FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

PART C: TASARIM VE TEKNOLOJİ

Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology

ISSN: 2147-9526

Year: 2025, Volume: 13 Issue: 2

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji
Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology

ISSN: 2147-9526, Year: 2025, Volume: 13 Issue: 2

İmtiyaz Sahibi/ Owner	Prof. Dr. Uğur ÜNAL – Gazi Üniversitesi
Yayın Yönetmeni / Publishing Manager	Prof. Dr. Uğur GÖKMEN – Gazi Üniversitesi
Yazışma Adresi / Correspondence Address	fbedergic@gazi.edu.tr
İnternet Adresi / Web Address	https://dergipark.org.tr/tr/pub/gujsc
Yayın Türü /Publication Type	Süreli / 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 Doç. Dr. Selçuk YAĞMUR– Gazi Üniversitesi
Alan Editörleri / Area Editors	Prof. Dr. Nihat ÖZTÜRK – Gazi Üniversitesi Prof. Dr. Alaattin KAÇAL – Dumlupınar Üniversitesi Prof. Dr. Sait Dündar SOFUOĞLU – Kütahya Dumlupınar Üniversitesi Doç. Dr. Halil KARAKOÇ – Hacettepe Üniversitesi Doç. Dr. İlyas KARASU – Samsun Üniversitesi Doç. Dr. Şenol ŞİRİN – Düzce Üniversitesi Doç. Dr. Saadin Oyucu – Gazi Üniversitesi Doç. Dr. Cemil OCAK – Gazi Üniversitesi Doç. Dr. Volkan KILIÇLI – Gazi Üniversitesi Dr. Öğr. Üyesi Berre KÜMÜK – İskenderun Teknik Üniversitesi Doç. Dr. Alper CALAM - Gazi Üniversitesi Doç. Dr. Seyfi ŞEVİK – Hitit Üniversitesi Doç. Dr. Gökhan SÜRÜCÜ – Gazi Üniversitesi Doç. Dr. Fecir DURAN - Gazi Üniversitesi Doç. Dr. Beste Desticioğlu TAŞDEMİR – Milli Savunma Üniversitesi Doç. Dr. İlyas KARASU – Samsun Üniversitesi Doç. Dr. Mehmet Rıda TÜR – Batman Üniversitesi

©2025

	Doç. Dr. Mehmet Rıda TÜR – Batman Üniversitesi Dr. Öğr. Üyesi MÜCELLA İLKENTAPAR - Erciyes Üniversitesi Dr. Öğr. Üyesi CEVDET EMİN EKİNCİ – Fırat Üniversitesi Dr. Öğr. Üyesi PINAR SEZİN ÖZTÜRK KARDOĞAN - Gazi Üniversitesi Dr. Öğr. Üyesi Muhammed Ali KOŞAN – Kahramanmaraş İstiklal Üniversitesi Öğr. Gör. Dr. Onur ALTUNTAŞ – Milli Savunma Üniversitesi Öğr. Gör. Dr. Emre AYHAN – Gazi Üniversitesi
Sekretarya / Secretariat	Doç. Dr. Selçuk YAĞMUR– Gazi Üniversitesi
Mizanpaj Editörleri / Layout Editors	Oğuz Kaan ÇİNİCİ – Gazi Üniversitesi Yaren GÜVEN – Gazi Üniversitesi Can ALİCAN – Gazi Üniversitesi
Teknik Editör / Technical Editor	Medine ÖZKAYA – Gazi Üniversitesi

©2025

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji
Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology

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, Cıtefactor 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

©2025

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.

©2025

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji
Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology

İÇİNDEKİLER / CONTENTS

31. **Optimal Coordination of Directional Overcurrent Relays Using an Exponential-Based Non-Standard Characteristic and the Nutcracker Optimizer** (Araştırma Makalesi), Alişan AYVAZ 417

32. **Alaşımsız Demir Tozu İlavesi ile Geliştirilen Akrilonitril Bütadien Stiren Polimer Kompozitlerinin Fiziksel ve Mekanik Özellikleri** (Araştırma Makalesi), Münir TAŞDEMİR, Elif ULUTAŞ 431

33. **Eriyik yığma modelleme işlemi esnasında polipropilenin kristalizasyon davranışı** (Araştırma Makalesi), Murat ÇELİK 440

34. **A Cost-Effective and High-Efficiency Novel 15-Level Hybrid MLI Topology for Renewable Energy Systems** (Araştırma Makalesi), Murat KARAKILIÇ, Hasan HATAŞ 450

35. **Titreşim Optimizasyonu için Akıllı Cnc Router Sistem Tasarımı** (Derleme Makalesi), Duygu GÜRKAN, Ahmet MAVİ, İhsan KORKUT 462

36. **Enhancement of Microstructure Evolution and Tribological Properties of Al6063 Alloy Through Grain Refinement via ECAP Technique** (Araştırma Makalesi), Taha Alper YILMAZ 471

37. **Production of D2 and 17-4 PH Bimetallic Materials and Investigation of Their Mechanical Properties in Atomic Diffusion Additive Manufacturing Method** (Araştırma Makalesi), Ufuk TAŞCI 488

38. **Investigation of Mechanical Properties of Granite Waste Sludge and Sepiolite Substituted Self-Compacting Mortars** (Araştırma Makalesi), Aynur İRMAK ER, Salih YAZICIOĞLU 499

39. **Assessing Unconfined Vapor Cloud Explosions (UVCE) Physical Effects: A Software Built for Modelling with BST Methodology** (Araştırma Makalesi), Tahsin Aykan KEPEKLİ 512

40. **The PIDA Controller Analysis Simulator** (Araştırma Makalesi), Metin HATUN, Fahri VATANSEVER 526

41. **Effects of Adhesive Type and Surface Preparation on the Mechanical Strength of Thermoplastic and CFRP Structures** (Araştırma Makalesi), Emin ÖZTÜRK, Mert KILINÇEL, Gülden KABAKÇI, Ahmet KÖMÜRCÜ 538

42. **Comparison of GUM and Monte Carlo Methods in Uncertainty Analysis of Airflow Measurement Systems** (Araştırma Makalesi), M. Saim SOYSAL, Hacı Mehmet ŞAHİN 553

43. **Tailoring the Optical and Electrical Properties of ZnO Films: Co-Doping with F and In** (Araştırma Makalesi), Ibrahim GUNES 567

©2025

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji
Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology

İÇİNDEKİLER / CONTENTS

44. **Innovative Automated Manual Transmission (AMT) System for Bicycles: Design, Implementation and Control** (Araştırma Makalesi), Ahmet KAĞIZMAN, Fehmi Can AY, Bengisu KILINÇ, Talha Enes ERCAN, Volkan SEZER 579

45. **Teşhir Tipi Soğutucular İçin Yenilikçi Kapı Tasarımı ve Performansa Etkisinin Deneysel Araştırılması** (Araştırma Makalesi), Fatma Nur ERDOĞMUŞ, Sedanur BİLGİN, Sümeyra İBİŞ, Leyziva AYDEMİRLİ 592

46. **Design and Comprehensive Simulation of 5 MWp and 10 MWp Solar Power Plants in Ma'an: Detailed System Design, Economic Returns, and Environmental Benefits in a Semi-Arid Climate** (Araştırma Makalesi), İbrahim Mahmoud Rizeq ALSAQAR, Mehmet ERDEM 609

47. **Multi-Focal Diffractive Lens by Apodized Phase Photon Sieves** (Araştırma Makalesi), Ahmet ÜNAL 627

48. **Aerodynamic analysis of wind turbine blades: A numerical study** (Araştırma Makalesi), İlker YILMAZ, Ayşegül AVCI, Ekin AKÖZ ARSLANKAYA 641

49. **Dynamic Voting-Based Ensemble Deep Learning for Closely Resembling Crop Classification** (Araştırma Makalesi), Engin EŞME, Muhammed Arif ŞEN, Halil ÇİMEN 653

50. **Seviye 3 ve Seviye 4 Otonom Araçlarda FMEA Yöntemi Kullanılarak Risk Öncelik Değerlendirmesi Yapılması** (Araştırma Makalesi), Elif Tuğba GÜNGÖR, Mustafa KURT 665

51. **Akarçay Havzası Hidrolojisinin SWAT Modeli ile Değerlendirilmesi** (Araştırma Makalesi), Zeliha SELEK, Cihangir ARSLAN 680

52. **Kapalı Alanlarda Hassas UWB Tabanlı Konumlandırma için Uyarlamalı Genişletilmiş Kalman Filtresi** (Araştırma Makalesi), Abdulhamit SEVGİ , Hasan Erdinç KOÇER 692

53. **Havzaların Sismik Tepkisinin Modifiye Ricker Dalgacığı ile Nümerik Analizi** (Araştırma Makalesi), Hidayet Kemal UYAR , Sadık ÖZTOPRAK 706

54. **Basitleştirilmiş Bölünmüş Kaynaklı Evirici İçin Model Öngörülü Kontrol Yöntemi** (Araştırma Makalesi), Ali Şükrü EYÜBOĞLU , Naki GÜLER 718

55. **Yapısal Bazı Ahşap Türü Malzemede Koruma Amaçlı Yüzeysel Yakmanın (Karbonlaştırmanın) Ahşap Özelliklerine Etkisinin Deneysel Olarak İncelenmesi** (Araştırma Makalesi), Cengiz KÖROĞLU, Mustafa ALTUNOK 732

56. **Kamu Sağlığı ve Çevresel Sürdürülebilirlik için YOLOv5 Tabanlı Sigara Tespiti ve Sesli Uyarı Sistemi** (Araştırma Makalesi), Nur Kuban TORUN, Oğuzhan TATLI, Merve ÖNALAN 746

©2025

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji
Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology

İÇİNDEKİLER / CONTENTS

57. **Topoloji Optimizasyonu ile Gemi Çift Dip Konstrüksiyonu Dolu Döşek Tasarım İyileştirilmesi** (Araştırma Makalesi), Ahmet Fatih YILMAZ 763

58. **Enhancing the Mechanical Properties of Silty Soils Using Fibers Obtained from Waste Air Filters** (Araştırma Makalesi), Mehmet Uğur YILMAZOĞLU 777

59. **İmalat Mühendisliğinin Ekonomik Büyüme ve Verimlilik Üzerindeki Rolü ve Endüstri 4.0 Perspektifi** (Araştırma Makalesi), Çiğdem ÇİÇEK, Oğuz POYRAZOĞLU 788

60. **Koyun Yünü ve Ahşap Yonga Karışımı ile Üretilmiş Malzemede Yalıtım Özelliklerinin Belirlenmesi** (Araştırma Makalesi), Hasan ŞEN, Hamza ÇINAR 798

61. **Review and Assessment of Wind Power Forecasting Studies for Very Short- Term and Short-Term Horizons** (Derleme Makalesi), Mehmet YEŞİLBUDAK1, Mustafa BENLİ 812

©2025

Gazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Dergisi
PART C: TASARIM VE TEKNOLOJİ

Gazi University
Journal of Science
PART C: DESIGN AND TECHNOLOGY

GU J Sci, Part C, 13(2): 417-430 (2025)

Optimal Coordination of Directional Overcurrent Relays Using an Exponential-Based Non-Standard Characteristic and the Nutcracker Optimizer

Alisan AYVAZ[1*]

[1]*Amasya University, Faculty of Engineering, Department of Electrical and Electronics Engineering, Amasya, Türkiye*

Article Info

Research article
Received: 02/01/2025
Revision: 06/03/2025
Accepted: 21/03/2025

Keywords

Optimal coordination
Directional overcurrent relays
Non-standard characteristic
Nutcracker optimizer

Makale Bilgisi

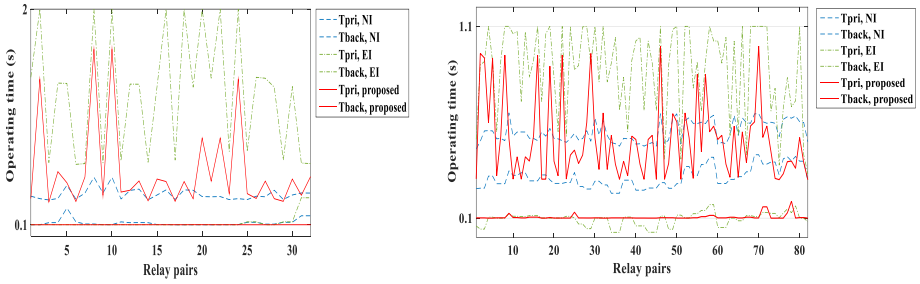
Araştırma makalesi
Başvuru: 02/01/2025
Düzeltme: 06/03/2025
Kabul: 21/03/2025

Anahtar Kelimeler

Optimal koordinasyon
Yönlü aşırı akım koruma röleleri
Standart olmayan karakteristik
Fındıkkıran kuşu optimize edicisi

Graphical/Tabular Abstract (Grafik Özet)

This paper proposes the use of an exponential-based non-standard relay characteristic curve for the optimal coordination of directional overcurrent protection relays and employs the Nutcracker Optimizer (NOA) to solve the optimization problem. / Bu makale, yönlü aşırı akım koruma rölelerinin optimal koordinasyonunda bir üstel tabanlı standard olmayan röle karakteristik eğrisinin kullanımını ve optimizasyon probleminin çözümünde fındık kıran kuşu optimize edicisi kullanımını önermektedir.



(a) *(b)*

***Figure A**: Primary and backup relay operating times obtained via NOA algorithm for a) IEEE 9-bus and b) IEEE 15-bus systems /**Şekil A:**. NOA algoritmasıyla elde edilen a) IEEE 9-baralı ve b) IEEE 15-baralı sistemler için birincil ve yedek röle çalışma süreleri*

Highlights (Önemli noktalar)

- *The use of an exponential-based relay characteristic type for the optimal coordination of DOCRs is proposed.*
- *The recently developed NOA algorithm is proposed for solving the optimal coordination problem.*
- *The proposed method is tested on the IEEE 9-bus and IEEE 15-bus test systems.*

***Aim (Amaç):** Providing a more selective and faster protection coordination by reducing relay operating times. / Röle işlem sürelerinin düşürülerek daha seçici ve hızlı bir koruma koordinasyonunun sağlanması.*

***Originality (Özgünlük):** This study proposes a new exponential-based non-standard relay characteristic curve and the use of the recently developed population-based metaheuristic method, the Nutcracker Optimizer, for the optimal coordination of directional overcurrent protection relays. / Bu çalışmada yeni bir üstel tabanlı standard olmayan röle karakteristik eğrisi ve yönlü aşırı akım koruma rölelerinin optimal koordinasyonunda son zamanlarda geliştirilmiş olan bir popülasyon bazlı metasezgisel yöntem olan fındık kıran kuşu optimize edicisi kullanımını önerilmektedir.*

***Results (Bulgular):** The results show that the use of either the NOA algorithm or the proposed relay characteristic individually provides effective outcomes; however, their combined use significantly reduces the total relay operating time. / Sonuçlar, NOA algoritmasının veya önerilen röle karakteristiğinin ayrı ayrı olarak kullanımının sonuçlarda etkililik sağladığını, fakat birlikte kullanımı ile toplam röle işlem süresinin önemli ölçüde azaldığını göstermiştir.*

***Conclusion (Sonuç):** The proposed method is a powerful alternative approach for solving the optimal coordination problem of DOCRs. / Önerilen yöntem, DOCR'ların optimal koordinasyon problemini çözmek için güçlü bir alternatif yaklaşımdır.*

*Corresponding author, e-mail: alisan.ayvaz@amasya.edu.tr
DOI: 10.29109/gujsc.1612191

GU J Sci, Part C, 13(2): 417-430 (2025)

Gazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Dergisi
PART C: TASARIM VE TEKNOLOJİ

Gazi University
Journal of Science
PART C: DESIGN AND TECHNOLOGY

http://dergipark.gov.tr/gujsc

Optimal Coordination of Directional Overcurrent Relays Using an Exponential-Based Non-Standard Characteristic and the Nutcracker Optimizer

Alisan AYVAZ[1*]

[1]*Amasya University, Faculty of Engineering, Department of Electrical and Electronics Engineering, Amasya, Türkiye*

Article Info

Research article
Received: 02/01/2025
Revision: 06/03/2025
Accepted: 21/03/2025

Keywords

Optimal coordination
Directional overcurrent relays
Non-standard characteristic
Nutcracker optimizer

Abstract

Directional overcurrent relays (DOCRs) play a crucial role in protecting sub-transmission and distribution systems due to their simplicity and cost-effectiveness. For selective and rapid protection, proper coordination of these relays is essential. At this point, the coordination of DOCRs is formulated as an optimization problem. The primary objective of this problem is to minimize relay operating times without violating coordination constraints. However, considering the complex nature of power systems, solving this nonlinear problem with high-level constraints becomes challenging. Furthermore, achieving efficiency in such solutions using standard relay characteristics is also difficult under the presence of numerous coordination constraints. In this context, this study proposes the use of an exponential-based non-standard relay characteristic function for calculating relay operating times and employs the nutcracker optimizer, a recently developed metaheuristic optimization algorithm, for solving the problem. The performance of the proposed method is tested on the IEEE 9-bus and IEEE 15-bus test systems, which are widely used in this field. The results obtained with the proposed method are compared with those in the literature and show the effectiveness of the proposed approach. Especially, the results demonstrate that the exponential-based non-standard relay characteristic used in the proposed method achieves approximately a 67% reduction in relay operating times compared to the standard relay characteristic (normally inverse) for the IEEE 15-bus system.

Yönlü Aşırı Akım Koruma Rölelerinin Üstel Tabanlı Standart Olmayan Karakteristik ve Fındıkkıran Kuşu Optimize Edicisi Kullanılarak Optimal Koordinasyonu

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 02/01/2025
Düzeltme: 06/03/2025
Kabul: 21/03/2025

Anahtar Kelimeler

Optimal koordinasyon
Yönlü aşırı akım koruma röleleri
Standart olmayan karakteristik
Fındıkkıran kuşu optimize edicisi

Öz

Yönlü aşırı akım koruma röleleri (YAAKR), alt iletim ve dağıtım sistemlerinin korunmasında basit ve ekonomik oluşları dolayısıyla önemli bir rol oynamaktadırlar. Seçici ve hızlı bir koruma için bu rölelerin doğru bir şekilde koordine edilmesine ihtiyaç vardır. Bu noktada, Yakar'larına koordinasyonu bir optimizasyon problem olarak tasarlanmaktadır. Bu problemin temel amacı, röle işlem sürelerinin koordinasyon kısıtlarında bir ihlale yol açmadan minimize edilmesidir. Fakat güç sistemlerinin kompleks yapısı göz önüne alındığında bu yüksek seviyede kısıtlar içerebilen ve lineer olmayan problemi çözmek zor bir hal alabilmektedir. Buna ek, yüksek sayıda koordinasyon kısıtların varlığı altında standart röle karakteristikleri ile bu çözümde verim elde etmek de zor olabilmektedir. Bu kapsamda, bu çalışma röle işlem sürelerinin hesaplanmasında üstel tabanlı standart olmayan bir röle karakteristik fonksiyonunun ve problemin çözümünde son zamanlarda geliştirilen bir metasezgisel optimizasyon algoritması olan fındıkkıran kuşu optimize edicisinin kullanımını önermektedir. Önerilen yöntemin performansı, bu alanda sıklıkla kullanılan IEEE 9-bara ve IEEE 15-bara güç sistemleri üzerinde test edilmiştir. Önerilen yöntemle elde edilen sonuçlar, literatürdeki sonuçlarla karşılaştırılmış ve önerilen yöntemin etkililiği doğrulanmıştır. Özellikle, sonuçlar, önerilen çalışma kapsamında kullanılan üstel tabanlı standart olmayan röle karakteristiğinin 15-bara güç sistemi için röle işlem sürelerinde standart röle karakteristiği (normal ters zamanlı) kullanımına göre yaklaşık olarak %67 civarında azalma sağladığını göstermiştir.

*Corresponding author, e-mail: alisan.ayvaz@amasya.edu.tr
DOI: 10.29109/gujsc.1612191

1. INTRODUCTION (GİRİŞ)

The increasing demand for electricity, expansion of power grids, shift towards renewable energy generation, and technological advancements have significantly complicated power system-related problems, necessitating the development of innovative solutions. Within this scope, the coordination of directional overcurrent relays (DOCRs) emerges as one of these challenging problems. Given the expanding and increasingly complex nature of power systems, achieving fast and selective coordination among relays is of utmost importance. Fast coordination reduces stress on power system equipment and minimizes potential damage caused by faults, while selective coordination prevents unnecessary power outages in unaffected areas. Indeed, recent studies reveal a growing focus on this topic. Some of these studies propose improvements in optimization techniques, while others emphasize modifications in relay characteristics to achieve faster coordination. Examples of studies focusing on optimization techniques for solving the DOCR optimal coordination problem include the use of algorithms such as the enhanced white shark optimizer (EWSO) [1], modified electromagnetic field optimization algorithm (MEFO) [2], improved seagull optimization algorithm (ISOA) [3], sine cosine algorithm (SCA) [4], enhanced grey wolf optimizer (EGWO) [5], imperialistic competition algorithm (ICA) [6], modified evaporation rate water cycle algorithm (MERWCA) [7], and hybrid harris hawks optimization with sequential quadratic programming (HHO-SQP) [8].

The choice of optimization method is crucial for optimal coordination studies. The optimal coordination of DOCRs represents a nonlinear optimization problem with numerous constraints. Addressing this complex problem requires the application of effective optimization techniques. Moreover, depending on the size and structure of the power system, solving the protection coordination problem becomes even more challenging. Metaheuristic optimization methods demonstrate higher effectiveness compared to other classes of optimization approaches, such as mathematical programming methods, in solving complex problems like the optimal coordination problem [9]. In this context, a well-developed metaheuristic method always offers significant potential for solving the optimal coordination problem.

In studies in the literature, the normal inverse relay characteristic specified in IEC standards is generally used. In addition to the normal inverse characteristic, IEC standards also include other relay characteristics such as very inverse, extremely inverse, and long-time inverse, which can yield shorter relay operating times when employed [10]. Accordingly, in Reference [11], the selection of characteristic types based on various standards is considered as an optimization decision variable for relays. Similarly, in Reference [12], relay characteristics are determined through optimization by considering different characteristics. However, the selection of these standard characteristics does not always lead to effective results.

In recent years, advancements in relay technology and the increasing popularity of numerical relays in power system protection have been increasingly considered in the literature. Compared to electromechanical relays, numerical relays provide flexibility in relay characteristics, enabling the achievement of shorter relay operating times. In this context, with the flexibility offered by numerical relays, non-standard relay characteristics can also be assigned to DOCRs. Looking at the relevant studies in the literature, Reference [13] proposes a relay characteristic that includes voltage information, which is also utilized in Reference [14]. Similarly, Reference [15] introduces a two-level relay characteristic that allows assigning different characteristics for primary and backup operations of relays, resulting in shorter relay operating times while avoiding coordination time violations. In Reference [16], a user-defined relay characteristic is proposed. Instead of considering the coefficients related to the characteristic in the traditional relay operating time equation as fixed, the study in [16] treats them as continuous decision variables, enabling shorter relay operating times.

As observed, innovations in relay characteristics continue, and with the further proliferation of numerical relays, it is anticipated that studies on this topic will increase. In this context, this study proposes an exponential-based relay characteristic for DOCRs, aiming to achieve shorter relay operating times compared to traditional relay characteristics. The proposed relay characteristic provides significant reductions in relay operating times by offering flexibility in avoiding coordination constraints. While doing so, unlike the non-standard relay characteristics mentioned above, such as those in References [13] and [14], the proposed characteristic does not require an additional voltage input alongside the current

information. On the other hand, although References [15] and [16] propose non-standard relay characteristics, they are fundamentally based on the conventional relay operating time calculation function standardized by the IEC. However, despite the flexibility provided in the coefficients related to relay characteristics within this conventional function, its effectiveness in terms of selectivity and speed remains debatable. Accordingly, this study proposes an exponential function instead of the conventional function used for relay operating time calculation to overcome the limitations of the conventional approach.

On the other hand, this study proposes the use of the nutcracker optimizer algorithm (NOA), developed in 2023 by Abdel-Basset et al. [17], for solving the optimal coordination problem of DOCRs. The NOA algorithm is a population-based metaheuristic optimization method inspired by the foraging, storing, and gathering behaviors of the nutcracker bird in nature. With advantages such as a small number of control parameters, fast computation, and robust global search capability, the NOA algorithm has demonstrated effective performance in solving various engineering problems, including photovoltaic model parameter extraction [18] and fresh agricultural product distribution [19].

The main contributions of this study can be summarized as follows:

- The use of an exponential-based relay characteristic type for the optimal coordination of DOCRs is proposed.
- The recently developed NOA algorithm is proposed for solving the optimal coordination problem.
- The proposed method is tested on the IEEE 9-bus and IEEE 15-bus test systems.
- Analyses are conducted under two different scenarios for the separate use of traditional relay characteristics and the proposed characteristic for DOCRs.
- The results obtained with the proposed method are compared with those in the literature, demonstrating the effectiveness of the proposed approach.

The remainder of this study is organized as follows: Section 2 presents the problem model for the optimal coordination of DOCRs. The mathematical model of the NOA algorithm is introduced in Section 3. Results and discussions are provided in Section 4. Finally, conclusions are presented in Section 5.

2. PROBLEM FORMULATION OF OPTIMAL COORDINATION OF DOCRS (YÖNLÜ AŞIRI AKIM KORUMA RÖLELERİNİN OPTİMAL KOORDİNASYONU PROBLEM FORMÜLASYONU)

In this section, the optimal coordination problem model is presented for both the scenarios of the use of traditional and proposed relay characteristics.

2.1. Problem Model For Conventional Relay Characteristic (Geleneksel Röle Karakteristiği İçin Problem Modeli)

In the optimal coordination problem of directional overcurrent relays (DOCRs), the objective is to minimize the total operating times of primary relays without violating coordination and relay coordination constraints. In this context, the relay setting parameters constitute the decision variables of the problem. The relay operating time, which depends on the relay setting parameters and the fault current passing through the relays, is determined as follows:

$$T_i = \frac{\mathrm{TDS}_i \times \alpha}{\left(I_{f_i} / \mathrm{PS}_i\right)^{\beta} - 1} \tag{1}$$

where T_i represents the operating time of ith DOCR; I_{f_i} denotes the fault current passing through the relay i; TDS_i is the time dial setting of relay i; PS_i is the pickup setting of relay i; and α and β are constants related to the relay characteristic in IEC standards.

In the optimization process, while determining the relay operating times using Eq. (1), the coordination time interval (CTI) constraint must not be violated to ensure selective protection coordination. The constraint ensuring the preservation of the CTI between each pair of relays is as follows:

$$\mathrm{CTI}_{\min} \leq T_{j,b} - T_{i,p} \tag{2}$$

where $T_{j,b}$ is the operating time of the backup relay j; $T_{i,p}$ is the operating time of the primary relay i; and $\mathrm{CTI}_{\min}$ represents the minimum value of coordination time interval.

Additionally, the relay setting parameters and relay operating times are constrained to specific ranges. The corresponding problem constraints are expressed by the following equations:

$$\mathrm{TDS}^{\min} \leq \mathrm{TDS}_i \leq \mathrm{TDS}^{\max} \tag{3}$$

$$\mathrm{PS}^{\min} \le \mathrm{PS}_i \le \mathrm{PS}^{\max} \tag{4}$$

$$T^{\min} \le T_i \le T^{\max} \tag{5}$$

The objective function of the problem, subject to the constraints provided above, is as follows:

$$\mathrm{OF} = \sum_{i=1}^{N_R} T_{i,p} + \mathrm{Penalty} \tag{6}$$

where N_R is the number of relays, and the Penalty is a function to penalize the constraint violations as follows:

$$\begin{aligned}\mathrm{Penalty} = &\sum_{i=1}^{N_{RP}} \tau \times \max\left(\mathrm{CTI}_{\min} - T_{j,b} + T_{i,p}, 0\right) \\ &+ \sum_{i=1}^{N_R} \tau \times [\max(T^{\min} - T_i, 0) + \max(T_i - T^{\max}, 0)]\end{aligned} \tag{7}$$

where N_{RP} is the number of relay pairs, and τ equals 1000.

2.2. The Proposed Exponential-Based Characteristic (Önerilen Üstel Tabanlı Karakteristik)

The relay operating time function, defined by Eq. (1) and specified in IEC standards, varies based on the relay characteristics determined by the parameters α and "β" . However, the reduction of relay operating times is often limited by changing these characteristic parameters. To address this limitation, modifications to the function or the introduction of newly defined functions or curves can help overcome this constraint. Accordingly, this study proposes the use of an exponential-based relay characteristic function, defined by Eq. (8), as a replacement for the function given in Eq. (1). This approach aims to achieve shorter operating times for primary relays.

$$T_i = \left[\gamma_i \times \exp\left[\frac{\rho_i \times \mathrm{TDS}_i}{I_{f_i}/\mathrm{PS}_i - 1}\right]\right]^{\mu_i} \tag{8}$$

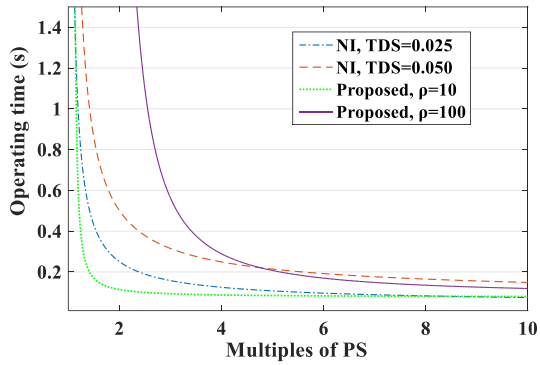
where γ_i, μ_i and ρ_i represent the relay characteristic parameters for relay i, which, similar to TDS_i and PS_i, are to be determined through the optimization process.

By utilizing the proposed exponential-based characteristic, the optimization results for each relay include a total of five different optimization decision variables or relay setting parameters, as given in Eq. (9).

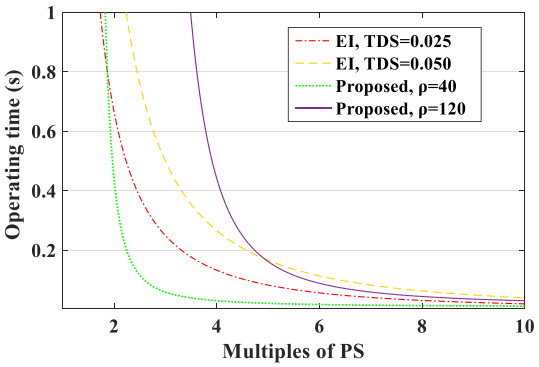
$$X_i = [\mathrm{TDS}_i \quad \mathrm{PS}_i \quad \rho_i \quad \gamma_i \quad \mu_i] \tag{9}$$

The objective function of the proposed coordination problem becomes Eq. (6) subjected to Eqs. (2)-(5), (8).

To demonstrate the flexibility of the proposed exponential-based characteristic, an example plot of curves for the standard NI and EI relay characteristics with the proposed one is given in Figure 1.



(a)



(b)

Figure 1. Comparison of the (a) NI-proposed and (b) EI-proposed relay characteristics ((a) NI-önerilen ve (b) EI-önerilen röle karakteristiklerinin karşılaştırılması)

Examining Figure 1 reveals that the proposed exponential-based characteristic provides greater flexibility over a wider range of fault currents. This flexibility is particularly beneficial for backup protection, as it helps prevent coordination constraint violations. Moreover, compared to standard relay characteristics, it achieves this by causing a lower increase in primary relay operating time at higher pickup current multiples, which correspond to primary protection.

