tekniğine dayanır. Etrafı ısıtıcıyla sarılmış düz kare prizma şeklindeki kalıbın içine toz haline getirilmiş "%80 Bi₂Te₃ + %20 Bi₂Se₃" den oluşan bir karışım konulur. Kalıp 400°C'e kadar ısıtılır ve pres vasıtasıyla 7atm=7.105Pa'lık basınç uygulanır. Kalıbın boyutlarına uygun elde edilen yarıiletkenlerin kalınlıkları değişir. Deneyde kesiti kare şeklinde ve kenarı 7mm (alanı 49 mm²) olan P tipi presslenmiş yarıiletkenler için "%74 Bi₂Te₃ + %26 Sb₂Te₃'den" oluşan toz karışımı kullanılmıştır [10-12].

Çalışmada kullanılan yarıiletkenlerin elde edilmiş yöntemine göre şekilleri değişmektedir. Bölge eritme yöntemi ile elde edilen numunelerin yüksekliği 2cm ve çapı 8mm olan silindir şeklinde iken, presslenmiş numunelerin yüksekliği 2cm tabanı 7mm x 7mm olan kareden oluşan düz kare prizma şeklindedir. Yarıiletkenleri tiplerine göre gruplara ayırmak için TES Ltd şirketinde geçirilen özel N-P tipi belirleme akıllı sistem kullanıldı [1-3]. Bu cihazın genel görüntüsü Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. N-P tip belirleme cihazı ve Numuneler (N-P type device and Samples)

Çalışmada 2 adet numunenin iletkenlik-sıcaklık ve termoemk-sıcaklık değişimini araştırmak için T.C. Harman yöntemi uygulanmıştır. Bunun için $\alpha - \sigma$ ölçüm aleti (sistemi) tasarlanmış ve yapılmıştır. Bütün deney düzeneği 1 adet $\alpha - \sigma$ ölçüm aleti, 1 adet ayarlama ünitesi, 3 adet dijital multimetreden oluşmaktadır. $\alpha - \sigma$ ölçüm aleti aşağıdaki resimde

gösterilmiştir. $\alpha - \sigma$ ölçüm aleti, üzerinde 2 adet çelik destek monte edilmiş sabit bir taban, destekler üzerinde hareket edebilen ısıtıcı ve aralığı 1cm olan iki elektrotlu hareketli sistemden oluşmaktadır. Destekler arasında çapı 4 cm olan delikli bir örs bulunmaktadır. Aynı çapa sahip ısıtıcı, ince bir boru üzerine sarılmış telden yapılmıştır. Örs ve ısıtıcının

deliklerinden geçerek yarıiletken numunelerin alt ve üst yüzeyleri ile temas edebilecek şekilde bakır(Cu) ve konstandan (%60 Cu + %40 Ni) yapılmış termokupulların uçları vidalı üst kapaklarla sabitleştirilmiştir. Örs üzerinde bulunan yarıiletken numuneyi sabit tutmak ve üzerindeki potansiyel farkını ölçebilmek için ebonitten üstü ile bir yanı açık delikli kapak şeklinde bir tutucu yapılmıştır. Tutucu, örs üzerine takıldıktan sonra içine numune konulur ve ısıtıcı yavaşça hareket ettirilerek yarıiletkenin üzerine tam temas sağlayacak şekilde indirilir. Maksimum temas sağlamak için ısıtıcıyı oluşturan çelik parçanın alt kısmı daire şeklinde

oyulmuştur. Yarıiletken üzerindeki voltajı ölçmek için iğne şeklinde yapılmış yaylı ve hareketli elektrotlar kullanılmıştır. Yarıiletken alete yerleştirildikten sonra elektrotlar tam temas edecek şekilde yaklaştırılarak yandaki vidayla sabitleştirilmiştir.



Şekil 2. $\alpha - \sigma$ Ölçüm aleti ve iklimlendirme dolabı ($\alpha - \sigma$ Measuring instrument and air conditioning cabinet)

Isıtıcının giriş kabloları, termokupulların ve elektrotların çıkış uçları tabanın alt kısmında giriş - çıkış jakı üzerine lehimlenmiştir. Aynı tip jak ayarlama ünitesi üzerine de monte edilmiştir. Bunları birbirine bağlamak için çoklu kablo kullanılmıştır. Ayarlama ünitesi tek sistemle yarıiletkenlerin α ve σ 'sının ölçümünü sağlar. Ünitenin üzerindeki " $\alpha - \sigma$ " anahtarı " σ "; "Emk-V" anahtarı "V-(voltaj)" konumunda iken yarıiletkenin σ 'sı ölçülür. Yarıiletkenin α 'sını ölçmek için "Emk - V" anahtarı "E", " $\alpha - \sigma$ " ise " α " konumuna getirilmelidir. Ünitenin üzerindeki "Rs" çıkışına $0,01 \Omega$ 'luk standart direnç, "A" çıkışına ampermetre, "mV" çıkışına ise bir DC voltmetre bağlanmaktadır. Yarıiletkenin üzerinden geçen akım şiddetini (maksimum $I = 1A$ geçmelidir), yarıiletkenin uçları arasında sıcaklık farkını sabit tutmak ve ısıtıcıya uygulanan voltajı ayarlamak için tüm sistemin beslemesi bir varyak ile sağlanmaktadır. Parametrelerin ortam sıcaklığına göre araştırılması için $\alpha - \sigma$ ölçüm aleti yarıiletken numune ile beraber sıcaklığı kontrol edilebilen bir iklimlendirme cihazın içine konulmaktadır. Cihazın sıcaklığı ayarlandıktan sonra sabitleşmesi için beklenmiş ve daha sonra ölçümler yapılmıştır. Deneyde SFL Advanced High

Temperature & Environmental Systems iklimlendirme kullanılmıştır. Ölçümler oda sıcaklığından($18^{\circ}C$) başlamak üzere $100^{\circ}C$ 'ye kadar her defasında $10^{\circ}C$ artırılarak yapılmıştır. Yarıiletkenlerden geçen AC akım şiddetini, standart direnç üzerindeki V_s , numunenin üzerindeki V_x voltajları ve yarıiletkenin meydana getirdiği termoemk veya termokupulların oluşturduğu voltajı ölçmek için 3 adet Fluke 45 Dual Display multimetre kullanılmıştır. $\alpha - \sigma$ ölçüm aleti ve iklimlendirme cihazı Şekil 2'de gösterilmiştir.

Modern yarıiletkenler teorisine göre ister özden isterse P tipi yarıiletkenlerin tüm fiziksel özellikleri yarıiletkenlerdeki yük konsantrasyonuna (n) bağlıdır. Yarıiletkenlerde n değeri sıcaklığa, bant yapısına ve taşıyıcıların kristal örgü ile etkileşme (fononlar üzerinde saçılma) mekanizmasına göre değişmektedir. Bir yarıiletkenin α , σ ve χ 'sı, n'ye göre değiştiği için bunların arasında da bir bağlantı mevcuttur. P tipi yarıiletkenlerde, yüksek sıcaklıklarda (oda ve daha yüksek sıcaklıklarda) iletkenlik katsayısı (σ) sıcaklığa göre,

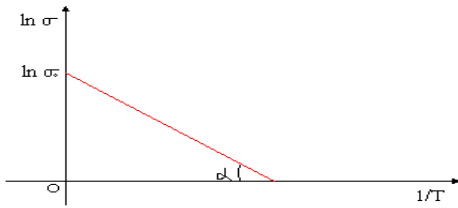
$$\sigma = \sigma_0 e^{\frac{-E_g}{2kT}} \quad (1)$$

Şeklinde değişmektedir. Burada σ_o sıcaklığa bağlı olmayan bir sabittir ve $T \rightarrow \infty$; yani tüm yük taşıyıcılar iletimde iken, σ 'yı ifade eder. σ_o 'ın yaklaşık değeri 105 tir.

Bu eşitliğin iki tarafının doğal logaritmasını alırsak

$$\ln \sigma = \ln \sigma_o - \frac{Eg}{2kT} \quad (2)$$

denklemini elde ederiz. Burada "k = 10^{-4} eV / K" Boltzman sabiti, T Kelvin cinsinden sıcaklıktır. Buradaki $\ln \sigma$ 'nın $1/T$ 'ye göre bir lineer fonksiyon olduğu açıktır. ($\ln \sigma \sim 1/T$)(bkz. Şekil 3)



Şekil 3. $\ln \sigma = f\left(\frac{1}{T}\right)$ fonksiyonunun grafiği (Graph of function $\ln \sigma = f\left(\frac{1}{T}\right)$)

Bu fonksiyonun grafiği bir doğrudur ve eğimi (tan α) $\frac{Eg}{2k}$ dir. Yani Eğim = $\frac{Eg}{2k}$ (3) ifadesi yazılabilir. Demek ki bir yarıiletkenin $\ln \sigma = f\left(\frac{1}{T}\right)$ fonksiyonu ve eğimi elde edilirse o zaman

$$Eg = 2kEğim \quad (4)$$

formülünden Eg yasak bölgenin değeri hesaplanabilir. Makalede bu yöntemle eritilmiş ve presslenmiş P tipi yarıiletkenlerinin Eg 'leri hesaplanmıştır.

Bir yarıiletkende ısı iletimi (χ), yük taşıyıcıların (χ_y) ve fononların (χ_f) katkısıyla meydana gelmektedir. P tipi yarıiletkenlerde, orta ve yüksek sıcaklıklarda elektronların veya deliklerin ısı iletimindeki katkısı sıcaklığa göre değişmez. Yani $\chi_y \neq f(T)$ ve χ 'e veya χ_p sabittir. İncelediğimiz termoelektrik yarıiletkenler için $\chi_y = 9,8.10^{-3}$ W/cmK dir. Teorik araştırmalara

göre N veya P tipi yarıiletkenlerde

$$\sigma = 2,5.10^{-3} \Omega^{-1} cm^{-1} \text{ değeri için}$$

$$\chi = 9,8.10^{-3} + \frac{2k^2}{e^2} .\sigma T \quad (5)$$

$\sigma > 3,5.10^{-3} \Omega^{-1} cm^{-1}$ için ise

$$\chi = 9,8.10^{-3} + \frac{3k^2}{e^2} .\sigma T \quad (6)$$

formülleri kullanılabilir. Burada $e = -1,6.10^{-19}$ C elektron yüküdür. Burada, kullanılan tüm yarıiletkenlerde $\sigma < 2500 \Omega^{-1} cm^{-1}$ olduğuna göre ısı iletkenliğini hesaplamak için

$$\chi = 9,8.10^{-3} + \frac{2k^2}{e^2} .\sigma T \text{ veya}$$

$$\chi = 9,8.10^{-3} + 0,7.10^{-8} \sigma T \quad (7)$$

formülü kullanılmıştır.

Direkt ölçülen α , σ ve hesaplanan χ değerlerini kullanarak yarıiletkenlerin kalitesini karakterize eden Z parametresi hesaplanmıştır;

$$Z = \frac{\alpha^2 \sigma}{\chi} \quad (8)$$

Her bir yarıiletken numune için α , σ , χ ve Z parametrelerinin (18°C - 100°C) yani 291K – 373K sıcaklık aralıklarındaki değişimi grafiklere aktarılmıştır. Ayrıca $\sigma = \sigma\left(\frac{1}{T}\right)$ fonksiyonundan yarıiletkenlerin Eg parametresi de tespit edilmiştir. Böylece geliştirilen α - σ ölçüm sistemi ile iki farklı yöntemle elde edilmiş P tipi termoelektrik yarıiletkenlerin 5 parametresi (α , σ , χ , Z ve Eg) incelenmiş ve literatürdeki teorik ve deneysel sonuçlarla kıyaslanmıştır.

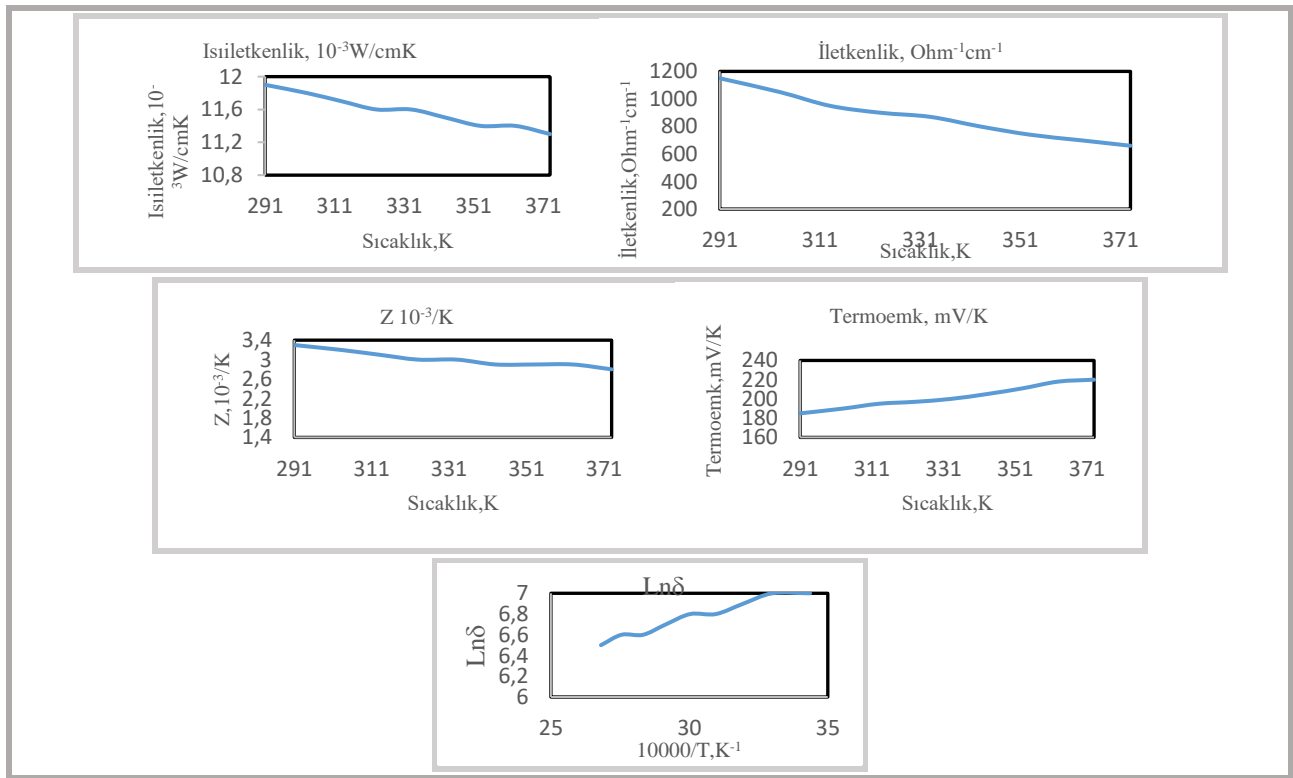
3. BULGULAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

Çalışmada eritilmiş, silindirik şekilde, yarıçapı $r=4\text{mm}$ (kesitalanı $\Rightarrow A = \pi.r^2 = 3,14.0,4^2 = 5.10^{-3}\text{cm}^2$), uzunluğu 3cm olan 1 adet P tipi yarıiletken kullanılmıştır. Aynı boyuttaki preslenmiş yarıiletkenler, düz kare prizma şeklinde olup kesit alanları $A = a^2 = 0,7\text{cm} \times 0,7\text{cm} = 0,49\text{cm}^2$ dir. Yarıiletkenlerin üzerindeki gerilim düşümü (V_x) α - σ ölçüm aletinin elektrotları arasındaki sabit uzaklıkta iki noktadan alınmıştır

olduğuna göre bütün numuneler için $l = 1\text{cm}$ olarak kabul edilmiştir. 2 gruba ayrılan numunelerin farklı sıcaklıklarda, her biri için ayrı ayrı 10 kere ölçümler alınarak ortalama değerleri hesaplanmıştır. Böylelikle hem ölçümde meydana gelebilecek hatalar önlenmiş hem de ölçümlerin kontrolü yapılmıştır. α ve σ 'nın ortalama ve bu değerlere göre hesaplanan χ ve Z değerlerinin sıcaklığa göre değişiminin tablo ve grafikleri de her numune için Şekil 4 - 5'de ayrı ayrı verilmiştir. Ayrıca tablolarda E_g 'nin değeri de hesaplanarak gösterilmiştir

Tablo 1. P Tipi Preslenmiş (P Type Pressed)

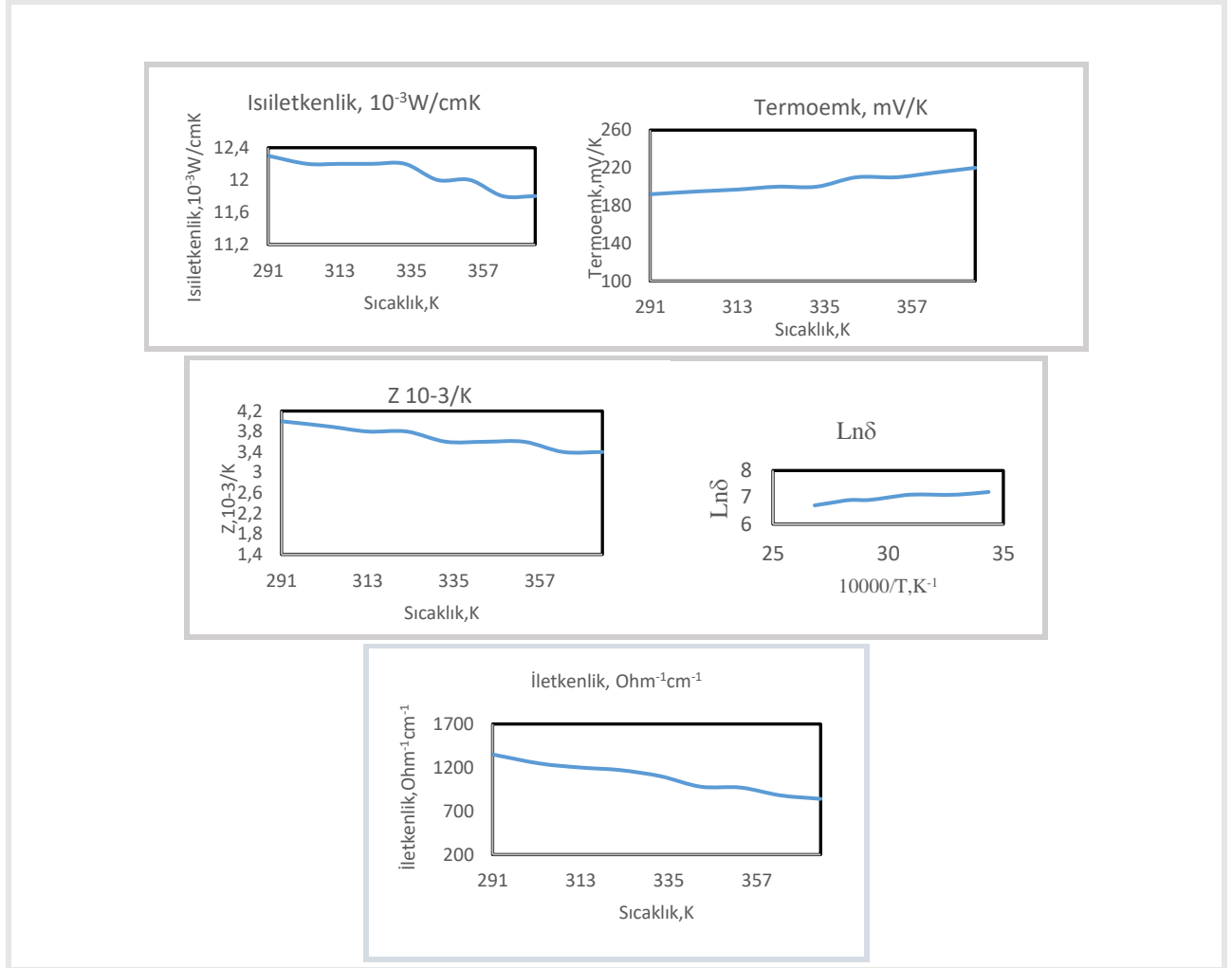
Sıcaklık, K	10000/T, 1/K	İletkenlik, $\text{Ohm}^{-1}\text{cm}^{-1}$	Termoemk, $\Delta V/\text{K}$	Isiletkenlik, $10^{-3}\text{W}/\text{cmK}$	Z $10^{-3}/\text{K}$	$\text{Ln}\sigma$	Eğim,	E_g , eV
291	34,36	1150	185	11,9	3,3	7,0	0,07	0,13
303	33,00	1050	190	11,8	3,2	7,0		
313	31,95	950	195	11,7	3,1	6,9		
323	30,96	900	197	11,6	3,0	6,8		
333	30,03	870	200	11,6	3,0	6,8		
343	29,15	800	205	11,5	2,9	6,7		
353	28,33	740	211	11,4	2,9	6,6		
363	27,55	700	218	11,4	2,9	6,6		
373	26,81	660	220	11,3	2,8	6,5		



Şekil 4. P-tipi Preslenmiş Yarıiletkenin Özellikleri (Properties of P-type Pressed Semiconductor)

Tablo 2. P-Tipi Eritilmiş (P-type melted)

Sıcaklık, K	10000/T, 1/K	İletkenlik, Ohm-1cm-1	Termoemk, $\Delta V/K$	İsiletkenlik, 10-3W/cmK	Z 10-3/K	$Ln\sigma$	Eğim, eV	Eg, eV
291	34,36	1350	192	12,3	4,0	7,2	0,07	0,11
303	33,00	1245	195	12,2	3,9	7,1		
313	31,95	1200	197	12,2	3,8	7,1		
323	30,96	1170	200	12,2	3,8	7,1		
333	30,03	1100	200	12,2	3,6	7,0		
343	29,15	980	210	12,0	3,6	6,9		
353	28,33	970	210	12,0	3,6	6,9		
363	27,55	880	215	11,8	3,4	6,8		
373	26,81	840	220	11,8	3,4	6,7		



Şekil 5. P-tipi eritilmiş yarıiletkenin özellikleri (Properties of P-type melted semiconductor)

Şekil 6 ve Şekil 7 'te bütün numuneler için α , σ , χ ve Z parametrelerinin sıcaklığa göre değişimi tek tablo ve grafik şeklinde ayrı ayrı verilmiştir. Çalışmada elde edilen sonuçlara göre 2 grupta α , σ , χ ve Z parametrelerinin sıcaklığa göre davranışları ister teorik açıdan isterse literatürde A.F. Ioffe, T.Caillat, C.Lahalle – Gravier Ve B. Lendir [14-16] gibi bilim adamlarının benzer termoelektrik maddeler için elde ettikleri deneysel

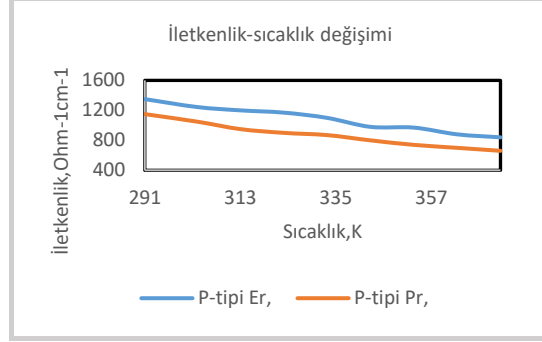
sonuçlarla aynıdır. Ayrıca çalışmada hesaplanan Eg değerleri P tipi için literatüre göre bu aralık 0,10eV - 0,12eV iken elde edilen sonuçlar 0,11eV - 0,13eV olmuştur. Böylelikle elde edilen sonuçlar %10 bağıl hatayla dünya bilim adamlarının bulduğu sonuçlarla aynı olduğu gösterilmiştir. Elde edilen bu sonuçlar ister teorik isterse deneysel açıdan çalışmanın ne kadar başarılı olduğunun kanıtıdır. Grupları ayrı ayrı ele aldığımızda eritilmiş kristallerin, başta Z olmak üzere tüm parametreleri 18°C -100°C sıcaklık

aralığında presslenmiş yarıiletkenlere göre daha yüksektir. Buna göre termoelektrik modullerin üretiminde bölge eritme yöntemi (THM) ile elde edilmiş yarıiletkenlerin kullanılmasının daha uygun olacağı görülmüştür. Bu modullerden yapılan

soğutucu veya jeneratörlerin farklı iklim ve sıcaklıklarda çalışması öngörüldüğü için eritilmiş yarıiletkenlerin kullanılması daha hesaplı olacaktır.

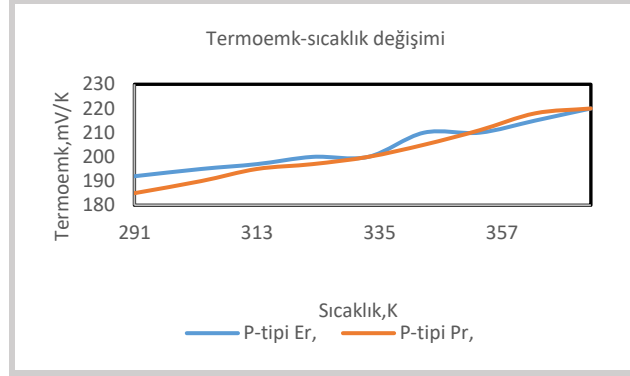
Tablo 3. İletkenlik-sıcaklık değişimi (Conductivity-temperature variation)

Sıcaklık, K	P-tipi Er, mV/K	P-tipi Pr, mV/K
291	192	185
303	195	190
313	197	195
323	200	197
333	200	200
343	210	205
353	210	211
363	215	218
373	220	220



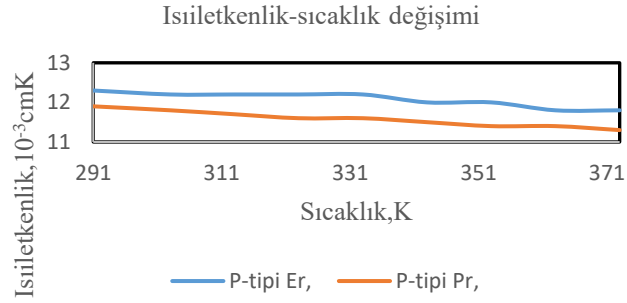
Tablo 4. Termoemk - sıcaklık değişimi (Thermoemk - temperature variation)

Sıcaklık, K	P-tipi Er, mV/K	P-tipi Pr, mV/K
291	192	185
303	195	190
313	197	195
323	200	197
333	200	200
343	210	205
353	210	211
363	215	218
373	220	220



Tablo 5. Isı iletkenlik-sıcaklık değişimi (Thermal conductivity-temperature variation)

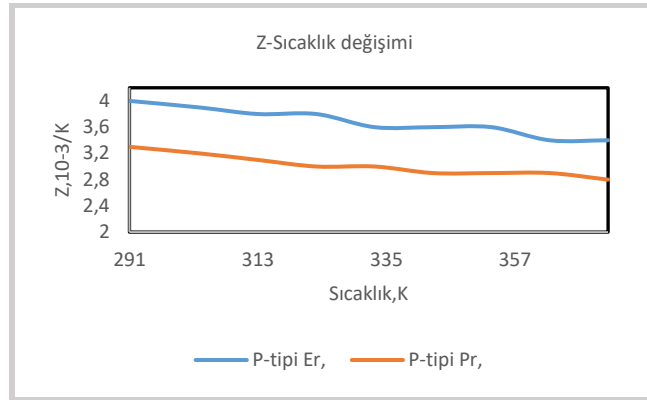
Sıcaklık, K	P-tipi Er, 10^{-3}cmK	P-tipi Pr, 10^{-3}cmK
291	12,3	11,9
303	12,2	11,8
313	12,2	11,7
323	12,2	11,6
333	12,2	11,6
343	12,0	11,5
353	12,0	11,4
363	11,8	11,4
373	11,8	11,3



Şekil 6. Farklı yarıiletkenlerin değişim özellikler (Change properties of different semiconductors)

Tablo 6. Z - sıcaklık değişimi (Z - temperature variation)

Sıcaklık, K	P-tipi Er, 10^{-3}K^{-1}	P-tipi Pr, 10^{-3}K^{-1}
291	4	3,3
303	3,9	3,2
313	3,8	3,1
323	3,8	3
333	3,6	3
343	3,6	2,9
353	3,6	2,9
363	3,4	2,9
373	3,4	2,8



Şekil 7. Farklı yarıiletkenlerin değişim özellikleri (Exchange properties of different semiconductor)

Ölçülen parametrelerin 291-393 K arasında sıcaklığa bağlı değişimi Şekil 4-7'de verilmiştir. Grafiklerden görüldüğü gibi bölge eritme yöntemi ve pressleme ile üretilen numunelerin elektriksel ve ısı iletkenlikleri ve Seebeck katsayıları sıcaklıkla hemen hemen benzer davranış sergilemektedirler. Ancak bölge eritme yöntemi ile elde edilen kristalin Seebeck kat sayısı daha büyükken elektriksel ve ısı iletkenlikleri daha düşüktür. Şekil 7'de gösterildiği gibi, bölge eritme yöntemi ile elde edilen numunenin Z parametresi pressleme ile üretilene göre σ , α ve \mathcal{Z} parametrelerine bağlı olarak daha yüksektir [1-5].

Yarı metaller grubunu oluşturan yarıiletkenlerde serbest yük taşıyıcılarının sabit kalmasından dolayı iki numunenin iletkenliği sıcaklığa bağlı olarak azalmaktadır. Ayrıca metallere farklı olarak elektriksel iletkenliğin sıcaklıkla tam lineer değişmemesinin nedeni elektronların etkin kütlelerinin sıcaklıkla değişmesidir [8]. Tablo 3'ten görüldüğü gibi bölge eritme yöntemi ile elde edilen numunede lineerlik pressleme ile üretilene göre daha iyidir. Bölge eritme ile büyütölen numunede oda sıcaklığının altında ve üstünde iki lineer bölge, pressleme ile büyütölen numuneye göre daha belirgindir. Oda sıcaklığının altında elektronların fononlar tarafından sürüklenmesi baskın iken yüksek sıcaklıklarda fonon elektron saçılması

baskındır. Bu nedenle oda sıcaklığının üzerinde iletkenlik daha hızlı bir şekilde azalmaktadır [1-5].

Tablo 4'te verilen Seebeck kat sayısının sıcaklığa göre değişimi Ioffe teorisi ile uyum içerisinde [16]. Bu teoriye göre yarı metallerde elektron yoğunluğunun değişen sıcaklıkla sabit kalmasına karşın, α 'nın hem sıcaklığa, hem de aynı zamanda sıcaklıkla değişen elektronun etkin külesine ve elektron saçılma mekanizmalarına bağlıdır. Bu iki neden düşük ve yüksek sıcaklıklarda kendini daha çok göstermektedir. Ara sıcaklıklarda ise ele alınan numunelerde olduğu gibi ve teoriye de uygun bir şekilde α sıcaklıkla doğru orantılı olarak değişmektedir. Tablo 4'te görüldüğu gibi bölge eritme yöntemi ile elde edilen numune için α 'nın değeri pressleme yöntemi ile üretilen numuneye göre bütün sıcaklıklarda daha yüksektir [1-5].

Katılarda ısı iletkenliği açıklayan tam bir teorik model olmamasına rağmen ancak nitel olarak ısı iletkenlik düşük sıcaklıklarda artan sıcaklıkla artarken, yüksek sıcaklıklarda artan sıcaklıkla azalmaktadır [16]. Yarıiletkenlerde ısı iletkenlik, maddenin ısı özelliklerine bağlı olmakla beraber yarıiletkenin bant yapısına, optik özelliklerine, kristal örgünün kusurlarına ve atomik bağ şekillerine de bağlıdır. Yüksek sıcaklıklarda, özellikle Debye sıcaklığının üstündeki sıcaklıklarda, elektronların fononlar üzerinden saçılmasından ve fononların ısı transferinde katkılarının artmasından dolayı artan sıcaklığa göre ısı iletkenlikte bir azalma olacaktır [16]. Kristal örgü kusurları artıkça ısı iletkenlik artmaktadır. Bölge eritme yöntemi ile elde edilen numunede presleme yöntemi ile elde edilen numuneye göre daha az örgü kusuru olduğundan bu kristalde ısı iletkenliği diğerine göre daha Düşüktür [1-8].

Eş.8'den de anlaşıldığı gibi Z parametresi, (σ), (α) ve (χ) değerlerine bağlı olarak sıcaklığa göre değişim gösterecektir. (Bi_2Te_3) Sb_2 gibi bileşikleri için yapılan teorik araştırmalara göre orta sıcaklıklarda Z parametresinin sıcaklığa göre önce arttığı daha sonra bir maksimumdan geçerek azaldığı bilinmektedir [1-8]. Tablo 6'dan açıkça görüldüğu gibi Z parametresi göz önüne alınan sıcaklık aralığında iki numune için de deneysel sonuçlar Ioffe teorisi ile uyum içerisinde olduğu görülmektedir. Elde edilen sonuçlara göre tüm sıcaklık aralıkları için eritme yöntemi ile elde edilen kristalin Z parametresi pressleme yöntemi ile elde edilen numuneye göre daha yüksek olmuştur. Her iki numunenin de Z parametreleri oda sıcaklığı civarında maksimum değere sahiptir. Bu nedenle termoelektrik modüller içeren jeneratör ve soğutma

sistemleri oda sıcaklığı civarında maksimum verimde çalışabilirler. Z parametresi sıcaklığa bağlı olarak bir değişim sergilemektedir. Termoelektrik modüller kullanılarak üretilen jeneratör ve soğutma sistemlerinde Z parametresindeki bu değişim göz önünde tutulmalıdır. Bölge eritme yöntemi ile büyütülen numunenin Seebeck kat sayısının daha yüksek ısı iletkenliğinin ise daha düşük olması bu numunenin Z parametresinin daha yüksek olmasını sağlamıştır. Bu nedenle termoelektrik modüllerin üretiminde bölge eritme ile üretilen numunelerin kullanılması uygundur [1-8].

4. SİMGELER (SYMBOLS)

α : Termoemk

σ : Elektrik iletkenliği

χ : Isı iletkenliği

Z : Z parametresi

ΔT : Sıcaklık farkı

$^{\circ}\text{C}$: Santigrat derece

$^{\circ}\text{K}$: Kelvin

5. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Elde edilen sonuçları yarıiletkenlerin tipine göre değerlendirildiğinde P tipi eritilmiş yarıiletkenlerin P tipi presslenmiş yarıiletkenlere göre σ 'sı daha küçük α ve Z değerleri ise daha büyük olduğu saptanmıştır. Yarıiletkenin termoelektrik kalitesini karakterize eden Z'nin 18°C - 100°C sıcaklık aralığında P tipi eritilmiş yarıiletkenlerde %40 ile %20 civarında azaldığını, P presslenmiş yarıiletkenlerde ise %15 azaldığı tespit edilmiştir. Z parametresinin tanımı gereği; yüksek Z parametresi için Seebeck kat sayısının ve elektriksel iletkenliğin büyük, ısı iletkenliğin ise küçük olması gerekir. Bölge eritme ve pressleme yöntemi ile elde edilen numunelerin ilgili parametreleri kıyaslandığında bölge eritme yönteminin presleme yöntemine göre daha yüksek Seebeck katsayısı ve düşük ısı iletkenlik sağlamasından dolayı bu yöntem pressleme yöntemine göre daha avantajlıdır. Dezavantajı ise bu yöntemin presleme yöntemine göre elektriksel iletkenliğinin daha düşük olmasıdır. Ancak bölge eritme yöntemi ile yüksek iletkenlikli numuneler üretilmesi için çalışmalar yapılması Z parametresinin verimini daha da artıracaktır. Makalede gerçekleştirilen çalışmanın hem teorik hem de deneysel sonuçları katıhâl fiziği ve özellikle

yariletkenlerin termoelektrik özelliklerinin araştırılması açısından büyük önem taşımaktadır. Geliştirilen $\alpha - \sigma$ ölçüm sistemi gerekirse her türlü yariletkenin hem yüksek hem de düşük sıcaklıklardaki parametrelerinin ölçülmesinde kullanılabileceği görülmüştür. Yariletken teknolojisinin Türkiye'deki durumu göz önünde bulundurulduğunda, bu çalışma Türkiye'deki, sadece yariletken fiziğine katkıda bulunması bir kenara; bu konuyla ilgili bir dönüm noktası olacağı açıkça görülmektedir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

Bu çalışma Gazi Üniversitesi BAP projesi kapsamında desteklenmiştir.
Proje No: FYL/2022-8239

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)

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

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

Günay ÖMER: Deneyleri yapmış, sonuçlarını analiz etmiş, düzenleme ve denetleme yapmıştır.

She conducted experiments, analyzed the results, regulated and supervised

Raşit AHISKA: Deneyleri yapmış, sonuçlarını analiz etmiş, düzenleme ve denetleme yapmıştır.

He conducted experiments, analyzed the results, regulated and supervised

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

There is no conflict of interest in this study.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Ahıska R and et. 'Thermoelectric Characterization Of N-Type (Bi₂Te₃)Se₃ Semiconductors In A Temperature Range 11-373 K', G.U. Journal of Science 18(3):481-487 (2005)
- [2] Ahıska R and et.' Synthesis and Analyses of Thermoelectric Lead Telluride' Journal of Materials Science and Engineering B 3 (1) (2013) 32-39
- [3] Ahıska R and et.'Phase Content and Thermoelectric Properties of Optimized Thermoelectric Structures Based on the Ag-Pb-Sb-Te System' Journal Of Electronic Materials, Vol. 45, No. 3, 2016,1576-1586
- [4] Ahıska R and et.' Investigation of the Possibilities for Increasing the Thermoelectric Figure of Merit of Nanostructured Materials Based on Bi₂Te₃-Sb₂Te₃ Solid Solutions' Physics of the Solid State, 2012, Vol. 54, No. 11, pp. 2165–2172
- [5] Bowley A. E, Inst A., Cowles L E J., Williams G J., Goldsmid H J, Inst F, Measurement of the figure of merit of a thermoelectric material Journal of Scientific Instruments, 38: 433-435 (2002)
- [6] Waclawek W. and Zabkowska M., "Apparatus for the measurement of thermoelectrical properties", Journal of Physics E: Scientific Instruments, 14: 618-620 (1981)
- [7] Buist R. J., "in Handbook of Thermoelectrics CRC", edited by D.M. Rowe, Pres. Inc New York, (2005)
- [8] Lahalle - Gravier C., "Thermoelectric Characterization of Bi₂T₂,55Se_{0,45} Solid Solutions", J. Phys. Chem. Solids, 59(1): 13-20, (1997)
- [9] Lendir B., "Effect of Antimony Content of the Thermoelectric Figure of Merit of Bi_{1-x}Sb_x Alloys", J. Phys. Chem. Solids, 59(1): 129-134 (1997)
- [10] Buist R. J., "in 11th International Conference on Thermoelectric" October 7-8, Arlington TX USA, 57-61 (1992)
- [11] Ahıska R and et. 'Microcontroller-based test system for determining the P-N type and Seebeck coefficient of the thermoelectric semiconductors' Measurement 139 (2019) 361–369
- [12] Min G., Rowe D.M., "in Proc. 5th European Workshop on Thermoelectrics", Pardubice, Czechia, September 20-21,81-87 (1999)
- [13] Toshitaka O., Takenobu K, "in Handbook of Thermoelectrics CRC", edited by D.M. Rowe, Pres. Inc New York,(1995
- [14] Caillat T., "Preparation and Thermoelectric Properties of Some Arsenopyrite Phases Based on RuSd_{2-x} Te_{2x} and RuSb_{2-2x} Se_{2x} Solid Solutions", J. Phys. Chem. Solids, 59(1): 61-67 (1997)
- [15] Harman T. C., "Special Techniques for Measurement of Thermoelectric Properties", J.Appl. Phys.13: 440 (1962)
- [16] Ioffe A.F. "Poluprovodnikovie Termoelementi", edited by P.V.Gultaiev, Pres. Akademia Nauk SSSR , Moscow, (1960)
- [17] Ömer G. "Earth Air Thermoelectric Generators",G.U. Journal of Science Part C: 804-812 (2023)

Teşhir Tipi Soğutucular İçin CO₂ Soğutkanlı Eko-Tasarım Dış Ünite Geliştirilmesi

Süleyman ERTEN¹  Melis ÖDER^{1*}  Burak Can TEMÜR²  Buğra KOÇ² 

¹Nurdil Teknik Soğutma A.Ş., Ankara, Türkiye.

²Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Enerji Sistemleri Mühendisliği, Ankara, Türkiye.