3. THE NUTCRACKER OPTIMIZER ALGORITHM (FINDIKKIRAN KUŞU OPTİMİZE EDİCİSİ ALGORİTMASI)

The nutcracker optimization algorithm (NOA) is inspired by the food searching, storing, and retrieval behaviors of the Clark's nutcracker [17]. These birds exhibit two distinct behaviors during different seasons. During the summer and fall months, they focus on finding food, particularly high-quality seeds, and storing them in safe locations. In winter and spring, they retrieve the stored food to feed themselves and their young, ensuring survival. The birds' exceptional memory and survival behaviors are mathematically modeled in the NOA algorithm. This algorithm features two distinct exploration and exploitation phases mirroring the birds' seasonal behaviors.

In the first exploration phase, the birds search for food, aiming to find the best quality seeds. Their primary food source is the seeds within pinecones, and they typically prefer large seeds with higher nutritional value. If they do not find seeds that meet their preference, they continue searching. The behavior corresponding to the first exploration phase of the NOA algorithm is represented as follows:

$$X_{i,j}^{t+1} = \begin{cases} X_{i,j}^{t}, & if\ \tau_1 < \tau_2 \\ \begin{matrix} X_{m,j}^{t} + \varepsilon \cdot \left(X_{A,j}^{t} - X_{B,j}^{t}\right) \\ +\omega \cdot \left(r^2 \cdot U_j - L_j\right), \end{matrix} & if\ t \le it^{max}/2 \\ \begin{matrix} X_{m,j}^{t} + \varepsilon \cdot \left(X_{A,j}^{t} - X_{B,j}^{t}\right) \\ +\omega \cdot (r_1 < \delta) \cdot \left(r^2 \cdot U_j - L_j\right), \end{matrix} & otherwise \end{cases} \quad (10)$$

where $X_{i,j}^{t}$ and $X_{i,j}^{t+1}$ are the current and the new positions of the ith nutcracker, respectively; $X_{A,j}^{t}$, and $X_{B,j}^{t}$ are the random nutcracker positions; $X_{m,j}^{t}$ denotes the mean of the dimension j for all nutcracker positions; U_j and L_j are upper and lower bound of the dimension j, respectively; r, r_1, τ_1, and τ_2 are random numbers between 0 and 1; it^{max} represents the maximum number of iterations; ε is a random number determined via the levy flight; δ is an algorithm parameter that controls avoiding from local optima; and ω is defined by the following equation:

$$\omega = \begin{cases} \tau_3 & if\ r_1 < r_2 \\ \tau_4 & if\ r_2 < r_3 \\ \tau_5 & if\ r_1 < r_3 \end{cases} \quad (11)$$

where r_2, r_3, and τ_3 are random numbers between 0 and 1; τ_4 and τ_5 are random numbers generated according to the normal distribution and levy flight, respectively.

The nutcrackers that find pine seeds search for suitable locations to store them. This behavior corresponds to the first exploitation phase of the NOA algorithm and is expressed as follows:

$$X_{i,j}^{t+1} = \begin{cases} \begin{matrix} X_{i,j}^{t} + \omega \cdot \left(X_{bst,j}^{t} - X_{i,j}^{t}\right) \cdot |\lambda| \\ +r_1 \cdot \left(X_{A,j}^{t} - X_{B,j}^{t}\right), \end{matrix} & if\ \tau_1 < \tau_2 \\ X_{i,j}^{t} + \omega \cdot \left(X_{A,j}^{t} - X_{B,j}^{t}\right), & if\ \tau_1 < \tau_3 \\ l \cdot X_{bst,j}^{t}, & otherwise \end{cases} \quad (12)$$

where $X_{bst,j}^{t}$ is the current best position in the nutcracker swarm; λ is a random number generated using levy flight nutcracker positions; and l is a coefficient decreased linearly from 1 to 0 over iterations.

The transition between the exploration phase 1 and the exploitation phase 2 of the NOA algorithm is achieved as follows:

$$X_i^{t+1} = \begin{cases} \text{Eq. (10)} & if\ \xi_1 < P_{a1} \\ \text{Eq. (12)} & otherwise \end{cases} \quad (13)$$

where ξ_1 is a random number ranging between 0 and 1 and P_{a1} decreases linearly from 1 to 0 over iterations.

The food-searching and storing behavior of the nutcracker birds during the summer and fall periods correspond to the exploration phase 1 and exploitation phase 1, as described previously. On the other hand, during the winter and spring months, the birds focus on retrieving the stored food to ensure the survival of themselves and their young. In this context, the behavior of the nutcrackers in finding their stored food, which corresponds to the exploration phase 2, and the actions they take based on whether food is present in the storage locations correspond to the exploitation phase 2.

The nutcrackers, with their special abilities, are capable of remembering multiple reference points that help them find their stored locations. In the NOA algorithm, the number of reference points is selected as 2. Based on these reference points, the nutcrackers' behavior of finding the places where they stored food corresponds to the exploration phase 2, and it is modeled as follows:

$$X_i^{t+1} = \begin{cases} X_i^{t}, & if\ fitness(X_i^{t}) < fitness(R_{i1}^{t}) \\ R_{i1}^{t}, & otherwise \end{cases} \quad (14)$$

$$X_i^{t+1} = \begin{cases} X_i^{t}, & if\ fitness(X_i^{t}) < fitness(R_{i2}^{t}) \\ R_{i2}^{t}, & otherwise \end{cases} \quad (15)$$

where

$$R_{i1,j}^{t} = \begin{cases} X_{i,j}^{t} + \phi \cdot \cos(\theta) \cdot \left(X_{A,j}^{t} - X_{B,j}^{t}\right) \\ \quad + \phi \cdot RP, & if\ \theta = \pi/2 \\ X_{i,j}^{t} + \phi \cdot \cos(\theta) \cdot \left(X_{A,j}^{t} - X_{B,j}^{t}\right), & otherwise \end{cases} \quad (16)$$

$$R_{i2,j}^{t} = \begin{cases} X_{i,j}^{t} + \left(\phi \cdot \cos(\theta) \cdot \left(\left(U_j - L_j\right) \cdot \tau_3 + L_j\right)\right) \cdot U_{2,j}, & if\ \theta = \pi/2 \\ \quad + \phi \cdot RP \\ X_{i,j}^{t} + \phi \cdot \cos(\theta) \cdot \left(\left(U_j - L_j\right) \cdot \tau_3 + L_j\right) \cdot U_{2,j}, & otherwise \end{cases} \quad (17)$$

$$\phi = \begin{cases} \left(1 - \dfrac{t}{it_{max}}\right)^{\frac{2t}{it_{max}}} & if\ r_1 > r_2 \\ \left(\dfrac{t}{it_{max}}\right)^{\frac{2}{t}} & otherwise \end{cases} \quad (18)$$

where $R_{i1,j}^{t}$ and $R_{i2,j}^{t}$ are the reference positions in the memory of ith nutcracker; RP represents a random position vector; and θ is a random in the range between 0 and π.

According to the NOA algorithm, nutcracker birds exhibit food-searching behavior based on either the 1st or 2nd reference points (i.e. $R_{i1,j}^{t}$ and $R_{i2,j}^{t}$). However, when the nutcrackers reach their storage locations, they may encounter situations where the food is either present or absent. Due to various natural factors such as snow and rain, the food may not be there or may have been damaged. In such cases, to continue their survival, the nutcrackers will search for other promising areas. This behavior corresponds to the exploitation phase 2 of the NOA algorithm and is expressed as follows:

$$X_{i,j}^{t+1} = \begin{cases} X_{i,j}^{t}, & if\ \tau_3 < \tau_4 \\ X_{i,j}^{t} + r_1 \cdot \left(X_{bst,j}^{t} - X_{i,j}^{t}\right) \\ \quad + r_2 \cdot \left(R_{i1,j}^{t} - X_{C,j}^{t}\right), & otherwise \end{cases} \quad (19)$$

$$X_{i,j}^{t+1} = \begin{cases} X_{i,j}^{t}, & if\ \tau_5 < \tau_6 \\ X_{i,j}^{t} + r_1 \cdot \left(X_{bst,j}^{t} - X_{i,j}^{t}\right) \\ \quad + r_2 \cdot \left(R_{i2,j}^{t} - X_{C,j}^{t}\right), & otherwise \end{cases} \quad (20)$$

where r_1, r_2, τ_3, τ_4, τ_5, and τ_6 are random numbers between 0 and 1 and $X_{C,j}^{t}$ is the position of the Cth nutcracker.

The transition between the 2nd Exploration phase and the 2nd Exploitation phase of the NOA algorithm is achieved as follows:

$$X_{i}^{t+1} = \begin{cases} \text{Eq. (13) and Eq. (14)}, & if\ \xi_2 < P_{a2} \\ \text{Eq. (18) and Eq. (19)}, & otherwise \end{cases} \quad (21)$$

where ξ_2 is a random number ranging between 0 and 1 and P_{a2} equals to 0.2.

4. RESULTS AND DISCUSSION (SONUÇLAR VE TARTIŞMA)

The proposed method in this study is tested on two well-known test systems: the IEEE 9-bus and IEEE 15-bus test systems. Furthermore, the study is conducted under three scenarios, as outlined below:

- Scenario 1: The use of the standard relay characteristic function and its associated normal inverse characteristic (α =0.14 and β=0.02 in Eq. (1))
- Scenario 2: The use of the standard relay characteristic function and its associated extremely inverse characteristic (α =80 and β=2 in Eq. (1))
- Scenario 3: The use of the proposed exponential-based relay characteristic function

In Scenario 1 and Scenario 2, the relay operating times are calculated based on the traditional relay characteristic function, and the optimization process is performed. Scenario 1 employs the normal inverse characteristic type, which is commonly used in most studies in the literature, while Scenario 2 employs the extremely inverse characteristic type, which has been shown to provide better results than other standard characteristics in the literature [10]. Scenario 3 represents the usage of the proposed exponential-based relay characteristic function.

All optimization results are obtained using the Nutcracker Optimization Algorithm (NOA), with the algorithm control parameters chosen as in the original work [17]. The maximum number of iterations and the population size are set to 5000 and 50, respectively. To compare the performance of the NOA algorithm, the sand cat swarm optimization (SCSO) [20] and chameleon swarm algorithm (CSA) [21] are studied in this paper. The metaheuristic algorithms are based on randomness, which may cause variations in the results for each run [22]. Therefore, considering the potential changes due to randomness, each algorithm is run 20 times, and the best result is determined from these 20 runs.

Table 1. The bounds of problem constraints (Problem Kısıtlarının Sınırları)

System	Standard parameters				Proposed characteristic-based parameters		
	TDS_i	PS_i	T_i	CTI_{min}(s)	ρ_i	γ_i	μ_i
9-bus	0.025-1.2	taken from [2]	0.1-2	0.2	1-50	0.1-0.5	1-4
15-bus	0.1-1.1	0.5-2.5	0.1-1.1	0.2	1-50	0.1-0.5	1-4

The problem constraints are given in Table 1 for the test systems considered in this paper. Here, the problem constraints are selected with the same as in the references [16] and [23], for the IEEE 9-bus and IEEE 15-bus test systems, respectively. The aim is to make a fair comparison of the NOA algorithm with the literature methods including improved moth-flame optimization (IMFO) [16] and oppositional Jaya (OJaya) [23] algorithms.

4.1. Test System 1: IEEE 9-Bus System (Test Sistemi 1: IEEE 9-Bara Sistemi)

The single-line diagram of the IEEE 9-bus system is shown in Figure 2. The system includes a total of 24 directional overcurrent protection relays and 32 primary/backup relay pairs. The current transformer ratio associated with the relays is 500/1. Detailed information regarding fault currents and pickup setting limits related to the system can be found in reference [2].

Table 2 presents the optimal relay setting parameters obtained using the NOA algorithm for all considered scenarios. According to the results, lower relay operating times are achieved when using both the normal inverse and the proposed relay characteristic. However, when the extremely inverse characteristic is used, a significantly high OF value is observed. This is because, at high fault currents, the extremely inverse characteristic provides shorter relay operating times compared to the normal inverse characteristic. However, as seen in Table 1, a minimum relay operating time of 0.1 s is considered in the evaluations. Consequently, with this relay characteristic, it is not possible to avoid the penalty value given in Eq. (7) for relays R17, R19, R21, and R23, which are subjected to high fault current levels. On the other hand, using the proposed relay characteristic results in a 15% reduction in the OF value compared to the NI curve. The operating times of relay pairs are plotted in Figure 3.

Table 3 gives statistical optimization results for comparison in terms of minimum (Min), maximum (Max), average (Avg), and standard deviation (Std) of OF values over 20 independent runs. According to the results, the NOA algorithm is the best in terms of Min, Max, and Avg for all scenarios. For only Scenario 1, the Std value of the NOA algorithm is relatively higher than those of the others. However, considering the results in other metrics such as the Min value, the NOA algorithm provides a 42% reduction compared to the second-best result obtained via SCSO.

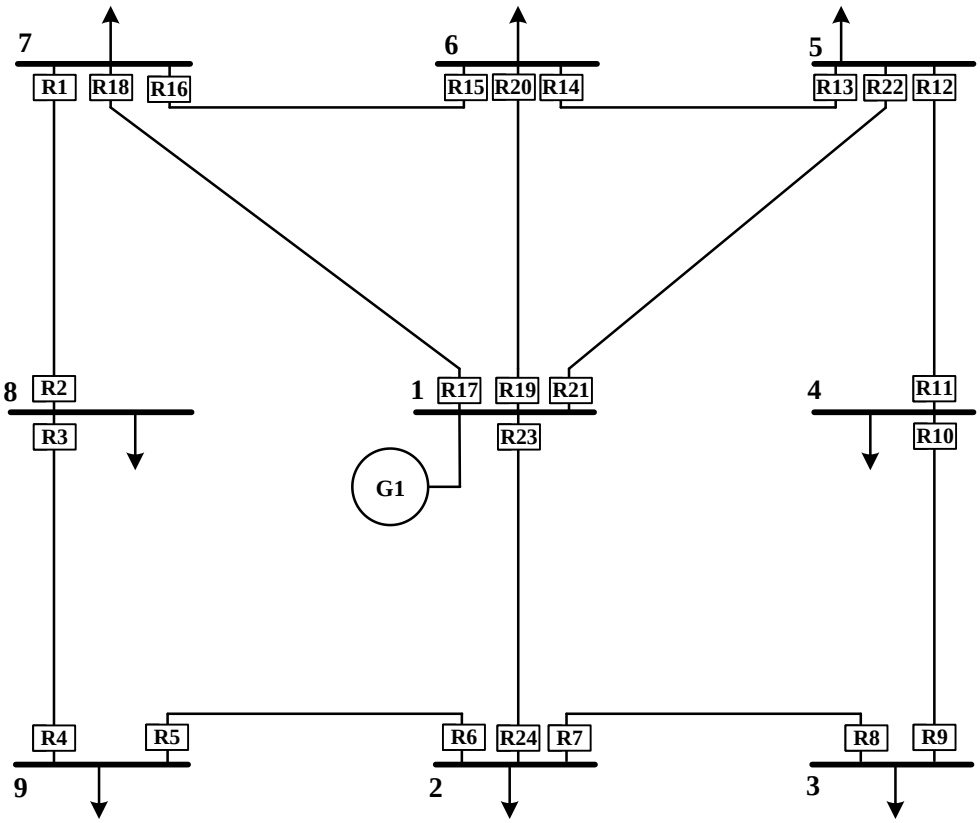


Figure 2. Single-line diagram of the IEEE 9-bus test system (IEEE 9-bara test sistemi tek hat şeması)

Table 2. Optimal relay settings obtained using the NOA for the IEEE 9-bus system (IEEE 9-bara sistem için NOA kullanılarak elde edilen optimal röle ayarları)

Relay	Scenario 1		Scenario 2		Scenario 3				
	TDS_i	PS_i	TDS_i	PS_i	TDS_i	PS_i	ρ_i	γ_i	μ_i
R1	0.0268	1.552	0.2890	0.639	0.4464	0.561	12.257	0.1696	1.600
R2	0.0250	0.761	0.0456	0.538	0.1549	0.703	6.768	0.1473	1.413
R3	0.0250	1.320	0.6409	0.248	0.4459	0.369	12.734	0.1533	1.558
R4	0.1556	0.076	0.2229	0.391	0.4715	0.412	8.763	0.1763	1.665
R5	0.0250	0.899	0.2282	0.263	0.2053	0.403	13.556	0.1831	1.715
R6	0.0260	1.634	0.3107	0.556	0.3527	0.585	13.037	0.1377	1.392
R7	0.0250	1.591	0.3243	0.543	0.2569	0.742	11.932	0.1340	1.334
R8	0.0250	0.899	0.4134	0.196	0.2613	0.377	16.899	0.1328	1.539
R9	0.0251	1.210	0.1712	0.445	0.4309	0.306	15.688	0.1472	1.539
R10	0.0251	1.318	0.1176	0.578	0.3034	0.448	17.556	0.1450	1.566
R11	0.0250	0.762	0.1160	0.339	0.2492	0.393	9.265	0.1806	1.648
R12	0.0251	1.032	0.3144	0.354	0.2269	0.496	12.912	0.1603	1.486
R13	0.0262	1.219	0.1800	0.612	0.3734	0.292	22.425	0.1566	1.524
R14	0.0257	1.425	0.5203	0.410	0.4066	0.427	15.651	0.1515	1.488
R15	0.0260	1.396	0.1765	0.702	0.2594	0.588	9.804	0.2309	1.807
R16	0.0250	1.341	0.5596	0.348	0.3856	0.353	11.598	0.2071	1.705
R17	0.0376	1.174	0.1125	1.104	0.1527	1.477	10.191	0.1596	1.379
R18	0.0250	1.103	0.0250	1.104	0.1566	1.416	7.208	0.1367	1.557
R19	0.0368	1.214	0.1264	1.027	0.1306	1.298	13.012	0.1490	1.322
R20	0.0250	1.027	0.0278	1.090	0.0611	1.317	6.936	0.1515	1.319
R21	0.0347	1.431	0.1125	1.103	0.1432	1.349	8.487	0.1515	1.300
R22	0.0250	1.103	0.0250	1.104	0.1833	1.323	6.869	0.1149	1.397
R23	0.0324	1.741	0.0879	1.266	0.2328	1.560	7.447	0.1354	1.271
R24	0.0250	1.266	0.0250	1.266	0.1083	1.461	8.190	0.1220	1.631
OF (s)	2.8322		213.6262		2.4046				

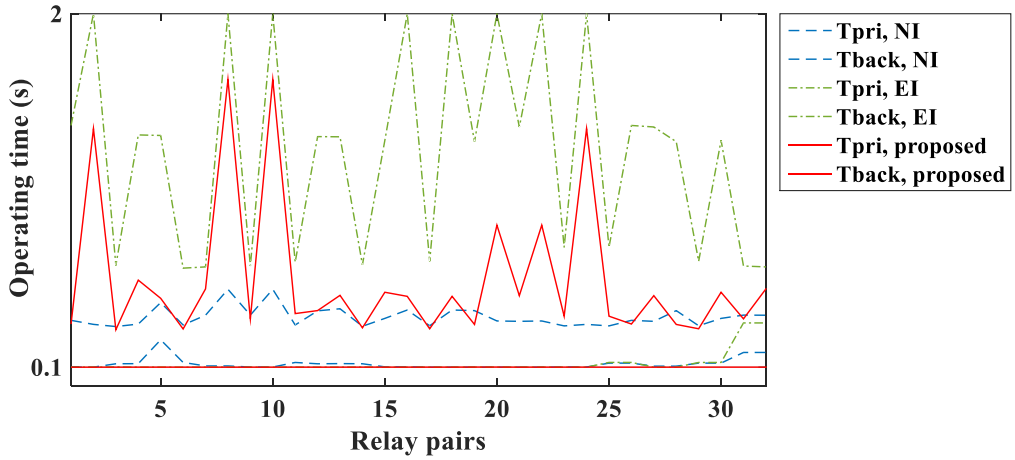
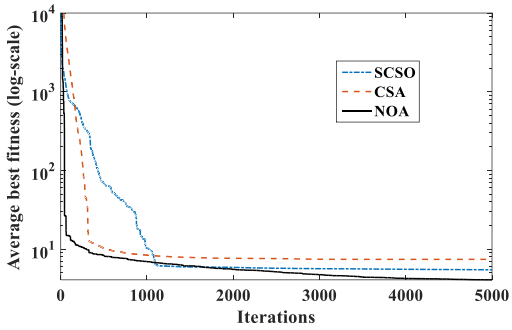


Figure 3. Operating times corresponding to the optimal relay settings obtained using the NOA for the IEEE 9-bus system (IEEE 9-baralı sistem için NOA kullanılarak elde edilen optimal röle ayarlarına karşılık gelen röle işlem süreleri)

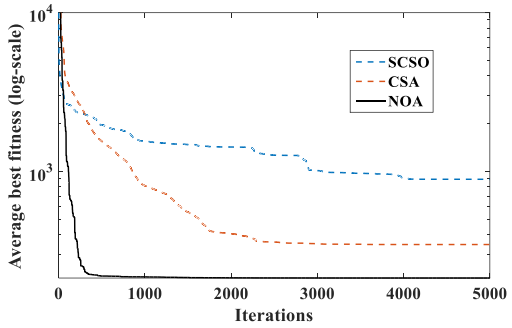
Figure 4 shows the convergence curves obtained using different algorithms for the IEEE 9-bus test system. It is observed that the NOA algorithm exhibits a faster convergence performance compared to others for all scenarios. It can also be concluded that, by using the NOA algorithm, desired solutions can be achieved with a low number of iterations.

Table 3. Statistical optimization results over 20 runs for the IEEE 9-bus system (IEEE 9-baralı sistem için 20 çalıştırma üzerinden elde edilen istatistiksel optimizasyon sonuçları)

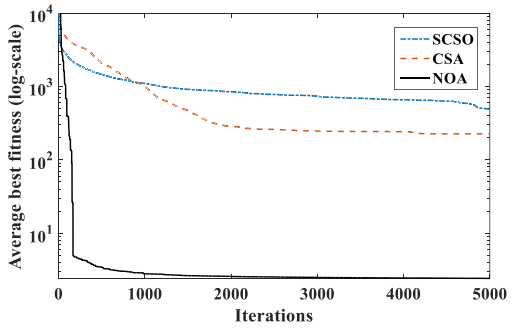
Scenario	Method	Min	Max	Avg	Std
Scenario 1	**SCSO**	4.863	6.334	5.467	0.638
	CSA	6.300	8.620	7.436	0.693
	NOA	2.832	5.258	4.087	0.710
Scenario 2	**SCSO**	629.559	1450.688	892.911	353.837
	CSA	218.329	1429.883	347.213	380.447
	NOA	213.626	213.659	213.641	0.012
Scenario 3	**SCSO**	4.920	1817.347	491.257	693.274
	CSA	3.583	1131.784	225.525	465.845
	NOA	2.405	2.475	2.422	0.025



(a)



(b)



(c)

Figure 4. Convergence curves obtained for (a) Scenario 1, (b) Scenario 2, and (c) Scenario 3 for the IEEE 9-bus system (IEEE 9-bara sistemi için (a) Senaryo 1, (b) Senaryo 2 ve (c) Senaryo 3'e ait yakınsama eğrileri)

According to the results given in Table 4, the NOA algorithm yields approximately a 5% reduction in OF value compared to the published result in [16].

Table 4. Comparison of the results for Scenario 1 for the IEEE 9-bus system (IEEE 9-baralı sistem için Senaryo 1'e ait sonuçların karşılaştırılması)

Method	IMFO [16]	SCSO	CSA	NOA
OF (s)	2.983	4.863	6.300	2.832

4.2. Test System 2: IEEE 15-Bus System (Test Sistemi 2: IEEE 15-Bara Sistemi)

The single-line diagram of the IEEE 15-bus distribution system is shown in Figure 5. The system includes a total of 42 directional overcurrent protection relays and 82 primary/backup relay pairs. Detailed data including the current transformer ratios and fault current can be found in [24].

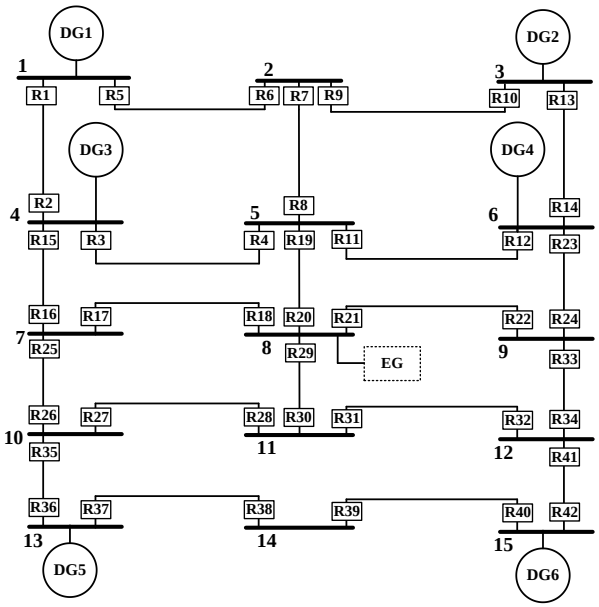


Figure 5. Single-line diagram of the IEEE 15-bus test system (IEEE 15-bara test sistemi tek hat şeması)

Similar to the 9-bus system, the proposed relay characteristic outperforms the standard relay characteristics. Especially, the proposed relay characteristic provides a 67% improvement in OF value compared to the NI curve. Furthermore, it can be seen that, by using the EI curve, it is not possible to avoid constraint violations, even in this system case.

Figure 6 gives the operating times of primary and backup relays for different scenarios for the IEEE 15-bus system. The constraint violations in minimum operating time for the scenario of the usage of the EI curve are clearly seen in the figure.

Table 5. Optimal relay settings obtained using the NOA for the IEEE 15-bus system (IEEE 15-bara sistem için NOA kullanılarak elde edilen optimal röle ayarları)

Relay	Scenario 1		Scenario 2		Scenario 3				
	TDS_i	PS_i	TDS_i	PS_i	TDS_i	PS_i	ρ_i	γ_i	μ_i
R1	0.1006	1.528	0.4564	0.912	0.3916	1.005	15.419	0.1774	1.578
R2	0.1009	1.308	0.4528	0.659	0.3985	0.747	12.481	0.2002	1.627
R3	0.1287	1.601	0.6897	1.087	0.4931	0.962	18.316	0.2051	1.884
R4	0.1021	1.506	0.4976	0.914	0.4547	1.047	15.068	0.2411	2.273
R5	0.1208	1.917	0.5641	1.086	0.3672	1.124	17.415	0.1776	1.524
R6	0.1242	1.610	0.5951	1.059	0.4986	1.104	16.889	0.1941	1.899
R7	0.1176	1.911	0.6999	0.914	0.4957	1.028	14.645	0.2395	2.176
R8	0.1099	1.531	0.5888	0.958	0.3964	0.661	16.496	0.2646	2.044
R9	0.1302	1.606	0.5930	1.130	0.3699	1.353	17.392	0.1864	1.762
R10	0.1154	1.614	0.6738	0.960	0.4701	1.028	14.616	0.1736	1.599
R11	0.1011	1.555	0.4065	1.006	0.3124	0.876	20.180	0.2092	1.846
R12	0.1007	1.583	0.4705	0.942	0.4478	0.961	13.679	0.2344	2.099
R13	0.1298	1.550	0.6463	0.943	0.3168	1.308	15.287	0.2359	1.802
R14	0.1007	1.436	0.4580	0.836	0.3619	0.848	21.915	0.1774	1.681
R15	0.1009	1.284	0.4274	0.713	0.4122	0.837	13.688	0.1719	1.519
R16	0.1007	1.766	0.4691	0.956	0.3748	1.226	17.951	0.1831	1.873
R17	0.1060	1.665	0.5206	1.160	0.2979	1.209	23.009	0.1804	1.717
R18	0.1005	1.352	0.4904	0.681	0.3901	0.878	10.646	0.2199	1.668
R19	0.1199	1.614	0.8057	1.011	0.4325	1.104	21.487	0.1769	1.757
R20	0.1034	1.373	0.4966	0.927	0.3561	1.145	16.273	0.2231	1.900
R21	0.1178	1.170	0.4235	0.735	0.2371	0.859	19.793	0.2167	1.678
R22	0.1136	1.614	0.6126	1.158	0.5553	1.098	12.519	0.1884	1.699
R23	0.1015	1.371	0.3885	0.754	0.3753	0.999	13.761	0.1870	1.617
R24	0.1015	1.609	0.6869	0.878	0.4738	1.019	12.809	0.1894	1.737
R25	0.1326	1.640	0.5586	0.907	0.3518	1.107	17.826	0.2323	2.142
R26	0.1132	1.736	0.5165	1.045	0.4780	0.878	16.458	0.2046	1.888
R27	0.1310	1.588	0.5900	0.913	0.4757	1.052	16.637	0.1808	1.885
R28	0.1572	1.613	0.4435	1.455	0.5408	0.984	14.872	0.2299	2.016
R29	0.1155	1.586	0.6078	0.850	0.3589	0.730	21.928	0.2276	1.824
R30	0.1159	1.591	0.5471	1.039	0.3855	1.073	13.977	0.2622	2.131
R31	0.1254	1.606	0.8645	0.844	0.3414	1.106	18.618	0.1978	1.747
R32	0.1190	1.597	0.4480	0.968	0.3378	0.951	22.356	0.1638	1.646
R33	0.1569	1.596	0.6982	0.846	0.4871	1.034	20.086	0.2023	2.200
R34	0.1511	1.448	0.5265	1.187	0.6237	1.278	11.904	0.1965	1.590
R35	0.1343	1.683	0.4557	1.021	0.4067	1.100	16.728	0.1657	1.718
R36	0.1159	1.798	0.4275	1.119	0.3269	1.030	25.795	0.2122	2.081
R37	0.1487	1.725	0.3988	1.295	0.5283	0.987	17.783	0.1969	1.996
R38	0.1455	1.646	0.4847	1.081	0.4402	1.045	22.216	0.2036	2.117
R39	0.1386	1.661	0.5113	1.003	0.3896	1.092	17.667	0.2211	1.571
R40	0.1537	1.630	0.6146	1.132	0.4026	1.087	21.585	0.1792	1.899

R41	0.1547	1.732	0.5134	1.216	0.4748	1.002	16.120	0.2439	2.091
R42	0.1119	1.544	0.6801	0.798	0.3377	1.015	17.688	0.1997	1.768
OF (s)	13.4769		1197.4265		4.5074				

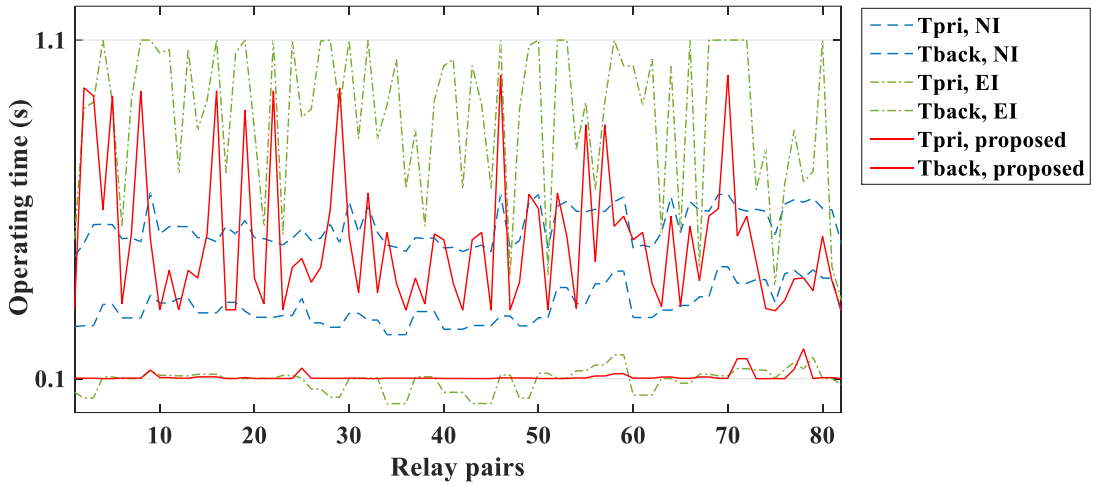


Figure 6. Operating times corresponding to the optimal relay settings obtained using the NOA for the IEEE 15-bus system (IEEE 15-baralı sistem için NOA kullanılarak elde edilen optimal röle ayarlarına karşılık gelen röle işlem süreleri)

Table 6. Statistical optimization results over 20 runs for the IEEE 15-bus system (IEEE 15-baralı sistem için 20 çalıştırma üzerinden elde edilen istatistiksel optimizasyon sonuçları)

Scenario	Method	Min	Max	Avg	Std
Scenario 1	**SCSO**	148.517	790.542	353.806	259.321
	CSA	19.277	20.958	20.273	0.740
	NOA	13.477	18.520	16.991	1.332
Scenario 2	**SCSO**	1325.657	1601.400	1428.593	114.117
	CSA	1260.094	1386.180	1325.172	47.223
	NOA	1197.427	1205.580	1199.427	3.201
Scenario 3	**SCSO**	2168.458	5540.362	3839.388	1320.427
	CSA	5.362	6.538	6.048	0.356
	NOA	4.507	4.738	4.571	0.078

The statistical results given in Table 6 confirm the effectiveness of the NOA algorithm for the optimal coordination of DOCRs. Similar to the 9-bus system, the NOA algorithm provides the best results in terms of Min, Max, and Avg for the 15-bus system as well. On the other hand, the CSA algorithm ranks second, performing better in minimizing relay operating times. Based on the results obtained for Scenario 3, it can be inferred that the SCSO algorithm struggles with problems that involve a high number of constraints. It gives significantly higher OF values compared to the CSA and NOA algorithms.