Article Info

Research article
Received: 28/02/2024
Revision: 21/03/2024
Accepted: 25/03/2024

Keywords

Refrigeration
Refrigerated Display
Cabinet
Carbon Dioxide
Refrigerant

Makale Bilgisi

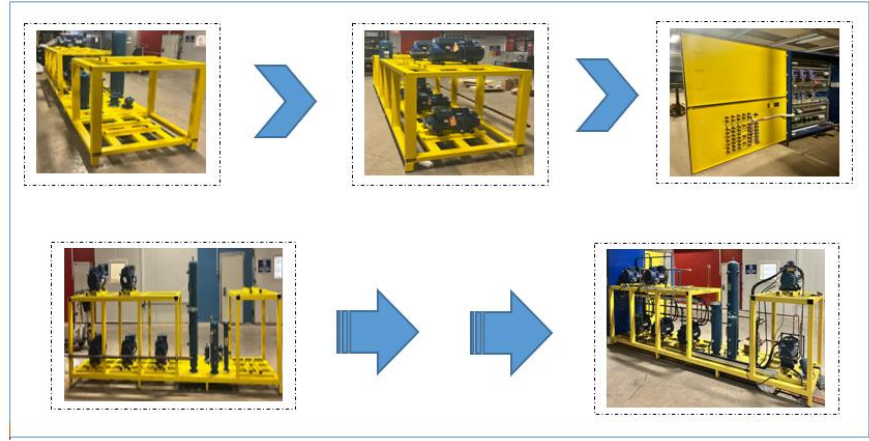
Araştırma makalesi
Başvuru: 28/02/2024
Düzeltilme: 21/03/2024
Kabul: 25/03/2024

Anahtar Kelimeler

Soğutma
Teşhir Tipi Soğutucu
Karbondioksit
Soğutucu Akışkan

Grafik Özet (Graphical/Tabular Abstract)

Çevre dostu CO₂ soğutkanlı eko-tasarım dış ünite, farklı sıcaklık sınıflarındaki teşhir tipi soğutucuları senkronize çalıştırarak enerji verimliliği sağlar. Testler PS ve NS sınıflarında başarıyla tamamlanmış, enerji sınıfları C ve E olarak belirlenmiştir. Tek sistemle farklı sıcaklık sınıfları sunulur. / The eco-designed outdoor unit with environmentally friendly CO₂ refrigerant provides energy efficiency by synchronized operation of refrigerated display cabinets in different temperature classes. Tests were successfully completed in PS and NS classes and energy classes were determined as C and E. Different temperature classes are offered with a single system.



Şekil A: CO₂ dış ünite yapım aşaması / Figure A: CO₂ outdoor unit construction phase

Önemli noktalar (Highlights)

- Çevre dostu CO₂ (R744) kullanımıyla çevresel etkiler azaltılır ve enerji verimliliği sağlanır. Senkronize çalışma özelliği sayesinde farklı sıcaklık sınıflarındaki soğutucular tek bir dış üniteyle yönetilir. / The use of environmentally friendly CO₂ (R744) reduces environmental impact and ensures energy efficiency. Synchronized operation allows coolers in different temperature classes to be managed by a single outdoor unit.

Amaç (Aim): Çevre dostu doğal soğutucu akışkan olan CO₂ kullanarak, farklı sıcaklık sınıflarındaki teşhir tipi soğutucular için enerji verimli ve çevre dostu bir sistem tasarlamak ve bu sistemle süpermarket gibi satış alanlarında farklı sıcaklık ihtiyaçlarını tek bir sistemle karşılayabilmektir. / Design an energy efficient and environmentally friendly system for display type coolers in different temperature classes using CO₂, an environmentally friendly natural refrigerant, and to meet different temperature needs in sales areas such as supermarkets with a single system.

Özgünlük (Originality): Çalışmanın özgün yanı, çevre dostu CO₂ soğutkanının kullanılmasıyla farklı sıcaklık sınıflarındaki teşhir tipi soğutucuların senkronize çalıştırılmasını sağlayan eko-tasarıma odaklanmasıdır. / What is unique about the study is its focus on eco-design, which enables the synchronized operation of refrigerated display cabinets of different temperature classes through the use of environmentally friendly CO₂ refrigerant.

Bulgular (Results): CO₂ (R744) kullanımıyla çevresel etkiler azaltılmıştır. Testler PS ve NS sınıflarındaki soğutucular için başarıyla tamamlanmış, enerji sınıfları belirlenmiştir. / Environmental impact is reduced through the use of CO₂ (R744). Tests were successfully completed for coolers in PS and NS classes and energy classes were determined.

Sonuç (Conclusion): CO₂ (R744) kullanımıyla çevre dostu bir soğutma sistemi başarıyla geliştirilmiştir. Senkronize çalışma özelliği sayesinde farklı sıcaklık sınıflarındaki soğutucuların yönetimi kolaylaştırılmıştır. / An environmentally friendly cooling system has been successfully developed with the use of CO₂ (R744). Synchronized operation simplifies the management of coolers in different temperature classes. Tests have confirmed energy efficiency and performance for PS and NS class refrigerants.



Teşhir Tipi Soğutucular İçin CO₂ Soğutkanlı Eko-Tasarım Dış Ünite Geliştirilmesi

Süleyman ERTEN¹ Melis ÖDER^{1*} Burak Can TEMÜR² Buğra KOÇ²

¹Nurdil Teknik Soğutma A.Ş., Ankara, Türkiye.

²Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Enerji Sistemleri Mühendisliği, Ankara, Türkiye.

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 28/02/2024
Düzeltilme: 21/03/2024
Kabul: 25/03/2024

Anahtar Kelimeler

Soğutma
Teşhir Tipi Soğutucu
Karbondiyoksit
Soğutucu Akışkan

Öz

Enerji sistemlerinin çevresel etkilerinin azaltılması ve enerjinin verimli kullanımı ekolojik denge açısından önemlidir. Soğutma sistemlerindeki standartlar ve yönetmelikler, sera etkisiyle küresel ısınmayı artıran soğutucu akışkanların kullanımını sınırlar. Günümüzde çevre dostu soğutucu akışkanlar tercih edilmekte olup, özellikle karbondiyoksit CO₂ (R744), KIP değerinin 1, ODP değerinin 0 olması aynı zamanda yanma ve tutuşma özelliğine sahip olmamakla birlikte toksit içerikli herhangi bir madde içermemesi nedeniyle önemli bir alternatif haline gelmiştir. Bu anlamda çalışmada, pozitif sıcaklık (PS) (-1 °C / +5 °C) ve negatif sıcaklık (NS) (-15 °C / -30 °C) sınıflarındaki teşhir tipi soğutucular için çevre dostu doğal soğutucu akışkan olan CO₂ (R744) kullanılarak, birden fazla kompresörü içeren eko-tasarıma uygun kompakt bir dış ünite tasarlanmıştır. Tasarlanan dış ünite, süpermarketlerde birden fazla farklı sıcaklık sınıfındaki TTS'leri senkronize olarak çalıştırabilme özelliğine sahiptir. Tasarlanan dış üniteli merkezi (remote) soğutucu TS EN ISO 23953-2: 2017 standardı kapsamında test odalarında test edilmiş ve PS-NS kompresörleri ve multi-ejektör sistemi kullanılarak performansı analiz edilmiştir. PS ve NS sınıflarındaki soğutucular (iç üniteler) için toplam enerji tüketimleri sırasıyla 27,86 kWh/gün ve 36,1 kWh/gün olarak hesaplanmış ve enerji sınıfları ise sırasıyla C ve E sınıfı olarak belirlenmiştir. Bu soğutucular için maksimum ve minimum paket sıcaklıkları sırasıyla -0,8 / +5 °C ve -16 / -27 °C aralığındadır. Yapılan analizler neticesinde istenilen farklı sıcaklıklardaki soğutma yükleri karşılanmış ve kabin içinde soğutulan ürünlerin standart kapsamında belirtilen sıcaklık sınıfları sağlanmıştır. Böylece, bu tasarım ile süpermarket vb. satış alanlarında teşhir tipi soğutucularda tek bir sistem ile farklı sıcaklık sınıflarını sağlayan CO₂ soğutkanlı bir soğutma sistemi ortaya konmuştur.

Development of Eco-Design Outdoor Unit with CO₂ Refrigerant for Refrigerated Display Cabinets

Article Info

Research article
Received: 28/02/2024
Revision: 21/03/2024
Accepted: 25/03/2024

Keywords

Refrigeration
Refrigerated Display
Cabinet
Carbon Dioxide
Refrigerant

Abstract

Reducing the environmental impact of energy systems and the efficient use of energy are important for ecological balance. Standards and regulations in refrigeration systems limit the use of refrigerants that increase global warming with greenhouse effect. Nowadays, environmentally friendly refrigerants are preferred and especially carbon dioxide CO₂ (R744) has become an important alternative because it has a KIP value of 1, ODP value of 0, and does not contain any toxic substances as well as not having combustion and ignition properties. In this sense, in this study, a compact outdoor unit suitable for eco-design including more than one compressor was designed using CO₂ (R744), an environmentally friendly natural refrigerant for refrigerated display cabinets in positive temperature (PT) (-1 °C / +5 °C) and negative temperature (NT) (-15 °C / -30 °C) classes. The designed outdoor unit is capable of synchronized operation of multiple TTSs of different temperature classes in supermarkets. Remote cooler with the designed outdoor unit was tested in test chambers within the scope of TS EN ISO 23953-2: 2017 standard and its performance was analyzed using PS-NS compressors and multi-ejector system. Total energy consumption for PT and NT class coolers (indoor units) was calculated as 27,86 kWh/day and 36,1 kWh/day respectively and energy classes were determined as C and E class respectively. The maximum and minimum package temperatures for these coolers are in the range of -0.8 / +5 °C and -16 / -27 °C, respectively. As a result of the analyzes, the cooling loads at different desired temperatures were met and the temperature classes specified in the standard for the products cooled in the cabinet were met. Thus, with this design, a CO₂ refrigerant cooling system that provides different temperature classes with a single system in refrigerated display cabinets in sales areas such as supermarkets etc. has been introduced.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Gıdaların soğuk muhafazasında soğuk zincir olarak tanımlanan konu çok kapsamlı olup içerisinde birçok soğutucu tipi vardır. Soğuk zincirin halkalarından biride çoğunlukla süpermarketlerde kullanılan teşhir tipi soğutuculardır (TTS). Çevresel sorunların başında gelen iklim değişikliği, 2009/125/EC (Eko-Tasarım Yönetmeliği) kapsamında üretim ve tüketim süreçlerinin gözden geçirilmesini zorunlu kılmaktadır. Bu bağlamda, TTS' ler için çevresel etkilerin azaltılması ve ekotasarım gereksinimlerinin karşılanması önem arz etmektedir. Gün geçtikçe artan düzenlemelerle birlikte çevresel duyarlılık gereksinimleri de artmaktadır.

TTS' lerin tasarımında çevresel etkilerin azaltılması ve hammadde/enerji kullanımının minimize edilmesi, ekotasarım gereksinimlerine uygun hareket etmek anlamına gelmektedir. Ülkelerin 2020 yılında Paris Anlaşması ile ortak olarak belirledikleri küresel sıcaklık artışını 2 °C' nin altında tutma hedefi göz önüne alındığında, yüksek enerji verimine sahip çevreci soğutucu akışkanlı TTS' lerin geliştirilmesi önem kazanmaktadır. Bu bağlamda, CO₂ (R744) soğutucu akışkan kullanılan soğutma sistemleri, düşük küresel ısınma potansiyeli nedeniyle öne çıkmaktadır.

CO₂'nin özellikleri, diğer geleneksel soğutucu akışkanlardan belirgin bir şekilde farklıdır. Özellikle, CO₂'in düşük kritik nokta sıcaklığı (31,06 °C) ve yüksek basınç (73,8 bar) sahip olması dikkat çeker. CO₂' nin uygulanmasını sınırlayan başka bir faktör ise -56,6 °C sıcaklıktaki yüksek üçlü noktası ve buna eşlik eden 5,1 bar basınçtır [1].

R744 soğutma sistemleri, genellikle orta ve düşük sıcaklıklı ılıman ile soğuk iklim kuşaklarında daha etkili bir performans sergilemektedir. Son dönemde, CO₂'nin soğutucu akışkan olarak kullanımı, soğuk içecek otomatları, süpermarketler, soğuk depolar, gıda üretim ve işleme tesisleri, endüstriyel dondurma üretim makineleri, ısı pompaları ve araç klima sistemleri gibi çeşitli uygulama alanlarında hızla artmaktadır [1]. Konu ile ilgili yapılan literatür çalışmaları incelendiğinde:

Dai ve ark. (2024) ticari süpermarketlere yönelik soğutma sistemlerinde doğal bir çalışma akışkanı olarak karbondioksit uygulamasını geliştirmek için kademeli mekanik alt soğutma kavramı araştırılmıştır. Önerilen potansiyel çözümler arasında çok aşamalı, mekanik alt soğutmalı CO₂ sistemi konfigürasyonu bulunmaktadır. Bu sistemler için ekserji, karbon ayak izi ve maliyet performansı göz önünde bulundurularak bir yaşam döngüsü değerlendirmesi yapılmış ve bu sistemler

temel bir CO₂ güçlendirici soğutma sistemi ve geleneksel bir R404A sistemi ile karşılaştırılmıştır. Değerlendirme, Çin genelinde farklı iklim bölgelerinde yer alan sekiz şehir için gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, çok aşamalı özel mekanik alt soğutmalı kullanımının geri dönüşü olmayan kayıpları etkili bir şekilde azalttığını ve CO₂ güçlendirici soğutma sisteme kıyasla daha yüksek yıllık ekserji verimliliğine yol açtığını göstermektedir. Üç aşamalı çok aşamalı özel mekanik alt soğutmalı konfigürasyonu, CO₂ güçlendirici soğutma sistemine göre %11,92-18,48 oranında daha yüksek ekserji verimliliği sergilemektedir. Ayrıca, üç aşamalı çok aşamalı özel mekanik alt soğutmalı sistem kullanıldığında Haikou'da yaşam döngüsü iklim performansı (LCCP) % 6,87 oranında azalmaktadır ve bu da daha düşük karbon emisyonuna işaret etmektedir. Sonuç olarak, çok aşamalı özel mekanik alt soğutma sistemleri, özellikle üç aşamalı çok aşamalı özel mekanik alt soğutmalı konfigürasyonu, üstün emisyon azaltma performansı ve temel sisteme kıyasla daha düşük yaşam döngüsü maliyeti nedeniyle ılık veya sıcak bölgelerdeki uygulamalar için daha uygun olduğu görülmektedir [2]. Sengupta ve ark. (2023) süpermarketlerin verimliliğini artırmak ve BM Sürdürülebilir Kalkınma Hedeflerini desteklemek için soğutma ve iklimlendirme sistemlerinde yenilikler yaparak karbon ayak izlerini azaltma ihtiyacını araştırmışlardır. Çalışma, teorik kanıt için gerçek bileşen verilerini kullanarak ve matematiksel modeli deneysel verilerle doğrularak yeni bir çift ejektör tabanlı CO₂ soğutma konfigürasyonunu tanıtmaktadır. Önerilen sistem, 28°C / 40°C ortam sıcaklıklarında çalışma için özel bir mekanik alt soğutma tabanlı CO₂ sisteminden % 41,97 ila % 35,38 oranında daha iyi performans göstermektedir. Yıl boyunca performans, çeşitli sıcak ortam konumları için değerlendirilmiş ve geleneksel bir R404A doğrudan genleşme sistemine kıyasla %11,35 oranına varan önemli yıllık enerji tasarrufu göstermiştir. 40°C ortam sıcaklığında yapılan gelişmiş ekserji ve ekonomik analizler, yüksek kademeli kompresörün en yüksek etkiye sahip olduğu belirlenerek, tersinmezlikleri ve maliyetleri azaltma potansiyelini ortaya koymaktadır. Bileşenler arasındaki karşılıklı etkileşimler dışsal analiz kullanılarak araştırılmış ve bir genetik algoritma optimizasyonu, mekanik alt soğutma tabanlı CO₂ sistemine kıyasla sistem için %6 oranında daha yüksek ekserjetik performansla sonuçlanmıştır [3]. Chi ve ark. (2023) ejektörlü NH₃/CO₂ kaskad soğutma sistemi üzerine odaklanmışlardır. Soğutma çevrimi için

matematiksel bir model oluşturmakta ve termodinamik analiz yoluyla mevcut literatürle karşılaştırmaktadır. Kaskad soğutma sistemi üzerinde ileri ekserji analizi yapılarak bileşenlerin ekserji yıkımı hesaplanmıştır. Analiz, toplam ekserji yıkımının % 38,674'ünün önlenebilir olduğunu ortaya koymaktadır ve bu da sistemin iyileştirilmesi için yüksek bir potansiyele işaret etmektedir. Ayrıca, toplam ekserji yıkımının %77,77 oranında endojen faktörlerden, %22,22 oranında ise eksojen faktörlerden kaynaklanmaktadır [4]. Li ve ark. (2024), geleneksel sentetik soğutucu akışkanlarla ilgili çevresel kaygıları ele almakta ve çevre dostu bir alternatif olarak karbondioksit (CO_2) odaklanmaktadır. Bununla birlikte, CO_2 soğutma sistemleri genellikle verimsiz çalışmaya yol açan önemli kısma kayıplardan muzdariptir. Bunu azaltmak için bu çalışma, sistemin tasarım dışı performansını artırmak için üç kontrol edilebilir ejektörlü bir çoklu ejektör tasarımı önermektedir. CO_2 çoklu ejektörlü soğutma sisteminin deneysel analizi yapılarak çeşitli çalışma koşullarının basınç yükseltme, sürüklenme oranı ve verimlilik dahil olmak üzere çoklu ejektör performansı üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir. Temel olarak bir genişleme valfi kullanan tek kademeli bir sıkıştırma sistemi ile karşılaştırmalı bir çalışma da gerçekleştirilmiştir. Çoklu ejektör sistemi maksimum 656 kPa basınç artışı göstermektedir. Pratik olarak uygulandığında farklı çalışma koşullarında soğutma performans katsayısını (COP) en üst düzeye çıkaran bir optimum basınç kontrolü stratejisi önerilmiştir. Çoklu ejektör sisteminin soğutma COP değeri, optimum basınç kontrolü stratejisi ile temel sisteme kıyasla % 30,69 oranında iyileşerek verimliliğin arttığını göstermektedir [5].

Yang ve ark. (2023) düşük sıcaklıklarda ejektörlü ve ejektörsüz trans-kritik CO_2 iki aşamalı sıkıştırma soğutma sistemi incelenmiştir. Gaz soğutucu basıncı, gaz soğutucu çıkış sıcaklığı ve elektronik genişleme vanası açıklığının gaz soğutucu ve genel sistem performansı üzerindeki etkileri deneysel olarak araştırılmıştır. Sonuçlar, belirli koşullar altında (91 bar gaz soğutucu basıncı, 33 °C çıkış sıcaklığı ve %95 elektronik genişleme vanası açıklığı), transkritik CO_2 iki aşamalı sıkıştırma soğutma sisteminin COP değerinin 0,78'lik bir zirveye ulaştığını göstermektedir. Bu, aynı çalışma koşulları altında ejektörsüz transkritik CO_2 iki aşamalı sıkıştırma soğutma sisteminin COP değerinden 2,28 kat daha yüksektir. Çalışma ejektör için en uygun çalışma aralığını tanımlamakta ve gaz soğutucu basıncının COP üzerinde en önemli etkiye sahip olduğunu, bunu elektronik genişleme vanası açıklığı ve gaz soğutucu çıkış sıcaklığının izlediğini

ortaya koymaktadır. Deneysel, belirli elektronik genişleme vanası açma koşullarıyla daha yüksek COP elde edilebileceğini ve genel sistem COP değerini en üst düzeye çıkarmak için optimum bir ara basınç ve gaz soğutucu basıncı olduğunu vurgulamaktadır [6]. Leerbeck ve ark. (2023) Süpermarket soğutma sistemleri için güçlü, büyük ölçekli arıza teşhisi ve optimize edilmiş kontrol sağlamayı amaçlayan bir evaporatör ve onu çevreleyen soğutma kabini için veri odaklı bir gri kutu modeli sunmaktadır. Uygulanabilirliğini göstermek için (Danimarka) bir süpermarketteki on buharlaştırıcıdan bir dakikalık örnekleme çözünürlüğüne sahip veriler kullanılmışlardır. Dolapların dinamik özellikleri ürün eklendikçe ve çıkarıldıkça sürekli değiştiğinden, yaklaşık 2,5 yıllık bir süre boyunca parametreleri her gün için tekrar tahmin etmişlerdir. Tahmin edilen parametrelerin fiziksel anlamı tartışılmakta ve sadece tahmini ısı transfer katsayıları ve ısı kapasiteleri kullanılarak bunların açık veya kapalı dolaplar veya odalar olarak nasıl farklılaştırılabileceği gösterilerek, dolapların karakterizasyonu ve sınıflandırılması için potansiyel uygulamalar gösterilmektedir. Analiz sonuçlarına göre, modelin fiziksel olarak anlamlı parametreleri tahmin etme açısından sağlam, doğru ve güvenilir olduğunu ve dolayısıyla büyük ölçekli uygulamaya uygun olduğu gösterilmektedir [7]. Yılmaz ve ark. (2020) Transkritik CO_2 soğutma sistemi ile soğutulan kapalı bir vitrin kabini içinde faz değiştiren malzeme (PCM) konumunun etkisini deneysel olarak incelemişlerdir. PCM konumlarının kabin hava sıcaklığı ve kompresör güç tüketimi üzerindeki etkisi, 24 ve 8 saatlik çalışma aralıklarında test ederek karşılaştırmışlardır. PCM'lerin kabin raflarına kurulmasının hem kabin hava sıcaklığını homojen tutması hem de belirli ortalama sıcaklık seviyelerinde tutması açısından daha avantajlı ve umut verici olduğunu tespit etmişlerdir. Raf kasasındaki PCM için, enerji tasarrufunu PCM kasası olmayana göre % 4,4 daha az bulmuşlardır. Bununla birlikte arka taraftaki PCM, %8 daha fazla enerji tüketimi sağlandığını ve raf kasasında PCM için çalışma süresini 15.8 daha az olduğunu tespit etmişlerdir. Sonuç olarak bu çalışmada raflarda kullanılan PCM'nin en iyi seçenek olduğu kararına varılmıştır [8]. Sanchez ve ark. (2023) Saf CO_2 'e alternatif olacak teorik olarak farklı CO_2 bazlı zeotropik bir karışım belirlemişlerdir. Bu karışım yanıcı olmayan GWP si 150 nin altında saf CO_2 den daha yüksek COP sağlayan teorik olarak farklı bir CO_2 karışımıdır. Referans olarak saf CO_2 kullanılarak dikey bir ekran soğutucusunda hazırlanmış ve enerjik olarak iki karışım olan $CO_2 / R1270$ ve $CO_2 / R32$ test

edilmiştir. Sonuç olarak, CO₂ karışımlarının enerji tüketimini 25 °C ortam sıcaklığında % 17,2' ye, 30 °C' de %12,2 'ye kadar azalttığını ortaya koymuşlardır. Ayrıca, CO₂ karışımlarıyla elde edilen sonuçlar, saf R1270 ile elde edilenlere en yakın ve aynı çalışma koşullarında R134a'dan daha iyi olduğunu kanıtlamışlardır [9]. Singh ve ark. (2020) yüksek ortam sıcaklığı bağlamında bir Hint süpermarketi için 33 kW soğutma kapasiteli çok ejektörlü CO₂ soğutma sisteminin deneysel değerlendirmesi yapmışlardır. Teçhizat, iki çoklu ejektörden oluşan yeni bir tasarımla donatılmıştır. Bu yeni tasarımla maksimum 5,5 bar basınç artışının elde edildiği görülmektedir. Ayrıca dahili ısı eşanjörünün desteğiyle genel sistem performansındaki iyileşme görülmektedir. Maksimum COP ve PIR'de gözlemlenen artışlar sırasıyla %7,2 ve %6,2'dir. Evaporatör taşmasının çıkıştaki kızgın ısını %83,84 oranında azalttığı, bunun da toplam PIR'de %6,51 oranında azalmaya yol açtığı gözlemlenmiştir. Sonuçlar, seri çoklu ejektör konfigürasyonuna sahip CO₂ soğutma sisteminin daha yüksek ortam sıcaklıkları için güvenilir bir seçim olduğunu ve daha düşük ortam sıcaklıklarında mevcut sistemlerden daha iyi performans göstermesinin beklendiği öngörülmüştür [10]. Yu ve ark. (2018) CO₂ otomobil klima sisteminin enerji verimliliğini arttırmak için teorik ve deneysel çalışmalar yapmışlardır. Teorik analiz, CO₂ ve propan karışımının performansını artırdığını göstermiştir; bu nedenle çeşitli CO₂ -propan kütle oranlarının etkilerini görmek için deneyler yapmışlardır. Deneysel sonuçlar, teorik sonuçlarla benzer eğilimler gösterdiği görülmüştür. Aynı kompresör hızında sistem COP'sinin, saf CO₂ sisteminden %29,4 daha yüksek olan CO₂ kütle oranının %60'ında en yüksek seviyeye ulaştığı ve hatta R134a sistemiyle eşit seviyeye ulaştığı, optimum basınç ve tahliye sıcaklığının düştüğü göstermişlerdir. Sonuç olarak CO₂ -propan karışımlarının kullanımının, soğutma kapasitesi sabit tutulduğunda bile maksimum %22'lik bir COP artışı sağladığını gösterilmektedir [11].

Bu çalışma kapsamında TTS' ler için aynı anda hem PS hem de NS sınıflarını sağlayabilen dış ünitenin geliştirilmesi amaçlanmıştır. Bu tasarımın farklı sıcaklık sınıflarındaki TTS' ler ile bağlantıları yapılarak performansının araştırılması amaçlanmıştır.

2. MATERYAL VE METOD (MATERIALS AND METHODS)

2.1. Deneysel Ekiman (Experimental Equipment)

CO₂, ozon tabakasına zarar vermeyen ve küresel ısınmaya yol açmayan bir soğutucu akışkandır. Bu özellikleri nedeniyle çevre dostu bir seçenek olarak kabul edilmektedir. CO₂, yüksek ısı transfer özelliklerine sahiptir böylece soğutma sistemlerinin daha verimli çalışmasına olanak tanır. Ayrıca bir başka verim artışı sağlayan ekipman ise çevrimde kullanılan multi-ejektördür.

Multi-ejektörlerin avantajlarından bazıları şunlardır:

- Yüksek basınçlı CO₂' nin düşük basınçlı CO₂' ye enerji transferi, sistemdeki enerji verimliliğini artırır ve enerji maliyetlerini düşürür.
- Multi-ejektörler, sistemdeki enerji kaynaklarını daha verimli bir şekilde kullanmaya olanak tanır, bu da genel sistem performansını artırır.
- Diğer enerji geri kazanım teknolojilerine kıyasla, multi-ejektörlerin kurulum ve bakım maliyetleri genellikle daha düşüktür.

Bu nedenlerden dolayı, CO₂ soğutucu akışkanlı sistemlerde multi-ejektörler, enerji verimliliğini arttırmak ve işletme maliyetlerini azaltmak için yaygın olarak kullanılan bir bileşen haline gelmiştir.

Bu çalışmada, süpermarketlerde yaygın olarak kullanılan PS ve NS sınıflarındaki TTS' ler, çevre dostu doğal soğutucu akışkan olan CO₂ kullanılarak, birden fazla kompresörü içeren ekotasarıma uygun kompakt bir dış ünite tasarımı gerçekleştirilmiştir. Multi-ejektörlü, transkritik CO₂ soğutkanlı soğutma sistemi taslak çizimi Şekil 1' de verilmiştir. Tasarlanan dış ünite, TS EN ISO 23953-2: 2017 standardı altında PS ve NS sıcaklık sınıflarına sahip TTS' lere bağlantısı yapılarak Class 3 (%60 bağıl nem, 25 °C) şartlarında test edilmiştir.

TS EN ISO 23953-2: 2017 standardı iklim sınıfı 3 (25 °C ve %60 Bağıl nem) şartlarında testleri gerçekleştirilen TTS' nin ölçüm cihazlarının özellikleri ve hassasiyetleri Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Multi-ejektörlü, transkritik CO₂ soğutkanlı soğutma sistemi test ölçü cihazları (Multi-ejector, transcritical CO₂ refrigerant cooling system test meters)

Ölçü aleti	Ölçü aralığı	Doğruluk
Debi ölçer	0–1000 kg/h	±0.1%
Enerji analizörü	0–50 A (220V / 380V)	±0.1%
T-tipi termokupl	233,15–473,15 K	±0.1%
Termohigrometre	0–100 %RH	±1.5%
	273,15–312,15 K	±0.1%
Anemometre	0–2 m/s	±0.1%
Düşük basınç ölçü aleti	0–30 bar	±0.1%
Yüksek basınç ölçü aleti	30–150 bar	±0.1%

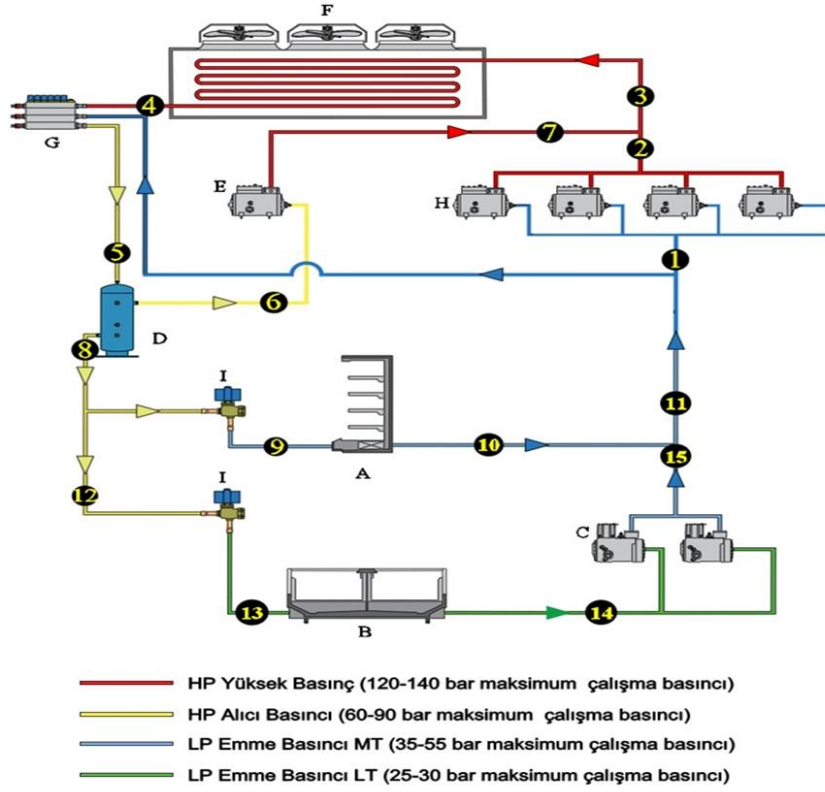
2.2. Deneysel Tasarım (Experimental Design)

R744 soğutucu akışkanlı, multi-ejektörlü transkritik olarak çalışan bu soğutma sisteminin önemli bileşenlerinden olan yarı hermetik kompresörler hem PS hem de NS sınıflarında kullanılan kompresörlerdir. Ayrıca çevrimdeki bypass kompresörü sayesinde de sistemdeki basınç farkları dengelenerek daha stabil bir çalışma sağlanır.

Soğutucu akışkan PS/NS kompresörlerinde sıkıştırılarak yüksek sıcaklık ve basınçta gaz soğutucusuna gönderilir. Gaz soğutucular, sistemin verimliliğini artırmak ve CO₂'nin sıcaklığını düşürmek için kullanılır. Transkritik CO₂'nin faz değişimini kontrol ederek istenilen sıcaklık aralığında tutarlar. Gaz soğutucuda, faz değişimi olmadan havaya ısı geçişi gerçekleşir. Atılan bu ısı ile merkezi enerji sistemlerinde ısıtma yükü karşılanabilir. Gaz soğutucudan çıkan soğutucu akışkan multi-ejektöre gönderilir.

Multi-ejektörler, CO₂ akışkanının basınç düşümünü kullanarak enerji transferini gerçekleştirirler. Yüksek basınçlı CO₂ akışkanı, multi-ejektörün birinci aşamasına beslenir. Bu aşamada, CO₂ akışkanı, düşük basınçlı CO₂ akışkanı ile karıştırılır ve enerji transferi gerçekleşir. Sonuç olarak, düşük basınçlı CO₂ akışkanının basıncı artar ve bu, ikinci birimde kullanılabilir.

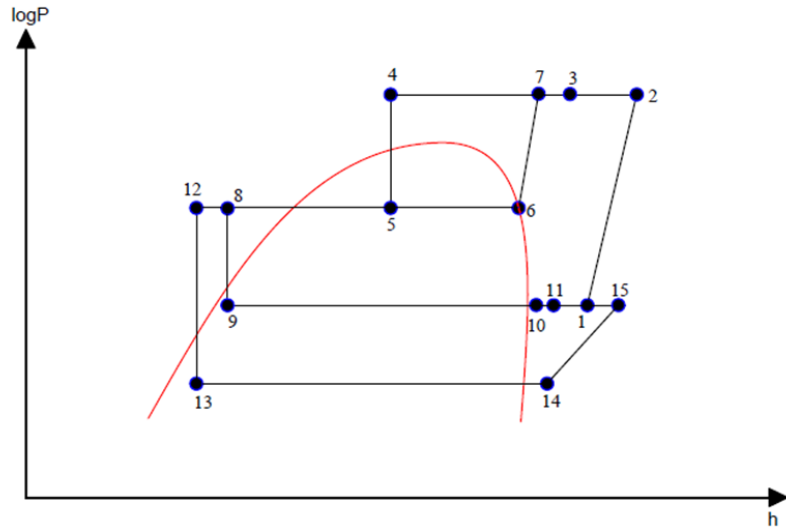
Çevrim devamında kullanılan flash tank, sistemin performansını artırmak için kullanılan bir diğer önemli bileşendir. Yüksek basınçlı CO₂'nin düşük basınçlı CO₂'ye dönüşümünü sağlar ve bu sayede sistemdeki enerji verimliliği artar. Flash tanktan genleşme elemanına gönderilen soğutkan kısımla işleminden sonra evaporatöre girer. Evaporatörde soğutucu akışkan havadan ısı çekerek havayı soğutur. Evaporatörden çıkan soğutucu akışkan buhar fazında kompresöre gönderilerek çevrim tamamlanır. Sistem tasarımı Şekil 1'de verilmiştir.



A) PS sınıfı TTS (PT class RDC); B) NS sınıfı TTS (NT class RDC); C) Yarı hermetik kompresörler (NS) (Semi-hermetic compressors) (NT); D) Flash tank (Flash tank); E) Yarı hermetik kompresör (Bypass) (Semi-hermetic compressors) (Bypass); F) Gaz soğutucu (Gas cooler); G) Multi-ejektör (Multi-ejector); H) Yarı hermetik kompresörler (PS) (Semi-hermetic compressors) (PT); I) Genleşme elemanları (Expansion elements)

Şekil 1. Multi-ejektörlü, Transkritik CO₂ Soğutkanlı Soğutma Sistemi Taslak Çizimi (Draft Drawing of Cooling System with Multi-ejector, Transcritical CO₂ Refrigerant)

Transkritik çevrime ait logP-h diyagramı Şekil 2' de verilmiştir.



Şekil 2. Multi-ejektörlü, Transkritik CO₂ Soğutkanlı Soğutma Sistemi logP-h Akış Diyagramı (LogP-h Flow Diagram of a Multi-ejector, Transcritical CO₂ Refrigerant Cooling System)

R744 soğutucu akışkanı, özellikle transkritik çevrimlerde tercih edilen bir soğutucu akışkandır ve diğer soğutucu akışkanlara kıyasla önemli ölçüde daha yüksek basınç ve sıcaklık seviyelerine ulaşır.

R744'ün transkritik çevriminde kullanılan sistem elemanları, bu özel koşullara uyum sağlamak üzere özel olarak tasarlanmıştır. Yüksek basınç ve sıcaklık altında etkili bir performans elde etmek için, bu sistem elemanları R744'ün özgün

termodinamik özelliklerini dikkate alacak şekilde özenle seçilir ve entegre edilir [15]. Tasarım parametrelerine ait sıcaklık, bağıl nem, kapasite ve güç değerleri Tablo 2'de verilmiştir.

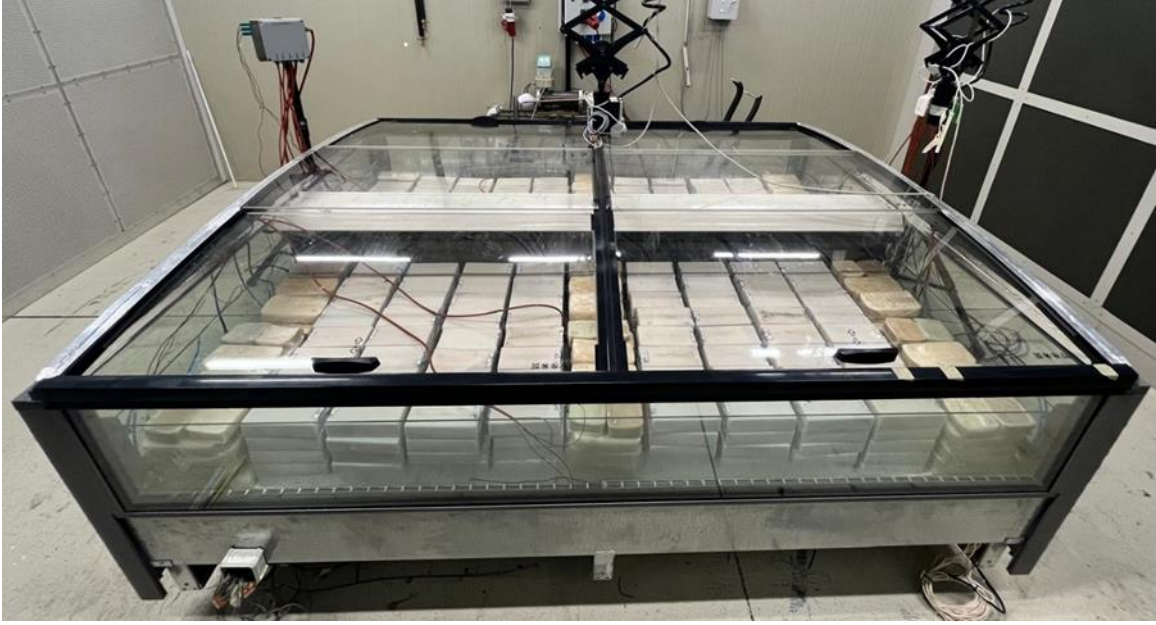
Tablo 2. Multi-ejektörlü, transkritik CO₂ soğutmalı soğutma sistemi tasarım parametreleri (Design parameters of a multi-ejector, transcritical CO₂ refrigeration system)

Tasarım Parametreleri	Parametre Değerleri
Evaporasyon sıcaklığı (°C) ~ PS	-5
Evaporasyon sıcaklığı (°C) ~ NS	-35
Evaporatör kapasitesi (kW) ~ PS	5
Evaporatör kapasitesi (kW) ~ NS	4
Kompresör gücü (kW) ~ PS	5,5
Kompresör gücü (kW) ~ NS	4,3
Gaz soğutucu kapasitesi (kW)	20
Test odası sıcaklık (°C)	25
Test odası bağıl nem (%)	60

TS EN ISO 23953-2: 2017 standardı ve iklim sınıfı 3 şartlarında test edilen PS ve NS sınıfına ait TTS' nin görselleri Şekil 3 ve Şekil 4'te verilmiştir.



Şekil 3. Test edilen PS sınıfı TTS' ye ait görsel (Image of the tested PT class RDC)



Şekil 4. Test edilen NS sınıfı TTS' ye ait görsel (Image of the tested NT class RDC)

3. TEORİK ANALİZ (THEORETICAL ANALYSIS)

Teşhir tipi soğutucularda kullanılan mekanik buhar sıkıştırımlı soğutma çevrimi temel ekipmanları kompresör, evaporatör, kondenser ve genleşme elemanıdır. Transkritik CO₂ çevrimde kondenser yerine gaz soğutucu kullanılır.

Çevrim ekipmanlarının kapasiteleri ve güç tüketimleri aşağıdaki eşitliklerle bulunabilir [12].