According to Figure 7, the NOA algorithm has a higher convergence performance compared to the others for the IEEE 15-bus system as well.

On the other hand, to compare the proposed exponential characteristic with the standard characteristics for a lower minimum operating time constraint, some additional experiments are also performed. In these experiments, the minimum operating time is set to 0.01 s. The results are given in Table 7. It is clearly seen that using the EI curve provides a significant reduction in the OF value compared to using the NI curve when the minimum operating time constraint is set to a lower value. However, the proposed characteristic with the NOA algorithm is still the best, even in these experiments.

The NOA algorithm improves the result published in the literature by 13.2% for the IEEE 15-bus system, as seen in Table 8.

Table 7. OF values considering a minimum operating time of 0.01 s for the IEEE 15-bus system (IEEE 15-bara sistem için minimum 0.01 s işletme süresi dikkate alınarak elde edilen OF değerleri)

Method	Scenario 1	Scenario 2	Scenario 3
SCSO	173.948	1.739	2188.256
CSA	18.947	1.797	3.751
NOA	13.552	1.408	0.811

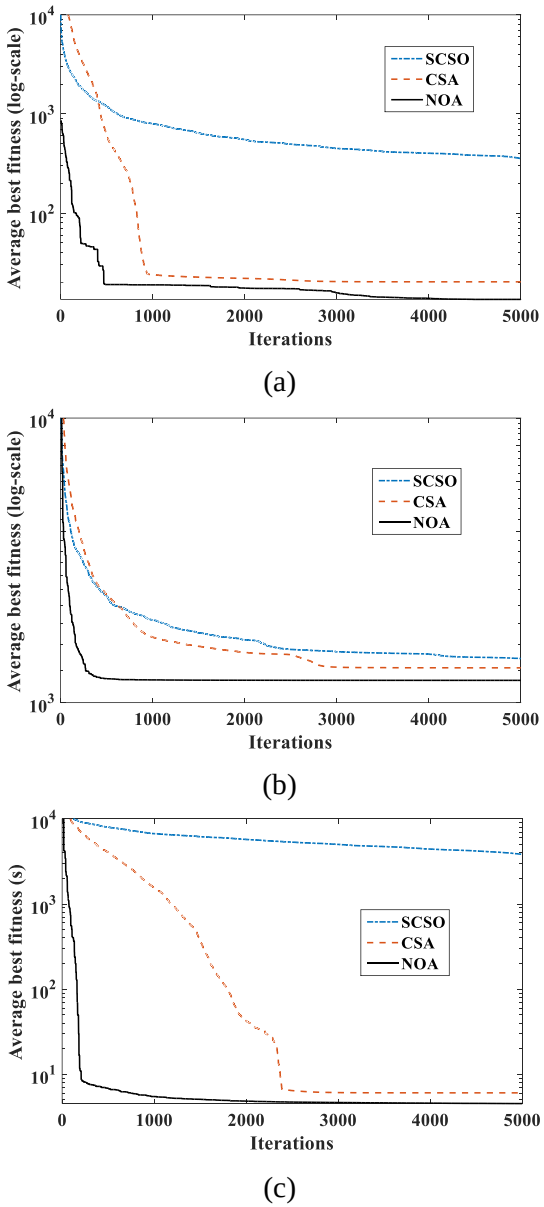


Figure 7. Convergence curves obtained for (a) Scenario 1, (b) Scenario 2, and (c) Scenario 3 for the IEEE 15-bus system (IEEE 15-bara sistemi için (a) Senaryo 1, (b) Senaryo 2 ve (c) Senaryo 3'e ait yakınsama eğrileri)

Table 8. Comparison of the results for Scenario 1 for the IEEE 15-bus system (IEEE 15-bara sistem için Senaryo 1'e ait sonuçların karşılaştırılması)

Method	OJaya [23]	SCSO	CSA	NOA
OF (s)	15.523	148.517	19.277	13.477

4.3. Discussion (Tartışma)

According to the results of the study, the proposed relay characteristic provides lower primary relay operating times compared to standard characteristics. On the other hand, the NOA algorithm, proposed for solving the problem, has demonstrated better performance than the other considered algorithms. In this regard, the use of the NOA algorithm, together with the proposed exponential-based characteristic, is to be highly effective in solving the optimal relay coordination problem.

As a drawback of the proposed approach, replacing standard characteristics with the proposed relay characteristic increases the number of decision variables from 2 to 5 for each relay. As observed for SCSO in this study, this situation may negatively impact the performance of the optimization algorithm. However, this disadvantage can be mitigated by using a well-established algorithm such as the NOA.

5. CONCLUSIONS (SONUÇLAR)

In this study, the use of an exponential-based relay characteristic for DOCRs and the nutcracker optimizer is proposed to solve the optimal coordination problem. The NOA algorithm, developed in recent years, offers advantages such as fewer control parameters and high convergence performance compared to other metaheuristic algorithms. On the other hand, the exponential-based relay characteristic is proposed to provide flexibility by overcoming the limitations imposed by conventional relay characteristics on relay operating times.

In the problem solution, both the exponential-based relay characteristic function and the conventional relay characteristic function based on the normal inverse and extremely inverse characteristics as specified in IEC standards are considered. The experiments are conducted under different scenarios to validate the effectiveness of the proposed exponential-based relay characteristic function. In addition, to evaluate the performance of the NOA

algorithm, the SCSO and CSA algorithms are studied in the paper.

The results show that the use of the extremely inverse characteristic provides lower primary relay operating times compared to the use of the normal and extremely relay inverse characteristics. On the other hand, the NOA algorithm demonstrates consistent and reliable performance compared to the SCSO and CSA algorithms across all scenarios and test systems. When compared to results published in the literature, it is observed that the proposed exponential-based characteristic, combined with the NOA algorithm, provides highly effective results.

Considering all these findings, it can be concluded that the proposed method is a powerful alternative for solving the optimal coordination problem of DOCRs. In future work, the proposed method is planned to be applied to different objective functions and penalty values, as well as to distance-directional overcurrent protection coordination.

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)

***Alisan AYVAZ*:** He conducted the experiments, analyzed the results and performed the writing process.

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

CONFLICT OF INTEREST (ÇIKAR ÇATIŞMASI)

There is no conflict of interest in this study.

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

REFERENCES (KAYNAKLAR)

[1] Ayvaz A. A new and effective directional overcurrent relay coordination approach for IIDG-based distribution networks using different setting groups for peak and off-peak demand periods. Electric Power Systems Research. 2024; 237: 111017.

[2] Bouchekara HREH, Zellagui M, Abido MA. Optimal coordination of directional overcurrent relays using a modified electromagnetic field optimization algorithm. Applied Soft Computing. 2017; 54: 267-283.

[3] Abdelhamid M, Houssein EH, Mahdy MA, Selim A, Kamel S. An improved seagull optimization algorithm for optimal coordination of distance and directional over-current relays. Expert Systems with Applications. 2022; 200: 116931.

[4] Sarwagya K, Nayak PK, Ranjan S. Optimal coordination of directional overcurrent relays in complex distribution networks using sine cosine algorithm. Electric Power Systems Research. 2020; 187: 106435.

[5] Kamel S, Korashy A, Youssef AR, Jurado F. Development and application of an efficient optimizer for optimal coordination of directional overcurrent relays. Neural Computing and Applications. 2020; 32: 8561-8583.

[6] Alaee P, Amraee T. Optimal coordination of directional overcurrent relays in meshed active distribution network using imperialistic competition algorithm. Journal of modern power systems and clean energy. 2020; 9(2): 416-422.

[7] Korashy A, Kamel S, Houssein EH, Jurado F, Hashim FA. Development and application of evaporation rate water cycle algorithm for optimal coordination of directional overcurrent relays. Expert Systems with Applications. 2021; 185: 115538.

[8] ElSayed SK, Elattar EE. Hybrid Harris hawks optimization with sequential quadratic programming for optimal coordination of directional overcurrent relays incorporating distributed generation. Alexandria Engineering Journal. 2021; 60(2): 2421-2433.

[9] Ayvaz A. An enhanced sparrow search algorithm for model order reduction of proton exchange membrane fuel cell system. Transactions of the Institute of Measurement and Control. 2025; In press: 01423312241273838.

[10] Sorrentino E, Rodríguez JV. Effects of the curve type of overcurrent functions and the location of analyzed faults on the optimal coordination of directional overcurrent protections. Computers & Electrical Engineering. 2020; 88: 106864.

[11] Ramli SP, Mokhlis H, Wong WR, Muhammad MA, Mansor NN. Optimal coordination of directional overcurrent relay based on combination of Firefly Algorithm and

Linear Programming. Ain Shams Engineering Journal. 2022; 13(6); 101777.
[12] Ahmadi SA, Karami H, Sanjari MJ, Tarimoradi H, Gharehpetian GB. Application of hyper-spherical search algorithm for optimal coordination of overcurrent relays considering different relay characteristics. International Journal of Electrical Power & Energy Systems. 2016; 83: 443-449.
[13] Alasali F, Saidi AS, El-Naily N, Smadi MA, Holderbaum W. Hybrid tripping characteristic-based protection coordination scheme for photovoltaic power systems. Sustainability. 2023; 15(2): 1540.
[14] Hong L, Rizwan M, Rasool S, Gu Y. Optimal relay coordination with hybrid time–current–voltage characteristics for an active distribution network using alpha Harris hawks optimization. Engineering Proceedings. 2021; 12(1): 26.
[15] Yazdaninejadi A, Nazarpour D, Talavat V. Coordination of mixed distance and directional overcurrent relays: Miscoordination elimination by utilizing dual characteristics for DOCRs. International Transactions on Electrical Energy Systems. 2019; 29(3): e2762.
[16] Korashy A, Kamel S, Alquthami T, Jurado F. Optimal coordination of standard and non-standard direction overcurrent relays using an improved moth-flame optimization. IEEE Access. 2020; 8: 87378-87392.
[17] Abdel-Basset M, Mohame R, Jameel M, Abouhawwash M. Nutcracker optimizer: A novel nature-inspired metaheuristic algorithm for global optimization and engineering design problems. Knowledge-Based Systems. 2023; 262: 110248.
[18] Duan Z, Yu H, Zhang Q, Tian L. Parameter extraction of solar photovoltaic model based on nutcracker optimization algorithm. Applied Sciences. 2023; 13(11): 6710.
[19] Wu D, Yan R, Jin H, Cai F. An adaptive nutcracker optimization approach for distribution of fresh agricultural products with dynamic demands. Agriculture. 2023; 13(7): 1430.
[20] Seyyedabbasi A, Kiani F. Sand Cat swarm optimization: A nature-inspired algorithm to solve global optimization problems. Engineering with computers. 2023; 39(4): 2627-2651.
[21] Braik MS. Chameleon Swarm Algorithm: A bio-inspired optimizer for solving engineering design problems. Expert Systems with Applications. 2021; 174: 114685.
[22] Ayvaz A. An improved chicken swarm optimization algorithm for extracting the optimal parameters of proton exchange membrane fuel cells. International Journal of Energy Research. 2022; 46(11): 15081-15098.
[23] Yu J, Kim CH, Rhee SB. Oppositional Jaya algorithm with distance-adaptive coefficient in solving directional over current relays coordination problem. IEEE Access. 2019; 7: 150729-150742.
[24] Amraee T. Coordination of directional overcurrent relays using seeker algorithm. IEEE Transactions on Power Delivery. 2012; 27(3): 1415-1422.

Gazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Dergisi
PART C: TASARIM VE TEKNOLOJİ

Gazi University
Journal of Science
PART C: DESIGN AND TECHNOLOGY

GU J Sci, Part C, 13(2): 431-439 (2025)

Alaşımsız Demir Tozu İlavesi ile Geliştirilen Akrilonitril Bütadien Stiren Polimer Kompozitlerinin Fiziksel ve Mekanik Özellikleri

Münir TAŞDEMİR[1*], Elif ULUTAŞ[1]

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

Article Info

Research article
Received: 24/06/2024
Revision: 23/01/2025
Accepted: 02/03/2025

Keywords

Acrylonitrile butadiene styrene
Non-alloyed iron powder
Mechanical properties
Polymer composite
Physical properties

Makale Bilgisi

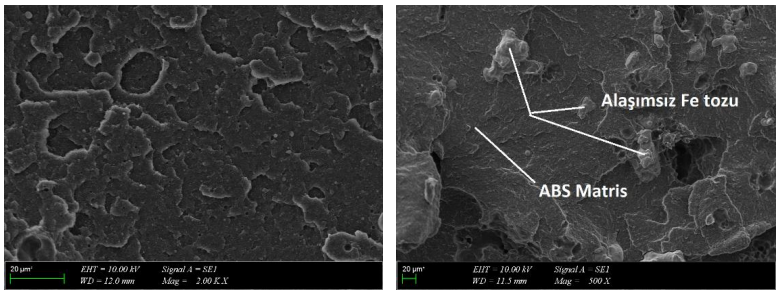
Araştırma makalesi
Başvuru: 24/06/2024
Düzeltme: 23/01/2025
Kabul: 02/03/2025

Anahtar Kelimeler

Akrilonitril bütadien stiren
Alaşımsız demir tozu
Mekanik özellikler
Polimer kompoziti
Fiziksel özellikler

Grafik Özet (Graphical/Tabular Abstract)

Bu çalışmada, akrilonitril bütadien stiren (ABS) polimerine alaşımsız demir tozunun etkileri değerlendirilmiştir. Alaşımsız demir tozu, ABS'ye hacimce %3, %6 ve %9 oranlarında katılmış ve bu farklı toz oranlarının ABS'nin fiziksel, mekanik ve termal özellikleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. / In this study, the effects of unalloyed iron powder on acrylonitrile butadiene styrene (ABS) polymer were evaluated. Unalloyed iron powder was added to ABS at 3%, 6% and 9% by volume and the effects of these different powder ratios on the physical, mechanical and thermal properties of ABS were investigated.



Resim/Figure A: *ABS/alaşımsız Fe polimer kompozitinin SEM mikroyapı fotografları (SEM microstructure photographs of ABS/non-alloyed Fe polymer composite)*

Önemli noktalar (Highlights)

- *Polimer kompozit / Polymer Composite*
- *Fiziksel özellikler / Physical Properties*
- *Alaşımsız demir tozu / non-alloyed iron powder*

Amaç (Aim): *Bu çalışmanın temel amacı, alaşımsız demir tozunun mevcut üretim sürecine entegre edilerek, ek bir yüzey işleme gereksinimi ve maliyet artışı olmaksızın doğrudan üretim aşamasına geçilmesiyle elde edilecek sonuçların incelenmesidir./ The main purpose of this study is to investigate the results to be obtained by integrating non-alloyed iron powder into the existing production process and directly switching to the production phase without the need for additional surface treatment and increased cost.*

Özgünlük (Originality): *Bu çalışmalar, metal tozu eklemenin polimer kompozitlerinin fiziksel ve mekanik özellikleri üzerindeki etkilerinin karmaşık olduğunu ve genellikle sertlik ve rijitlikte artış sağlarken, esneklik ve dayanıklılıkta zayıflamalara yol açabileceğini ortaya koymaktadır./ These studies reveal that the effects of adding metal powder on the physical and mechanical properties of polymer composites are complex and generally lead to increases in hardness and stiffness but may lead to decreases in flexibility and strength.*

Bulgular (Results): *SEM sonuçları alaşımsız demir tozlarının ABS matrisi içinde homojen olarak dağılmadığını ve iyi bir adezyonun olmadığını göstermektedir. / SEM results show that non-alloyed iron powders are not homogeneously distributed in the ABS matrix and there is no good adhesion.*

Sonuç (Conclusion): *Test sonuçlarına göre, alaşımsız demir tozu ilavesi, elastiklik modülü, shore sertliği, yoğunluk, MFI, HDT ve vicat yumuşama sıcaklıklarında anlamlı bir artışa yol açarken, çekme ve kopma mukavemeti, uzama oranı ve Izod çentikli darbe mukavemeti değerlerinde bir azalma gözlemlenmiştir./ According to the test results, the addition of non-alloyed iron powder caused a significant increase in the elastic modulus, shore hardness, density, MFI, HDT and vicat softening temperatures, while a decrease in the tensile and rupture strength, elongation ratio and Izod notched impact strength values was observed..*

*Corresponding author, e-mail: munir@marmara.edu.tr
DOI: 10.29109/gujsc.1504065

GU J Sci, Part C, 13(2): 431-439 (2025)

Gazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Dergisi
PART C: TASARIM VE TEKNOLOJİ

Gazi University
Journal of Science
PART C: DESIGN AND TECHNOLOGY

http://dergipark.gov.tr/gujsc

Alaşımsız Demir Tozu İlavesi ile Geliştirilen Akrilonitril Bütadien Stiren Polimer Kompozitlerinin Fiziksel ve Mekanik Özellikleri

Münir TAŞDEMİR[1*], Elif ULUTAŞ[1]

[1]*Marmara University Faculty of Technology, Department of Metallurgical and Materials Engineering, 34840 Maltepe ISTANBUL*

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 24/06/2024
Düzeltme: 23/01/2025
Kabul: 02/03/2025

Anahtar Kelimeler

Akrilonitril bütadien stiren
Alaşımsız demir tozu
Mekanik özellikler
Polimer kompoziti
Fiziksel özellikler

Öz

Bu çalışmada, akrilonitril bütadien stiren (ABS) polimerine alaşımsız demir tozunun etkileri değerlendirilmiştir. Alaşımsız demir tozu, ABS'ye hacimce %3, %6 ve %9 oranlarında katılmış ve bu farklı toz oranlarının ABS'nin fiziksel, mekanik ve termal özellikleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. ABS polimer matrisi ile alaşımsız demir tozu, çift vidalı ekstrüder kullanılarak eriyik karıştırma yöntemiyle homojen bir şekilde karıştırılmış ve sonrasında granül haline getirilmiştir. Üretilen granüller, enjeksiyon kalıplama yöntemiyle test numuneleri haline getirilmiş ve bu numuneler üzerinde elastiklik modülü, çekme ve kopma mukavemeti, uzama oranı, Izod çentikli darbe mukavemeti, Shore sertlik değeri, yoğunluk, erime akış indeksi (MFI), ısıl çarpılma sıcaklığı (HDT) ve Vicat yumuşama sıcaklığı gibi fiziksel ve mekanik testler gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, alaşımsız demir tozlarının ABS matrisi içindeki dağılımını daha ayrıntılı bir şekilde belirlemek amacıyla taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak mikro yapısal analiz yapılmıştır. Test sonuçlarına göre, alaşımsız demir tozu ilavesi, elastiklik modülü, shore sertliği, yoğunluk, MFI, HDT ve vicat yumuşama sıcaklıklarında anlamlı bir artışa yol açarken, çekme ve kopma mukavemeti, uzama oranı ve Izod çentikli darbe mukavemeti değerlerinde bir azalma gözlemlenmiştir. SEM sonuçları ise alaşımsız demir tozlarının ABS matrisi içinde homojen olarak dağılmadığını ve iyi bir adezyonun olmadığını göstermektedir.

Physical and Mechanical Properties of Acrylonitrile Butadiene Styrene Polymer Composites Developed with the Addition of Non-Alloyed Iron Powder

Article Info

Research article
Received: 24/06/2024
Revision: 23/01/2025
Accepted: 02/03/2025

Keywords

Acrylonitrile butadiene styrene
Non-alloyed iron powder
Mechanical properties
Polymer composite
Physical properties

Abstract

This study evaluates the effects of non-alloyed iron powder on acrylonitrile butadiene styrene (ABS) polymer. Non-alloyed iron powder was added to ABS in volume fractions of 3%, 6%, and 9%, and the impact of these varying powder concentrations on the physical, mechanical, and thermal properties of ABS was investigated. The ABS polymer matrix and non-alloyed iron powder were blended homogeneously using a twin-screw extruder with a melt mixing method, and subsequently pelletized. The produced pellets were then molded into test specimens using injection molding, and various physical and mechanical tests, including modulus of elasticity, tensile and break strength, elongation at break, Izod notched impact strength, Shore hardness, density, melt flow index (MFI), heat deflection temperature (HDT), and Vicat softening temperature, were performed. Additionally, scanning electron microscopy (SEM) was employed for detailed microstructural analysis to determine the distribution of non-alloyed iron powder within the ABS matrix. The test results showed that the addition of non-alloyed iron powder led to a significant increase in modulus of elasticity, shore hardness, density, MFI, HDT, and Vicat softening temperature, while a decrease was observed in tensile and break strength, elongation at break, and Izod notched impact strength. The SEM results show that the pure iron particles are not homogeneously distributed within the ABS matrix and there is a lack of good adhesion.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Polimerik malzemelerin kullanımının giderek yaygınlaşmasının başlıca sebepleri, bu malzemelerin yeniden kullanılabilir olmaları, işlenmelerinin kolay olması ve üretim süreçlerinde ekonomik avantajlar sağlamasıdır. Ancak, bu malzemelerin bazı uygulamalarda mekanik ve fiziksel özelliklerinin yeterli olamaması, onların kullanım alanlarını sınırlayabilmektedir. Bu nedenle, polimerlerin mekanik ve fiziksel performansını artırmak amacıyla, farklı

*Corresponding author, e-mail: munir@marmara.edu.tr
DOI: 10.29109/gujsc.1504065

malzemelerin polimerlere eklenerek kompozit yapılar geliştirilmiş ve böylece daha güçlü ve dayanıklı materyaller elde edilmiştir. Bu yaklaşım, polimerlerin sınırlı performanslarını aşarak daha geniş bir uygulama yelpazesi sunmaktadır [1].

Yapılan araştırmalarda ABS/alaşımsız demir tozu karışımları ile ilgili bir çalışma tespit edilmemiştir. Fakat metal tozlarının polimerik malzemelere katılması ile elde edilen kompozitlerin özellikleri üzerine çeşitli çalışmalar bulunmaktadır. Bu çalışmalar, tozun katkı oranı, dağılımı ve üretim yönteminin, elde edilen kompozitlerin mekanik, ısısal ve akışkanlık özellikleri üzerindeki etkileri üzerinedir. Örneğin, Niksad ve arkadaşları [2], ABS polimerine %10 demir tozu ekleyerek, bu kompozitleri üç boyutlu yazıcı filamentleri olarak kullanmak amacıyla üretmişlerdir. Kullandıkları demir tozu %99,7 saflığa sahip olup, ortalama parçacık boyutu 45 mikron civarındadır. Bu çalışmada, elde edilen kompozitin eriyik akış özellikleri detaylı bir şekilde incelenmiştir. Benzer şekilde, Hanemann ve Honnef [3], poliester polimerine mikronize demir tozları ekleyerek elde ettikleri kompozitin akışkanlık özelliklerini araştırmışlardır. Güldaş ve arkadaşları [4] ise polipropilen içerisine alüminyum tozu ekleyerek, ekstrüzyon yöntemiyle ürettikleri kompozitlerin akış özelliklerini incelemişlerdir. Çalışmalarında, toz boyutu ve katkı oranı ile erime akış indeksinin sıcaklık ve basınç artışına bağlı olarak değişim gösterdiğini tespit etmişlerdir. Bu tür çalışmalar, metal tozlarının polimer kompozitlerinin işlenebilirliğini ve performansını iyileştirmek için önemli bilgiler sunmaktadır. Güngör [5], yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE) polimerine farklı oranlarda (hacimce %5, %10 ve %15) Fe (Ancorsteel 1000HP - Hoeganaes) tozu ekleyerek yapılan deneysel çalışmalarda, demir tozu oranının arttıkça polimer kompozitinin mekanik özelliklerinde değişiklikler gözlemiştir. Özellikle, demir tozu içeriği arttıkça % uzama, darbe dayanımı, akma ve çekme mukavemeti gibi özelliklerde düşüş meydana gelirken; elastiklik modül ve sertlik gibi özelliklerde belirgin bir artış tespit edilmiştir. Bu sonuçlar, metal tozlarının polimer kompozitlerine eklenmesinin malzemenin rijitliğini artırmasına rağmen, esneklik ve darbe dayanımında azalma ile sonuçlanabileceğini göstermektedir. Benzer bir şekilde, Taşdemir ve Gülsoy [6], polistiren içerisine %5, %10 ve %15 oranlarında demir tozu ekleyerek yapılan çalışmada, demir tozu oranının arttığı durumlarda elastiklik modül, ısıl çarpılma sıcaklığı, erime akış indeksi ve shore sertlik değerlerinde yükselme gözlemişlerdir. Ancak, aynı oranlarda ekleme yapıldığında % uzama, darbe mukavemeti, çekme mukavemeti ve akma mukavemeti gibi mekanik özelliklerde düşüş meydana gelmiştir. Bu bulgular, demir tozu katkısının polistirenin fiziksel ve mekanik performansını etkileyebileceğini ve genellikle rijitlik ve sertlik artışı sağlarken, esneklik ve dayanıklılıkla ilgili bazı olumsuz etkiler yaratabileceğini ortaya koymaktadır. Saude ve arkadaşları [7], ABS polimerine demir tozu ve yüzey aktif madde ekleyerek üç boyutlu yazıcılar için filament üretmişlerdir. Çalışmalarında, ABS'nin hacimce %50-46, demir tozunun %24-29 ve yüzey aktif maddenin ise %26-25 oranlarında kullanıldığını belirtmişlerdir. Yapılan testler sonucunda, demir tozu oranının artmasıyla birlikte eğilme mukavemeti ve sertlik değerlerinde bir azalma görülürken, çekme mukavemeti ve kopma mukavemeti değerlerinde ise artış tespit edilmiştir. Gülsoy ve Taşdemir [8], polipropilen polimerine %99,75 saflıkta ve ortalama 50 mikron parçacık boyutuna sahip demir tozu eklemiş ve bu karışımı hacimce %5, %10 ve %15 oranlarında kullanarak polimer kompoziti hazırlamışlardır. Bu çalışmada, demir tozu oranının artmasıyla ısıl çarpılma sıcaklığı, Vicat yumuşama sıcaklığı, erime akış indeksi, Shore sertlik ve elastik modül değerlerinde artış gözlemlenirken, aynı zamanda Izod çentikli darbe mukavemeti, çekme mukavemeti, akma mukavemeti ve % uzama gibi mekanik özelliklerde bir azalma olduğu belirlenmiştir. Chawla ve arkadaşları [9], ABS polimerine demir tozu ilave ederek bir kompozit materyal geliştirmişlerdir. Çalışmalarında, ekstrüzyon hızı ve sıcaklığı gibi üretim parametrelerini değiştirerek, üç boyutlu yazıcılar için uygun filament üretimi gerçekleştirmişlerdir. Demir tozu oranının ağırlıkça %2,5'ten %5'e yükseltilmesiyle, MFI değerinde bir artış gözlemişlerdir. Benzer şekilde, Gülsoy ve Taşdemir [10] başka bir çalışmada, ABS kopolimerine hacimce %5, %10 ve %15 oranlarında bronz tozu ekleyerek polimer kompoziti hazırlamışlardır. Elde ettikleri kompozitte, bronz tozu oranının arttığı durumlarda elastik modül, sertlik ve ısıl çarpılma sıcaklığı gibi termomekanik özelliklerin yükseldiği, ancak erime akış indeksi, darbe mukavemeti, % uzama, çekme ve akma mukavemeti gibi mekanik özelliklerin ise azaldığı belirlenmiştir. Bu çalışmalar, metal tozu eklemenin polimer kompozitlerinin fiziksel ve mekanik özellikleri üzerindeki etkilerinin karmaşık olduğunu ve genellikle sertlik ve rijitlikte artış sağlarken, esneklik ve dayanıklılıkta zayıflamalara yol açabileceğini ortaya koymaktadır.

Bu çalışmanın temel amacı, alaşımsız demir tozunun mevcut üretim sürecine entegre edilerek, ek bir yüzey işleme gereksinimi ve maliyet artışı olmaksızın doğrudan üretim aşamasına

geçilmesiyle elde edilecek sonuçların incelenmesidir. Bu doğrultuda, alaşımsız demir tozunun yüzey modifikasyonunun yapılması veya uyumlaştırıcı bileşenlerin miktarının arttırılması, ABS ve takviye malzemesi olan alaşımsız demir tozu arasındaki etkileşimin iyileştirilmesine olanak tanıyabilir. Bu tür bir iyileştirme, aynı zamanda kompozitin mekanik özelliklerinde daha belirgin bir artışa yol açabilir. Bu çalışmada elde edilen sonuçlar neticesinde, alaşımsız demir tozunun ABS ile karıştırılmasının, polimerin çeşitli özelliklerini geliştirdiği ancak bazı mekanik özelliklerinde ödün verilmesi gerektiği anlaşılmaktadır.