Sistemdeki evaporatör kapasitesi eşitlik 1 kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$\dot{Q}_{evap} = \dot{m}(h_1 - h_4) \quad (1)$$

Sistemdeki gaz soğutucu kapasitesi eşitlik 2 ile hesaplanır.

$$\dot{Q}_{gs} = \dot{m}(h_2 - h_3) \quad (2)$$

Sistemdeki kompresörün gücü, eşitlik 3 ile hesaplanır.

$$\dot{W}_k = \dot{m}(h_2 - h_1) \quad (3)$$

TTS için Toplam Enerji Tüketimi (TET) Eşitlik 4 yardımı ile bulunur [13].

$$TET = SET + GET \quad (4)$$

Eşitlik 4'te belirtilen Soğutma Enerji Tüketimi (SET) değeri ve Günlük Enerji Tüketimi (GET) değeri Eşitlik 5 ve Eşitlik 6 yardımı ile bulunur [13].

$$SET = (24 - t_{def}) \times \theta_{24-def} \times \frac{T_k - T_c}{0,34 \times T_c} = Q_{toplam} \times \frac{T_k - T_c}{0,34 \times T_c} \quad (5)$$

t_{def} defrost süresini (h), θ_{24-def} test koşullarında bir kabinin enerji tüketimini hesaplamak için evaporatör kapasitesini (kWh), T_k yoğuşma sıcaklığını (K), T_c soğutma anında evaporasyon sıcaklığını (K), Q_{toplam} çevreye atılan toplam ısı miktarını (kWh) ifade eder [13].

$$GET = FET + AET + RET + YTIET \quad (6)$$

FET fanların tükettiği enerji miktarını (kWh/24h), AET aydınlatmaların tükettiği enerji miktarını (kWh/24h), RET rezistansların tükettiği enerji miktarını (kWh/24h), YTIET yoğuşma tavaasında bulunan ısıtıcıların tükettiği enerji miktarını (kWh/24h) ifade eder [13].

TTS' lerin enerji etiketlemede sınıfları belirlenirken, enerji tüketimlerine bağlı olarak hesaplanan enerji verimlilik endeksi (EVE) değeri Eşitlik 7, Eşitlik 8 ve Eşitlik 9 yardımı ile bulunur [14].

EVE, TTS' nin yıllık enerji tüketiminin (YET) standart yıllık enerji tüketimine (SYET) oranlanmasıyla bulunur [14].

$$EVE = \frac{YET}{SYET} \quad (7)$$

YET değeri aşağıdaki gibi hesaplanabilir [14].

$$YET = 365 \times GET \quad (8)$$

SYET değeri aşağıdaki gibi hesaplanabilir [14].

$$SYET = 365 \times P \times (M + N \times Y) \times C \quad (9)$$

Regülasyon (EU) 2019/2018 göre denklem 9 kullanılarak;

- PS sınıfı TTS için M ve N değeri “9,1”, NS sınıfı TTS için M değeri “4” ve N değeri “10,3” alınmıştır. M ve N değerleri farklı tipteki soğutucu ve dondurucular için alınan sabit değerlerdir [14].
- C değeri ise sıcaklık koşulları ve karşılık gelen sıcaklık kat sayısı değerini ifade etmektedir [14]. PS sınıfı TTS için C değeri “1,15”, NS sınıfı TTS için C değeri ise “1” alınmıştır.
- P değeri plug in TTS’ler için 1,10, remote TTS’ler için ise 1 olarak alınır [14]. PS / NS sınıfı TTS için P değeri “1” alınmıştır.

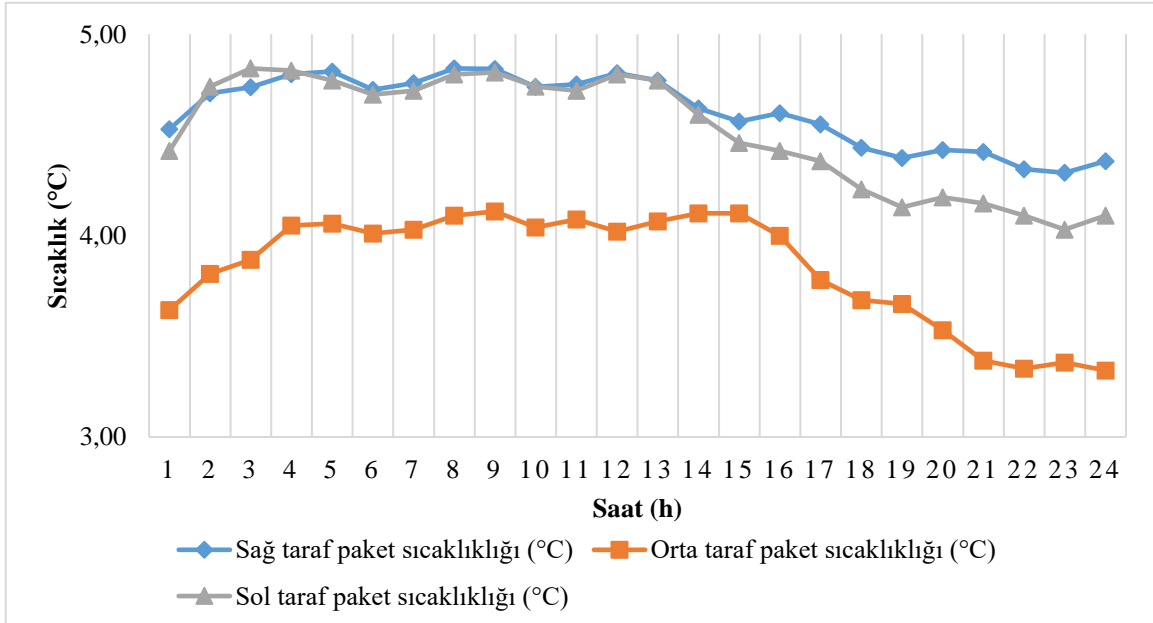
- Y değeri, toplam teşhir alanını (TTA) ifade etmektedir [14]. PS sınıfı TTS için Y (TTA) değeri “6,61 m²”, NS sınıfı TTS için Y (TTA) değeri “6,2 m²” olarak hesaplanmıştır.

- PS sınıfı TTS için SYET değeri “29068 kWh/yıl”, NS sınıfı TTS için SYET değeri “24769 kWh/yıl” olarak hesaplanmıştır.

Denklem 7 ve 8 kullanılarak PS sınıfı TTS için EVE değeri “34,98”, NS sınıfı TTS için EVE değeri “53,2” olarak hesaplanmıştır.

4. BULGULAR (RESULTS)

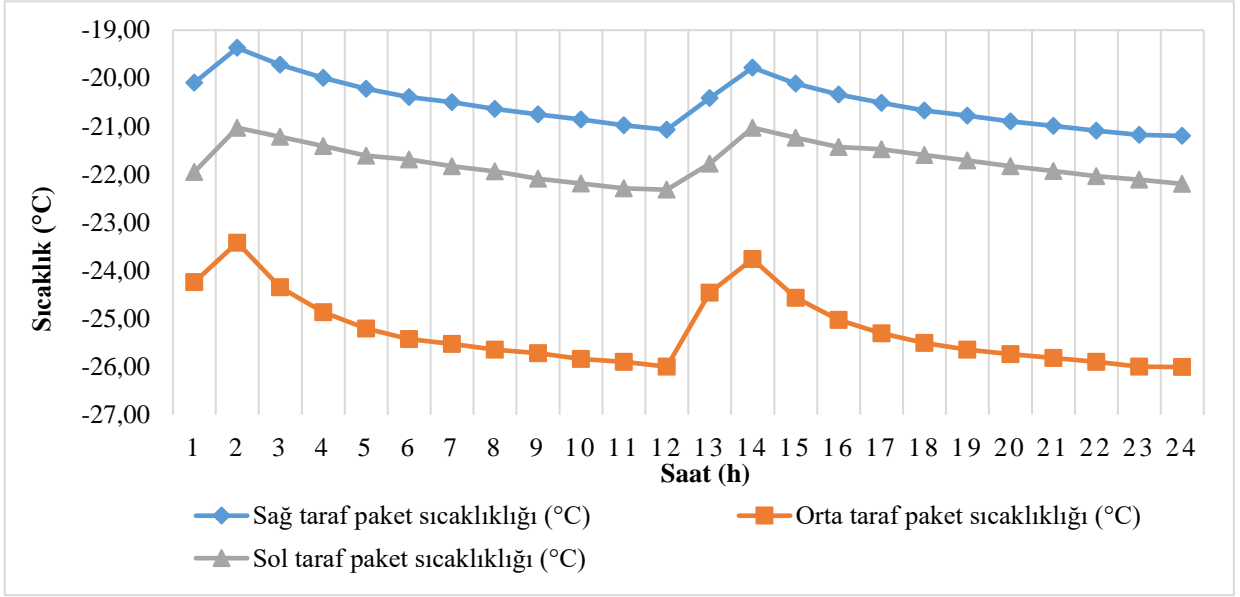
TS EN ISO 23953-2: 2017 standardına ve iklim sınıfı 3 koşullarına uygun test edilen PS sınıfı ait TTS için sol, orta ve sağ taraf paket sıcaklık grafiği Şekil 5’te verilmiştir. Bu grafik sonuçlarına göre test paketlerinin sıcaklık değerleri standarta göre uygun aralıkta (-1 °C / +5 °C) olduğu görülmektedir.



Şekil 5. PS sınıfı sahip TTS’ nin sağ, orta ve sol taraf ortalama paket sıcaklıkları (Right, center and left side average package temperatures of RDC with PT class)

TS EN ISO 23953-2: 2017 standardına ve iklim sınıfı-3 koşullarına uygun test edilen NS sınıfına ait TTS için sol, orta ve sağ taraf ortalama paket sıcaklık grafikleri sırasıyla Şekil 6’da verilmiştir. Elde edilen test sonuçları, sıcaklık değerlerinin

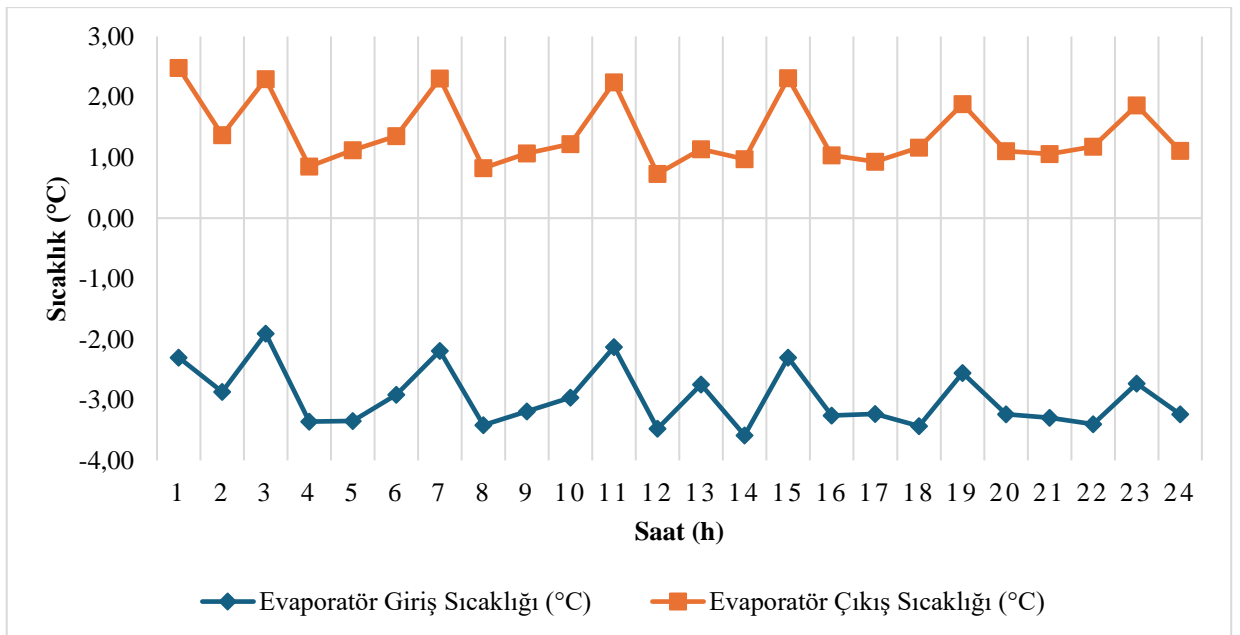
standarta uygun olarak istenilen sıcaklık aralıklarında (-15 °C / -30 °C) olduğunu göstermektedir.



Şekil 6. NS sınıfı TTS’ nin sağ, orta ve sol taraf ortalama paket sıcaklıkları (Right, center and left side average package temperatures of NT class RDC)

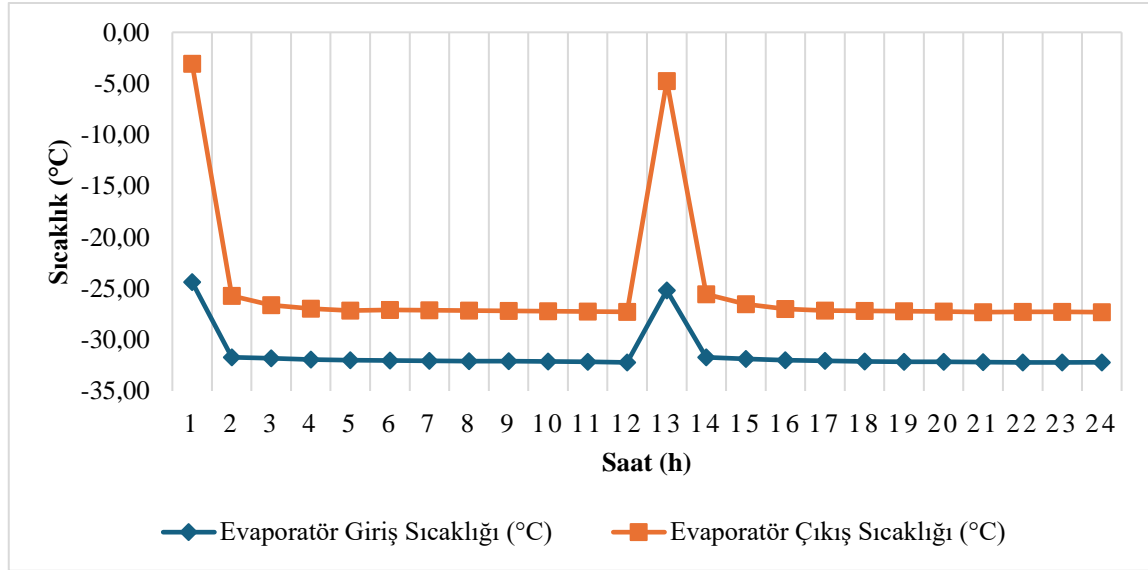
Gerçekleştirilen testlerde, PS ve NS sınıflarına ait teşhir tipi soğutucu kabinlerin sol, orta ve sağ bölgelerindeki ortalama paket sıcaklıkları ölçülerek grafiklerde verilmiştir. Grafiklerde görülen pik noktalarının sebebi TTS’nin defrost esnasında soğutma işlemini durdurup paket sıcaklıklarının anlık yükselmesidir.

PS sınıfına ait TTS’lerin evaporatör giriş-çıkış sıcaklık değerleri Şekil 7’ de verilmiştir. Grafiğe bakıldığında PS sınıfına ait TTS’nin evaporasyon değeri maksimum -4 °C olarak ölçülmüş olup test edilen kapılı bir soğutucu olduğu için soğutma kapasitesi yeterli seviyededir.



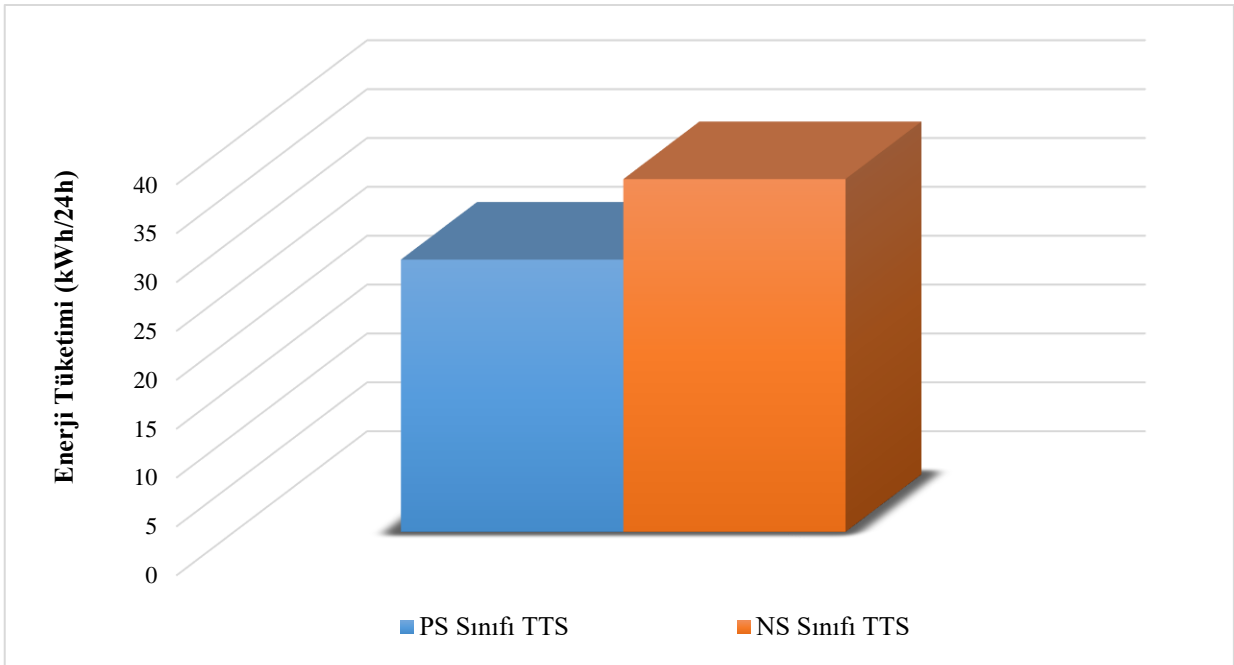
Şekil 7. PS sınıfı TTS’ nin evaporatör giriş-çıkış sıcaklık değerleri (Evaporator inlet-outlet temperature values of PT class RDC)

NS sınıfına ait TTS'lerin evaporatör giriş-çıkış sıcaklık değerleri Şekil 8'de verilmiştir. Grafikte NS sınıfına ait TTS'nin evaporasyon değeri maksimum -32,5 °C olarak ölçülmüştür.



Şekil 8. NS sınıfı TTS'nin evaporatör giriş-çıkış sıcaklık değerleri (Evaporator inlet-outlet temperature values of NT class RDC)

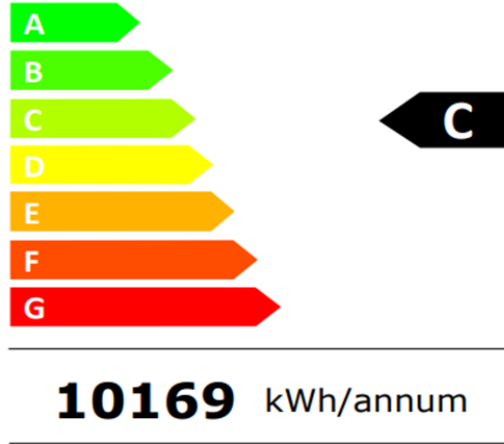
PS ve NS sınıfına sahip TTS'lerin günlük enerji tüketim grafiği Şekil 9'da verilmiştir. Günlük enerji tüketimi Eşitlik 6 yardımı ile hesaplanmıştır.



Şekil 9. PS ve NS sınıfı TTS'lerin günlük enerji tüketimi değerleri (Daily energy consumption values of PT and NT class RDCs)

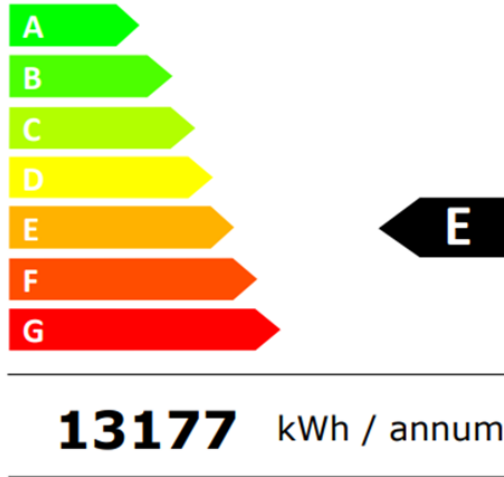
PS sınıfına sahip TTS' nin enerji etiket sınıfı "C" olarak belirlenmiş etiket sınıfı belirlenirken Eşitlik

7,8,9 yardımı ile hesaplanmıştır. Şekil 10’da enerji etiketine dair görsel verilmiştir.



Şekil 10. PS sınıfı TTS’ nin enerji etiketine ait görsel (Image of the energy label of PT class RDC)

NS sınıfı TTS’ nin enerji etiket sınıfı “E” olarak belirlenmiş ve etiket sınıfı belirlenirken Eşitlik 7,8,9 yardımı ile hesaplanmıştır. Şekil 11’de enerji etiketine dair görsel verilmiştir.



Şekil 11. NS sınıfı TTS’ nin enerji etiketine ait görsel (Image of the energy label of NT class RDC)

5. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Yapılan çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

- TS EN ISO 23953-2: 2017 standardına göre test edilen iç üniteler, PS ve NS sınıflarına sahip olup, tek bir merkezi dış ünite tarafından kontrol edilerek enerji verimliliği sağlanmıştır.
- PS ve NS sınıflarındaki soğutucular (iç üniteler) için günlük toplam enerji

tüketimleri sırasıyla 27,86 kWh/gün ve 36,1 kWh/gün olarak hesaplanmıştır.

- CO₂ eko-tasarım dış ünite ile entegrasyonu sağlanan TTS’ler yaşam döngüsü boyunca daha enerji verimli ve sürdürülebilir sistemler olmaktadır.
- PS ve NS sınıflarındaki soğutucular (iç üniteler) için enerji sınıfları ise sırasıyla C ve E sınıfı olduğu görülmüştür.

- TTS'lerdeki maksimum ve minimum paket sıcaklıkları (-0,8 / +5 °C ve -16 / -27 °C) belirlenmiştir. Analizler sonucunda çeşitli sıcaklık gereksinimleri karşılanmış ve kabin içindeki ürünler belirtilen standart sıcaklık sınıflarına uygun olarak soğuk/donmuş muhafazası sağlanmıştır.
- PS sınıfı TTS için TTA değeri “6,61 m²”, NS sınıfı TTS için TTA değeri “6,2 m²” olarak hesaplanmıştır.
- PS sınıfı TTS için SYET değeri “29068 kWh/yıl”, NS sınıfı TTS için SYET değeri “24769 kWh/yıl” olarak hesaplanmıştır.
- PS sınıfı TTS için EVE değeri “34,98” bulunarak enerji etiket sınıfı “C” olarak belirlenmiştir. NS sınıfı TTS için EVE değeri “53,2” bulunarak enerji etiket sınıfı “E” olarak belirlenmiştir.
- CO₂ kullanımı enerji maliyetlerini azaltırken sistem performansını artırır. Gıda endüstrisi, süpermarket soğuk depo sistemleri, endüstriyel prosesler ve iklimlendirme gibi çeşitli alanlarda tercih edilir.
- Multi-ejektörlü transkritik CO₂ soğutma sistemleri çevre dostu ve enerji verimliliği sağlar. Doğru entegrasyon ve çalışma prensiplerinin anlaşılmasıyla endüstriyel uygulamalarda sürdürülebilir soğutma çözümleri geliştirilebilir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

Yazarlar, çalışmaya vermiş oldukları desteklerinden dolayı Nurdil Teknik Soğutma A.Ş' ye teşekkür ederler.

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)

Süleyman ERTEN: Deney düzeneğini hazırlayarak deneyleri yapmıştır.

He prepared the experimental setup and performed the experiments.

Melis ÖDER: Deney sonuçlarını analiz etmiş ve makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

She analyzed the results and performed the writing process.

Burak Can TEMÜR: Deney sonuçlarını analiz etmiş ve makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

He analyzed the results and performed the writing process.

Buğra KOÇ: Deney sonuçlarını analiz etmiş ve makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

He analyzed the results and performed the writing process.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

There is no conflict of interest in this study.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Kasap, F., Acül, H., Canbaz, H., & Erbil, S. (2011). R744 (CO₂) soğutucu akışkanlı soğutma sistemleri, kanatlı borulu R744 (CO₂) evaporatör ve gaz soğutucu tasarım esasları. X. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi, 1, 369-389.
- [2] Dai, B., Cao, Y., Zhou, X., Liu, S., Fu, R., Li, C., & Wang, D. (2024). Exergy, carbon footprint and cost lifecycle evaluation of cascade mechanical subcooling CO₂ commercial refrigeration system in China. Journal of Cleaner Production, 434, 140186.
- [3] Sengupta, A., & Dasgupta, M. S. (2023). Energy and advanced exergoeconomic analysis of a novel ejector-based CO₂ refrigeration system and its optimization for supermarket application in warm climates. Thermal Science and Engineering Progress, 44, 102056.
- [4] Chi, W., Yang, Q., Chen, X., Li, L., Liu, G., & Zhao, Y. (2023). Advanced exergy analysis of NH₃/CO₂ cascade refrigeration system with ejector. International Journal of Refrigeration, 145, 185-195.
- [5] Li, L., Tian, H., Liu, K., Wu, Y., Wang, X., Liang, X., & Shu, G. (2024). Optimum pressure control with three controllable ejectors of a CO₂

- multi-ejector refrigeration system. International Journal of Refrigeration, 157, 172-185.
- [6] Yang, D., Zhu, J., Wang, N., & Xie, J. (2023). Experimental study on the performance of trans-critical CO₂ two-stage compression refrigeration system with and without an ejector at low temperatures. International Journal of Refrigeration, 154, 231-242.
- [7] Leerbeck, K., Bacher, P., Heerup, C., & Madsen, H. (2023). Grey box modeling of supermarket refrigeration cabinets. Energy and AI, 11, 100211.
- [8] Yılmaz, D., Mancuhan, E., & Yılmaz, B. (2020). Experimental investigation of PCM location in a commercial display cabinet cooled by a transcritical CO₂ system. International Journal of Refrigeration, 120, 396-405.
- [9] Sánchez, D., Vidan-Falomir, F., Nebot-Andrés, L., Llopis, R., & Cabello, R. (2023). Alternative blends of CO₂ for transcritical refrigeration systems. Experimental approach and energy analysis. Energy Conversion and Management, 279, 116690.
- [10] Singh, S., Maiya, P. M., Hafner, A., Banasiak, K., & Neksa, P. (2020). Energy efficient multiejector CO₂ cooling system for high ambient temperature. Thermal Science and Engineering Progress, 19, 100590.
- [11] Yu, B., Wang, D., Liu, C., Jiang, F., Shi, J., & Chen, J. (2018). Performance improvements evaluation of an automobile air conditioning system using CO₂-propane mixture as a refrigerant. International Journal of Refrigeration, 88, 172-181.
- [12] Aktaş, M., Koşan, M., Arslan, E. ve Tuncer, AD (2019). Termal enerji depolama ünitesinin modifikasyonu ile yeni bir güneş destekli ısı pompası sisteminin tasarlanması. Makine Mühendisleri Enstitüsü Bildirileri, Bölüm A: Güç ve Enerji Dergisi, 233 (5), 603.
- [13] TS EN ISO 23953-2:2017 Refrigerated display cabinets-Part 2: Classification, requirements and test conditions.
- [14] Commission Delegated Regulation (EU) 2019/2018 of 11 March 2019 supplementing Regulation (EU) 2017/1369 of the European Parliament and of the Council with regard to energy labelling of refrigerating appliances with a direct sales function (Text with EEA relevance). (2019, 11 March). Office Journal of the European Union (L 315). http://data.europa.eu/eli/reg_del/2019/2018/oj
- [15] İyim E., Altıntaş A., Almış Ç. Karbondioksit Akışkanlı Transkritik Soğutma Sistemlerinde Valf Seçim Kriterleri.

Mathematical Modeling of Voc Gas Release Values in Wood Based Panels with Surface Treatment

Haldun Ender ERDEM^{1*}, Hamza ÇINAR²

¹Kırıkkale University, Kırıkkale Vocational School, Kırıkkale, Türkiye

²Gazi University, Vocational School of Technical Sciences, Department of Design, Ankara, Türkiye

Article Info

Research article
Received: 08/04/2024
Revision: 22/05/2024
Accepted: 24/05/2024

Keywords

VOC (Benzene and Toluene) Emission Machining Wood Coating Varnish Glue Mathematical Modelling

Makale Bilgisi

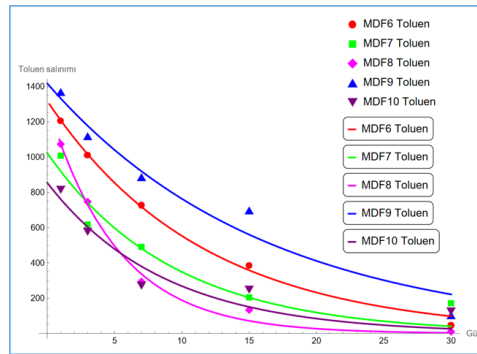
Araştırma makalesi
Başvuru: 08/04/2024
Düzeltilme: 22/05/2024
Kabul: 24/05/2024

Anahtar Kelimeler

VOC (Benzen ve Toluene) Emisyonu Ağaç Kaplama Vernik Tutkal Matematiksel modelleme

Grafik Özet (Graphical/Tabular Abstract)

The experimental results obtained as ppm in polyurethane varnish applied test specimens were plotted by applying non-linear fit to the exponential function with the help of Mathematica programme. / Poliüretan vernik uygulanan deney numunelerinde ppm olarak elde edilen deney sonuçları Mathematica programı yardımıyla üstel fonksiyona non-linear fit işlemi uygulanarak grafikler oluşturulmuştur.



Şekil A: Poliüretan Vernik Toluene ölçüm değerleri (ppm) Figure A: Polyurethane Varnish Toluene measurement values (ppm)/

Önemli noktalar (Highlights)

- Elde edilen denklem yardımı ile istenilen bir zaman için gaz salınım miktarı bulunabilir./ With the help of the equations obtained, the amount of gas emission for a desired time can be found.
- Elde edilen denklem yardımı ile gaz salınımlarının ne zaman maruziyet değerinin altında olacağı önceden tahmin edilebilir / With the help of the equation obtained, it can be predicted in advance when gas emissions will be below the exposure value.
- Elde edilen denklemler benzer malzemelerin gaz salınımları hakkında önceden fikir verebilir./ The equations obtained can give a preliminary idea about the gas emissions of similar materials.

Amaç (Aim): With the help of the equation obtained, it is aimed to determine the amount of emission of VOC gases for a desired time period and to find out when the VOC gas will be zero. / Elde edilen denklem yardımı ile istenilen bir zaman dilimi için VOC gazlarının salınım miktarlarını belirlemesi ve VOC gazının ne zaman sıfırlanacağını bulunması amaçlanmaktadır.

Özgünlük (Originality): For the first time in the literature, gas emissions can be predicted for any time with the equation obtained from the results of gas emissions. / Literatürde ilk kez gaz salınımları sonuçlarından elde edilen denklemle herhangi bir zaman için gaz salınımı önceden tahmin edilebilir.

Bulgular (Results): It can be said that the values corresponding to the first day oscillation do not have much effect on the oscillation, the determining factor is the damping constant. / İlk gün salınımına karşılık gelen değerlerin salınım üzerinde çok fazla etkisi olmayıp, belirleyici faktör sönüm sabitidir, denilebilir.

Sonuç (Conclusion): Producers should sell their products after the amount of emission of these VOC gases falls below the critical value. / Üretici firmalar, bu VOC gazlarının salınım miktarı kritik değerinin altına düştükten sonra ürünlerini satmalıdır.



Mathematical Modeling of VOC Gas Release Values in Wood Based Panels with Surface Treatment

Haldun Ender ERDEM^{1*}, Hamza ÇINAR²

¹Kırıkkale University, Kırıkkale Vocational School, Kırıkkale, Türkiye

²Gazi University, Vocational School of Technical Sciences, Department of Design, Ankara, Türkiye

Article Info

Research article
Received: 08/04/2024
Revision: 22/05/2024
Accepted: 24/05/2024

Keywords

VOC (Benzene and Toluene) Emission
Machining
Wood Coating
Varnish
Glue
Mathematical Modelling

Özet

VOC (Uçucu organik bileşikler), insan sağlığına ve çevreye zarar verebilen gazlardır. VOC'lerden en yaygın olarak bilinenleri benzen, toluen, etilbenzen ve ksilendir. Bu çalışmada, Türkiye'de mobilya üretim süreçlerinde sıklıkla kullanılan orta yoğunluktaki lif levha (MDF), yonga levha, kayın kaplama, papel kaplama, selülozik ve poliüretan uygulanan ürünlerde VOC gazlarının (Benzen ve Toluene) emisyonları belirlenmiş ve sonuçlar Mathematica programı ile incelenmiştir. Mathematica programının Fitting yönetimi kullanılarak, VOC gazlarının emisyon miktarları zamana bağlı elde edilmiştir. Böylece benzen ve toluen emisyonlarının zamana bağlı değişimi için matematiksel bağımlılar bilindiğinden gazların herhangi bir andaki miktarı ne zaman sıfırlanacağı ve ne zaman maruziyet değerlerinin altına düşeceği belirlenebilir. Sonuç olarak; Benzen gazı en yüksek değeri ortalama 156.372 ppm ile Ham MDF'de, Toluene gazı en yüksek değeri ise ortalama 159.353 ppm ile kenarları kaplamalı MDF bulunmuştur. Vernik uygulamalarında, poliüretan verniğin benzen gazı için daha önce maruziyet değerinin altına düştüğü, selülozik vernikte ise toluen gazı için daha önce maruziyet değerinin altına düştüğü tespit edilmiştir. Üretici firmalar, bu çalışmadaki yöntemi kullanarak süreci önceden tahmin edebilirler, insan sağlığı ve çevre kirliliği açısından ürünlerdeki VOC gazları maruziyet değerinin altında düşüğünde de ürünlerini satış için piyasalara arz edebilirler.

Üstyüzey İşlemleri Uygulanan Ahşap Esaslı Panellerde VOC Gaz Salınım Değerlerinin Matematiksel Modellenmesi

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 08/04/2024
Düzeltilme: 22/05/2024
Kabul: 24/05/2024

Anahtar Kelimeler

VOC (Benzen ve Toluene) Emisyonu
Ağaç Kaplama
Vernik
Tutkal
Matematiksel modelleme

Abstract

VOC (Volatile organic compounds) are gases that can harm human health and the environment. The most widely known VOCs are benzene, toluene, ethylbenzene and xylene. In this study, the emissions of VOC gases (Benzene and Toluene) in medium density fibreboard (MDF), particleboard, beech veneer, papel veneer, cellulosic and polyurethane applied products, which are frequently used in furniture production processes in Turkey, were determined and the results were examined with Mathematica program. By using the Fitting management of Mathematica programme, the emission amounts of VOC gases were obtained as a function of time. Thus, since the mathematical relations for the time-dependent change of benzene and toluene emissions are known, it can be determined when the amount of gases at any moment will be zero and when it will fall below the exposure values. As a result, the highest value of benzene gas was found in raw MDF with an average of 156.372 ppm and the highest value of toluene gas was found in MDF with coated edges with an average of 159.353 ppm. In varnish applications, polyurethane varnish was found to fall below the previous exposure value for benzene gas, and cellulosic varnish was found to fall below the previous exposure value for toluene gas. Producer companies can predict the process in advance by using the method in this study, and they can supply their products to the markets for sale when the VOC gases in the products fall below the exposure value in terms of human health and environmental pollution.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Sanayi devrimi ile başlayan nüfusun şehirlerde yoğunlaşması konut, işyeri ve sosyal alan

ihtiyacının giderek artmasına yol açmıştır. İnsanların yeni yaşam alanlarına ihtiyaç duymaları sonucu mobilya kullanımı artmıştır [1]. İnternet kullanımı da ürüne ulaşma sürecini kolaylaştırmış

ve mobilya tüketimi artmıştır [2]. Bunun sonucu olarak ahşap esaslı levhaların kullanımı giderek artmıştır.

Ahşap esaslı levhalar yüzeylerini kaplamada kullanılan tutkal ve verniklerin toksisitesi yüksek kimyasallar içerdikleri bilinmektedir [3]. Mobilya üretim ve kullanım süreçlerinde bu toksit malzemeler buldukları ortama yayılmaktadırlar. Uçucu organik bileşikler (VOC) olarak bilinen bu toksik malzemeler insan sağlığını olumsuz olarak etkilemektedir [4]. Ev yapımında ve dekorasyonlarında kullanılan yonga levha, yönlendirilmiş yonga levha, sert ağaç kontrplak ve orta yoğunluklu lif levha (MDF) gibi preslenmiş ahşap ürünlerin üretiminde üre formaldehit kullanılmaktadır. Formaldehit insanlarda kanserojen olduğu bilinen bir maddedir [5] [6] [7]. Formaldehit dışında benzen ve tolüen gibi VOC'ler sağlık etkileri açısından öncelikli kirleticiler olarak değerlendirilir [8].

Çin'de altı büyük endüstrinin (araç imalatı, baskı, ekipman kaplama, elektronik imalat, mobilya, üretim ve biyo-eczacılık) VOC emisyonlarını, emisyon özelliklerini, çevresel etki ve sağlık riski değerlendirme konularını raporlamışlardır. Raporların VOC emisyonlarının derinlemesine anlaşılmasını sağlayacağı ve bazı endüstrilerde VOC emisyonlarının ulusal kontrolü ve yönetimi için temeller oluşturması düşünülmüştür. Ana emisyon bileşeni olarak benzenler, esterler, alkoller, ketonlar, alkanlar, kloroalkanlar ve alkenler tespit edilmiştir. Sağlık riski değerlendirmelerinde ise öncelikle mobilya imalatı ve kloroalkanların titizlikle kontrol edilmesi önerilmektedir. VOC emisyonlarının kontrollünde düşük maliyetli ve yüksek verimli teknolojiler geliştirmek ve belirli endüstri emisyon standartlarını düzenlemek iki temel konu olarak önerilmiştir [9].

Çin'de solvent kullanımıyla ilişkili uçucu organik bileşiklerin kaynak profilleri isimli çalışmalarında, mobilya endüstrisinde VOC emisyonunun önemli düzeyde olduğunu belirtmişlerdir. Buna ilaveten VOC'lerin tüm üretim süreçlerindeki sağlık risklerinin yeterince araştırılmadığını belirtmişlerdir ve mobilya üretim süreçlerindeki VOC kaynakları hakkında çok az şey bilindiğini ifade etmişlerdir [10].

Uçucu organik bileşiklerin (VOC) emisyon oranları 5m³ boyutunda bir oda 25°C ve 50% nemde beş tür ortak mobilya ürününün emisyon özelliklerini araştırmak için ölçümler yapmışlardır. Evlerde ve işyerlerinde yaygın olarak kullanılan bu mobilya ürünleri salınım oranları yönünden sıralandığında

(Yemek masası > divan > sandalye > komodin > dolap) sonucu elde edilmiştir. Farklı kimyasal grupları arasındaki VOC emisyon oranları sıralaması (aromatik > terpenler > karbonil > diğerleri > parafin > olefin > halojenli parafin) elde edilmiştir. Bu nedenle, VOC salınımlarının farklı mobilya türleri arasında oldukça hassas bir şekilde bulunabileceğini tespit etmişlerdir. Buna ek olarak kaplamalı veya kaplamasız mobilyalarda VOC salınımlarında önemli bir fark olmadığını açıklamışlardır [11].

Tong, R., ve arkadaşları, mobilya üretim sürecinde yayılan uçucu organik bileşiklerin kaynakları ve sağlık risklerini incelemişlerdir. Elde ettikleri sonuçlara göre VOC'lerin yüzey kaplama işleminin ardından cilalamada, astarlama, kenar yapıştırma, cilanın perdahlanmasında, kurutma ve boya karıştırma işlemlerinde olduğunu göstermektedir. Çalışanların sağlıkları açısından üst kaplama, alt kaplama ve cilalama bölümleri 1.00E-05 üzerindeki değerler sonucu en büyük kanserojen risklerin olduğu bölümlerdir. Diğer bölümler olan boya karıştırma, kurutma ve kenar yapıştırma kanserojen risk daha düşük gözlemlenmiştir. Ahşap işleme atölyesi ve boyama atölyesindeki emisyon süreçlerinde alkanlar, hidrokarbonlar, halojenli alkanlar, ketonlar ve doymuş alifatik esterler dahil toplam 17 VOC bulunmuştur. VOC'lerin esas olarak yapıştırıcılar, boyalar, seyrelticiler ve kürlenme maddelerinden salındığını gözlemlenmiştir. Buna bağlı olarak mobilya üretiminde en fazla VOC konsantrasyonun sırası ile kaplama > kenar yapıştırma > cilalama verniği > kurutma > boya karıştırma işlemlerinde belirlenmiştir. Bu bağlamda üst kaplama ve kaplama işlemlerinde havalandırmanın davlumbaz ve tahliye kanalları ile yapılmasını önermişlerdir. Böylelikle kimyasal kirleticilerin solunmasının hafifletileceğini düşünmektedirler [12].