2. MATERYAL VE MEDOD (MATERIALS AND METHODS)

2.1. Kullanılan Malzemeler (Used Materials)

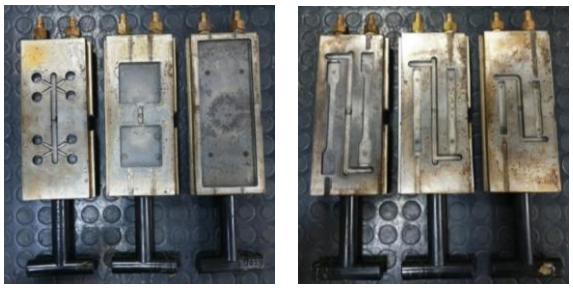
Çalışmada, ABS kopolimer matrisine farklı oranlarda ilave edilen alaşımsız demir (Fe) tozlarıyla dört farklı grup oluşturulmuştur. Elde edilen ABS/alaşımsız Fe polimer kompozitlerinin oranları, Tablo 1'de sunulmuştur. ABS, Starex firmasının SD-0150 kodlu ürünüdür. Bu malzemenin yoğunluğu 1,03 g/cm³, su emme oranı %0,3, eriyik akış indeksi değeri (200 °C, 5 kg yük altında) 1,8 g/10 dk, çekme mukavemeti 48 MPa ve vicat yumuşama sıcaklığı (1 kg yük) 107 °C'dir. Kompozit malzemede kullanılan Ancosteel 150 hp alaşımsız Fe tozu Hoeganaes firmasının üretmiş olduğu üründür. Alaşımsız Fe'nin saflığı %99,75'tir ve ortalama parçacık boyutu 50 mikrondur (firma reçete bilgisidir). Hacim, kütle/yoğunluk formülüyle hesaplanmıştır.

Tablo 1. ABS/alaşımsız Fe polimer kompozitinin karışım oranları-hacimce (Mixing ratios of ABS/unalloyed Fe polymer composite by volume)

Gruplar	ABS (%)	Alaşımsız Fe (%)
1	100	-
2	97	3
3	94	6
4	91	9

2.2. Numune Hazırlama (Sample Preperation)

ABS, elektro.mag M1071P model kurutma fırınında 105°C sıcaklıkta bir gün boyunca kurutulmuştur. Kurutma işlemi sonrasında, numuneler V-Tipi kuru karıştırıcıda 15 dakika süreyle karıştırılmış ve ardından çift vidalı ekstrüderde, 40-55 bar arasında bir basınç altında, 70 dev/dk vida dönüş hızında ve vida-kovan sıcaklıkları 210-250°C aralığında işlenmiştir. Granüller, daha sonra bir gün boyunca 105°C'de kurutulmuştur. Test numuneleri enjeksiyon kalıplama işlemine tabi tutulmuş ve 210-250°C sıcaklık aralığında, 750 bar basınç altında, kalıp bekleme süresi 15 saniye olacak şekilde şekillendirilmiştir. Şekil 1'de enjeksiyon ile kalıplamada kullanılan kalıp resimleri verilmiştir. Kalıplama parametreleri ise Tablo 2'de sunulmuştur.



Şekil 1. ABS/alaşımsız Fe polimer kompozitinin kalıplanmasında kullanılan enjeksiyon kalıpları (Injection molds used for molding ABS/non-alloyed Fe polymer composite)

Tablo 2. Kalıplama parametreleri (Molding parameters)

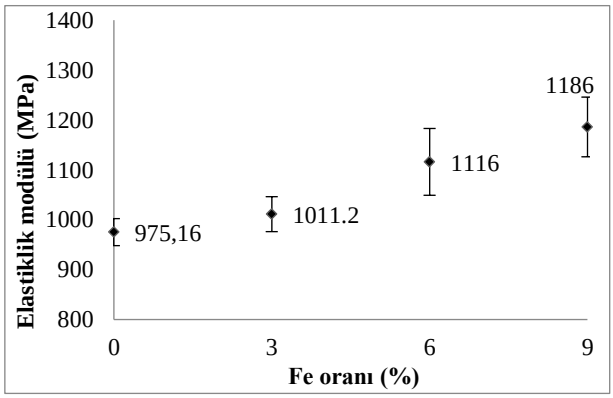
İşlem	Ekstrüzyon	Enjeksiyon
Sıcaklık (ºC)	210-250	210-250
Basınç (bar)	40-55	750
Kalıpta tutma süresi (sn)	-	15
Vida dönme hızı (dev/dk)	70	-
Kalıp sıcaklığı (ºC)	-	40-45

2.3. Test Yöntemleri (Test Methods)

Bu çalışmada, numunelerin mekanik özelliklerinin belirlenmesi için çekme testi ASTM D638 standardına uygun olarak Zwick (Z010) çekme test cihazı kullanılarak, 50 mm/dk hızında ve beş adet numunenin ortalamaları alınarak gerçekleştirilmiştir. Izod darbe (çentikli) testleri ise ASTM D256 standardına göre, oda sıcaklığında Zwick cihazı ile yapılmıştır. Shore sertlik ölçümleri, Zwick marka cihazla (ASTM D2240) gerçekleştirilmiştir. Yoğunluk tayini, ISO 2781 standardına uygun olarak her bir grup için üç ayrı ölçüm alınıp yapılmıştır. HDT ve vicat yumuşama noktası testleri, Devotrans CEAST 6521 marka HDT-vicat test cihazı ile, ISO 75 ve ISO 306 standartlarına göre uygulanmıştır. Akış davranışı, Zwick 4100 EAİ cihazı kullanılarak, ISO 1133 standardına uygun olarak 200°C sıcaklık ve 5 kg yük altında incelenmiştir. SEM analizinden önce, numune yüzeyleri altın/paladyum alaşımı ile kaplanmış ve Zeiss EVO MA 10 marka SEM cihazı (10 kV) ile incelenmiştir

3. RESULTS (BULGULAR)

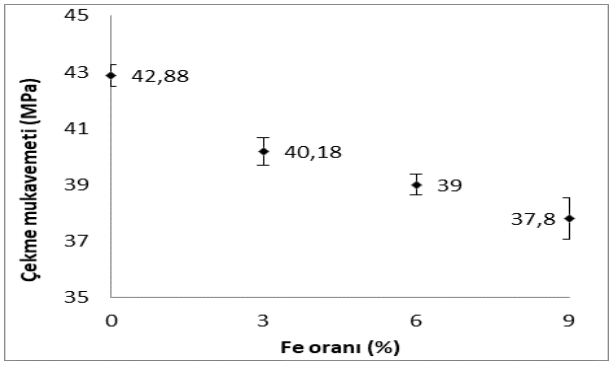
Çalışmada, ABS polimerine demir tozu ilavesi ile elde edilen karışıma uygulanan çekme testi sonucunda elde edilen elastiklik modülü değerleri Şekil 2'de sunulmuştur. Grafik incelendiğinde, saf ABS'nin elastiklik modülü değeri 975,16 MPa olarak ölçülmüştür. Ancak, ABS'ye hacimce %3 oranında demir tozu eklenmesiyle bu değer 1011,2 MPa'ya yükselmiştir. Demir tozu oranı %6'ya çıktığında, elastiklik modülü değeri 1116 MPa'ya ve %9'luk ilaveyle 1186 MPa'ya ulaşmıştır. %9 demir tozu içeren kompozit, en yüksek elastiklik modülüne sahip olup, bu değer saf ABS'ye kıyasla %21,6'lık bir artış göstermektedir. Demir tozu, ABS'ye göre çok daha sert bir malzemedir. Demir tozu, ABS matrisi içine eklendiğinde, kompozit malzemenin genel sertliğini artırmıştır. Alaşımsız demir parçacıklarının deformasyonu, ABS'nin deformasyonundan çok daha zordur. Bu durum, kompozitin elastiklik modülünün yükselmesine neden olmuştur. Elastiklik modülü, malzemenin deformasyona karşı gösterdiği direnç olduğundan, sertliği yüksek olan demir tozu parçacıkları, kompozit malzemenin genel deformasyon direncini artırır. Bu sonuç, alaşımsız demir tozu ilavesinin, ABS'nin elastik özelliklerini artırma potansiyeline sahip olduğunu ve polimerin mekanik dayanımını iyileştirdiğini göstermektedir. Bu sonuçlar Güngör [5], Taşdemir ve Gülsoy [6] yapmış olduğu çalışmalar ile paralellik göstermektedir.



Şekil 2. ABS/alaşımsız Fe polimer kompozitinin elastiklik modül değerleri (Elastic modulus values of ABS/non-alloyed Fe polymer composite)

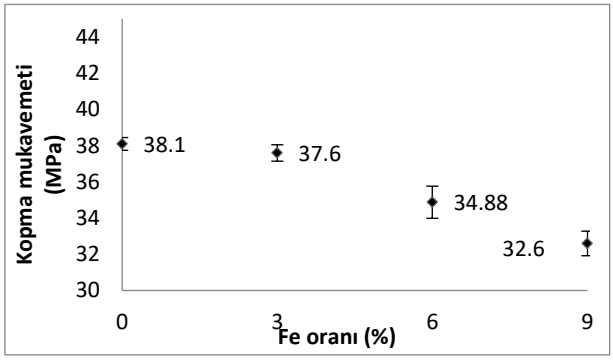
Şekil 3'te, ABS polimerine demir tozu ilavesiyle elde edilen çekme mukavemeti değerleri sunulmuştur. Bu verilere göre, saf ABS'nin çekme mukavemeti değeri 42,88 MPa olarak belirlenmiştir. Ancak, ABS'ye hacimce %3 oranında demir tozu eklenmesiyle bu değer 40,18

MPa'ya düşmüştür. %6 oranında demir tozu ilavesinde çekme mukavemeti daha da azalarak 39 MPa'ya gerilemiş ve %9 demir tozu ilavesiyle ise en düşük çekme mukavemeti değeri olan 37,8 MPa'ya ulaşmıştır. Bu sonuç, saf ABS'ye kıyasla %11,8'lik bir azalmayı göstermektedir. ABS'ye alaşımsız demir tozu eklenmesi, yapıyı rijit özellik kazandırdığından elastiklik modülünü artırırken, çekme mukavemeti düşürmüştür. Bu düşüş, esas olarak alaşımsız demir tozunun polimerle bağlanamaması, homojen olmayan dağılım, iç gerilimler, mikro çatlaklar ve yük taşıma kapasitesinin değişmesi gibi faktörlerden kaynaklanmaktadır. Yani, elastiklik modülündeki artış, daha az deformasyona ve daha fazla sertliğe yol açarken, çekme mukavemeti, zayıf bağlar ve mikro yapısal bozulmalar nedeniyle olumsuz etkilenebilir. Mikroyapı analizleri de bu durumu desteklemektedir; Mikro yapı fotoğrafları incelendiğinde demir tozlarının ABS matrisine iyi bir şekilde bağlanmadığı tespit edilmiştir. Bu bağlanma zayıflığı, materyalin çekme mukavemetinin düşmesine neden olmuştur.



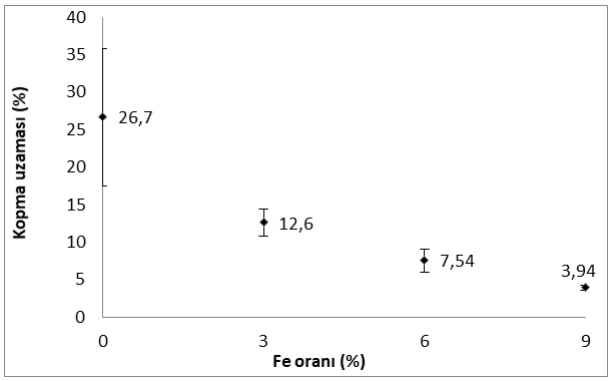
Şekil 3. ABS/alaşımsız Fe polimer kompozitinin çekme mukavemeti değerleri (Tensile strength values of ABS/non-alloyed Fe polymer composite)

Şekil 4'te, ABS içerisine hacimce %3 oranında demir tozu ilavesiyle elde edilen kopma mukavemeti değerleri sunulmuştur. Grafikte, saf ABS'nin kopma mukavemeti değeri 38,1 MPa olarak ölçülmektedir. %3 demir tozu eklenmesiyle bu değer 37,6 MPa'ya düşerken, %6 demir ilavesinde bu değer 34,88 MPa'ya gerilemiştir. %9 demir tozu ilavesi ise kopma mukavemeti değerinin daha da azalarak 32,6 MPa'ya inmesine yol açmıştır, bu da en düşük ölçülen değeri temsil etmektedir. Bu değişimler, saf ABS'nin kopma mukavemeti değeri ile kıyaslandığında %14,4'lük bir azalma göstermektedir. Kopma mukavemetindeki bu düşüş, demir tozlarının ABS matrisi ile yeterince iyi bağlanamamasına bağlı olarak açıklanabilir.



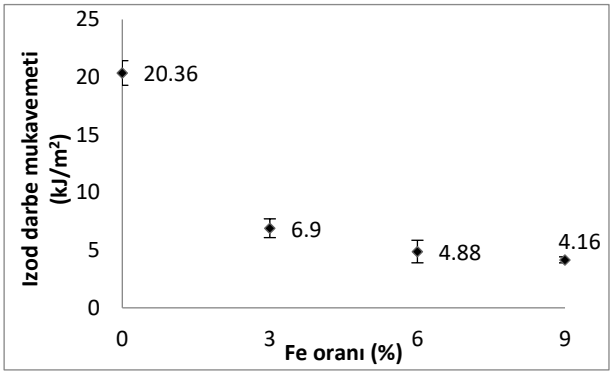
Şekil 4. ABS/alaşımsız Fe polimer kompozitinin kopma mukavemeti değerleri (Tensile strength values of ABS/non-alloyed Fe polymer composite)

Şekil 5'te, %3 demir tozu ilavesiyle elde edilen kompozitin kopma uzama değerleri sunulmaktadır. Grafikte, saf ABS'nin kopma uzama değerinin %26,7 olduğu görülmektedir. %3 demir tozu eklenmesiyle bu değer %12,62'ye düşerken, %6 demir tozu ilavesiyle bu oran bir miktar daha azalarak %7,54'e gerilemiştir. En düşük kopma uzama değeri, %9 demir tozu ilavesiyle elde edilen kompozitte %3,94 olarak ölçülmüştür. Bu değer, saf ABS'nin kopma uzama değeriyle kıyaslandığında %85,2 oranında bir azalma göstermektedir. ABS, plastik deformasyon kabiliyeti yüksek bir malzemedir, ancak demir tozu ilavesiyle birlikte, kompozit daha kırılgan hale gelmiş ve polimerin plastik akma davranışını engellemiştir bu da kopma öncesindeki uzamayı sınırlamıştır. Demir tozunun artan oranı ile bu etki daha belirginleşmiştir. Sonuç olarak, demir tozunun eklenmesi, ABS'nin doğal elastikiyetini ve uzama kapasitesini sınırlayarak kopma uzamasında düşüşe neden olmuştur. Güngör [5] tarafından gerçekleştirilen çalışma ile sonuçlar benzerlik göstermektedir.



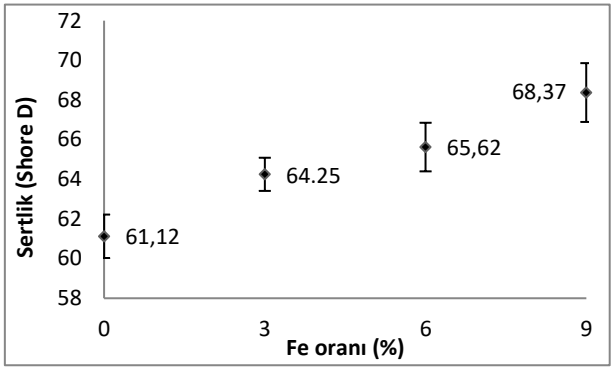
Şekil 5. ABS/alaşımsız Fe polimer kompozitinin kopma uzama değerleri (Elongation at break values of ABS/non-alloyed Fe polymer composite)

Şekil 6'da, ABS polimerine %3 oranında demir tozu eklenerek elde edilen kompozitin Izod çentikli darbe mukavemeti değerleri sunulmuştur. Bu grafikte, saf ABS'nin darbe mukavemeti değerinin 20,36 kJ/m² olduğu gözlemlenmektedir. Ancak, %3 demir tozu ilavesiyle bu değer belirgin bir şekilde düşerek 6,9 kJ/m²'ye gerilemiştir. %6 demir tozu eklemesiyle darbe mukavemeti daha da azalarak 4,88 kJ/m² seviyesine ulaşmıştır. En düşük darbe mukavemeti değeri ise %9 demir tozu ilavesinde 4,16 kJ/m² olarak kaydedilmiştir. Bu sonuç, ABS'nin darbe mukavemetinin %79,5 oranında bir azalma gösterdiğini ortaya koymaktadır. Şekil 5'teki mikroyapı fotoğrafı, demir tozu parçacıklarının ABS matrisinde iyi bir adezyon oluşturmadığını ve bu parçacıkların kolaylıkla matristen ayrıldığını göstermektedir. Bu zayıf bağlantılar, malzemenin darbe enerjisini düzgün bir şekilde dağıtamamasına ve kırılma noktasında daha kırılgan hale gelmesine yol açmıştır. Sonuç olarak, kompozitteki alaşımsız demir tozu oranının artmasıyla birlikte, darbe mukavemeti değerlerinde gözlemlenen azalma, materyalin darbeye karşı daha hassas hale gelmesine sebebiyet vermiştir.



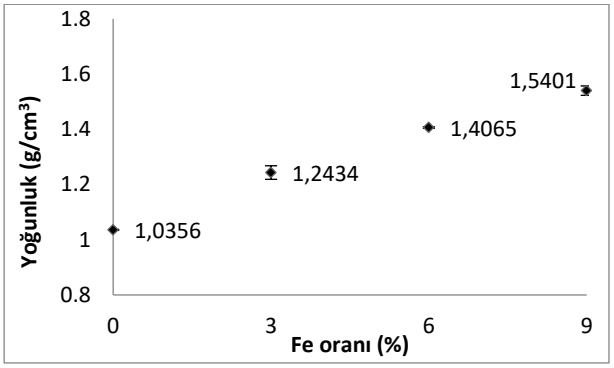
Şekil 6. ABS/alaşımsız Fe polimer kompozitinin Izod darbe mukavemeti değerleri (Izod impact strength values of ABS/non-alloyed Fe polymer composite)

Şekil 7'de, ABS içerisine %3 demir tozu ilavesiyle elde edilen sertlik değerleri sunulmaktadır. Bu grafik incelendiğinde, saf ABS'nin sertlik değeri 61,12 Shore D olarak ölçülmüştür. %3 oranında demir tozu ilavesiyle bu değer 64,25 Shore D'ye çıkarken, %6 demir tozu eklenmesiyle sertlik değeri bir miktar daha artarak 65,62 Shore D'ye ulaşmıştır. En yüksek sertlik değeri ise %9 demir tozu eklemesiyle 68,37 Shore D olarak kaydedilmiştir. Bu, saf ABS ile karşılaştırıldığında %11,8'lik bir artış göstermektedir. Bu artış, demir tozunun sert ve katı yapısının polimer matrisine entegre olmasıyla açıklanabilir. Demir tozlarının katkısı, polimer matrisinin daha rijit hale gelmesine ve dolayısıyla malzemenin sertlik değerinin yükselmesine neden olmuştur. Demir parçacıklarının matrisle oluşturduğu fiziksel bağlar, malzemenin içyapısındaki etkileşimleri artırarak sertlik değerlerinin yükselmesine yol açmıştır. Alaşımsız demir tozunun arttırılması ile sertlik değerlerinde gözlemlenen artış, malzemenin daha rijit ve dayanıklı hale gelmesine işaret etmekle birlikte, bu sertlik artışının diğer mekanik özellikler üzerinde olumsuz etkiler yaratabileceği de göz önünde bulundurulmalıdır.



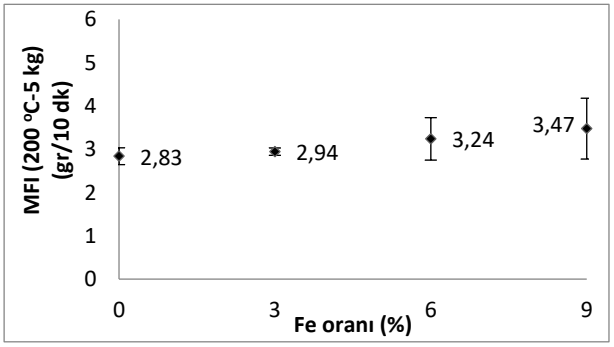
Şekil 7. ABS/alaşımsız Fe polimer kompozitinin sertlik değerleri (Hardness values of ABS/non-alloyed Fe polymer composite)

Şekil 8'de, ABS içerisine hacimce %3 demir tozu ilavesiyle elde edilen yoğunluk değerleri sunulmaktadır. Verilen grafik incelendiğinde, saf ABS'nin yoğunluk değeri 1,0356 g/cm³ olarak ölçülmüştür. Ancak, ABS'ye %3 demir tozu eklenmesiyle bu değer 1,2434 g/cm³'e yükselmiştir. %6 demir tozu ilavesinde, yoğunluk bir miktar daha artarak 1,4065 g/cm³ seviyesine çıkmıştır. En yüksek yoğunluk değeri ise %9 demir tozu eklenmesiyle 1,5401 g/cm³ olarak kaydedilmiştir. Bu değer, saf ABS'nin yoğunluk değeri ile karşılaştırıldığında %48,7 oranında bir artış göstermektedir. Bu artışın temel nedeni, demir tozunun yoğunluğunun (7,85 g/cm³), ABS polimerinden belirgin derecede daha yüksek olmasıdır. Demir tozunun polimer matrisine ilave edilmesi, kompozit malzemenin toplam yoğunluğunu artırarak daha yoğun bir yapı oluşturmuştur. Bu, özellikle metal içerikli kompozitlerde yaygın olarak görülen bir davranıştır.



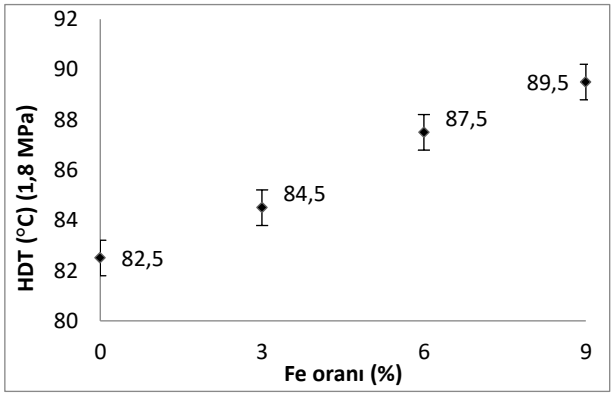
Şekil 8. ABS/alaşımsız Fe polimer kompozitinin sertlik değerleri (Hardness values of ABS/non-alloyed Fe polymer composite)

Şekil 9'da, ABS içerisine %3 oranında demir tozu ilavesiyle elde edilen MFI değerleri sunulmaktadır. Grafik incelendiğinde, saf ABS'nin MFI değeri 2,83 g/10 dk olarak ölçülmüştür. ABS'ye %3 demir tozu eklenmesiyle MFI değeri, 2,94 g/10 dk seviyesine yükselmiştir. %6 demir tozu ilavesinde bu değer daha fazla artarak 3,24 g/10 dk'ya ulaşırken, %9 demir tozu eklenmesinde ise en yüksek MFI değeri olan 3,47 g/10 dk kaydedilmiştir. Bu değer, saf ABS'nin MFI değeriyle karşılaştırıldığında %22,6 oranında bir artış göstermektedir. Bu artışın temel nedeni, demir tozunun ABS matrisine olan bağlanma derecesinin düşük olmasıdır. Demir tozu parçacıklarının matrisle yeterince güçlü bir adezyon oluşturamaması, malzemenin daha akışkan olmasına yol açmaktadır. Bu durum, kompozitin daha düşük viskoziteye sahip olmasını sağlar ve daha kolay şekillendirilmesine imkan verir. Yüksek MFI değerleri, daha düşük işlem sıcaklıkları ve enjeksiyon basınçları ile üretim yapılmasına olanak tanır, bu da enerji verimliliğini artırabilir ve üretim sürecini daha ekonomik hale getirebilir. Enjeksiyonla üretim sırasında düşük basınçlar kullanılarak, nihai ürünler daha az enerji harcanarak ve daha az ısıl stres altında üretilebilir, bu da malzemenin işlenebilirliğini iyileştirir [11].



Şekil 9. ABS/alaşımsız Fe polimer kompozitinin MFI değerleri (MFI values of ABS/non-alloyed Fe polymer composite)

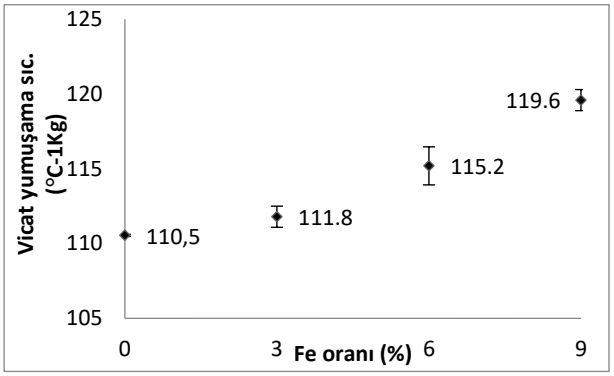
Şekil 10'da, ABS içerisine hacimce %3 oranında demir tozu eklenerek elde edilen ısıl çarpılma sıcaklığı değerleri sunulmaktadır. Grafik incelendiğinde, saf ABS'nin HDT değeri 82,5 °C olarak ölçülmüştür. ABS'ye %3 demir tozu ilave edilmesiyle, HDT değeri 84,5 °C'ye yükselmiştir. %6 demir tozu eklenmesiyle bu değer 87,5 °C'ye çıkarken, %9 demir tozu ilavesiyle en yüksek HDT değeri olan 89,5 °C kaydedilmiştir. Bu değer, saf ABS'nin HDT değeri ile karşılaştırıldığında %8,4 oranında bir artış göstermektedir. Demir tozunun eklenmesiyle, polimer matrisinin mekanik yapısı güçlenmiş ve ısıl dayanıklılık üzerinde olumlu bir etkisi olmuştur. Gülsoy ve Taşdemir [10] tarafından yapılan çalışmada benzer şekilde, ABS kopolimeri içerisine bronz tozu eklenmesiyle ısıl çarpılma sıcaklığının arttığı tespit edilmiştir. Bu da, demir tozu içeren kompozitlerin, matris materyali ile daha sağlam bir yapı oluşturarak daha yüksek ısıl stabilite gösterdiğini ve ısıl yüke karşı daha dayanıklı hale geldiğini desteklemektedir. Bu durum, özellikle yüksek sıcaklık koşullarında kullanılacak malzemelerin performansını artırmak için önemli bir bulgu sağlamaktadır.



Şekil 10. ABS/alaşımsız Fe polimer kompozitinin HDT değerleri (HDT values of ABS/non-alloyed Fe polymer composite)

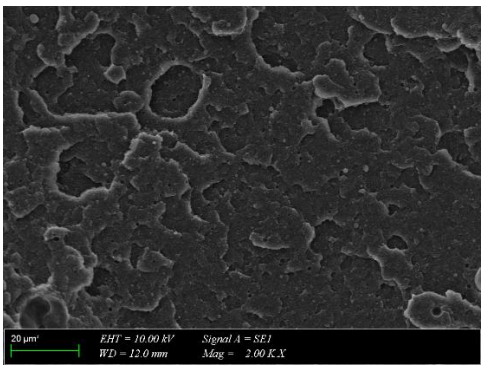
Şekil 11'de, ABS içerisine hacimce %3 demir tozu ilavesiyle elde edilen Vicat yumuşama sıcaklığı değerleri sunulmaktadır. Grafik incelendiğinde, saf ABS'nin Vicat yumuşama sıcaklığı değeri 110,5 °C olarak ölçülmüştür. ABS'ye %3 demir tozu eklenmesiyle bu değer 118,0 °C'ye yükselmiştir. %6 demir tozu ilavesinde, Vicat yumuşama sıcaklığı değeri 115,2 °C'ye çıkarken, %9 demir tozu ilavesiyle en yüksek Vicat yumuşama sıcaklığı değeri 119,6 °C olarak kaydedilmiştir. Bu değer, saf ABS'nin Vicat yumuşama sıcaklığı değeri ile kıyaslandığında %8,2 oranında bir artış göstermektedir. Bu artış, alaşımsız demir tozunun

ABS polimer matrisine eklenmesiyle kompozitin ısıl stabilitesinin arttığını ve daha yüksek sıcaklıklara dayanıklı hale geldiğini göstermektedir. Alaşımsız demir tozu, ABS matrisin mekanik ve termal özelliklerini iyileştirerek malzemenin şekil değiştirme noktasına kadar daha yüksek sıcaklıklara dayanabileceğini göstermiştir. Bu sonuç, özellikle yüksek sıcaklık koşullarında uygulama gerektiren endüstriyel alanda, kompozit malzemelerin performansını artırmak adına önemli bir katkıdır.

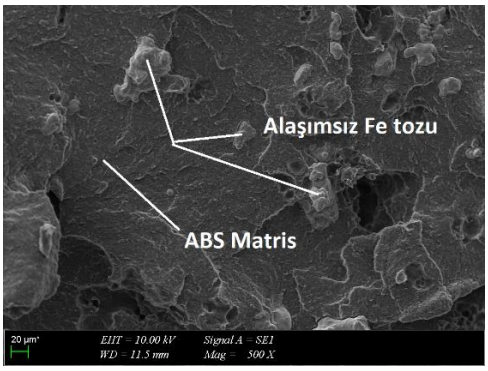


Şekil 11. ABS/alaşımsız Fe polimer kompozitinin Vicat yumuşama sıcaklığı değerleri (Vicat softening temperature values of ABS/non-alloyed Fe polymer composite)

Şekil 12'de, ABS/alaşımsız Fe polimer kompozitinin mikroyapı analizine ait SEM fotoğrafları sunulmaktadır. Görüntüler incelendiğinde, ABS matrisi ile alaşımsız demir parçacıklarının belirgin bir şekilde göründüğü ve demir tozlarının matris içerisinde homojen bir şekilde dağılmadığı gözlemlenmektedir. Ancak, SEM fotoğraflarında dikkat çeken bir diğer önemli husus, demir parçacıklarının ABS matrisiyle yeterli bir adezyon göstermemesi ve bu iki bileşenin arasındaki bağın zayıf olmasıdır. Bu durum, demir tozlarının matrisle etkileşim kurmada güçlük yaşadığını ve kompozit malzemenin mekanik özelliklerinin bu bağlanma zayıflığından olumsuz etkilenebileceğini düşündürmektedir. Adhezyon eksikliği, kompozitlerin dayanıklılığını ve performansını sınırlayabilecek önemli bir faktördür ve bu bulgu, demir tozlarının matrise entegrasyonunu iyileştirmek amacıyla yüzey modifikasyonu veya bağlayıcı maddelerin kullanımını gerektirmektedir.



Saf ABS (Pure ABS)



ABS/Fe (91/9)

Şekil 12. ABS/alaşımsız Fe polimer kompozitinin SEM mikroyapı fotoğrafları (SEM microstructure photographs of ABS/non-alloyed Fe polymer composite)

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada, ABS polimerine alaşımsız demir tozu ilave edilerek yeni bir polimer kompoziti üretilmiştir. Üretilen kompozitin çeşitli mekanik ve termal özellikleri incelenmiş, elastisite modülü, çekme mukavemeti, kopma mukavemeti, % uzama, Izod çentikli darbe mukavemeti, Shore sertlik, yoğunluk, MFI, HDT ve Vicat yumuşama sıcaklığı gibi değerleri belirlenmiştir. Ayrıca, kompozitin mikroyapısı SEM ile incelenmiştir. Yapılan testler sonucunda, demir tozunun polimer matrisine eklenmesiyle elastisite modülü, Shore sertliği, yoğunluk, MFI, HDT ve Vicat yumuşama sıcaklıklarının belirgin şekilde arttığı gözlemlenmiştir. Bu artış, demir tozunun mekanik ve termal dayanıklılığı artırıcı bir etki sağladığını göstermektedir. Ancak, kompozitte % uzama, çekme mukavemeti, kopma mukavemeti ve Izod çentikli darbe mukavemeti gibi mekanik özelliklerde düşüşler tespit edilmiştir. Bu olumsuz değişiklikler, muhtemelen demir tozlarının ABS matrisiyle yeterli bir adhezyon sağlayamamasından kaynaklanmaktadır. SEM analizleri, demir tozlarının matris içinde homojen bir şekilde

dağılmadığını ve ABS matrisi ile alaşımsız demir tozları arasında güçlü bir etkileşim olmadığına işaret etmektedir. Bu durum, kompozitlerin mekanik performansını olumsuz yönde etkilemiştir.

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)

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

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

***Elif ULUTAŞ*:** Deneyleri yapmış, sonuçlarını analiz etmiş ve maklenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

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

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

There is no conflict of interest in this study.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

[1] Güldaş A, Temel S. Alüminyum tozu takviyeli polipropilenin takviye oranına göre mekanik özellikleri, 1st International Symposium on Plastic and Rubber Technologies and Exhibition, Ankara, (2013).

[2] Niksad M, Masood SH, Sbarski I. and Groth A. A study of melt flow analysis of an ABS-Iron composite in fused deposition modelling process, Tsinghua Science & Technology, 14, (29-37), (2009).

[3] Hanemann T. and Honnef, K. Rheological investigations on the flow behavior of polymer-microsized iron powder composites, Polymer Composites, 30(8), (1114-1118), (2009).

[4] Güldaş A. Temel S. Altuğ M. Alüminyum tozu katkılı polipropilenin ergiyik akış indeksi özelliklerinin incelenmesi, Journal of Polytechnic, 20(1), (51-59), (2017).

[5] Güngör A. Mechanical properties of iron powder filled high density polyethylene composites, Materials & Design, 28(3), (1027-1030), (2007).

[6] Taşdemir M. and Gülsoy HÖ. Physical and mechanical properties of iron powder filled, polymer-plastics technology and engineering, 45, 12, (2006).

[7] Saude N, Ibrahim M and Ibrahim MHI. Mechanical properties of highly filled iron-ABS composites in injection molding for FDM wire filament, Materials Science Forum. Vol:773-774, (456-461), Trans Tech Publications Ltd. (2014).

[8] Gülsoy HÖ, and Taşdemir M. Physical and mechanical properties of polypropylene reinforced with Fe particles, International Journal of Polymeric Materials, 55, 619–626 (2006).

[9] Chawla K, Singh R, Singh J, and Mehta H. Investigations on mechanical properties of secondary recycled ABS reinforced with Fe powder for 3D printing applications, Materials Today: Proceedings, 50(5), (2450-2454), (2022).

[10] Gülsoy HÖ and Taşdemir M. The effect of bronze particles on the physical and mechanical properties of acrylonitrile-butadiene-styrene copolymer, Polymer-Plastics Technology and Engineering, 46, (789–793), (2007).

[11] Taşçı G. Zeren M. Metal katkılı polimer matrisli hibrit kompozitler, Metal Dünyası, 2017.

Gazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Dergisi
PART C: TASARIM VE TEKNOLOJİ

Gazi University
Journal of Science
PART C: DESIGN AND TECHNOLOGY

GU J Sci, Part C, 13(2): 440-449 (2025)

Eriyik yığma modelleme işlemi esnasında polipropilenin kristalizasyon davranışı

Murat ÇELİK[1*]

[1]*Erciyes Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Kayseri, Türkiye*

Article info

Research article
Received: 24/01/2025
Revision: 05/03/2025
Accepted: 10/03/2025

Keywords

Additive manufacturing
Fused deposition modelling
Crystallisation
3D printing

Makale Bilgisi

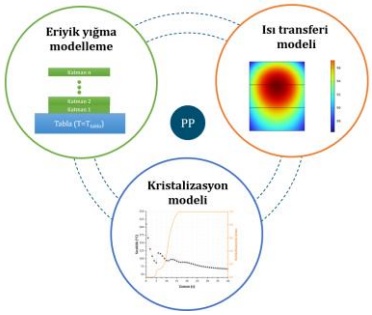
Araştırma makalesi
Başvuru: 24/01/2025
Düzeltme: 05/03/2025
Kabul: 10/03/2025

Anahtar Kelimeler

Eklemeli imalat
Eriyik yığma modelleme
Kristalizasyon
3D baskı

Grafik Özet (Graphical/Tabular Abstract)

Bu çalışmada eriyik yığma modelleme prosesi esnasında polipropilenin kristalizasyonu incelenmiştir. Bu amaç doğrultusunda bir ısı transferi modeli geliştirilerek kristalizasyon modeline çift yönlü olarak entegre edilmiş, farklı yazdırma koşullarına göre kristalizasyon oranındaki değişim analiz edilmiştir. / In this study, the crystallisation of polypropylene during the fused deposition modeling process was examined. For this purpose, a heat transfer model was developed and two-way coupled to a crystallisation model, and the changes in crystallisation ratio under different printing conditions were analysed.



Şekil A: *Grafik özet /* ***Figure A****: Graphical abstract*

Önemli noktalar (Highlights)

- *Polipropilen türü polimerin eriyik yığma modelleme işlemi esnasındaki ısı transferi sayısal olarak incelenmiştir. / The heat transfer of polypropylene polymer during the fused deposition modelling process was examined numerically.*
- *Isı transferi modeli kristalizasyon modeline bağlanarak işlem esnasındaki kristalizasyon oranındaki değişim farklı işlem parametrelerine göre tahmin edilmiştir. / The heat transfer model was coupled to a crystallisation model to predict changes in the crystallisation rate under different process parameters.*
- *Eriyik yığma modelleme işleminde kristalizasyon oranı için önemli parametreler tartışılmıştır. / Key parameters affecting the crystallisation rate in the fused deposition modeling process were discussed.*

Amaç (Aim): *Çalışmanın amacı, polipropilen türü polimer malzemenin eriyik yığma modelleme işlemi esnasındaki ısıl karakteristiğe bağlı olan kristalizasyon oranını bir model vasıtasıyla tespit ve tahmin etmektir. / The aim of the study is to determine and predict the crystallisation rate of polypropylene through a model, which depends on its thermal history during the fused deposition modeling process.*

Özgünlük (Originality): *Polipropilen türü malzemeni sonlu elemanlar metoduyla 2 boyutta basit bir model geometrisi için ısı transferi ve kristalizasyon modeli oluşturulmasıdır. / The development of a heat transfer and crystallisation model for polypropylene using the finite element method for a simple 2D domain.*

Bulgular (Results): *Eriyik yığma modelleme işlemi esnasında yazdırma hızı, soğutma oranı, yazdırma ortamı sıcaklığı gibi çeşitli yazdırma parametrelerinin kristalizasyon oranı üzerindeki etkisi ortaya konmuştur. / The effects of various printing parameters, such as printing speed, cooling rate, and enclosure temperature, on the crystallisation rate during the fused deposition modeling process have been demonstrated.*

Sonuç (Conclusion): *Eriyik yığma modelleme metoduyla üretilen yarı kristal polimer malzemelerin kristalizasyon oranı ve buna bağlı olarak mekanik özellikleri, model sonuçlarına göre işlem parametrelerini dikkatlice ayarlayarak değiştirilebilmektedir. / The crystallisation rate of semi-crystalline polymer materials produced by the fused deposition modeling method, and consequently their mechanical properties, can be altered by carefully adjusting the process parameters based on the model results.*

*Corresponding author, e-mail: m.celik@erciyes.edu.tr
DOI: 10.29109/gujsc.1626366

GU J Sci, Part C, 13(2): 440-449 (2025)

Gazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Dergisi
PART C: TASARIM VE TEKNOLOJİ

Gazi University
Journal of Science
PART C: DESIGN AND TECHNOLOGY

http://dergipark.gov.tr/gujsc

Eriyik yığma modelleme işlemi esnasında polipropilenin kristalizasyon davranışı

Murat ÇELİK[1*]

[1]*Erciyes Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Kayseri, Türkiye*

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 24/01/2025
Düzeltme: 05/03/2025
Kabul: 10/03/2025

Anahtar Kelimeler

Eklemeli imalat
Eriyik yığma modelleme
Kristalizasyon
3D baskı

Öz

Eklemeli imalat teknolojileri, geleneksel imalat yöntemlerine kıyasla daha fazla esnekliğe izin veren doğaları nedeniyle giderek popülerleşmektedir. Bu teknolojilerin en yaygın kullanılan çeşidi olan eriyik yığma modelleme (EYM) işleminde çoğunlukla termoplastik polimer malzemeler katmanlar halinde serilerek üç boyutlu parçalar üretilir. Kristalizasyon davranışı sıcaklık değişimlerinden oldukça fazla etkilenen yarı kristal polimer malzemelerin EYM ile üretiminde, işlemdeki yüksek soğuma hızları mekanik özellikler üzerinde etkili olmaktadır. Bu çalışmada polipropilen türü yarı kristal malzemenin EYM işlemi esnasındaki kristalizasyon davranışı incelenmiştir. Bu bağlamda öncelikle katmanlı üretim metodunu simüle ederek sıcaklık profilini tahmin bir ısı transferi oluşturulmuş, bu model daha sonra kristalizasyon kinetiğini hesaplayan bir başka modelle iki taraflı olarak bağlanmıştır. Geliştirilen model farklı üretim parametrelerindeki kristalizasyon oranını eş zamanlı olarak tahmin edebilmektedir. Sonuçlar, malzeme kristalizasyon oranının ve buna bağlı olarak mekanik özelliklerin, EYM işlemi esnasındaki ısıtma ve soğutma işlemlerinin dikkatli şekilde ayarlanarak değiştirilebileceğini göstermektedir.

Crystallisation behaviour of polypropylene during the fused deposition modelling process

Article Info

Research article
Received: 24/01/2025
Revision: 05/03/2025
Accepted: 10/03/2025

Keywords

Additive manufacturing
Fused deposition modelling
Crystallisation
3D printing

Abstract

Additive manufacturing technologies have gained significant attention due to their inherent flexibility when compared to traditional manufacturing processes. In the most commonly used additive manufacturing method, Fused Deposition Modelling (FDM), typically thermoplastic polymer materials are extruded layer by layer to produce three-dimensional parts. The production of semi-crystalline polymer materials using the FDM process, which are significantly affected by temperature changes in terms of their crystallisation behaviour, impacts the mechanical properties due to high cooling rates in FDM. In this study, the crystallisation behaviour of polypropylene during the FDM process was examined. In this context, a heat transfer model was initially created to simulate layer-by-layer production in an FDM printer, which estimates the temperature profile in the part. This model was then coupled to a crystallisation model to predict the evolution of relative crystallinity across the layers. The results show that the crystallisation rate of the part, and consequently its mechanical properties, can be altered by carefully adjusting the heating and cooling processes during the process.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Eklemeli imalat teknolojileri, 1980'li yıllarda ortaya çıkmasına rağmen, patent sürelerinin 21. yüzyılın başlarında dolmasıyla büyük bir ivme kazanmıştır. Malzemeleri katman katman birleştirme esasına dayandığı için eklemeli olarak adlandırılan bu imalat yönteminin birçok çeşidi mevcuttur. Teknolojinin toz yatak füzyonu, malzeme jeti ve direkt enerji depozisyonu gibi çeşitli alt dalları bulunmakta olup, bu yöntemler hem prototipleme hem de fonksiyonel, özelleştirilmiş parça üretimi için endüstride yaygın olarak kullanılmaktadır [1]. Bu duruma paralel olarak, ekstrüzyon esaslı eklemeli imalat yöntemleri, düşük maliyetleri ve kullanım kolaylıkları nedeniyle endüstri dışında, son kullanıcılar arasında da popüler hale gelmiştir.

*Corresponding author, e-mail: m.celik@erciyes.edu.tr
DOI: 10.29109/gujsc.1626366

Özellikle eriyik yığma modelleme (EYM) yöntemi esaslı yazıcılar, son kullanıcılar tarafından sıkça tercih edilmektedir.

EYM türü eklemeli imalatta genelde amorf veya yarı kristal polimerler kullanılmaktadır. Polipropilen (PP), polietilen tereftalat (PET), Nylon 6 gibi polimerler yaygın olarak kullanılan yarı kristal malzemelerdendir. Yarı kristal terimi, polimer zincirlerinin düzenini tanımlamaktadır. Amorf polimerlerde zincirlerin dağılımı düzensizken, yarı kristal polimerlerde düzenli sıralanan kristal bölgeler ile amorf bölgeler bir arada bulunmaktadır. Malzemede kristal bölgelerin varlığı mekanik özellikleri olumlu yönde etkilemektedir [2], çünkü düzenli şekilde dizilen polimer zincirlerinin arasındaki intermoleküler kuvvetler amorf malzemelerdekine göre daha güçlüdür [3]. Bu nedenle, EYM işlemi sonrasında çekme mukavemeti, elastisite modülü ve sertlik gibi birçok parametrenin kristalizasyon oranına göre değiştiği bilinmektedir [4]. Diğer taraftan, PP gibi yarı kristal polimerler, EYM işlemi sonrasında soğurken amorf polimerlere kıyasla daha çok bükülme ve kıvrılma gibi sorunlara yol açmaktadır [5].

Kristalizasyon oranı soğuma hızına bağlı olarak değişmektedir [6]. Buna göre, eriyik haldeki polimer soğudukça polimer zincirleri nükleasyon olarak adlandırılan bir süreçte katlanarak düzenli yapılar oluşturur. Bu yapılar gittikçe büyüyerek sferülit adı verilen kristal yapılar meydana getirir [7]. Soğuma hızı sferülitlerin morfolojisi ve sayısı üzerinde büyük rol oynar. Dolayısıyla EYM gibi soğuma hızlarının görece yüksek olduğu süreçlerde, kristalizasyon kinetiğini anlamak ve incelemek, üretilen parçalarda istenilen mekanik özelliklere ulaşılmasını sağlayabilir [8]. Yarı kristal polimerlerde soğuma sonucu meydana gelen kristalizasyon, parçanın hacminde değişimlere yol açabildiği için [9], kristalizasyon kinetiğini oranını kontrol etmek boyutsal doğruluğu da beraberinde getirecektir. Kristalizasyonun bir başka sonucu da parçada oluşan artık gerilmeler ve buna bağlı olarak ortaya çıkan bükülmelerdir [10]. Dolayısıyla EYM işleminde kristalizasyon oranını tayin edip, ilgili parametrelerle kontrol edebilmek, bu tür problemleri üretimden önce tahmin edebilir. Bu açıdan, EYM işlemini simüle edebilen modeller, zaman ve maliyet açısından da avantajlıdır.

Literatürde yarı kristal polimerlerin EYM işlemindeki kristal yapılarının deneysel incelenmesine dair olan çalışmalar, son yıllarda eklemeli imalat üretiminin popülerleşmesine paralel olarak artmıştır. Sıklıkla kullanılan EYM malzemelerin yanı sıra ileri mühendislik uygulamalarında kullanılan farklı polimerler de kristalizasyon açısından değerlendirilmiştir. Örneğin, poli-eter-eter-keton (PEEK) havacılık ve otomotiv uygulamalarında kullanılan yüksek performanslı bir polimerdir. Yapılan deneysel çalışmalar, yazdırma parametrelerini değiştirerek ya da ısıl işlem uygulayarak, PEEK türü polimerlerin kristal oranının artırılabildiğini göstermektedir [11]. Benzer şekilde, yaygın polimerlerden biri olan PP'nin de EYM işlemi esnasındaki kristalizasyon davranışı deneysel olarak incelenmiş, katkılandırma yapılarak yazdırılabilme özelliğinin iyileştirilebildiği gösterilmiştir [12]. PP için geliştirilen üç boyutlu EYM proses modeli içeren çalışmalar, yazdırma parametreleri ve ortam koşulları ile kristalizasyon sonucu ortaya çıkan artık gerilmeler ve parça bükülmesi arasındaki ilişkiyi deneysel olarak da detaylı şekilde ortaya koymaktadır [10], [13], [14]. Yazdırma kolaylığı ve biyobozunur özelliği nedeniyle EYM işleminde en çok kullanılan malzemelerden biri olan polilaktik asitte (PLA), soğuma hızı ve ısıl işlem sonucunda kristal yapıda ciddi değişimler olabilmektedir [15]. Enjeksiyon kalıplama işleminin aksine, EYM işleminde koşullara bağlı olarak, PLA ya da Nylon 6 gibi malzemelerin kristalizasyon oranı artabilmektedir [16]. Ayrıca PLA türü malzemelere talk gibi çekirdeklenme ajanları eklenerek kristalizasyon davranışı değiştirilebilir [2]. Poliamit polimerlerde kristalizasyon oranının katmanlar arası bağ üzerinde de etkili olduğu gösterilmiştir [3]. EYM işleminde kristalizasyon oranını etkileyebilen bir başka etmen de süreç esnasındaki polimer akışıdır [8], [17]. Bu deneysel çalışmalar, EYM işleminde üretilen parçaların nihai kristalizasyon oranını tayin edebilse de, işlem esnasındaki değişen kristalizasyon oranını yazdırma işlemindeki sıcaklık profillerine göre tahmin edebilen modeller, uygun parametreleri daha hızlı ve etkili bir şekilde belirlemeye imkan tanıyabilir. Bu bağlamda, EYM işlemi esnasındaki sıcaklık dağılımlarını tahmin eden ısı transfer modelleriyle, sıcaklığa bağlı kristalizasyon oranı değişimini hesaplayan kinetik modeller birleştirilerek, kristal yapı sonlu elemanlar metodu ile sayısal olarak incelenebilmektedir [13]. Bu tür sonlu eleman analiz modellerinde kritik olan nokta, gerçek yazdırma işleminde gerçekleşen katman katman ekstrüzyon işlemini simüle edecek şekilde element aktivasyonu yapmaktır. Modelde

bulunan elementlerden bazıları, belli bir zaman aralığında aktive edilerek ekstrüzyon edilmiş gibi değerlendirilmelidir [10]. Bu işlem nozulun XY düzlemindeki 2 boyutlu hareketine benzer şekilde olabileceği gibi [14], daha pratik bir yöntem olarak üst üste biriktirilen ve nozulun Z eksenindeki hareketine benzer bir şekilde element aktivasyonu yapmak da mümkündür [18]. Bu tür modeller, malzeme davranışını tahmin etmede ve uygun EYM süreç parametrelerini tayin etmede büyük rol oynayabilir. Bu sebeple, bu çalışmada EYM işlemi sırasında sıcaklık profilini tahmin eden bir ısı transferi geliştirilmiş, daha sonra PP yarı kristal polimerinin kristal davranışını tahmin etmek için bir kristalizasyon modeliyle çift taraflı olarak birleştirilmiştir. Modelde malzeme aktivasyonu basitleştirilerek 2 boyutta malzeme serimi varsayılmış ve farklı proses parametrelerinin parçanın sıcaklık dağılımı ve kristal yapısı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Modelin özgün tarafı PP türü yarı kristal polimerin EYM sırasında, iki boyutta basit bir yaklaşımla hızlı bir şekilde kristalizasyon oranını tahmin edebilmesidir. Sunulan bu model, farklı tür polimerler için EYM işlemi esnasındaki (*in situ*) kristalizasyon oranını belirlemede kullanılabilir.

2. MATERYAL VE METOD (MATERIALS AND METHODS)

2.1. Isı transfer modeli (Heat transfer model)

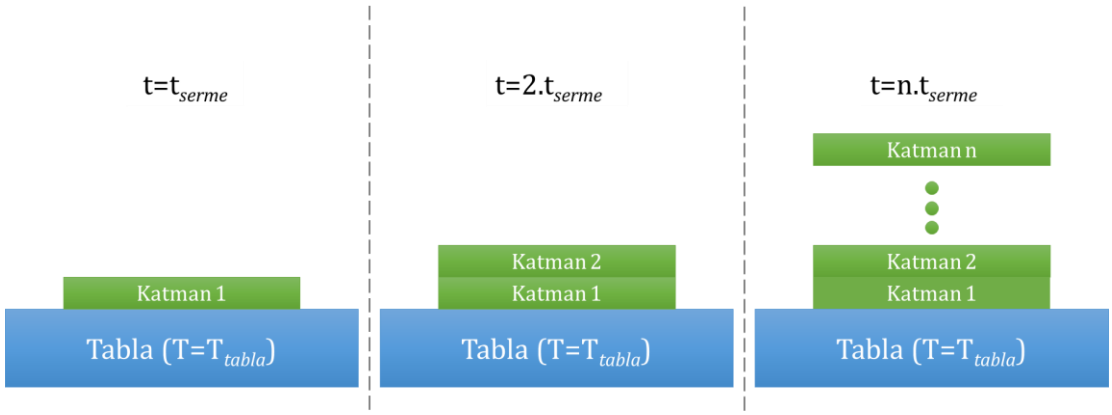
EYM işleminde katı haldeki polimer filament, ısıtılmış bir nozuldan geçirilerek eritilir. Ardından erimiş filament, nozul tarafından katman katman yatağa serilir. Serme işlemi sonrasında her bir katmandaki enerji eşitliği Denklem 1'de verilmiştir [10]:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla.(\mathrm{k}\nabla T) = Q \qquad (1)$$

Burada ρ yoğunluk (kg/m^3), C_p özgül ısı (W/kgK), k ısıl iletkenlik (W/mK), T ise sıcaklıktır (K). Kristalizasyondan kaynaklanan ısı Q Denklem 2'deki gibi ifade edilebilir [19]:

$$Q = \rho \Delta H_c \frac{\partial \alpha}{\partial t} \qquad (2)$$

Burada ΔH_c kristalizasyon entalpisi, α ise zamana bağlı kristallik oranıdır. Isı transfer modelinde, poliamit malzeme çalışan Pourali ve arkadaşlarının [18] kullanmış olduğu yaklaşım benimsenmiştir. Bu yaklaşımda, serme işlemi sonrası her bir katmandaki ısı transferi ve kristalleşme süreçleri iki boyutlu bir modelle analiz edilebilir. Serilen malzeme tamamen dikdörtgen olmasa da, serme işlemi model geometrisini basitleştirmek için üst üste serilmiş dikdörtgen katmanlar halinde tanımlanabilir. Yazdırma hızına göre katmanlar, model geometrisinde aktif hale getirilerek işlem esnasındaki ısı transferi hesaplanabilir. Bu süreç Şekil 1'de açıklanmıştır.



Şekil 1. Isı transfer model geometrisi ve katman aktivasyonu (Heat transfer model geometry and layer activation)

Buna göre, tabla sıcaklığı sabittir, ilk katman ise başlangıçta yazdırma sıcaklığında olup, taşınım ve tablaya olan iletim nedeniyle hızla soğumaya başlar. İkinci katman, t_{serme} zamanına göre yazdırma sıcaklığında aktive olarak benzer bir soğuma sürecinden geçer. Aynı yaklaşım diğer katmanlar için de benimsenerek sıcaklık dağılımı hesaplanmaktadır. Katmanlar arasında ideal bir temas varsayılmıştır. Katmanların çevresinde taşınım sınır şartı olarak belirlenmiştir. Işınımla

olan ısı kaybı, EYM ölçeğinde ihmal edilebilir olduğu için sınır şartı olarak kullanılmamıştır [20].

2.2. Kristalizasyon modeli (Crystallisation model)

İzotermal koşullarda polimer kristalizasyonu ilk olarak Avrami tarafından matematiksel olarak ifade edilmiştir [21]. Ancak EYM başta olmak üzere çoğu üretim sürecinde izotermal koşullar mümkün değildir. Nakamura ve arkadaşları [22] Avrami denklemlerini non-izotermal koşullarda farklı soğutma oranları için Denklem 3'te gösterildiği gibi genişletmiştir:

$$\alpha\,(t) = 1 - exp\left(-\left[\int_0^t K_{nak}\,T(t)dt\right]^n\right) \quad (3)$$

Denklem 3'ü ısı transferi modeline bağlamak için diferansiyel formda Denklem 4'teki gibi ifade edilebilir:

$$\frac{\partial\alpha}{\partial t} = nK_{nak}(T)(1-\alpha)[-\ln(1-\alpha)]^{1-\frac{1}{n}} \quad (4)$$

Burada α kristalizasyon oranı, n Avrami katsayısı, $K_{nak}(T)$ ise Nakamura kinetiği kristalizasyon fonksiyonudur. $K_{nak}(T)$ Avrami ve Ozawa katsayılarına bağlı olmakla beraber, aşağıdaki gibi ifade edilebilir [23]:

$$K_{nak}(T) = \left(\frac{4}{3}\pi N_0(T)\right)^{\frac{1}{3}} G_0 \exp\left(-\frac{U}{R(T-T_\infty)}\right) \exp\left(-\frac{K_G}{T(T_f-T)}\right) \quad (5)$$

Denklem 5'te N_0 aktif çekirdeklerin sayısı, G_0 sferülit büyüme hızıyla ilgili parametre, U hareket aktivasyon enerjisine benzer bir enerji parametresi, R gaz sabiti, T_∞ moleküler yer değiştirmenin olmadığı sıcaklık, T_f erime sıcaklığıdır. Diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC) deneyleri sonucunda Denklem 5'teki parametrelerin değerleri belirlenebilmektedir. PP polimeri için bu değerler Le Goff ve arkadaşları [24] tarafından deneysel olarak belirlenmiştir.

2.3. Polimer Özellikleri (Polymer properties)

Bu çalışmada PP polimerinin EYM işlemiyle eklemeli imalatı incelenmiştir. Yüksek darbe direncine sahip, ısı ve kimyasallara karşı dayanıklı, düşük yoğunluklu bir yarı kristal polimer olan PP, dünyada en çok kullanılan polimerlerden biridir. Yarı kristal polimerlerde, ısı transferi modelinde önemli olan özgül ısı ve yoğunluk gibi parametreler amorf ve kristal bölgelerin oranına göre değişmektedir. Bu nedenle malzeme özellikleri kristalizasyon oranının bir fonksiyonu olarak aşağıdaki gibi ifade edilebilir [24]:

$$X(\alpha,T) = \alpha X_{yk}(T) + (1-\alpha)X_a(T) \quad (6)$$

Denklem 6'da X kristalizasyon oranının ve sıcaklığın bir fonksiyonu olan malzeme özelliği, X_{yk} yarı kristal yapıdaki polimerin özeliği, X_a ise amorf yapıdaki polimerin malzeme özelliğidir. Isı transferi modelinde özgül ısı (C_p), yoğunluk (ρ) ve ısıl iletkenlik (k) gibi malzeme parametreleri Denklem 6'da gösterildiği gibi kristal oranına göre hesaplanarak kullanılmıştır.

PP polimer için yarı kristal ve amorf yapıdaki malzeme özellikleri aşağıdaki denklemlerde verilmiştir [24]:

$$C_{p,a}(T) = 3.1T + 2124 \quad (7)$$

$$C_{p,yk}(T) = 10.68T + 1451 \quad (8)$$

$$\rho_a(T) = 1/(6.773x10^{-4}T + 1.138) \quad (9)$$

$$\rho_{yk}(T) = 1/(4.225x10^{-4}T + 1.077) \quad (10)$$

$$k_a(T) = -6.25x10^{-5}T + 0.189 \quad (11)$$

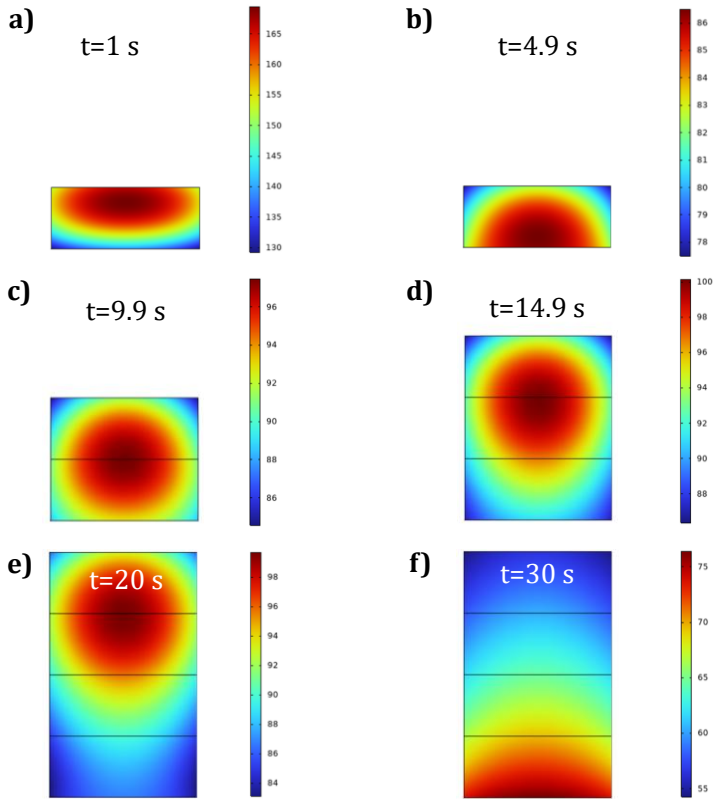
$$k_{yk}(T) = -4.96x10^{-4}T + 0.31 \quad (12)$$

Isı transferi modelinde herhangi bir noktanın sıcaklığı hesaplanınca, bu noktadaki malzeme özelliklerin önce Denklem 7-12 kullanılarak amorf ve yarı kristal fazlardaki değerleri bulunup, daha sonra Denklem 6 kullanılarak söz konusu andaki kristalizasyon oranına göre malzeme özelliğinin değeri hesaplanmıştır.