Petr,C., ve Jiri,S., mobilya üretiminde kullanılan farklı türden malzemelerin VOC emisyonları üzerindeki etkisini belirlemeye çalışmışlardır. Deneysel kısım, mobilya üretimi için kullanılan çeşitli malzeme türlerinin VOC emisyonlarının miktarı ve kalitesi üzerindeki etkisinin değerlendirilmesine odaklanmaktadır. Bu amaç doğrultusunda elde edilen ölçüm sonuçlarına göre, butilasetat (poliüretan vernik için kullanılan kimyasal) ve butoxy (su bazlı vernik için kullanılan kimyasal) maddeleri içeren iki farklı türde vernik ile verniklenmiş deney malzemelerinin VOC emisyonları her iki durum için maddelerin konsantrasyonları açısından 24 saat sonra en yüksek seviyede gözlemlenmiştir [13].

Çınar, H. ve arkadaşları 18 mm kalınlığındaki yonga levha ve MDF örneklerini 20 °C sıcaklıkta ve

Yapılan çalışmada yonga levha için en yüksek değerin (0,4119 ppm) ile merkezden; en düşük değerinde (0,0875 ppm) ile kenardan salındığını açıklamışlardır. MDF deney numuneleri için ise en yüksek değeri (0,3012 ppm) merkezden alınan örneklerde belirlenirken, en düşük değeri de (0,1807 ppm) kenardan alınan deney numunelerinde salındığını belirlemişlerdir [14].

Çınar, H. ve arkadaşları selülozik, sentetik ve poliüretan verniklerden açığa çıkan gazların emisyon değerlerini bulmak amacıyla, yonga levha ve MDF deney numunelerini kayın kaplama ile kaplayıp kaplamalı malzeme üzerine vernik uygulamışlardır. Selülozik vernik kullanılan örnekler sentetik verniğe göre 94%, poliüretan verniğe göre ise 65% daha fazla Toluen gazı salgılamıştır. Poliüretan vernik kullanılan örnekler ise sentetik verniğe göre 99%, selülozik verniğe göre ise 65% daha fazla n-Butil asetat gazı salgılamıştır. Selülozik vernik kullanılan örnekler

65% nemde, üretimden 1, 2 ve 3 saat sonra formaldehit salınımı yönünden analiz etmişlerdir.

ise sentetik verniğe göre 99% daha fazla Aseton gazı salgılamıştır. Selülozik vernik kullanılan malzemeler ise sentetik verniğe göre 97%, poliüretan verniğe göre ise 23% daha fazla İzobütülasetat gazı salgılamıştır. Tüm bu sonuçlar tasarımcılar tarafından evrensel tasarımın önemli bir parçası olan yeşil tasarım ışığında, sentetik verniklerin selülozik ve poliüretan verniklere kıyasla daha çok tercih edilme gerekliliğini gerektirmektedir [15].

Uçucu organik bileşenler için mesleki maruziyet sınır değerleri Kanserojen veya Mutajen Maddelerle Çalışmalarda Sağlık ve Güvenlik Önlemleri Hakkında Yönetmelik [16] ve Tablo 1'de IFA Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung tarafından yayınlanan GESTIS International Limit Values'da belirtilmiştir [17]. Tablo 2'de Mobilya sektöründe kullanılan bazı kimyasallar ve insan üzerindeki olumsuz etkileri [18].

Tablo 1. Uçucu VOC bileşiklerinin Ulusal ve Uluslararası mesleki maruziyet sınır değerleri (National and International occupational exposure limit values of volatile VOC compounds)

EINECS (1)	CAS (2)	Maddenin Adı	Sınır Değer				Özel İşaret (3)
			TWA (4) (8 Saat)		STEL (5) (15 Dak.)		
			mg/m ³ (6)	ppm (7)	mg/m ³	ppm	
202-425-9	71-43-2	Benzen	3,25	1	384	100	Deri
202-436-9	95-63-6	Toluen	192	50	384	100	-

Tablo 2. Mobilya sektöründe kullanılan bazı kimyasal maddeler (Some chemicals used in the furniture industry)

Kimyasalın Adı	Kimyasal Formülü	Kullanım Amacı	Maruz kalma şekli ve sağlık sorunları
Toluen	C ₆ H ₅ CH ₃	Mobilya endüstrisinde tutkal, boya, tiner ve vernik maddelerinde bulunmaktadır. Ahşap koruma, vernikleme, yapıştırma, birleştirme gibi işlem basamaklarında kullanılmaktadır.	Solunum: Buharlaşmaya bağlı uyuşukluk, baş dönmesi, öksürük, boğaz ağrısı, bilinç kaybı, baş ağrısı, mide bulantısı Deri: Cildi tahriş eder. Tekrarlanan maruz kalma ciltte kuruluğa, çatlamaya veya kızarıklığa neden olabilir. Göz: Gözle temas tahrişe neden olabilir. Eritme (kızarıklık), ağrı Yutma: Akciğerde hasara neden olabilir.
Benzen	C ₆ H ₆	Boyama, vernikleme işlemlerinde kullanılır.	Solunum: Burun, boğaz ve akciğer tahrişi Yüksek konsantrasyonların solunması sonucu baş dönmesi, uyuşukluk, narkotik belirtiler Deri: Cilt tahrişi, dermatit Göz: Yüksek konsantrasyonda göz tahrişi Yutma: Kusma, solunum yetmezliği, ölüm

Deney numunelerine uygulanan her işlemde elde edilen sayısal sonuçlar Wolfram Mathematica programı ile Fitting yönetimi kullanılarak, VOC salınımının zamana bağlı olarak matematiksel

ifadesi elde edilmiştir. Bu denklem yardımı ile istenilen bir zaman dilimi için VOC gazlarının salınım miktarlarını belirlemesi ve VOC gazının ne zaman sıfırlanacağını bulunması amaçlanmaktadır.

2. MATERYAL VE METOD (MATERIALS AND METHODS)

2.1. Deneysel Ekipman (Experimental Equipment)

18mm yonga levha ve MDF, 0.6 mm kayın kaplama, 2 mm papel kaplama, üre formaldehit, holtmelt, kontak tutkal, selülozik, poliüretan ve su bazlı vernikleri deney numunelerinin hazırlanmasında kullanılmıştır.

2.2. Numunelerin Hazırlanması (Preparation of Samples)

MDF'den 50 çarpı 50cm ebadında kesilen deney numunelerine sırasıyla şu işlemler uygulanmıştır. Öncelikle parçaların her iki yüzüne üre formaldehit tutkalı kullanılarak 0.6 mm kayın kaplandı. Parçaların kenarlarına Holtmelt tutkallar sürülerek 2mm papel kaplama yapıştırılmıştır. Palet zımpara makinesinde 80 numara zımpara ile deney numuneleri üst yüzey işlemlerine hazır hale getirildi. Dolgu verniği atıldıktan önce ve sonra 220 numara zımpara ile zımparalama yapılarak son kat vernik uygulaması yapılmıştır. Vernikleme aşamasında selülozik ve poliüretan vernikler kullanılmıştır. Vernikleri kuruması için 2 saat

beklenilmiştir. Polisan marka selülozik ve poliüretan dolgu vernikleri 250 m²/g, son kat vernik 200 m²/g olarak firmanın önerdiği şekilde deney numunelerine uygulanmıştır.

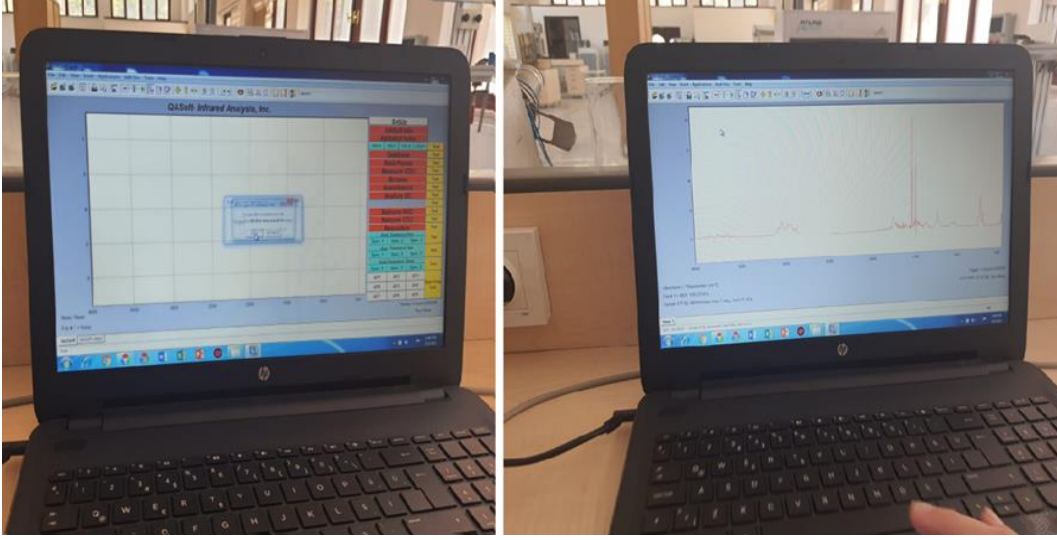
Deney numunelerinin hazırlanmasında TS 2470 ve EN 326-1 standartlarına uyulmuştur. Deney numuneleri 120 °C sıcaklık ve 150 bar basınçta presleme işlemi yapılarak yüzey kaplanmıştır. Hazırlanan deney örnekleri, sıcaklığı 20±2 °C ve bağıl nemi 65±5% olan iklimlendirme odasında değişmez ağırlığa ulaşmaya kadar bekletilmiştir. Deney numuneleri her bir ölçüm için 2 saat süre iklimlendirme kabininde (Nüve ID 300 test kabini) bekletildikten sonra numune alınarak ölçümler yapılmıştır (Şekil-1). Deneyler sırası ile; ham MDF, yüzeylere üre formaldehit tutkalı kullanılarak 0.6 mm kayın kaplama yapıştırılmış, kenarlarına Holtmelt kullanılarak 2 mm papel kaplama yapıştırılmıştır. Vernik uygulamaları gerekli zımparalama işlemi uygulanarak, dolgu ve son kat olmak üzere selülozik, poliüretan ve su bazlı olarak üretici firmanın tavsiyelerine uygun şekilde uygulanmıştır. Vernik uygulanan parçalar 1, 3, 7,15 ve 30 günde gaz ölçümleri TS EN 717-1 ve ISO 10580 esaslarına göre gerçekleştirilmiştir.



Şekil 1. Deney numunelerinin iklimlendirilmesi Nüve ID 300 ve gaz salınımının ölçüldüğü FTIR Spectrum Two cihazı (Acclimatisation of experimental samples Nüve ID 300 and FTIR Spectrum Two device for measuring gas release)

Gaz ölçümü için test hücresinin FTIR Spectrum Two cihazında kalibrasyonu yapılmıştır. Daha sonra iklimlendirme kabininde bulunan deney numunelerden salınan gaz salınım örnekleri test

hücrelerine çekilmiştir. Alınan gaz salınım örnekleri FTIR Spectrum Two cihazı ile entegre çalışan QASoft ve Grams programları ile tespit edilen gazların ppm değerleri alınmıştır (Şekil-2).



Şekil 2. FTIR Spectrum Two cihazı ile entegre çalışan QASoft ve Grams programları kullanılarak gaz miktarlarının bulunması. (Gas quantification using QASoft and Grams programmes integrated With FTIR Spectrum Two)

QASoft (Quantitative Analysis Software) (Kantitatif Analiz yazılımı): Bir maddenin hangi bileşenlerden (element veya bileşiklerden) meydana geldiğini bulmaya yarayan analiz türüne kalitatif; bu bileşenlerden her birinin miktarını bulmaya yarayan analiz türüne de kantitatif analiz denir. QASoft, Infrared Analysis Limited Şirketi tarafından geliştirilmiş kızılötesi aktif gazların ölçümünü sağlayan kantitatif bir gaz analizi yazılımıdır [19].

2.3. Sayısal Metot (Numerical Method)

Artan zaman değerlerine göre gazların salınım miktarları beklendiği gibi üstel azalan bir fonksiyon gibi davranmaktadır. Bu nedenle Wolfram Mathematica programı yardımıyla üstel fonksiyona göre non-linear fit işlemi yapılmıştır [20]. Fitting yöntemi en küçük kareler yönteminin kullanılmasına dayanır. En küçük kareler yönteminde veri setinde yer alan verilere göre veri setinin uyduğu matematiksel ifade belirlenir. Deney sonuçları ile matematiksel ifadeden üretilen sonuç arasındaki farkların karelerinin minimum olması istenir ve buna göre veri setinin uyduğu matematiksel ifade belirlenir [21]. Böylece Denklem (1) ile verilen matematiksel ifade kullanılmıştır.

$$g(t) = \exp(a + bt) \quad (1)$$

Burada $g(t)$, t anındaki gaz salınımıdır ve a ile b sabitleri, değerleri sayısal olarak belirlenmek istenen sabitlerdir. Non-linear fit işleminin uygulanması ile bu değerler Tablo 11’ de verilmiştir. Her bir gaza karşılık gelen gaz salınımı grafikleri Şekiller 3-6’da verilmiştir. Denklem (1)’ de eksponansiyel terim içinde yer alan “ a ” sabitinin kullanılmasının nedeni $t=0$, anındaki yani başlangıç anındaki salınımın

$$g(t=0) = \exp(a) \quad (2)$$

değerine karşı gelmesinden dolayıdır. Biraz cebirsel işlem yapılarak Denklem (1) ile verilen ifade

$$g(t) = \exp(a) \exp(-bt) = N_0 \exp(-bt), \quad (3)$$

$b > 0$

şeklinde yazılabilir. Burada N_0 , $t=0$ anındaki salınımına karşı gelir ve b sönüm sabiti olarak düşünülebilir. Elde edilen sonuçlar Tablo 9’da verilmiştir.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA (FINDINGS AND DISCUSSION)

Her aşamada test hücresine çekilen gazların FTIR Spektrum gaz ölçüm cihazında ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen değerler Tablo 3’de verilmiştir. Tablo 3 verilerine göre Benzen gazının Ham MDF için salınım değerleri 433.726 ppm ile 58.011 ppm aralığında elde edilmiştir. Kaplamalı MDF’de Benzen gazı salınım değerleri 256.365 ppm ile 12.055 ppm aralığında elde edilmiştir. Son olarak kenarları kaplamalı MDF’ de Benzen gazı salınım değerleri 109.273 ppm ile 2.348 ppm aralığında elde edilmiştir. Buna göre en yüksek Benzene salınım değerleri Ham MDF’ de gözlemlenmiştir. Bunun yanı sıra en küçük gaz salınım değerleri kenarları kaplamalı MDF’de gözlemlenmiştir. Elde edilen değerlerin ortalamaları hesaplandığında Ham MDF için 156.372 ppm en yüksek ve kenarları kaplamalı MDF’de 37.744 ppm en düşük değer olarak bulunmuştur.

Tablo 3 verilerine göre Toluene gazının Ham MDF için salınım değerleri 286.642 ppm ile 14.157 ppm aralığında elde edilmiştir. Kaplamalı MDF’de Toluene gazı salınım değerleri 166.468 ppm ile 30.638 ppm aralığında elde edilmiştir. Kenarları kaplamalı MDF’ de Toluene gazı salınım değerleri 906.357 ppm ile eksi değerler elde edilmiştir. Bu negatif değerler sıfır olarak alınmıştır. Buna göre en yüksek Toluene salınım değerleri kenarları kaplamalı numunelerde görüldüğü gibi en küçük değer de yine kenarları kaplamalı numunelerde gözlemlenmiştir. Elde edilen değerlerin ortalamaları hesaplandığında kaplamalı MDF için 60.204 ppm en düşük ve kenarları kaplamalı MDF için 159.353 ppm en yüksek değer olarak bulunmuştur. Tablo 3’ te verilen değerler, gazların zamana göre salınım değerleridir.

Tablo 3. Deney sonuçları (Experiment results)

Parça no	GAZLAR	Ham MDF	Kaplamalı (Üre Formaldehit)	Kenar Kaplamalı Holtmelt	Vernik türü	1.gün	3.gün	7.gün	15.gün	30.gün
1	Benzen	66.090	12.055	2.348	Selülozik	1480.030	842.498	517.355	212.002	12.103
	Toluene	286.642	30.638	-515.328		1450.024	619.036	524.539	431.196	159.784
2	Benzen	167.940	79.039	34.131		507.902	259.791	168.873	166.044	27.671
	Toluene	86.706	54.963	-58.745		1059.610	902.722	899.123	330.718	4.460
3	Benzen	58.011	44.214	32.020		445.879	387.804	184.259	63.899	6.270
	Toluene	26.105	32.906	-586.496		1285.913	649.026	401.645	165.744	61.352
4	Benzen	359.220	79.498	18.430		387.804	321.945	216.056	79.989	58.434
	Toluene	36.231	43.859	-99.797		1046.047	535.534	381.946	177.849	36.125
5	Benzen	433.726	256.365	56.004		591.790	445.178	278.673	171.583	129.922
	Toluene	14.157	71.165	-620.803		1288.284	554.472	508.409	127.469	22.953
6	Benzen	217.450	54.745	10.194	1273.081	791.503	746.934	104.558	93.427	
	Toluene	65.576	41.479	38.249	1205.074	1009.93	725.943	383.591	44.298	
7	Benzen	242.925	148.121	109.273	404.082	161.688	113.597	101.434	43.149	
	Toluene	122.775	98.992	67.729	1007.736	617.678	491.037	204.630	171.362	
8	Benzen	87.445	46.513	22.447	396.634	202.831	168.600	73.613	47.452	
	Toluene	24.179	71.659	522.881	1073.170	746.390	294.016	133.552	10.494	
9	Benzen	136.942	57.607	51.708	298.754	147.812	102.880	51.455	23.798	
	Toluene	21.971	49.912	57.927	1368.700	1118.36	886.478	697.762	103.730	
10	Benzen	69.462	61.307	40.169	694.322	310.090	54.085	34.147	13.171	
	Toluene	27.651	166.468	906.357	814.268	576.478	271.075	248.220	124.502	

Tablo 4. Selülozik vernik Benzen ölçüm değerleri (ppm) (Benzene measurement values of cellulosic varnish (ppm))

Parça Adı	Vernik Türü	Maruziyet ve Sıfır Değerleri			
		Maruziyet Değeri 100 (ppm) Benzen (Gün)	Sıfır Değeri Benzen (Gün)	Maruziyet Değeri 100 (ppm) Toluene (Gün)	Sıfır Değeri Toluene (Gün)
MDF 1	Selülozik	16	656	21	886
MDF 2		13	875	32	1425
MDF 3		13	821	13	565
MDF 4		15	1123	15	676
MDF 5		21	1273	14	607
MDF 6	Poliüretan	16	670	30	1251
MDF 7		7	501	22	1029
MDF 8		11	823	13	617
MDF 9		7	641	43	1716
MDF 10		6	345	18	693

Tablo 4'te selülozik vernik uygulanan ilk beş numunenin 13-21 gün aralığında aldığı değerler sonunda benzen gazı maruziyet değeri olan 100 ppm altına düştüğü gözlemlenmiştir. Poliüretan vernik uygulanan deney numunelerinde 6-16 gün aralığında aldığı değerler sonunda benzen gazı maruziyet değeri olan 100 ppm altına düştükleri gözlemlenmiştir. Bu verilere göre poliüretan verniğin benzen açısından daha önce maruziyet değerinin altında sonuçlar verdiği söylenebilir.

Tablo 4'te selülozik vernik uygulanan ilk beş numunenin 13-32 gün aralığında aldığı değerler sonunda toluen gazı maruziyet değeri olan 100 ppm altına düştüğü gözlemlenmiştir. Poliüretan vernik uygulanan deney numunelerinde 13-43 gün aralığında aldığı değerler sonunda toluen gazı maruziyet değeri olan 100 ppm altına düştükleri gözlemlenmiştir. Bu verilere göre selülozik verniğin toluen gazı açısından daha önce maruziyet değerinin altında sonuçlar verdiği söylenebilir.

3.1. Verilerin İstatistiksel Analizi (Statistical Analysis of Data)

Testler sonucunda elde edilen verilerin istatistiksel analizi MİNİTAB programı ile yapılmıştır. Gruplandırma için çoklu varyans analizi ANOVA testi uygulanmıştır.