3. BULGULAR (RESULTS)

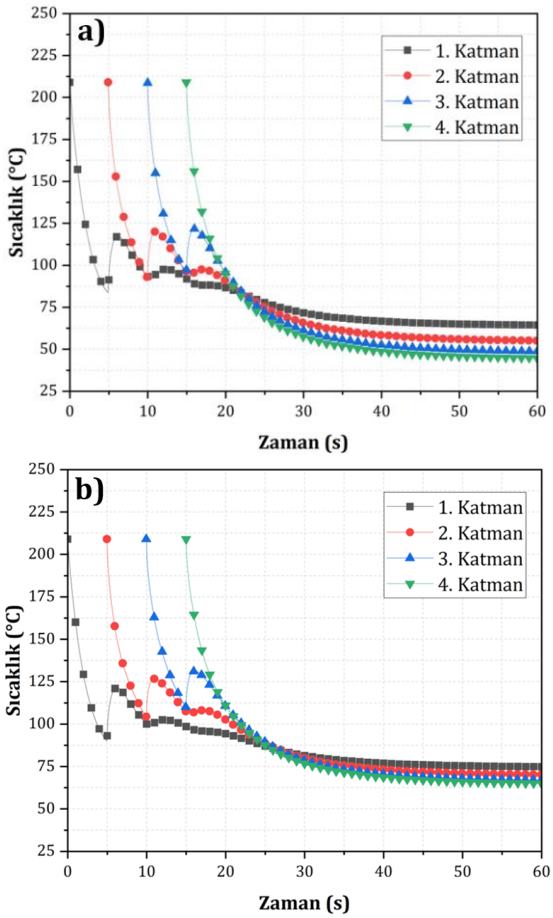
3.1. EYM işlemi esnasındaki sıcaklık dağılımı
(Temperature distribution during FDM process)

EYM işlemi esnasında ısı transferi modeli tarafından hesaplanan sıcaklık dağılımları t_{serme}=5 sn için Şekil 2'de gösterilmektedir. Şekil 2 (a)'da ilk katmanın yazdırıldıktan 1 saniye sonraki sıcaklığı gösterilmektedir. Buna göre ilk katmanın sıcaklığı, başlangıç sıcaklığı olan 210°C'den hızla düşmektedir. İlk katmanda 85°C'de sabit sıcaklıkta olan yatağa iletim yoluyla gerçekleşen ısı transferi, ortama taşınım yoluyla olan ısı transferinden daha fazladır. Ancak zaman geçtikçe bu durumun tam tersi meydana gelmekte, Şekil 2 (b)'de görüldüğü üzere katmanın yatakla temas eden bölgelerin sıcaklığı, kenarlara göre daha artmaktadır. Şekil 2 (b) ikinci katmanın, Şekil 2 (c) üçüncü katmanın, Şekil 2 (d) ise dördüncü katmanın yazdırılmasından hemen önceki sıcaklık dağılımlarını göstermektedir. Yazdırılan katman belli bir oranda soğuduktan sonra bir sonraki katmanın yazdırılması, önceki katman sıcaklığını tekrar artırmaktadır. Bu durum, önceki katman sıcaklığı kristalleşme sıcaklığının altında olsa bile camsı geçiş sıcaklığının üstünde olursa soğuk kristallenmeye sebep olabilmektedir [25]. İkinci katmanın yazdırılması sonucu ilk katmandaki sıcaklık artışı sonraki katmanlarda da mevcut olsa da, PP'nin görece düşük ısıl iletkenliği nedeniyle sıcaklık artışı azalan bir trend göstermektedir. Şekil 2 (e) ve (f) son katmanın yazdırılmasından hemen sonra ve 10 saniye sonrası oluşan sıcaklık profillerini göstermektedir. Buna göre, yazdırma işlemi bitip belli bir süre geçtikten yatakla temas halinde olan ilk katman, sıcaklığı en yüksek katmandır. PP'nin yarı kristal yapısı, 3B



Şekil 2. EYM işleminde **(a)** ilk katman yazdırıldıktan 1 saniye sonraki, **(b)** ikinci katman yazdırılmadan hemen önceki, **(c)** üçüncü katman yazdırılmadan hemen önceki, **(d)** dördüncü katman yazdırılmadan hemen önceki, **(e)** dördüncü katman yazdırıldıktan hemen sonraki, **(f)** dördüncü katman yazdırıldıktan 10 saniye sonraki sıcaklık profili (Temperature profiles **(a)** 1 s after printing first layer **(b)** just before second layer **(c)** just before third layer **(d)** just before fourth layer **(e)** after printing fourth layer **(f)** 10 s after printing fourth layer)

yazdırma işlemi esnasında bükülmesine ve yatağa yapışma zorluklarına sebep olduğu için 85-100°C aralığında bir yatak sıcaklığı önerilmektedir [23], bu da kalınlık doğrultusunda Şekil 2 (f)'te gösterilen homojen olmayan sıcaklık dağılımına neden olmaktadır. Yazdırma işlemi esnasında katmanlardaki ortalama sıcaklık değişimi Şekil 3'te daha net görülmektedir. Bu hızlı ve homojen olmayan sıcaklık değişimleri, kontrollü kristal yapı oluşumunu engelleyerek iç gerilmeler oluşturup deformasyonlara ve bükülmelere yol açabilir [26]. Bu nedenle PP gibi EYM işleminde yazdırılması zor olan bazı malzemeler için yazdırma ortamının da kapalı halde ısıtılması önerilmektedir [27].

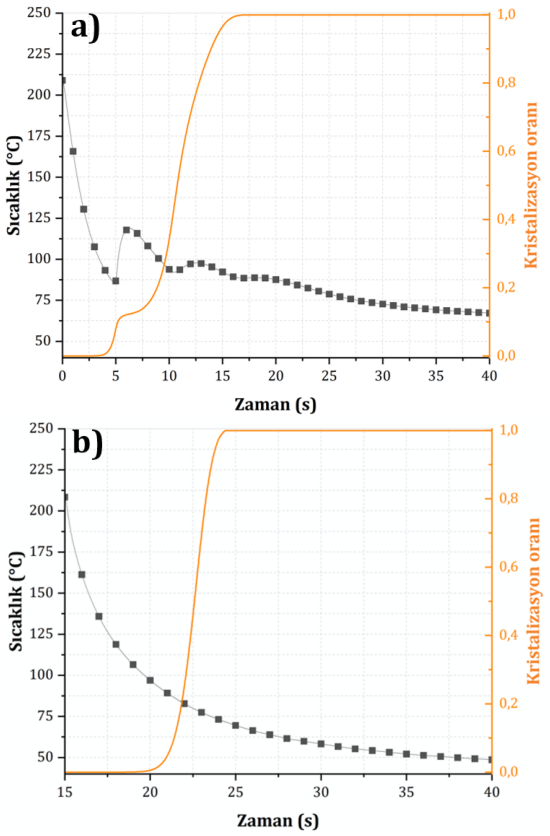


Şekil 3. (a) Atmosfere açık yazdırma durumunda **(b)** kapalı ve 65°C'de ısıtılmış ortamda yazdırma halinde katmanlardaki ortalama sıcaklık değişimi (Change in average temperature in **(a)** open to atmosphere **(b)** within enclosure at 65°C)

Şekil 3 (a)'da yazdırma ortamı sıcaklığının 25°C (atmosfere açık), (b)'de ise 65°C olduğu (kapalı ve ısıtılmış yazdırma bölgesi) senaryodaki sıcaklık dağılımı görülmektedir. Yazdırma ortamı ısıtıldığı zaman katmanlar arasındaki sıcaklık farkının önemli ölçüde azaldığı görülmektedir. Diğer taraftan, ısıtma olmadığı durumda ilk katman yatak sıcaklığına yakın ve son katman sıcaklığından 20°C kadar fazladır. Katmanlar arası ısı farkının düşük olması, katmanlar arası bağın daha kuvvetlendirebileceği gibi eğilme gibi istenmeyen sonuçların da önüne geçebilir.

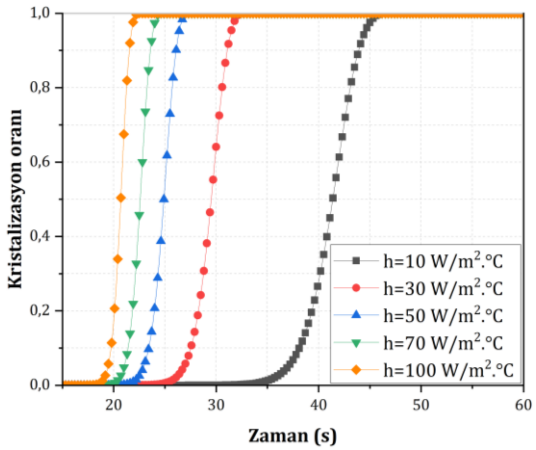
3.2. EYM işlemi esnasındaki kristalizasyon davranışı (Crystallisation behaviour during FDM process)

EYM işlemi esnasında PP gibi yarı kristal polimerlerin kristalizasyon kinetiği ekstrüzyon sıcaklığı, yatak sıcaklığı, ortam sıcaklığı ve yazdırma hızı başta olmak üzere farklı parametrelere bağlıdır. Ekstrüzyon ile nozul dışına çıkan PP, hızla soğur ve kristalizasyon sıcaklığına ulaştığında çekirdeklenerek kristal bölgeler meydana getirmeye başlar. Bu davranışı incelemek için ısı transferi modeli tarafından hesaplanan sıcaklık profili kristalizasyon modeline iki taraflı bağlanarak kristalizasyon kinetiği araştırılmıştır. Şekil 4 (a)'da ilk katmanın orta noktasındaki sıcaklık değişimi ve kristalizasyon oranı verilmiştir. İlk katman yazdırıldıktan sonra hızla düşen sıcaklığa paralel olarak kristalizasyon oranı da hızla artmış, ancak 5. saniyede ikinci katmanın yazdırılmasıyla ilk katman sıcaklığı tekrar kristalizasyon sıcaklığının üstüne çıkmıştır. Bu durum kristalleşme hızını önemli ölçüde düşürmüştür. 10. saniyede üçüncü katmanın yazdırılması ilk katman sıcaklığını PP'nin düşük ısıl iletkenliği nedeniyle çok fazla etkilememiş ve kristalizasyon hızı fazla değişmeden 15. saniye civarında tamamlanmıştır. Şekil 4 (b)'de ise aynı durum son katmanın orta noktası için görülmektedir. Son katmana ekstrüzyondan sonra farklı bir ısı girişi olmadığı için kristalizasyon sabit bir hızla ilerleyerek 5 saniye içerisinde tamamlanmıştır. İki katmanda da kristalizasyon oranı 1'e ulaşsa da kristal bölgeler yapı itibariyle farklılıklar gösterebilir. Sferülitlerin morfolojisi ve sayısı, birincil ve ikincil kristalizasyon oranları gibi farklılıklar üretilen parçanın mekanik özelliklerini etkileyebileceği için yukarda bahsedilen proses parametreleri ayarlanarak (örn. düşük yazdırma hızı) her katmanda benzer bir kristalizasyon davranışı elde etmek daha sağlıklı bir üretim süreci sağlayabilir.



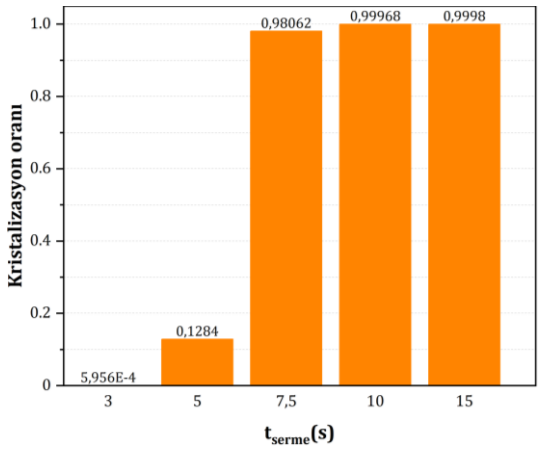
Şekil 4. (a) İlk katmanın tüm parça üretim süreci boyunca sıcaklık ve kristalizasyon oranı değişimi **(b)** dördüncü katmanın sıcaklık ve kristalizasyon oranı değişimi (Change in temperature and crystallisation of **(a)** first layer **(b)** fourth layer)

Polimerlerin kristalizasyon davranışında en önemli parametrelerden biri de soğuma hızıdır. EYM işleminde soğumada etkili olan taşınım katsayısı sıklıkla h=70 W/m^2.°C civarında bir değerdir [28], ancak bu değer yazıcı tasarımına göre değişebilir. Şekil 5, farklı taşınım katsayılarına göre son katmanın orta noktasındaki kristalizasyon davranışını göstermektedir. Şekilde yüksek soğuma hızlarında kristalizasyonun daha hızlı olduğu, soğuma hızı azaldığında ise kristalizasyonun daha yavaş olduğu görülmektedir. Bu modelde t_{serme}=5 s varsayıldığı düşünülürse, yüksek yazdırma hızı ve düşük soğuma hızlarında kristalizasyon tam olarak sağlanamayabilir. Düşük soğuma hızlarında polimer moleküllerinin mobilitelerinin yüksek olduğu daha geniş bir zaman aralığı olduğu için, kristalizasyon daha yüksek sıcaklıklarda başlayabilmektedir. Yüksek soğuma hızlarında relatif bir kristalizasyonu temsil eden kristalizasyon oranı daha yüksek olsa da, mutlak kristallik düşük soğuma hızlarında daha yüksek olabilir [7]. Bu nedenle üretilecek parçanın kullanım amacına göre EYM tipi yazıcılar ideal kristal oranını verecek şekilde soğutma açısından modifiye edilebilir.



Şekil 5. Kristalizasyon oranı ve taşınım katsayısı arasındaki ilişki (Relationship between crystallisation and convection coefficient)

Şekil 6, farklı t_{serme} değerlerine göre, ikinci katman yazdırılmadan hemen önce ilk katmandaki kristalizasyon oranını göstermektedir. Model sonuçlarına göre, bekleneceği gibi ardışık katman yazdırmaları arasındaki süre arttıkça bir önceki katmandaki kristallik artmaktadır. En kısa aralıkta (3 saniye) kristalleşme oranı oldukça düşükken, 7.5 saniye ve üzeri aralıklarda kristalleşme neredeyse tamamen gerçekleşebilmektedir. Nozul hareket hızına ve parça boyutlarına bağlı olan t_{serme} arttıkça, bir önceki katmanda soğuma için yeterli süre olacağı için kristalizasyon oranı artmaktadır. Ancak Şekil 4 (a)'da görüldüğü üzere önceki katmanda kristalizasyon t_{serme} süresi içinde tamamlanmasa bile sonraki katmanlar yazdırıldıktan sonra tamamlanabilmektedir. Şekil 6'da gösterilen durum daha çok arayüzeylerde gerçekleşen polimer interdifüzyonu ile ilgilidir, çünkü önceki katmanın yazdırılan katmandan önemli ölçüde soğuk olduğu durumlarda arayüzeydeki kristal büyümesi yavaşlayabilir [29]. Bu durum katmanlar arası bağ kuvvetini etkileyebilir. Katman kristalizasyon oranı ve katmanlar arası bağ arasındaki ilişki deneysel çalışmalarla daha detaylı şekilde incelenmelidir.



Şekil 6. İkinci katman yazdırılmadan hemen önceki ilk katman kristalizasyon oranının farklı t_{serme} değerlerine göre değişimi (Change of crystallisation just before the deposition of second layer with respect to different deposition times)

4. SONUÇ (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada EYM işlemi esnasında yarı kristal bir polimer olan PP'nin kristalizasyon davranışı incelenmiştir. İlk olarak EYM işlemi esnasında katmanların yazdırılmasını simüle eden iki boyutlu bir ısı transferi modeli oluşturularak yazdırma işlemi süresince gerçekleşen sıcaklık dağılımları hesaplanmıştır. Daha sonra non-izotermal kristalizasyon kinetiğini modellemek için Nakamura denklemi kullanılmış ve PP'nin kristalizasyon davranışı incelenmiştir. Deneysel olarak yazdırma işlemi esnasındaki kristalizasyon davranışı eş zamanlı olarak tespit etmek mümkün olmadığı için, oluşturulan model yazdırma parametreleri ve kristalizasyon oranı arasındaki ilişki hakkında bilgi vermektedir.

Model sonuçlarına göre, PP malzeme için kapalı ve ısıtılmış bir yazdırma ortamı katmanlar arası sıcaklık farkını azaltarak daha iyi bir katmanlar arası bağ sağlayabilir. Yüksek yazdırma hızlarının (daha küçük t_{serme}) her katmanda farklı bir kristalizasyon yapısı oluşturabileceği, bu nedenle mümkünse daha yavaş bir yazdırma işleminin yapılmasının üretim için daha iyi olabileceği gösterilmiştir. Ek olarak soğutma hızının kristalizasyon davranışında oynadığı büyük rol nicel olarak gösterilerek, EYM tipi yazıcıları istenen soğutma hızına ulaşacak şekilde modifiye etmenin yararlı olabileceği belirtilmiştir.

Bu çalışmada sunulan model iki boyutlu olup süreci daha basit bir şekilde analiz etmek için geliştirilmiştir. Gelecekte benzer şekilde malzeme aktivasyonu yapabilen üç boyutlu model geliştirilerek kristal davranışını daha doğru tahmin edebilir. Ayrıca model sonuçları, deney sonuçlarıyla desteklenerek modellerin doğruluğu artırılabilir. Örneğin, diferansiyel taramalı kalorimetre gibi termal analiz yöntemleriyle elde edilen kristalizasyon ölçümleri, modellerin doğrulamasında 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)

***Murat ÇELİK*:** Modelleri geliştirmiş, sonuçlarını analiz etmiş ve makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

He developed the models, analysed 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] I. Gibson, D. Rosen, and B. Stucker, Additive manufacturing technologies: 3D printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing, second edition. Springer New York, 2015. doi: 10.1007/978-1-4939-2113-3.

[2] W. Yu, X. Wang, E. Ferraris, and J. Zhang, "Melt crystallization of PLA/Talc in fused filament fabrication," Mater Des, vol. 182, p. 108013, Nov. 2019, doi: 10.1016/J.MATDES.2019.108013.

[3] A. Costanzo, U. Croce, R. Spotorno, S. E. Fenni, and D. Cavallo, "Fused Deposition Modeling of Polyamides: Crystallization and Weld Formation," Polymers 2020, Vol. 12,

Page 2980, vol. 12, no. 12, p. 2980, Dec. 2020, doi: 10.3390/POLYM12122980.

[4] O. Luzanin, D. Movrin, V. Stathopoulos, P. Pandis, T. Radusin, and V. Guduric, "Impact of processing parameters on tensile strength, in-process crystallinity and mesostructure in FDM-fabricated PLA specimens," Rapid Prototyp J, vol. 25, no. 8, pp. 1398–1410, Sep. 2019, doi: 10.1108/RPJ-12-2018-0316/FULL/PDF.

[5] O. S. Carneiro, A. F. Silva, and R. Gomes, "Fused deposition modeling with polypropylene," Mater Des, vol. 83, pp. 768–776, Oct. 2015, doi: 10.1016/J.MATDES.2015.06.053.

[6] A. Barzegar, S. Karimi, E. F. Sukur, H. S. Sas, and M. Yildiz, "Effect of fiber orientation on temperature history during laser-assisted thermoplastic fiber placement," https://doi.org/10.1177/07316844221143448, vol. 42, no. 17–18, pp. 953–968, Nov. 2022, doi: 10.1177/07316844221143448.

[7] H. Pérez-Martín, P. Mackenzie, A. Baidak, C. M. Ó Brádaigh, and D. Ray, "Crystallisation behaviour and morphological studies of PEKK and carbon fibre/PEKK composites," Compos Part A Appl Sci Manuf, vol. 159, p. 106992, Aug. 2022, doi: 10.1016/J.COMPOSITESA.2022.106992.

[8] C. McIlroy and R. S. Graham, "Modelling flow-enhanced crystallisation during fused filament fabrication of semi-crystalline polymer melts," Addit Manuf, vol. 24, pp. 323–340, Dec. 2018, doi: 10.1016/J.ADDMA.2018.10.018.

[9] P. Sreejith, K. Kannan, and K. R. Rajagopal, "A thermodynamic framework for the additive manufacturing of crystallizing polymers. Part I: A theory that accounts for phase change, shrinkage, warpage and residual stress," Int J Eng Sci, vol. 183, Feb. 2023, doi: 10.1016/j.ijengsci.2022.103789.

[10] A. Antony Samy, A. Golbang, E. Harkin-Jones, E. Archer, and A. McIlhagger, "Prediction of part distortion in Fused Deposition Modelling (FDM) of semi-crystalline polymers via COMSOL: Effect of printing conditions," CIRP J Manuf Sci Technol, vol. 33, pp. 443–453, May 2021, doi: 10.1016/J.CIRPJ.2021.04.012.

[11] C. Yang, X. Tian, D. Li, Y. Cao, F. Zhao, and C. Shi, "Influence of thermal processing conditions in 3D printing on the crystallinity and mechanical properties of PEEK material," 2017, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2017.04.027.

[12] M. Spoerk, J. Sapkota, G. Weingrill, T. Fischinger, F. Arbeiter, and C. Holzer, "Shrinkage and Warpage Optimization of Expanded-Perlite-Filled Polypropylene Composites in Extrusion-Based Additive Manufacturing," Macromol Mater Eng, vol. 302, no. 10, Oct. 2017, doi: 10.1002/MAME.201700143.

[13] A. A. Samy, A. Golbang, E. Harkin-Jones, E. Archer, M. Dahale, and A. McIlhagger, "Influence of Ambient Temperature on Part Distortion: A Simulation Study on Amorphous and Semi-Crystalline Polymer," Polymers 2022, Vol. 14, Page 879, vol. 14, no. 5, p. 879, Feb. 2022, doi: 10.3390/POLYM14050879.

[14] A. A. Samy et al., "Influence of Raster Pattern on Residual Stress and Part Distortion in FDM of Semi-Crystalline Polymers: A Simulation Study," Polymers 2022, Vol. 14, Page 2746, vol. 14, no. 13, p. 2746, Jul. 2022, doi: 10.3390/POLYM14132746.

[15] T. Tábi, I. E. Sajó, F. Szabó, A. S. Luyt, and J. G. Kovács, "Crystalline structure of annealed polylactic acid and its relation to processing," Express Polym Lett, vol. 4, no. 10, pp. 659–668, Oct. 2010, doi: 10.3144/EXPRESSPOLYMLETT.2010.80.

[16] M. Lay, N. L. N. Thajudin, Z. A. A. Hamid, A. Rusli, M. K. Abdullah, and R. K. Shuib, "Comparison of physical and mechanical properties of PLA, ABS and nylon 6 fabricated using fused deposition modeling and injection molding," Compos B Eng, vol. 176, p. 107341, Nov. 2019, doi: 10.1016/J.COMPOSITESB.2019.107341.

[17] Z. Wang, Z. Ma, and L. Li, "Flow-Induced Crystallization of Polymers: Molecular and Thermodynamic Considerations," Macromolecules, vol. 49, no. 5, pp. 1505–1517, Mar. 2016, doi: 10.1021/ACS.MACROMOL.5B02688/ASSET/IMAGES/LARGE/MA-2015-02688W_0005.JPEG.

[18] M. Pourali, A. Adisa, S. Salunke, and A. M. Peterson, "Crystallization modeling of two semi-crystalline polyamides during material

extrusion additive manufacturing," Scientific Reports 2024 14:1, vol. 14, no. 1, pp. 1–16, Nov. 2024, doi: 10.1038/s41598-024-77635-9.

[19] N. Schiavone, V. Verney, and H. Askanian, "Effect of 3D Printing Temperature Profile on Polymer Materials Behavior," 3D Print Addit Manuf, vol. 7, no. 6, p. 311, Dec. 2020, doi: 10.1089/3DP.2020.0175.

[20] T. D'Amico and A. M. Peterson, "Bead parameterization of desktop and room-scale material extrusion additive manufacturing: How print speed and thermal properties affect heat transfer," Addit Manuf, vol. 34, p. 101239, Aug. 2020, doi: 10.1016/J.ADDMA.2020.101239.

[21] M. Avrami, "Kinetics of Phase Change. I General Theory," J Chem Phys, vol. 7, no. 12, pp. 1103–1112, Dec. 1939, doi: 10.1063/1.1750380.

[22] K. Nakamura, T. Watanabe, K. Katayama, and T. Amano, "Some aspects of nonisothermal crystallization of polymers. I. Relationship between crystallization temperature, crystallinity, and cooling conditions," J Appl Polym Sci, vol. 16, no. 5, pp. 1077–1091, May 1972, doi: 10.1002/APP.1972.070160503.

[23] E. Koscher and R. Fulchiron, "Influence of shear on polypropylene crystallization: morphology development and kinetics," Polymer (Guildf), vol. 43, no. 25, pp. 6931–6942, Jan. 2002, doi: 10.1016/S0032-3861(02)00628-6.

[24] R. Le Goff, G. Poutot, D. Delaunay, R. Fulchiron, and E. Koscher, "Study and modeling of heat transfer during the solidification of semi-crystalline polymers," Int J Heat Mass Transf, vol. 48, no. 25–26, pp. 5417–5430, Dec. 2005, doi: 10.1016/J.IJHEATMASSTRANSFER.2005.06.015.

[25] Y. Furushima, C. Schick, and A. Toda, "Crystallization, recrystallization, and melting of polymer crystals on heating and cooling examined with fast scanning calorimetry," Polymer Crystallization, vol. 1, no. 2, p. e10005, Aug. 2018, doi: 10.1002/PCR2.10005.

[26] M. Spoerk et al., "Polypropylene Filled With Glass Spheres in Extrusion-Based Additive Manufacturing: Effect of Filler Size and Printing Chamber Temperature," Macromol Mater Eng, vol. 303, no. 7, p. 1800179, Jul. 2018, doi: 10.1002/MAME.201800179.

[27] "Ultimate Materials Guide - 3D Printing with Polypropylene." Accessed: Jan. 23, 2025. [Online]. Available: https://www.simplify3d.com/resources/materials-guide/polypropylene/

[28] H. R. Vanaei, S. Khelladi, M. Deligant, M. Shirinbayan, and A. Tcharkhtchi, "Numerical Prediction for Temperature Profile of Parts Manufactured using Fused Filament Fabrication," J Manuf Process, vol. 76, pp. 548–558, Apr. 2022, doi: 10.1016/J.JMAPRO.2022.02.042.

[29] E. Barocio, B. Brenken, A. Favaloro, and R. B. Pipes, "Interlayer fusion bonding of semi-crystalline polymer composites in extrusion deposition additive manufacturing," Compos Sci Technol, vol. 230, p. 109334, Nov. 2022, doi: 10.1016/J.COMPSCITECH.2022.109334.

Gazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Dergisi
PART C: TASARIM VE TEKNOLOJİ

Gazi University
Journal of Science
PART C: DESIGN AND TECHNOLOGY

GU J Sci, Part C, 13(2): 450-461 (2025)

A Cost-Effective and High-Efficiency Novel 15-Level Hybrid MLI Topology for Renewable Energy Systems

Murat KARAKILIÇ[1*] Hasan HATAŞ[2]

[1] *Iğdır University, Faculty of Engineering, Department of Computer Engineering, Iğdır, Turkey*

[2] *Van Yüzüncü Yıl University, Faculty of Engineering, Department of Electrical and Electronics Engineering, Van, Turkey*

Article Info

Research article
Received: 02/02/2025
Revision: 22/03/2025
Accepted: 07/04/2025

Keywords

Cost Function
Reduced Switch
Self-Voltage Balancing
Switched Capacitor (SC)
Multilevel inverters (MLIs)
Voltage Gain

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 02/02/2025
Düzeltme: 22/03/2025
Kabul: 07/04/2025

Anahtar Kelimeler

Anahtarlamalı Kapasitör (AK)
Azaltılmış Anahtar
Çok Seviyeli Eviriciler (ÇSE)
Gerilim Kazancı
Kendinden Gerilim Dengeleme
Maliyet Fonksiyonu

Graphical/Tabular Abstract (Grafik Özet)

This paper introduces a new hybrid MLI structure with a single DC source, 15-level output and 96.48% efficiency. The structure provides high performance with low THD (1.41%) and a small transformer. / Bu çalışma, tek DA kaynaklı, 15 seviyeli çıkış veren ve %96,48 verimle çalışan yeni bir hibrit ÇSE yapısı sunar. Yapı, düşük THB (%1,41) ve küçük transformatörle yüksek performans sağlar.

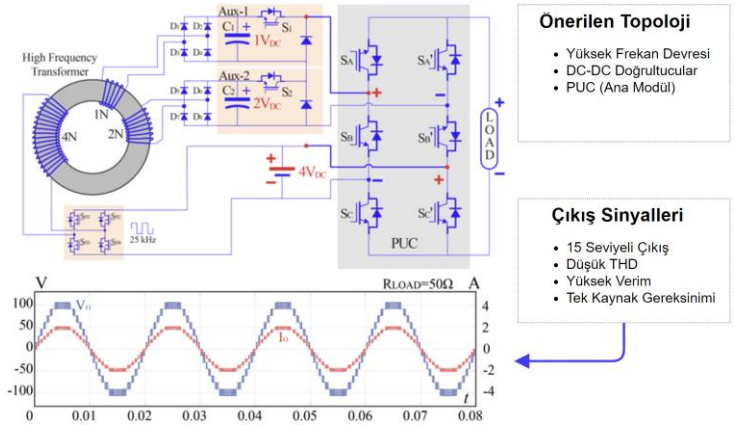


***Figure A**: Graphical representation of the proposed topology **Şekil A:** Önerilen topolojinin grafik gösterimi*

Highlights (Önemli noktalar)

- *The proposed structure introduces a hybrid inverter that generates 15-level output with a single DC source. / Önerilen yapı, tek DA kaynak ile 15 seviyeli çıkış üretebilen hibrit bir evirici sunar.*
- *Low cost and compact size are achieved through the high-frequency transformer. / Yüksek frekans transformatörü sayesinde düşük maliyet ve küçük boyut avantajı sağlar.*
- *Total harmonic distortion is reduced to a low level of 1.41%. / Toplam harmonik bozulma %1,41 gibi düşük bir seviyeye indirgenmiştir.*
- *High efficiency (96.48%) improves system performance. / Yüksek verim (%96,48) ile sistem performansı artırılmıştır.*
- *An economical solution is achieved using only 8 semiconductor devices with the PUC structure. / PUC yapısı ile sadece 8 yarı iletken cihaz kullanılarak ekonomik çözüm elde edilmiştir.*

***Aim (Amaç):** To develop a cost-effective, high-performance multilevel inverter structure using a single DC source and hybrid topology. / Tek bir DA kaynak ve hibrit topoloji kullanarak ekonomik ve yüksek performanslı çok seviyeli bir evirici yapısı geliştirmek.*

***Originality (Özgünlük):** This study introduces a novel hybrid approach combining switched diode and high-frequency link structures to feed a PUC-based inverter from a single DC source. / Bu çalışma, tek bir DA kaynaktan PUC tabanlı eviriciyi beslemek için anahtarlamalı diyot ve yüksek frekans bağlantı yapısını birleştiren özgün bir hibrit yaklaşım sunar.*

***Results (Bulgular):** The proposed inverter achieves 15-level output with 1.41% THD, 96.48% efficiency, and reduced transformer size and cost. / Önerilen evirici, %1,41 THB, %96,48 verim ile 15 seviyeli çıkış üretmiş ve transformatör boyutu ile maliyetini azaltmıştır.*

***Conclusion (Sonuç):** The presented structure provides a simplified, efficient, and scalable solution for multilevel inverter applications using minimal components. / Sunulan yapı, az sayıda bileşenle çok seviyeli evirici uygulamaları için sade, verimli ve ölçeklenebilir bir çözüm sunar.*

*Corresponding author, e-mail: murat.karakilic@igdir.edu.tr
DOI: 10.29109/gujsc.1631487

GU J Sci, Part C, 13(2): 450-461 (2025)

Gazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Dergisi
PART C: TASARIM VE TEKNOLOJİ

Gazi University
Journal of Science
PART C: DESIGN AND TECHNOLOGY

http://dergipark.gov.tr/gujsc

A Cost-Effective and High-Efficiency Novel 15-Level Hybrid MLI Topology for Renewable Energy Systems

Murat KARAKILIÇ[1*] Hasan HATAŞ[2]

[1] *Iğdır University, Faculty of Engineering, Department of Computer Engineering, Iğdır, Turkey*

[2] *Van Yüzüncü Yıl University, Faculty of Engineering, Department of Electrical and Electronics Engineering, Van, Turkey*

Article Info

Research article
Received: 02/02/2025
Revision: 22/03/2025
Accepted: 07/04/2025

Keywords

Cost Function
Reduced Switch
Self-Voltage Balancing
Switched Capacitor (SC)
Multilevel inverters (MLIs)
Voltage Gain

Abstract

This study proposes a new hybrid model for single DC source multilevel inverters (MLIs). The recommended switched diode (SD) and high frequency link (HFL) hybrid structure utilizes one single DC source voltage and supplies multiple DC voltages to the Packed U-Cell (PUC) circuit. The MLI generates 15 levels at the output signal using only 8 semiconductor devices. This simplifies the control of the system and provides an economic solution with a low cost function (CF) of 2.71. In addition, a detailed comparison with recent studies in the literature has been made. Unlike several other studies, the HFL approach is used for the voltage gain. Most of the current supplying the load is obtained directly from the DC supply source, while only a limited current element is transmitted through the high-frequency transformer. This significantly reduces transformer size and costs. In tests with inductive loads, the output is near pure sinusoidal like waveform. Under 50 Ω + 25 mH inductive load conditions, the total harmonic distortion (THD) is measured as 1.41%. Inverter efficiency is 96.48% in loss analysis with PLECS. The voltage peaks that occur during polarity transitions were eliminated by using controlled power switches instead of diodes and a stabilized output was obtained.

Yenilenebilir Enerji Sistemleri için Düşük Maliyetli ve Yüksek Verimli Yeni Bir 15 Seviyeli Hibrit MLI Topolojisi

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 02/02/2025
Düzeltme: 22/03/2025
Kabul: 07/04/2025

Anahtar Kelimeler

Anahtarlamalı Kapasitör (AK)
Azaltılmış Anahtar
Çok Seviyeli Eviriciler (ÇSE)
Gerilim Kazancı
Kendinden Gerilim Dengeleme
Maliyet Fonksiyonu

Öz

Bu makale, tek DA kaynaklı çok seviyeli evirici (ÇSE) için yeni bir hibrit model önermektedir. Önerilen anahtarlamalı diyot (AD) ve yüksek frekanslı bağlantı (YFB) hibrit yapısı, tek bir DA kaynak gerilimi kullanır ve Paketlenmiş U-Hücresi (PUH) devresine çoklu DA gerilimleri sağlar. ÇSE sadece 8 yarı iletken cihaz kullanarak çıkış sinyalinde 15 seviye üretir. Bu, sistemin kontrolünü basitleştirir ve 2,71'lik düşük maliyet fonksiyonu (MF) ile ekonomik bir çözüm sağlar. Ayrıca, literatürdeki son çalışmalarla detaylı bir karşılaştırma yapılmıştır. Diğer birçok çalışmadan farklı olarak, gerilim kazancı için HFB yaklaşımı kullanılmıştır. Yük akımı çoğunlukla doğrudan DA kaynaktan sağlanırken, sadece küçük bir kısmı yüksek frekans transformatöründen geçmektedir. Bu, transformatör boyutunu ve maliyetlerini önemli ölçüde azaltır. Endüktif yüklerle yapılan testlerde, çıkış neredeyse saf sinüzoidal benzeri dalga biçimindedir. 50Ω + 25mH endüktif yük koşulları altında, toplam harmonik bozulma (THB) %1,41 olarak ölçülmüştür. PLECS ile yapılan kayıp analizinde evirici verimi %96,48'dir. Polarite geçişleri sırasında oluşan gerilim tepe noktaları diyotlar yerine kontrollü güç anahtarları kullanılarak giderilmiş ve stabilize bir çıkış elde edilmiştir.

1. INTRODUCTION (GİRİŞ)

In recent years, significant developments in the power electronics field have highlighted the limitations of conventional two-level inverters in various applications [1], [2]. New generation applications require high power and high quality AC power [3], [4]. Some of these are electric vehicles, storage systems and renewable energy systems [5], [6]. Multilevel inverters (MLIs) offer reduced total harmonic distortion (THD) and enhanced output waveform quality in high-voltage

*Corresponding author, e-mail: murat.karakilic@igdir.edu.tr
DOI: 10.29109/gujsc.1631487

and high-power scenarios. These advantages have made them essential for many applications [7], [8].

Traditional MLI topologies such as cascaded neutral point clamped (NPC), flying capacitor (FC) and H-bridge (CHB) have been developed by many researchers [9]. A major limitation of these topologies is their requirement for a substantial number of power switches when scaled to achieve improved power quality and generate higher voltage levels [10]. Therefore, several strategies to improve the design of traditional MLI topologies have been developed to produce new topologies using these designs [11]. In order to reduce the cost and control complexity, the use of fewer switches in topologies has gained importance. However, using fewer switches can lead to higher voltage stress (TSV) on the switches [12]. Thus, the maximum voltage stress (MVS) increases and consequently switching losses increase. This negatively affects the performance of the inverter. These limitations have led researchers to new MLI designs and these studies, which are the focus of future research, are often referred to as next generation topologies. Some of the notable studies in the literature are presented with their major findings.

Some researchers have proposed topologies to reduce DC sources used in their proposed MLI structures. For example, in [13], a new design with two DC voltage sources is proposed. This structure is developed to achieve higher output voltage levels and aims to reduce independent DC sources compared to conventional MLIs. In [14], an extended general structure with series connection of the proposed MLI is presented. The recommended circuit has symmetrical and asymmetrical DC input source configurations.

Other researchers have developed new modules that synthesize the positive and negative levels of the topology without the need for an H-bridge structure [15]. Mostly asymmetric source configurations have been proposed to synthesize higher levels compared to the symmetric source configuration with the same number of power elements [16]. A square T-type module with 12 switches and 4 different DC sources was introduced in [17], which eliminates the need for H-bridges. In another work, the main topology generating 15 levels was extended to obtain 25 levels [18]. Switched diode (SD) circuit is frequently used in MLIs. Especially in two-stage MLI topologies, unipolar bus voltages are converted into bipolar levels with H-bridge using SD circuit [19].

Since numerous power systems, storage units, and electric vehicles (EVs) operate with a single DC-link voltage, efficient conversion of DC power into high-quality AC power becomes essential [20]. As a result, the development of suitable topologies utilizing a single DC source is crucial for such applications. Recent studies in the literature show that most single-source MLI configurations are based on switched capacitor structures. Another widely used method is to use a high frequency link (HFL) [21]. Both methods are notable for their effectiveness in achieving higher voltage levels using a single DC source. While HFL offers the advantage of reducing the cost and size of the system, it can increase the size of the transformer as all the power needs to be transmitted through the transformer. To address this limitation, some studies used the main DC source at selected output levels connected directly to the load, while the intermediate voltage levels have been generated from bus voltages generated through high-frequency link (HFL) techniques. While this method is effective in generating DC link voltages in multilevel inverters, it significantly reduces the transformer size, significantly affecting the overall efficiency [22].

In this paper, a 15-level multilevel inverter (MLI) design operating with only a single DC voltage source is presented. Two alternative structures, switched diode (SD) and switched source (SS), are proposed. The designed topology consists of three main parts: the first part is the SD or SS based structure, the second part is the high frequency link (HFL) DC-DC converter circuit and the third part is the packaged U cell (PUC) architecture. The proposed structure is compared with similar topologies in the existing literature and its advantages are highlighted. In particular, it has a very low cost function (CF) value of 2.37, which makes the topology economically favorable. In addition, the targeted output level is achieved by using only 8 power switches, which is quite low compared to similar studies.

2. PROPOSED TOPOLOGY (ÖNERİLEN TOPOLOJİ)

The hybrid MLI topology introduced in this study is illustrated in Figure 1. As depicted, the overall structure comprises three main sections: HFL, the auxiliary unit, and the main PUC circuit. HFL

transforms the voltage of DC source ($4V_{DC}$) into multiple bus voltages, specifically $1V_{DC}$ and $2V_{DC}$. In the second part, it uses Aux-1 and Aux-2 bus voltages and transfers them to the PUC circuit. The Pack-U Cell (PUC), which forms the main structure of the topology, generates a 15-level staircase waveform at the output using the DC source at the input and the intermediate level bus voltages.

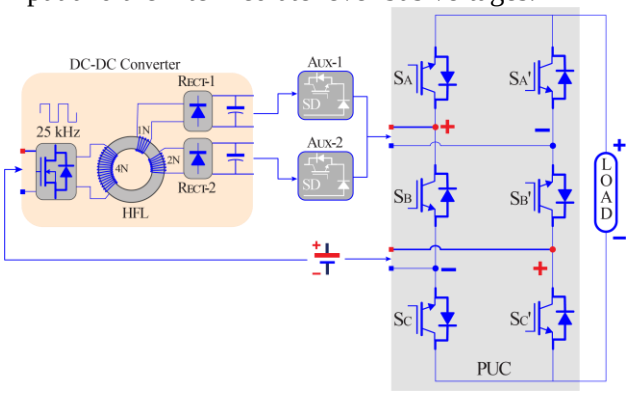


Figure 1. Proposed 15-Level hybrid MLI topology (Önerilen 15 seviyeli hibrit ÇSE topolojisi.)

In MLI circuits, the reversal of current direction at polarity transitions due to the effect of inductive components leads to peaks in the output voltage. This is due to the effect of the diodes on the current path in different operating modes, as the diodes can allow current to flow in certain directions and cut it off in case of reverse polarity. Sudden polarity changes cause a peak in the voltage wave because the diodes are reverse biased in the first instance. The most permanent solution is to replace the diodes with power switches. Power switches contain antiparallel diodes that allow the current on the switch to complete the cycle through the relevant diode in case of sudden changes in direction. Therefore, in the proposed topology, since the diodes produce peak voltages, power switches are used instead of diodes as a solution. Figure 1 shows the SC and the SS circuit which is formed by replacing the diode in this circuit with a power switch. Topology is simulated with both circuits and the results show that the problem is solved. The switching states are shown in Table 1.

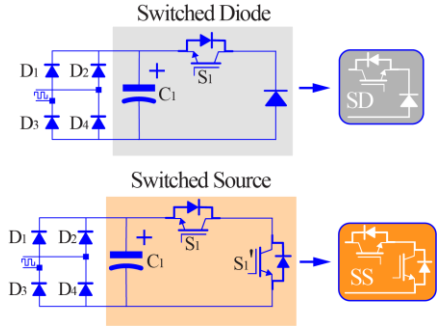


Figure 1. SC and SS circuits (AD ve AK devreleri)

Table 1. Switching Pattern Of the Proposed Topology (Önerilen Topolojinin Anahtarlama Modeli)

$S_1S_2S_AS_BS_C$	V_{out}	$S_1S_2S_AS_BS_C$	V_{out}
[00000]	+0	[01011]	-1
[01100]	+1	[10011]	-2
[10100]	+2	[11011]	-3
[11100]	+3	[00110]	-4
[00001]	+4	[01010]	-5
[01101]	+5	[10010]	-6
[10101]	+6	[11010]	-7
[11101]	+7		

As shown in Figure 2, Aux-1 applies $1V_{DC}$, Aux-2 applies $2V_{DC}$ bus voltages to the upper layer of the PUC, while the $4V_{DC}$ input source is connected to the lower layer. The HFL converts the input DC voltage into a load frequency AC wave and applies it to the transformer. The high frequency transformer has a winding ratio of 4:1:2. Thus, the $1V_{DC}$ and $2V_{DC}$ high frequency AC wave generated at its output charges the capacitors with the help of rectifiers and converts them into DC bus voltages.

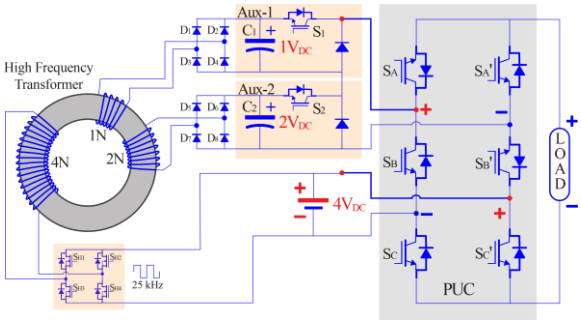


Figure 2. Circuit diagram of the proposed MLI topology (Önerilen ÇSE topolojisinin devre şeması)

Figure 3 explains the basic working principle of the proposed topology. The supply voltages are connected in reverse direction in the upper and lower layers of the PUC main circuit. This is due to the main working principle of the PUC circuit. V_u represents the upper layer supply voltage and V_b represents the lower layer voltage. The voltages synthesized by the PUC topology on the load are $\pm V_u$, $\pm V_b$, $\pm(V_u + V_b)$, respectively. In the proposed topology, multiple DC bus voltages produced by the DC-DC converter are applied instead of V_u. Thus, the PUC circuit produces voltages as ±1, ±2, ±3, ±4, ±(1+4), ±(2+4) and ±(3+4);

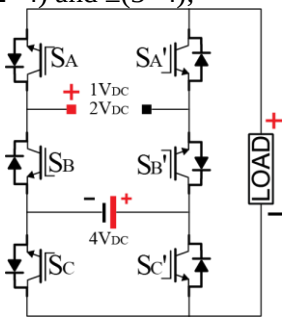


Figure 3. Voltage configuration of the main circuit. (Ana devrenin voltaj konfigürasyonu)

The proposed configuration has been thoroughly evaluated using both Sinusoidal Pulse Width Modulation (SPWM) and Nearest Level Control (NLC) strategies.The gate pulses generated by both control techniques and output voltage signals are presented in Figure 4. As seen in the figure, the upper signals are generated by SPWM and the lower ones are generated by NLC control technique. These findings are of critical importance in comparing the performance of both control techniques. In previous studies, the analyses performed on the dynamic responses and harmonic contents of these control techniques increase the reliability and applicability of the obtained results.

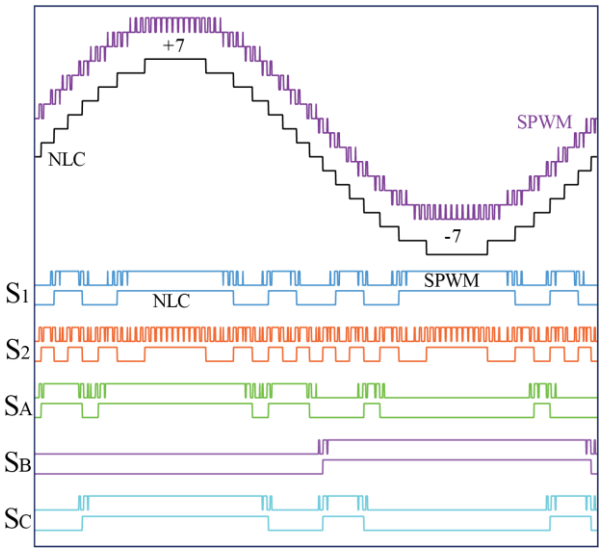


Figure 4. The output voltage waveforms and gate pulses of proposed MLI with (a) NLC and (b) SPWM control method. (Önerilen ÇSE'nin (a) NLC ve (b) SPWM kontrol yöntemi ile çıkış gerilimi dalga şekilleri ve kapı darbeleri.)

Figure illustrates the voltage stress experienced by the switches at various levels. Among all switching devices, S_B and S_B' are subjected to the largest voltage stress across the topology. The total blocking voltage, defined as the cumulative maximum voltage stress of all switches, serves as an important benchmark for evaluating MLI configurations. The maximum voltage values for each switch can be expressed as follows:

$$\begin{aligned} V_{SA'} &= V_{SA} = 3V_{DC} \\ V_{SB'} &= V_{SB} = 7V_{DC} \\ V_{SC'} &= V_{SC} = 4V_{DC} \\ V_{S1} &= 1V_{DC} \\ V_{S2} &= 2V_{DC} \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} TBV &= V_{SA'} + V_{SA} + V_{SB'} + V_{SB} + V_{SC'} + V_{SC} + V_{S1} + V_{S2} \\ TBV &= 31V_{DC} \end{aligned} \quad (2)$$

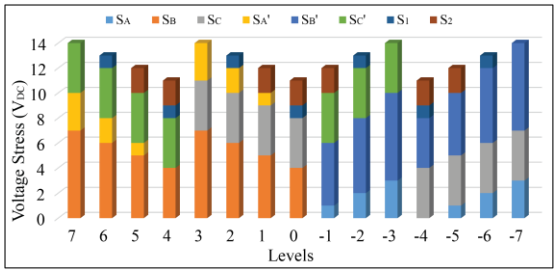


Figure 6. Voltage stress across to power switches in the proposed MLI. (Önerilen ÇSE'de güç anahtarları üzerindeki gerilim stresi.)

Figure provides a detailed representation of the power loss distribution among the power components. Thermal loss analysis using PLECS software shows that all power switches and diodes operating at the fundamental frequency exhibit an even loss distribution. Although the switches in the main module are subjected to higher voltage stresses, higher power losses occur in the switches in the Aux-1 and Aux-2 circuits. The highest individual power loss is noted at switch S_2, accounting for 10% of the total loss. Meanwhile, the high frequency switches S_{H1}-S_{H4} contribute 2% of the total power loss.

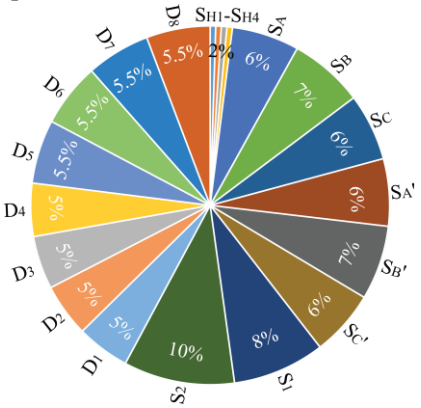


Figure 7. Power loss distribution (Güç kaybı dağılımı)

Based on the switching states provided in Table 1, the operating modes are illustrated in Figure . The figure highlights the ON-state power switches and corresponding bus voltages along the current path. Morover, the states of the S_1 and S_2 switches in the Aux-1 and Aux-2 circuits that provide multiple bus voltages to the upper layer of the PUC circuit in each operating mode are specified. As seen in the circuit diagram of the proposed topology in Figure 3, Aux-1 produces $0V_{DC}$ at its output for S_1=0 and $1V_{DC}$ for S_1=1. Similarly, Aux-2 produces 0 V_{DC} for S_2=0 and $2V_{DC}$ for S_2=1. Since the Aux-1, 2 circuits are connected in series, $3V_{DC}$ bus voltage is produced in the S_2S_1=11 switching state. All operating modes and switch states are presented in Figure 8.

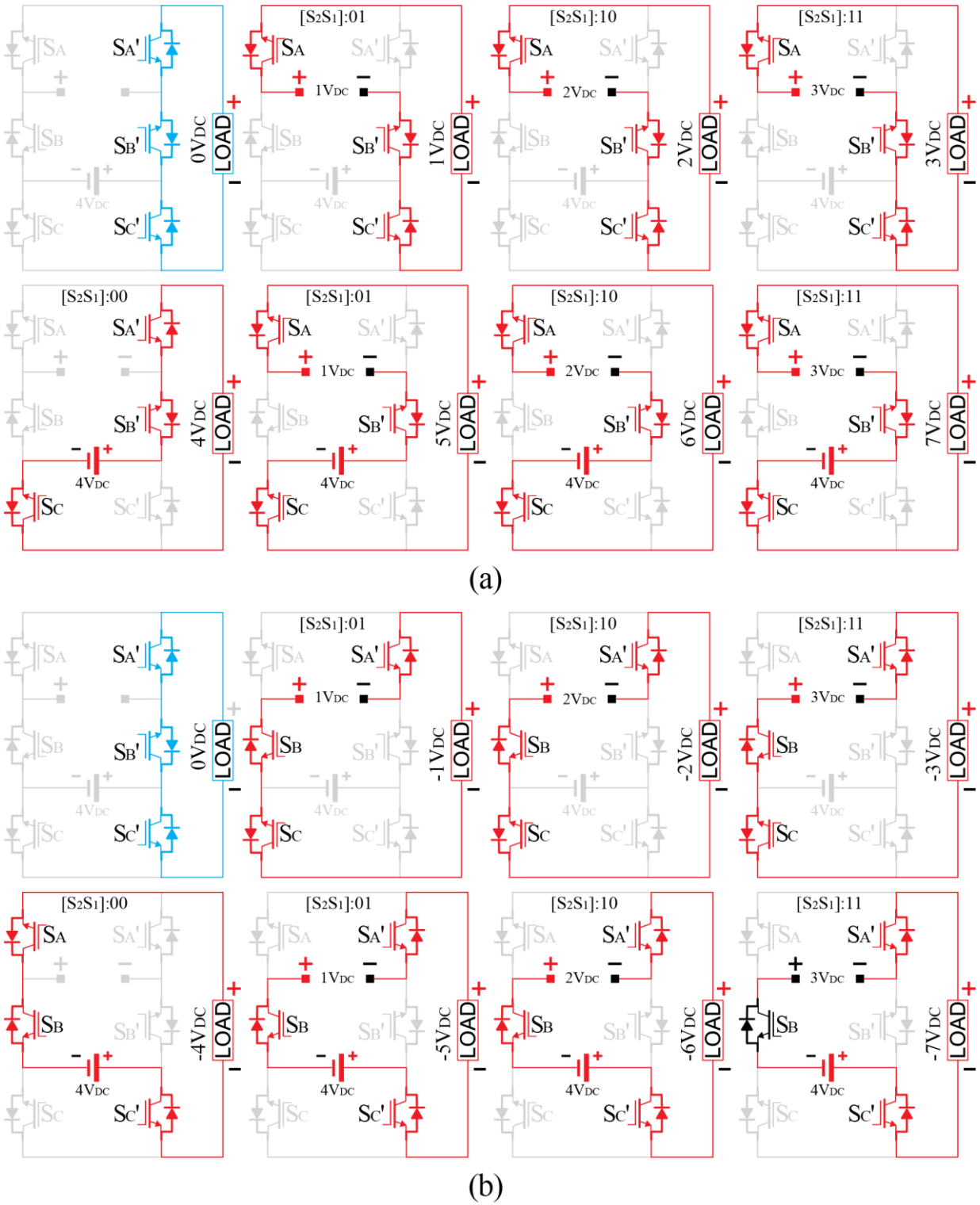


Figure 8. Operating modes of the proposed topology (Önerilen topolojinin çalışma modları)

In order to accurately determine the system efficiency in MLI structures, it is of great importance to determine the power losses in the circuit with practical methods. Although it is possible to calculate the losses under different load conditions with theoretical approaches, the electrical and thermal parameters of the circuit elements during operation vary depending on environmental factors, especially temperature. These dynamic changes reduce the accuracy of theoretical calculations and make the process complex. Therefore, in order to obtain more realistic results in power electronics systems, it is preferred to use simulation software that works with models including the thermal behavior of circuit components. In this study, the losses of power

components such as switches, diodes and capacitors are analyzed with PLECS software using thermal models of the relevant components. The simulations are carried out under output power values ranging from 0 to 1000 W and the variation of the efficiency depending on the output power is presented in Figure 5. The analysis results show that the proposed MLI topology operates with a high efficiency of 96.48%, especially at 1000 W output power. This result demonstrates that the structure not only works efficiently in high power applications but also minimizes losses with proper design and control.

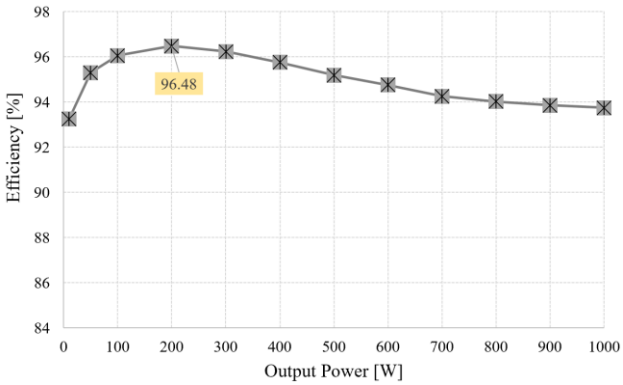


Figure 5. Inverter efficiency versus output power (Çıkış gücüne karşı invertör verimliliği)

3. COMPARATIVE STUDY (KARŞILAŞTIRMALI ÇALIŞMA)

This paper provides a detailed comparison with recent studies to show performance of proposed MLI topology. The main parameters used by many researchers to indicate the advantages of their proposed topology are the number of power elements used, the number of DC sources, the TBV and the number of levels generated by the topology. Although the cost functions (CF) determined with these parameters are partially formulated differently, they are mostly similar to each other.

The CF is determined as in Equation (3) according to the parameters specified.

$$CF = \frac{(N_{SW} + N_{GD} + N_D + N_C + \alpha TBV) \cdot N_{DC}}{N_L} \quad (3)$$

where α is defined as 0.5 and 1.5, selected based on the relative importance of the TSV.

Table 2 compares various inverter topologies in terms of the number of power components utilized and the total blocking voltage (TBV). Many studies have advantages and disadvantages. For example, the study in [23] synthesizes 9 levels at the output using 12 power devices and 3 switched capacitors. However, the same number of output levels is achieved by the topology in [11] using 10 switches. Moreover, it synthesizes 15 levels with 10 switches [24]. However, since it has a very high CF value, it is quite weak in terms of cost. The effect of 4 DC sources used at the input is significant in this. Another topology, the study in [25], synthesizes 7 levels with 10 switches and 2 capacitors, although its TBV value is very low. However, there are topologies that produce higher levels with fewer power elements [26]. The topology proposed in this study produces 15 output levels using only 8 power switches. The power switches used in the circuit reach a TBV value of 31V and attract attention with its low cost function (CF). It is seen that it has a very low cost compared to other studies in the literature. This increases the cost effectiveness of the system and brings about simplicity of design by reducing the number of components.

Table 2. Comparative analysis of proposed MLI (Önerilen ÇSE'nin karşılaştırmalı analizi)

Topology	Year	N_L	N_{DC}	N_{SW}	N_{GD}	N_D	N_C	TBV	C_F (α)	
									0.5	1.5
[11]	2023	9	1	10	9	2	3	44	5.11	10.00
[27]	2024	7	1	7	7	2	2	15	3.64	5.79
[25]	2024	7	1	10	10	1	2	17	4.50	6.93
[28]	2024	7	1	8	8	-	4	16	4.00	6.29
[23]	2022	9	1	12	11	-	3	44	5.33	10.22
[29]	2019	9	1	11	10	-	2	40	4.78	9.22
[30]	2022	13	1	14	13	-	3	33	3.58	6.12
[31]	2022	13	1	12	11	3	3	36	3.62	6.38
[32]	2019	13	2	16	16	-	4	34	8.15	13.38
[33]	2019	13	2	14	11	-	2	32	6.62	11.54
[34]	2021	13	2	14	14	2	4	34	7.85	13.08
[35]	2022	15	2	10	10	1	1	34	5.20	9.73
[24]	2017	15	4	10	10	-	-	42	10.93	22.13
[26]	2019	15	3	10	9	-	-	34	7.20	14.00
Prop.	**2024**	**15**	**1**	**8**	**8**	**2**	**2**	**31**	**2.37**	**4.43**

4. RESULTS AND DISCUSSION (BULGULAR VE TARTIŞMA)

The simulation analysis of the proposed 15-level (15L) hybrid MLI is performed using Matlab/Simulink and PLECS environments. The control and main circuit modeling of the proposed topology is performed in Matlab, while the loss evaluations are realized using PLECS. For the simulation setup, a 60 V_{DC} source is used and gate signals are generated using both NLC and SPWM techniques. Figure 6 shows the operating performance under a 50Ω pure resistive load using NLC approach. In particular, Figure 6(a) presents the output waveforms, while Figure 10(b) shows the voltage waveforms at the outputs of the Aux-1 and Aux-2 DC-DC converters. Similarly, Figure 7 shows waveforms under the same load condition using SPWM control method.

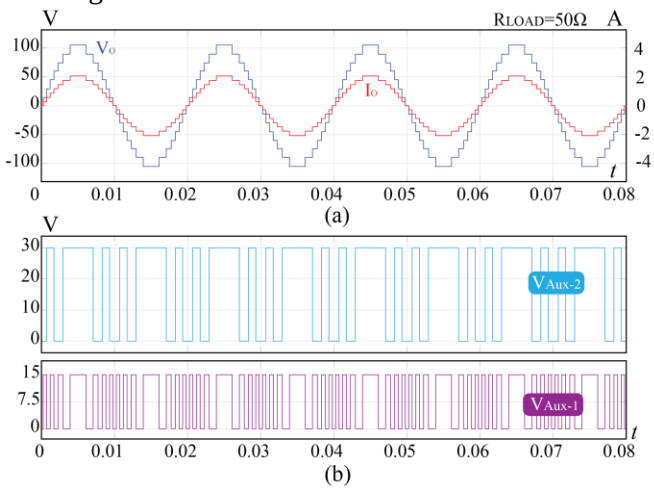


Figure 6. Voltage and current waveforms of the proposed topology (a), Aux-1 and Aux-2 voltages (b) (Önerilen topolojinin gerilim ve akım dalga şekilleri (a), Aux-1 ve Aux-2 gerilimleri (b))

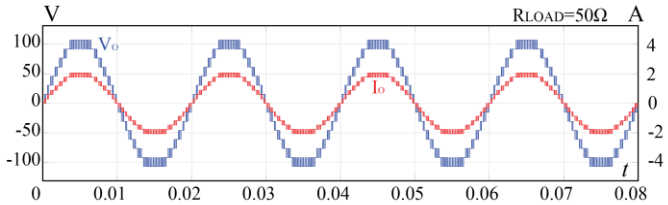


Figure 7. Voltage and current waveforms with SPWM method (SPWM yöntemi ile gerilim ve akım dalga şekilleri)

The inductive operation performance of the proposed 15L-MLI has been tested with 50Ω+25mH and 50Ω+50mH loads and the output waveforms are shown in Figure 8 (a) and (b), respectively. As can be seen, as the inductive load increases in the output waveforms, the voltage causes peaks at the polarity change moments. This will cause problems in highly inductive loads. As a solution to this problem, it is suggested to replace the Aux circuits with SS circuits instead of SD.

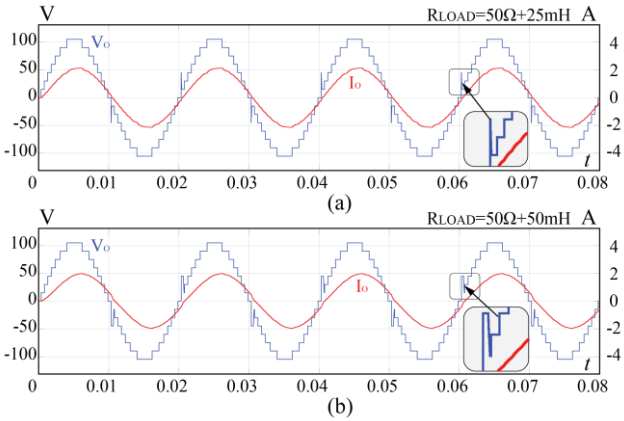


Figure 8. Inductive load response of the proposed MLI (Önerilen ÇSE'nin endüktif yük tepkisi)

It is seen in Figure 9 that the problem is eliminated by adding SS circuits. The output waveforms of the proposed circuit produced with different inductive loads are presented in the figure. In Figure 9, it is seen that there is no distortion in the output waveforms with 50Ω+25mH, 50Ω+50mH and 50Ω+200mH loads, respectively. Figure 9 (c) shows that there is no distortion despite the high inductive component. In addition, the analysis shows that the proposed solution is successful in both NLC and SPWM control techniques. THD analysis of the output current under these loads is shown in Figure 10. It is seen that very low total harmonic distortion (THD=1.53%) occurs in the current wave despite the low inductive load.