Deney numunelerine 1.gün alınan ölçümlerdeki selülozik ve poliüretan vernik uygulamalarında benzen ve toluen gazları belirlenmesine ilişkin ANOVA testi Tablo 5' te verilmiştir.

Tablo 5'te gösterilen değerlere göre, 1.gün verileri için benzen ve toluen arasındaki farklılıklar, $P < 0.05$ olduğu için anlamlı bulunmuştur. Vernik (selülozik ve poliüretan) arasındaki farklılıklar, $P < 0.05$ olduğu için önemli ölçüde düşük ve anlamsız olduğu anlaşılmıştır. Vernikler ve gazlar arasındaki farklılıkların P'nin 0.05 üzerinde olduğu için anlamsız olduğu da kanıtlanmıştır.

Tablo 5. Anova test sonuçları 1. gün. (Anova test results Day 1.)

Varyans Kaynağı	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Katkı	Kare Ortalama	F Değeri	Anlamlılık $P < 0,05$
Gaz	1	1309980	42.17%	1309980	12.04	0.003
Vernik	1	50750	1.63%	50750	0.47	0.504
Gaz*Vernik	1	4942	0.16%	4942	0.05	0.834
Hata	16	1740783	56.04%	108799		
Toplam	19	3106454	100.00%			

Tablo 6. Anova test sonuçları 3. gün. (Anova test results Day 3.)

Varyans Kaynağı	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Katkı	Kareler Ortalaması	F Değeri	Anlamlılık $P \leq 0,05$
Gaz	1	598055	39.25%	598055	11.68	0.004
Vernik	1	1357	0.09%	1357	0.03	0.873
Gaz*Vernik	1	105319	6.91%	105319	2.06	0.171
Hata	16	818913	53.75%	51182		
Toplam	19	1523643	100.00%			

Tablo 6'da verilen 3. Gün verilerine ANOVA testi sonuçlarına göre Tablo 5'teki gibi Gaz verileri arasındaki farklılıklar anlamlıdır fakat Vernik ile Gaz*Vernik verileri arasındaki farklılıklar anlamlı bulunmamıştır. Tablo 7'de verilen 7. Gün verilerine ANOVA testi sonuçlarına göre Tablo 5 ve 6'daki gibi Gaz verileri arasındaki farklılıklar anlamlıdır

fakat Vernik ile Gaz*Vernik verileri arasındaki farklılıklar anlamlı bulunmamıştır. Tablo 8'de verilen 15. Gün verilerine ANOVA testi sonuçlarına göre Tablo 5, 6 ve 7'deki gibi Gaz verileri arasındaki farklılıklar anlamlıdır fakat Vernik ile Gaz*Vernik verileri arasındaki farklılıklar anlamlı bulunmamıştır.

Tablo 9'da verilen 30. Gün verilerine ANOVA testi sonuçlarına göre hem Gaz verileri hem de Vernik ile

Gaz*Vernik verileri arasındaki farklılıklar anlamlı bulunmamıştır.

Tablo 7. Anova test sonuçları 7. gün. (Anova test results 7th day.)

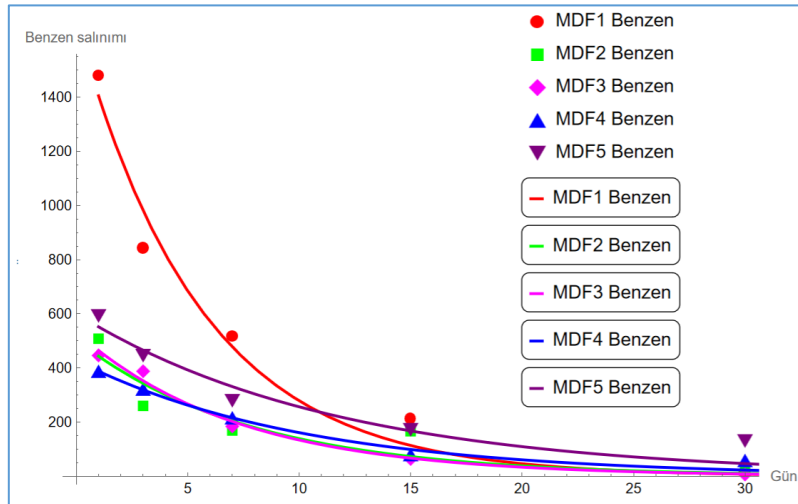
Varyans Kaynağı	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Katkı	Kareler Ortalaması	F Değeri	Anlamlılık $P \leq 0,05$
Gaz	1	401266	31.31%	401266	7.32	0.016
Vernik	1	2559	0.20%	2559	0.05	0.832
Gaz*Vernik	1	871	0.07%	871	0.02	0.901
Hata	16	877018	68.43%	54814		
Toplam	19	1281714	100.00%			

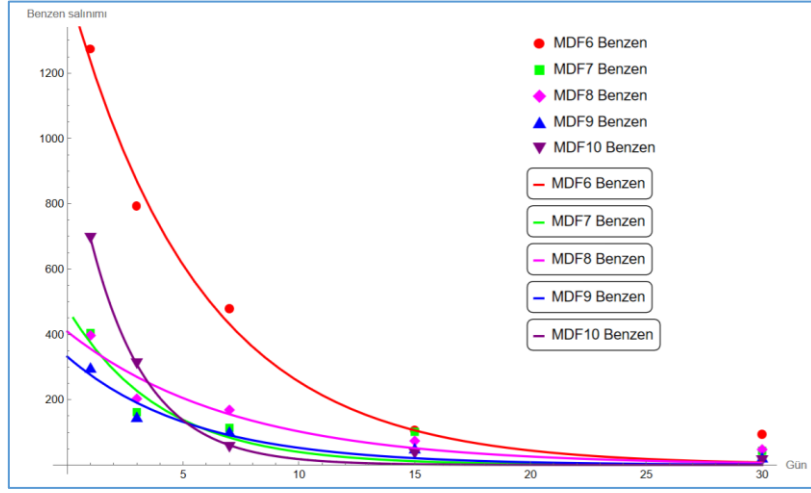
Tablo 8. Anova test sonuçları 15. gün. (Anova test results 15th day.)

Varyans Kaynağı	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Katkı	Kareler Ortalaması	F Değeri	Anlamlılık $P \leq 0,05$
Gaz	1	169649	34.98%	169649	9.50	0.007
Vernik	1	567	0.12%	567	0.03	0.861
Gaz*Vernik	1	29115	0.07%	29115	1.63	0.220
Hata	16	285686	68.90%	17855		
Toplam	19	485018	100.00%			

Tablo 9. Anova test sonuçları 30. gün. (Anova test results 30th day.)

Varyans Kaynağı	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Katkı	Kareler Ortalaması	F Değeri	Anlamlılık $P \leq 0,05$
Gaz	1	4023	7.69%	4023	1.42	0.251
Vernik	1	1221	2.33%	1221	0.43	0.521
Gaz*Vernik	1	1677	3.20%	1677	0.59	0.453
Hata	16	45415	86.77%	45415		
Toplam	19	52337	100.00%			

**Şekil 3.** Selülozik vernik Benzen ölçüm değerleri (ppm) (Benzene measurement values of cellulosic varnish (ppm))

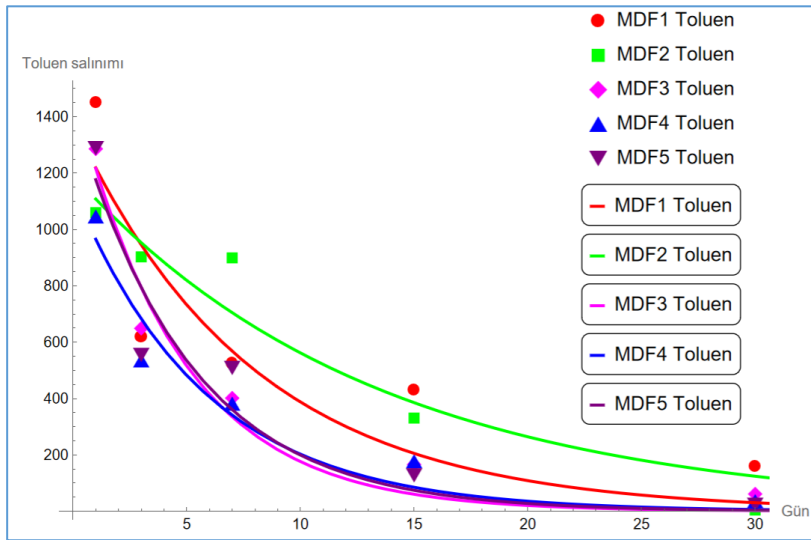


Şekil 4. Poliüretan vernik Benzen ölçüm değerleri (ppm) (Benzene measurement values of polyurethane varnish (ppm))

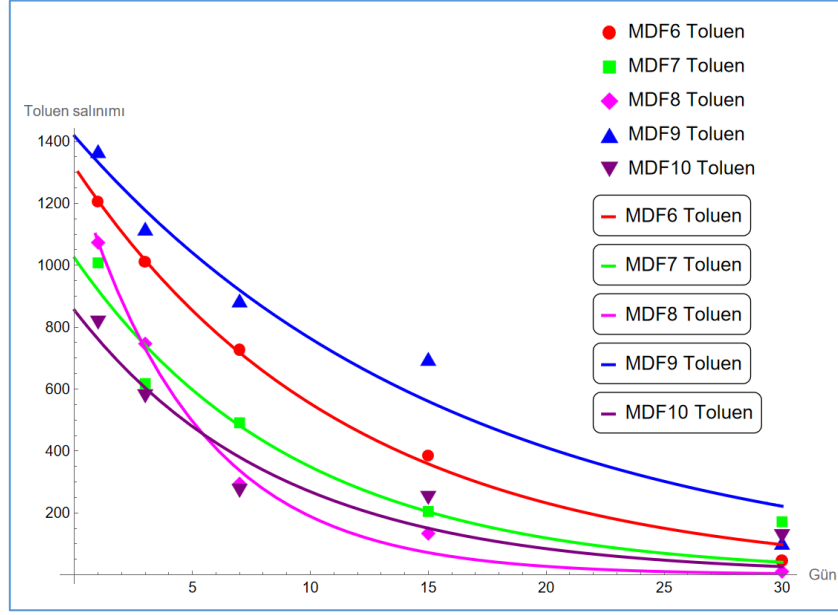
Şekil 3'te verilen incelendiğinde, selülozik verniklerin uygulandığı ilk beş numunede yaklaşık 17 gün sonunda benzen gazının maruziyet sınır değeri olan 100 ppm altına düştüğü gözlemlenmiştir.

Grafik incelendiğinde, poliüretan verniklerin uygulandığı ikinci beş numunede yaklaşık 12 gün sonunda benzen gazının maruziyet sınır değeri olan 100 ppm altına düştüğü gözlemlenmiştir.

Şekil 3 ve 4'teki grafikler incelendiğinde, poliüretan verniğin Benzen gazı açısından daha önce maruziyet değerinin altında sonuçlar verdiği söylenebilir. Grafik selülozik vernik uygulanan ilk beş numunede yaklaşık 17 gün sonunda toluen gazının maruziyet sınır değeri olan 200 ppm altına düştüğü gözlemlenmiştir.



Şekil 5. Selülozik vernik Toluen ölçüm değerleri (ppm) (Toluene measurement values of cellulosic varnish (ppm))



Şekil 6. Poliüretan vernik Toluen ölçüm değerleri (ppm) (Polyurethane varnish Toluene measurement values (ppm))

Şekil 6' da verilen grafik incelendiğinde, poliüretan verniklerin uygulandığı ikinci beş numunede yaklaşık 19 gün sonunda tolüen gazının maruziyet sınır değeri olan 200 ppm altına düştüğü gözlemlenmiştir. Şekil 5' teki grafikler selülozik ve

poliüretan vernik uygulanan parçalar karşılaştırıldığında bu verilere göre poliüretan verniğin Toluen gazı açısından daha sonra maruziyet değerinin altında sonuçlar verdiği söylenebilir.

Tablo 10. Non-linear fit işlemi sonucunda elde edilen matematiksel ifadelerin parametreleri (Parameters of the mathematical expressions obtained as a result of the non-linear fit process)

Parça no	Benzen			Toluen		
	N_0	b	τ^*	N_0	b	τ^*
1	1681.76	0.179783	110	1383.84	0.127225	150
2	504.37	0.129010	140	1194.65	0.075425	250
3	527.43	0.127987	140	1507.83	0.214680	90
4	427.59	0.097727	180	1148.22	0.173540	110
5	600.86	0.085210	220	1433.14	0.197339	100
6	1471.31	0.175369	110	1317.88	0.086814	220
7	479.60	0.249209	80	1023.42	0.107603	180
8	408.33	0.138162	130	1304.29	0.193396	100
9	333.21	0.171720	100	1396.60	0.061263	310
10	1043.57	0.406778	50	854.38	0.115747	160

*Gaz salınımının 10^{-6} değerinin altına düştüğü gün değeridir. 10'ar gün aralıkla hesaplatıldığından 10 günün katları olarak elde edilmiştir.

Sönüm sabiti küçük olan gazlar için gaz salınımının salınım süresi daha uzundur. Örneğin 4. ve 5. Benzene parçaları ve 2., 6., 7. ve 9. Toluen parçalarının sönüm sabitleri küçük olduğundan bu gazların salınımının sıfırlandığı gün süreleri 180 ve

üzeri günler olarak bulunmuştur. Yine elde edilen sonuçlara göre ilk gün salınım karşılık gelen değerlerin salınım üzerinde çok fazla etkisi olmayıp, belirleyici faktör sönüm sabitidir, denilebilir.

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Mobilya üretiminde kullanılan malzemelerdeki VOC gazlarının (Benzen ve Toluen) salınımı çalışanlar ve nihai mobilya tüketicisi için insan sağlığına olumsuz etkileri Tablo 2’de verilmiştir. Bu çalışmada deneysel olarak elde edilen verilere non-linear fit yöntemi uygulanarak bu gazların salınımı için matematiksel ifadeler elde edilmiş ve sonuçları Tablo 10’ da verilmiştir. Denklemler, zaman değişkenine bağlı olduğundan istenilen herhangi bir zaman için gaz salınım miktarı ve salınımın ne zaman maruziyet değerinin altına düşebileceği bu çalışmada bulunan denklemlerden elde edilebilir.

Çok hassas ve doğru sonuçlar elde edebilmek için daha uzun sürelerle deney tekrarlanmalıdır. Bu süreç boyunca çalışanlar üretim sürecinde özel maskeler kullanılmalı, çalışma ortamı uygun şekilde havalandırılmalıdır. Üretici firmalar, bu VOC gazlarının salınım miktarı kritik değerinin altına

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)

Haldun Ender ERDEM: Deneyleri yapmış, sonuçlarını analiz etmiş ve makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

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

KAYNAKLAR (REFERENCES)

[1] Sosyal, A., ve Demiral, Y. Kapalı ortam hava kirliliği. TSK Koruyucu Hekimlik Bülteni. 2007; 221-226.

[2] Kurt, R. Mobilya sektöründe e-ticaret’in GZFT analizi ile değerlendirilmesi. Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi. 2019;7: 616-627.

düşükten sonra ürünlerini satmalıdır. Bu durum üretici tarafından bağımsız denetçiler veya ticaret bakanlığı ile belgelendirerek tüketici güven endeksini artırabilir. Bu şekilde çalışan üreticiler insan sağlığına olumsuz etkide bulunmadığı için sektörde satış stratejisi olarak avantaj sağlayabilir.

Mobilya sektörü kullanılan malzemeler heterojen ve uygulamalar standart olmadığı için bu çalışmada elde edilen denklemler evrensel sonuçlar değildir. Bu çalışmada bulunan denklemler benzer malzemeler için VOC gazlarının salınımında fikir verebilir. Non-linear fit yöntemi kullanılarak sektörde kullanılan malzemeler için denklemler elde edilebilir.

Daha sonra yapılacak çalışmalarda Non- Lineer fit yöntemi yerine Derin Öğrenme yöntemleri ve yapay zeka teknikleri uygulanabilir.

Hamza ÇINAR: Analysed and interpreted the experimental results.

Deney sonuçlarını analiz etmiş ve yorumlamıştır.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

There is no conflict of interest in this study.

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

TEŞEKKÜRLER (ACKNOWLEDGMENTS)

Bu araştırmada Kırıkkale Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi 2018/054 nolu proje kapsamında alınan Wolfram Mathematica programı kullanılmıştır.

[3] Kostrweski, P. New Sources Of occupational exposure in modified or new technological process. Med Pr. 2001;52: 445-500.

[4] Aksakal, N., Vazioğlu, S, A., Güler, Ç. Mobilyadaki kimyasallar ve sağlık etkileri, Chemicals in furniture and their effects on health. 2005; 14: 267-272.

- [5] Kim, S., Kim, H. J. Evaluation of formaldehyde emission of pine & wattle tannin based adhesives by gas chromatography. *Holz. Roh. Werkst.* 2004; 62: 101-104.
- [6] Kim, S., H.-J. Kim, Effect of addition of polyvinyl Acetate to melamine-formaldehyde resin on the adhesion and formaldehyde emission in engineered flooring, *Int. J. Adhes. Adhes.* 25 (2005) 456.
- [7] Kelly, T. J., Smith, D. L., Satola, J. Emission rates of formaldehyde from materials and consumer products found in California homes, *Environ. Sci. Technol.* 1999; 33: 81-86.
- [8] Kotzias, D., Koistinen K., Kephelopoulou, S., Schlitt, C., Carrer, C., Maroni, M., et al. The INDEX project: critical appraisal of the setting and implementation of indoor exposure limits in the EU. Final Report for EUR 21590 EN. Italy: Joint Research Center. 2005; 331-336.
- [9] Wang, H., ve arkadaşları, Characterization and assessment of volatile organic compounds (VOCs) emissions from typical industries. *Chinese Science Bulletin, Environmental Chemistry.* 2013; 58: 724-730.
- [10] Yuan, B., ve arkadaşları. Source profiles of volatile organic compounds associated with solvent use in Beijing”, *Science Direct, Atmospheric Environment-* 2010; 44: 1919-1926.
- [11] Ho, D. X., ve arkadaşları. Emission Rates of Volatile Organic Compounds Released from Newly Produced Household Furniture Products Using a Large-Scale Chamber Testing Method. *The Scientific World Journal.* 2011;11: 1597-1622. <https://doi.org/10.1100/2011/650624>
- [12] Tong, R. ve arkadaşları. Emission characteristics and probabilistic health risk of volatile organic compounds from solvents in wooden furniture manufacturing. *Science Direct. Journal Of Cleaner Production.* 2024; 208; 1096-1108. <https://doi.org/10.1016/2011/j.jclepro.2018.10.195>
- [13] Cech, P., Standik, J. Mobilya Üretim Gibi Kaynak VOC Emisyonları İçin Kullanılan Malzemeler. *İleri Teknoloji Bilimleri Dergisi. Dergi Park Akademi.* 2017; 6: 1264-1276.
- [14] Çınar, H., ve arkadaşları. Formaldehyde Emission in Different Positions of Wood-Based Boards Used in Interior Architecture. *Journal of Design Planning and Aesthetics Research.* 2022; 91-104.
- [15] Çınar ve arkadaşları. Effect of Wood-Based Panels and Varnish Types on VOC Emissions in Furniture Production. *Gazi University Journal of Science Part A. Engineering and Innovation.* 2021; 8: 424-434.
- [16] Kanserojen veya Mutajen Maddelerle Çalışmalarda Sağlık ve Güvenlik Önlemleri Hakkında Yönetmelik. 2013.
- [17] [Url-4<https://limitvalue.ifa.dguv.de/>](https://limitvalue.ifa.dguv.de/)
- [18] Aydın, B. Ö. İç ortam havasında uçucu organik bileşiklerin derişimlerinin belirlenmesi ve maruziyet risklerinin değerlendirilmesi. *Doktora Tezi.* 2013; 48-50.
- [19] Infrared Analysis Şirketi. Procedures in Infrared Analysis Of Gases. QASoft Package 4.0 (QASoft Version4.0 with GRAMS AI Version 9.2 kullanımıkılavuzu). Part Q. 2014.
- [20] Türeci, R. G. Fizik ve Mühendislikte Wolfram Mathematica. Gazi Kitabevi. 2020. ISBN: 978-975-7216-87-6.
- [21] Burden, A. R., Burden, F., Faires, J. Numerical Analysis. Cenveo: Cengage Editor. 10th Ed. 2016.