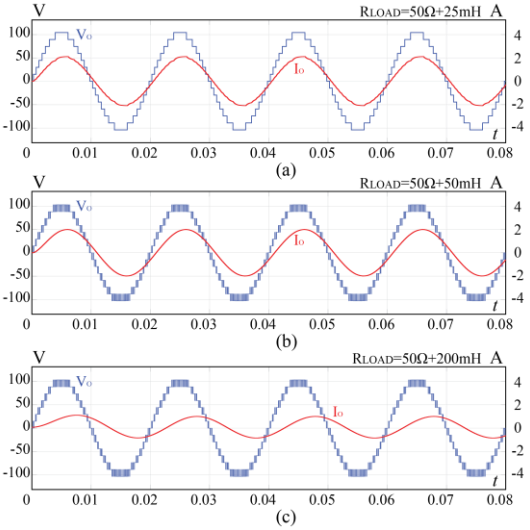


Figure 9. Output voltage and current waveforms with SS circuit (SS devresi ile çıkış gerilimi ve akım dalga şekilleri)

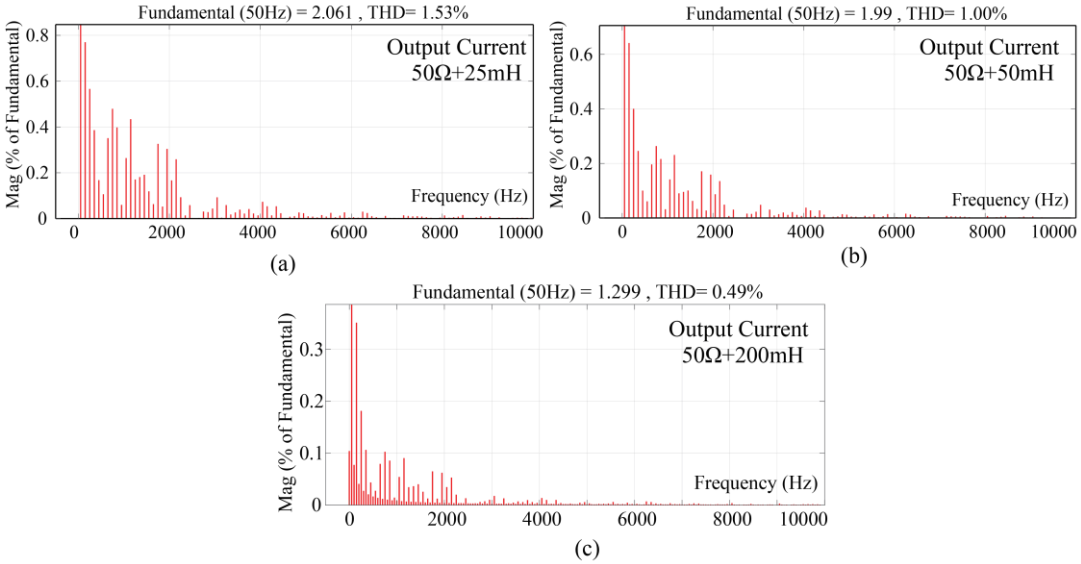


Figure 10. Harmonic analysis of the output currents with different loads (Farklı yüklerle çıkış akımlarının harmonik analizi)

Figure 10 (a) and (b) illustrate the variations in switching frequency and modulation index (MI), respectively. In Figure 15 (a), only the frequency is varied, whereas in Figure 11 (b) the frequency and MI are simultaneously varied. The corresponding frequency and MI values and the moments when these changes occur are indicated in the figures. The obtained results show that the proposed topology works stably against frequency and MI variations and no distortion is observed in the output waveforms.

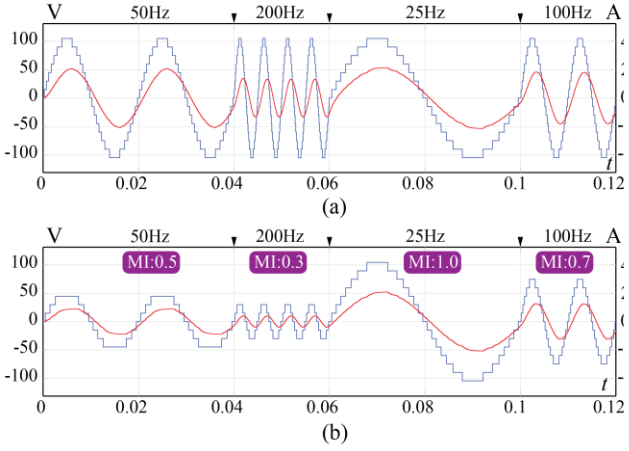


Figure 11. Response of output voltage and current to frequency (a) and modulation index changing (b) (Çıkış gerilimi ve akımının frekansa (a) ve modülasyon indeksi değişimine (b) tepkisi)

Figure 13 shows the experimental setup of the proposed MLI topology. The control signals are generated using a FPGA development board with high-performance digital signal processing capabilities. In the experimental system, the switching frequencies are set to 50 Hz (for the NLC method) and 5 kHz (for the SPWM method) to correspond to different control strategies. The tests performed on this prototype show that the designed topology can operate stably and reliably in real-time applications.

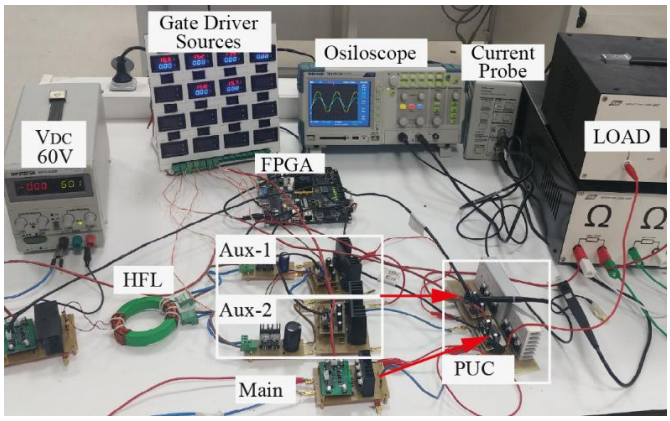
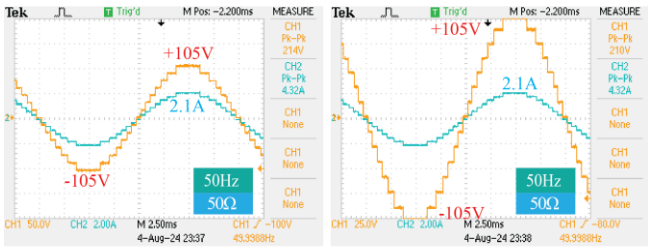


Figure 12. Experimental prototype of the proposed MLI (Önerilen ÇSE'nin deneysel prototipi)

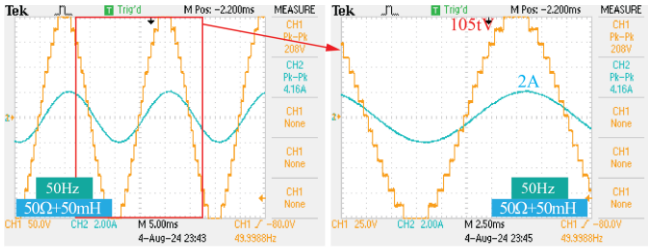
Figure 13 shows the experimental prototype test results under 60 VDC input voltage and 50Ω resistive inductive load (RL). In Figure 13 (a) and (b), it is observed that the output current and voltage are in the same phase. In addition, the output current and voltage waveforms show a 15-step staircase waveform operating at a frequency of 50 Hz. Theamplitude of the voltage waveform is measured as 105 V. These results demonstrate that the topology successfully achieves the experimentally predicted performance.



(a) (b)

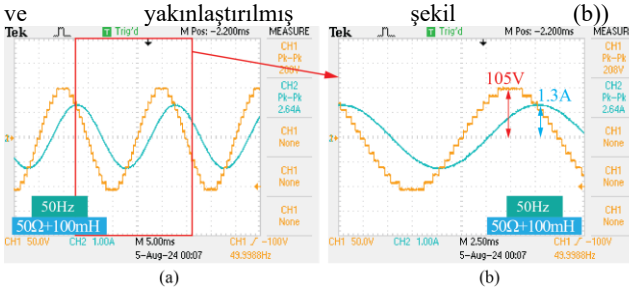
Figure 13. Experimental scopes of proposed MLI (a) output signals, (b) zoomed-in figure (Önerilen ÇSE'nin deneysel ölçekleri (a) çıkış sinyalleri, (b) yakınlaştırılmış şekil)

In order to show the inductive performance of the circuit, the experiment has been tested with different loads. First, the test is realized with a 50Ω+50mH load. Figure 14 shows no distortion occurred in the output signals. In the zoomed-in view of the waveforms in Figure 14 (b), it is seen that the current is smooth and is near to sinusoidal waveform. For high inductive performance, 200mH is connected to the load and the output waveforms are seen in Figure 15. Due to the high inductive load, the total impedance changed and the amplitude of the current wave decreased from 2A to 1.3A. In addition, the current phase shift compared to the voltage wave is noticeable.



(a) (b)

Figure 14. Inductive performance of proposed MLI with 50Ω+50mH load (a), and zoomed-in figure (b) (Önerilen ÇSE'nin 50Ω+50mH yük ile endüktif performansı (a) ve yakınlaştırılmış şekil (b))



(a) (b)

Figure 15. Inductive performance of proposed MLI with 50Ω+200mH load (a), and zoomed-in figure (b) (Önerilen ÇSE'nin 50Ω+200mH yük ile endüktif performansı (a) ve yakınlaştırılmış şekil (b))

Figure 16 shows output effect of modulation index (MI) variation. A reduction in the MI value decreases the number of levels and consequently negatively affects the quality of the output waveform. This figure presents the output waveforms corresponding to modulation index (MI) variations between 0.35 and 1.0. It is evident that the number of generated output levels varies with the MI value. For instance, an MI of 0.75 results in 10 output levels, whereas an MI of 0.35 produces only 5 levels. However, the output stability and voltage uniformity of the system are maintained despite the MI variations. Figure 17 shows the response of the experimental prototype to frequency variations. The circuit responded smoothly to frequency variations between 200 Hz and 25 Hz and no distortion was observed in the output signals. Figure 18 shows the dynamic system response when MI and frequency are varied simultaneously. The obtained results show that the proposed 15-level MLI topology exhibits high stability for different modulation indices and frequency variations.

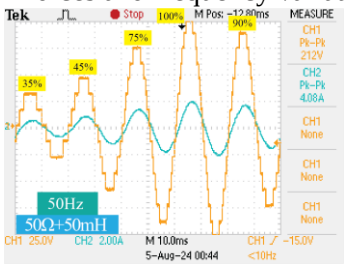
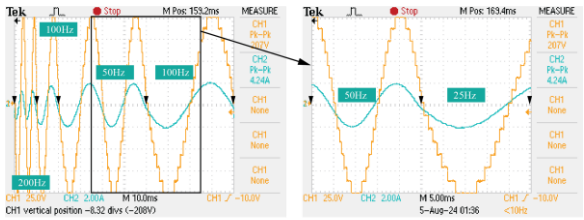
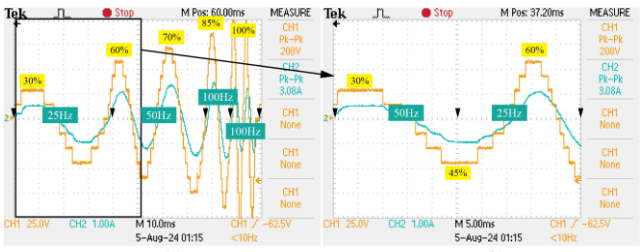


Figure 16. Dynamic performance of the proposed MLI under MI variation (Önerilen ÇSE'nin MI değişimi altında dinamik performansı)



(a) (b)

Figure 17. Dynamic performance of the proposed MLI under frequency variation (Önerilen ÇSE'nin frekans değişimi altında dinamik performansı)



(a) (b)

Figure 18. Dynamic performance of the proposed MLI under MI and frequency variation (Önerilen ÇSE'nin MI ve frekans değişimi altında dinamik performansı)

5. CONCLUSIONS (SONUÇLAR)

In this paper, a novel hybrid MLI topology is proposed that operates using only a single DC source. The most remarkable feature of the topology is its ability to generate 15 level at the output signal without additional DC voltage source. This performance is achieved using only eight power switches, simplifying the control structure of the system considerably. Compared to similar structures in the literature, this topology has a lower cost function (CF) value of 2.71, making it an economically prominent solution. Moreover, one of the most unique contributions of this work is the utilization of a HFL structure for voltage boosting. While most of the current is supplied directly from the input source, a small portion of the current is drawn from the HFL to generate the intermediate voltage levels, thus reducing transformer size and cost. For a low inductive load of 50Ω + 25mH, the output of the system is nearly ideal sinusoidal current, which is supported by a total harmonic distortion (THD) value of 1.41%. The inverter efficiency analysis is performed with PLECS software and the findings indicate that the proposed topology operates with 96.48% efficiency. On the other hand, the switched diode (SD) element used in the circuit caused unwanted peaks in the output voltage during polarity transitions. In order to overcome this problem, a switched source (SS) circuit with controlled switches is proposed instead of the SD circuit, thus stabilizing the output waveform.

As a result, the prominent findings of the study are summarized below:

- The proposed structure produces high-level output with low number of switches and offers a cost advantage with a CF of 2.71.
- Under low inductive load, almost sinusoidal output current is obtained with a THD value of 1.41%.
- According to the simulation results, the efficiency of the system is 96.48%.

Disturbing voltage peaks at polarity transitions are successfully eliminated by the SS circuit and output stability is achieved.

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)

***Murat KARAKILIÇ*:** Theoretical calculations, simulation studies, experimental setup and analysis of the proposed topology and writing and editing of the paper.

Önerilen topolojinin teorik hesaplamaları, benzetim çalışmaları, deney düzeneği kurulumu ve analiz süreçlerini yürütülmesi ile makalenin yazımı ve düzenlenmesi.

***Hasan HATAŞ*:** Evaluation of experimental and simulation results, preparation of graphs and illustrations.

Deneysel ve benzetim sonuçlarının değerlendirilmesi, grafik ve illustrasyonların hazırlanması.

CONFLICT OF INTEREST (ÇIKAR ÇATIŞMASI)

There is no conflict of interest in this study.

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

REFERENCES (KAYNAKLAR)

[1] A. Bughneda, M. Salem, A. Richelli, D. Ishak, and S. Alatai, "Review of Multilevel Inverters for PV Energy System Applications," *Energies 2021, Vol. 14, Page 1585*, vol. 14, no. 6, p. 1585, Mar. 2021, doi: 10.3390/EN14061585.

[2] F. Bilimleri Dergisi, A. Yaseen Hamad, E. Kürşat Yaylacı, R. Khalil Antar, G. Üniversitesi, and M. Bilgisi, "Voltage Level Managements of Multilevel Inverter Based on Renewable Energy Sources and Environment Conditions," *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, pp. 1–1, Mar. 2025, doi: 10.29109/GUJSC.1503575.

[3] K. K. Mahto, P. Das, D. Das, S. Mittal, and B. Mahato, "A New Criss-Cross-Based Asymmetrically Configured T-Type Multi-level Inverter," *Lecture Notes in Electrical Engineering*, vol. 1148 LNEE, pp. 1–14, 2024, doi: 10.1007/978-981-97-0154-4_1.

[4] S. Iqbal, N. F. Alshammari, M. Shouran, and J. Massoud, "Smart and Sustainable Wireless Electric Vehicle Charging Strategy with Renewable Energy and Internet of Things Integration," *Sustainability 2024, Vol. 16, Page 2487*, vol. 16, no. 6, p. 2487, Mar. 2024, doi: 10.3390/SU16062487.

[5] A. K. Aktar, A. Taşcıkaraoğlu, S. S. Gürleyük, and J. P. S. Catalão, "A framework for dispatching of an electric vehicle fleet using vehicle-to-grid technology," *Sustainable Energy, Grids and Networks*, vol. 33, p. 100991, Mar. 2023, doi: 10.1016/J.SEGAN.2022.100991.

[6] M. Karakılıç, "A Novel Enhanced Switched Capacitor (ESC) Unit and ESC Based 9L MLI Topology," *Journal of Electrical Engineering & Technology*, 2025, doi: 10.1007/s42835-025-02202-9.

[7] G. Ü. Fen, B. Dergisi, and O. Aytar, "Darlington CMOS İnverter Tabanlı Paralel Analog-Sayısal Dönüştürücü Tasarımı," *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, vol. 6, no. 1, pp. 67–78, Mar. 2018, doi: 10.29109/HTTP-GUJSC-GAZI-EDU-TR.358045.

[8] N. Güler, "9-Seviyeli Paket E-Hücreli Eviriciler için Üstün Burulma Algoritması Tabanlı Kayan Kipli Kontrol Tasarımı," *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, vol. 9, no. 1, pp. 57–70, Mar. 2021, doi: 10.29109/GUJSC.846704.

[9] E. Babaei, "A Cascade Multilevel Converter Topology With Reduced Number of Switches," *IEEE Trans Power Electron*, vol. 23, no. 6, 2008, doi: 10.1109/TPEL.2008.2005192.

[10] M. Karakılıç, "A Novel Hexagonal Switched Capacitor Unit (HSCU) Design With Seven-Level Multilevel Inverter Topology," *International Journal of Circuit Theory and Applications*, vol. 0, pp. 1–17, Feb. 2025, doi: 10.1002/CTA.4469.

[11] M. D. Siddique, M. Aslam Husain, A. Iqbal, S. Mekhilef, and A. Riyaz, "Single-Phase 9L Switched-Capacitor Boost Multilevel Inverter (9L-SC-BMLI) Topology," *IEEE Trans Ind Appl*, vol. 59, no. 1, 2023, doi: 10.1109/TIA.2022.3208893.

[12] P. Omer and J. Kumar, "A Review on Reduced Switch Count Multilevel Inverter Topologies," 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2969551.

[13] E. Babaei, M. F. Kangarlu, and M. Sabahi, "Extended multilevel converters: an attempt to reduce the number of independent DC voltage sources in cascaded multilevel converters," 2013, doi: 10.1049/iet-pel.2013.0057.

[14] M. Farhadi Kangarlu and E. Babaei, "A Generalized Cascaded Multilevel Inverter Using Series Connection of Submultilevel Inverters," *IEEE Trans Power Electron*, vol. 28, no. 2, p. 625, 2013, doi: 10.1109/TPEL.2012.2203339.

[15] R. S. Alishah, S. H. Hosseini, E. Babaei, and M. Sabahi, "Optimal Design of New Cascaded Switch-Ladder Multilevel Inverter Structure," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 64, no. 3, pp. 2072–2080, Mar. 2017, doi: 10.1109/TIE.2016.2627019.

[16] M. Saeedian, J. Adabi, and S. M. Hosseini, "Cascaded multilevel inverter based on symmetric-asymmetric DC sources with reduced number of components," 2017, doi: 10.1049/iet-pel.2017.0039.

[17] E. Samadaei, A. Sheikholeslami, S. A. Gholamian, and J. Adabi, "A Square T-Type (ST-Type) Module for Asymmetrical Multilevel Inverters," *IEEE Trans Power Electron*, vol. 33, no. 2, pp. 987–996, Feb. 2018, doi: 10.1109/TPEL.2017.2675381.

[18] J. C. Wu, H. L. Jou, and S. Y. Liou, "Asymmetric diode-clamped multi-level inverter based renewable power generation system," *International Journal of Electronics*, vol. 108, no. 1, 2021, doi: 10.1080/00207217.2020.1756455.

[19] M. Hosseinzadeh, M. Sarebanzadeh, M. Rivera, S. Member, E. Babaei, and P. Wheeler, "A Reduced Single-Phase Switched-Diode Cascaded Multilevel Inverter," *IEEE J Emerg Sel Top Power Electron*, vol. 9, no. 3, 2021, doi: 10.1109/JESTPE.2020.3010793.

[20] V. Krithika and C. Subramani, "A comprehensive review on choice of hybrid vehicles and power converters, control strategies for hybrid electric vehicles," *Int J Energy Res*, vol. 42, no. 5, pp. 1789–1812, Apr. 2018, doi: 10.1002/ER.3952.

[21] M. Karakılıç and M. N. Almalı, "Design of Hybrid Switched Diode Multilevel Inverter Using Single DC Source," *Journal of Electrical Engineering and Technology*, pp. 1–12, Feb. 2024, doi: 10.1007/S42835-024-01832-9/FIGURES/16.

[22] H. Hatas and M. N. Almali, "Design and control of a novel topology for multilevel inverters using high frequency link," *Electric Power Systems Research*, vol. 221, 2023, doi: 10.1016/j.epsr.2023.109458.

[23] M. D. Siddique *et al.*, "Single-Phase Boost Switched-Capacitor-Based Multilevel Inverter Topology With Reduced Switching Devices," *IEEE J Emerg Sel Top Power Electron*, vol. 10, no. 4, 2022, doi: 10.1109/JESTPE.2021.3129063.

[24] R. S. Alishah, S. H. Hosseini, E. Babaei, and M. Sabahi, "Optimal Design of New Cascaded Switch-Ladder Multilevel Inverter Structure," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 64, no. 3, pp. 2072–2080, Mar. 2017, doi: 10.1109/TIE.2016.2627019.

[25] M. Zaid, A. R. Moonis, A. Sarwar, A. Iqbal, and M. Tayyab, "Seven-level single-source switched capacitor inverter with triple boosting capability and high reliability," *International Journal of Circuit Theory and Applications*, vol. 52, no. 8, pp. 3844–3869, Aug. 2024, doi: 10.1002/CTA.3946.

[26] M. Daula Siddique, S. Mekhilef, M. Shah, A. Sarwar, A. Iqbal, and A. Memon, "A New

Multilevel Inverter Topology With Reduce Switch Count," 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2914430.

[27] W. Lin, J. Zeng, B. Fu, Z. Yan, and J. Liu, "Switched-capacitor Based Seven-level Boost Inverter with a Reduced Number of Devices," *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, vol. 10, no. 1, pp. 381–391, Jan. 2024, doi: 10.17775/CSEEJPES.2020.02620.

[28] S. Islam, M. Daula Siddique, M. R. Hussan, and A. Iqbal, "Reduced Voltage Stress and Spikes in Source Current of 7-Level Switched-Capacitor Based Multilevel Inverter," *IEEE Access*, vol. 11, pp. 74722–74735, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3297496.

[29] J. S. Mohamed Ali and V. Krishnasamy, "Compact Switched Capacitor Multilevel Inverter (CSCMLI) with Self-Voltage Balancing and Boosting Ability," *IEEE Trans Power Electron*, vol. 34, no. 5, 2019, doi: 10.1109/TPEL.2018.2871378.

[30] M. Wasiq, M. D. Siddique, A. Sarwar, A. Iqbal, and S. Mekhilef, "A triple boost 13-level switched-capacitor based multi-level inverter topology for solar PV applications," *International Journal of Circuit Theory and Applications*, vol. 50, no. 12, 2022, doi: 10.1002/cta.3391.

[31] S. Islam, D. Siddique, S. Mekhilef, M. Al-Hitmi, and A. Iqbal, "A Switched Capacitor-Based 13-Level Inverter With Reduced Switch Count," *IEEE Trans Ind Appl*, vol. 58, no. 6, p. 7373, 2022, doi: 10.1109/TIA.2022.3191302.

[32] T. Roy, P. K. Sadhu, and A. Dasgupta, "Cross-Switched Multilevel Inverter Using Novel Switched Capacitor Converters," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 66, no. 11, pp. 8521–8532, Nov. 2019, doi: 10.1109/TIE.2018.2889632.

[33] E. Samadaei, M. Kaviani, and K. Bertilsson, "A 13-Levels Module (K-Type) With Two DC Sources for Multilevel Inverters," *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS*, vol. 66, no. 7, 2019, doi: 10.1109/TIE.2018.2868325.

[34] T. Roy and P. K. Sadhu, "A Step-Up Multilevel Inverter Topology Using Novel Switched Capacitor Converters with Reduced Components," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 68, no. 1, pp. 236–247, Jan. 2021, doi: 10.1109/TIE.2020.2965458.

[35] M. Sarebanzadeh *et al.*, "A 15-Level Switched-Capacitor Multilevel Inverter Structure with Self-Balancing Capacitor," *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, vol. 69, no. 3, 2022, doi: 10.1109/TCSII.2021.3123115.

Gazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Dergisi
PART C: TASARIM VE TEKNOLOJİ

Gazi University
Journal of Science
PART C: DESIGN AND TECHNOLOGY

GU J Sci, Part C, 13(2): 462-470 (2025)

Titreşim Optimizasyonu için Akıllı Cnc Router Sistem Tasarımı

Duygu GÜRKAN[1*], Ahmet MAVİ[1], İhsan KORKUT[1]

[1]*Gazi University, Faculty of Technology, Department of Manufacturing Engineering, Ankara, Turkey*

Article Info

Research article
Received: 05/02/2025
Revision: 11/04/2025
Accepted: 28/04/2025

Keywords

CNC Router
Machining
Deep Learning
Chatter
Cutting Parameters

Makale Bilgisi

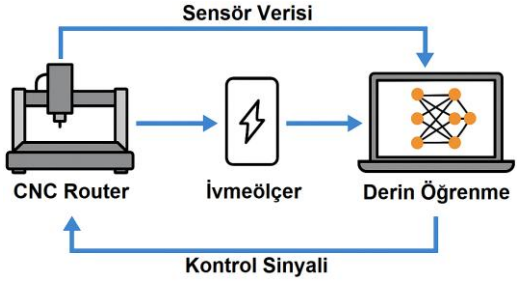
Araştırma makalesi
Başvuru: 05/02/2025
Düzeltme: 11/04/2025
Kabul: 28/04/2025

Anahtar Kelimeler

CNC Router
İşleme
Derin Öğrenme
Tırlama
Kesme Parametreleri

Grafik Özet (Graphical/Tabular Abstract)

Bu çalışma, donanım değişiklikleri ve derin öğrenme algoritmalarını entegre ederek titreşim tabanlı kesme parametresi optimizasyonunu gerçekleştiren, operatör müdahalesinden bağımsız akıllı CNC router tasarımı ve montajını sunmaktadır. / This study presents the design and assembly of an intelligent CNC router capable of real-time vibration-based optimization of cutting parameters, integrating deep learning algorithms for adaptive, operator-independent manufacturing.



Şekil A: *Sistem tasarım diyagramı/**Figure A**: System design diagram*

Önemli noktalar (Highlights)

- *Kesme parametrelerinin titreşim bazlı gerçek zamanlı optimizasyonu. / Real-time vibration-based optimization of cutting parameters.*
- *CNN-LSTM derin öğrenme modelinin CNC kontrol sistemine entegrasyonu. / Integration of a CNN-LSTM deep learning model into the CNC control system.*
- *Değişken devirli fener mili, yeni kontrol kartı ve ivmeölçer sensör arayüzü gibi donanım yükseltmeleri. / Hardware upgrades: variable-speed spindle, new control board, and accelerometer sensor interface.*
- *C# arayüz ve TCP/IP haberleşme ile operatör müdahalesinden bağımsız uyarlanabilir karar mekanizması. / Operator-independent adaptive decision-making via C# interface and TCP/IP communication.XXX*
- *Uzun süreli operasyonlarda sistem stabilitesinin ve model dayanıklılığının korunduğu kanıtlanmıştır. / System stability and model robustness were demonstrated over extended operations.*

Amaç (Aim): *Derin öğrenme kullanarak gerçek zamanlı titreşim ve kalite geri bildirimi temelinde kesme parametrelerini dinamik olarak optimize eden akıllı bir CNC router sistemi tasarlamak ve monte etmek/ To design and assemble a smart CNC router system that dynamically optimizes cutting parameters based on real-time vibration and quality feedback using deep learning.*

Özgünlük (Originality): *Çalışmanın özgünlüğü, donanım değişikliklerini operatör müdahalesi olmadan parametre optimizasyonu sağlayan CNN-LSTM modeli ile kesintisiz şekilde birleştirmesinde yatmaktadır/ The originality of this work lies in its seamless integration of hardware modifications with a CNN-LSTM model for on-the-fly parameter optimization without operator intervention.*

Bulgular (Results): *Elde edilen CNC router, kesme parametrelerini otonom ve gerçek zamanda ayarlayarak uyarlanabilir performans sergilemiş ve imalat verimliliği ile kalitesinde artış potansiyeli göstermiştir. / The resulting CNC router exhibited adaptive performance by adjusting cutting parameters autonomously and in real time, demonstrating the potential for increased manufacturing efficiency and quality.*

Sonuç (Conclusion): *Uzun süreli operasyonlarda sistem stabilitesinin ve model dayanıklılığının korunduğu kanıtlanmıştır. / This intelligent CNC router framework demonstrates a viable pathway towards fully autonomous, quality-assured manufacturing processes.*

*Corresponding author, e-mail: duygugurkan@gazi.edu.tr
DOI: 10.29109/gujsc.1633204

GU J Sci, Part C, 13(2): 462-470 (2025)

Gazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Dergisi
PART C: TASARIM VE TEKNOLOJİ

Gazi University
Journal of Science
PART C: DESIGN AND TECHNOLOGY

http://dergipark.gov.tr/gujsc

Titreşim Optimizasyonu için Akıllı Cnc Router Sistem Tasarımı

Duygu GÜRKAN[1*], Ahmet MAVİ[1], İhsan KORKUT[1]

[1]*Gazi University, Faculty of Technology, Department of Manufacturing Engineering, Ankara, Turkey*

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 05/02/2025
Düzeltme: 11/04/2025
Kabul: 28/04/2025

Anahtar Kelimeler

CNC Router
İşleme
Derin Öğrenme
Tırlama
Kesme Parametreleri

Öz

Dünyada dijital teknolojiler ile ivmelenen Endüstri 4.0, geleneksel üretim sistemlerine entegre edilerek, üretim sektörünü önemli boyutta dönüştürmekte ve mevcut endüstriyel süreçlerin dijitalleştirilmesini amaçlamaktadır. Bu dijitalleştirme, insan hatası faktörüne bağlı olmayan, akıllı ve kendisini uyarlayan, kalitesi ve verimi daha yüksek, daha hızlı bir imalat sanayinin en büyük adımı olmaktadır. Bu çalışmada, olması gereken titreşim seviyesi ve istenilen kaliteye göre kesme parametrelerini optimize edebilen akıllı bir CNC Router tasarımı ve montajı yapılmıştır. CNC Router'ın kesme parametrelerini tahmin etmesi ve gerçek zamanlı olarak güncellemesi için Stepcraft CNC Router'a ait makine kontrol kartı, sürücüleri, fener mili, güç kaynağı değiştirilmiştir. Ayrıca veri toplama ve kesme parametrelerine müdahale edebilmek için ara yüz tasarımı gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak, kesme parametrelerini olması gereken titreşim seviyesi ve beklenilen kaliteye göre tahmin edebilen, operatör müdahalesi olmadan gerçek zamanlı olarak operasyon sürecine karar verebilen ve kendini uyarlayan özgün bir CNC Router elde edilmiştir.

Smart Cnc Router System Desıgn for Vibration Optimization

Article Info

Research article
Received: 05/02/2025
Revision: 11/04/2025
Accepted: 28/04/2025

Keywords

CNC Router
Machining
Deep Learning
Chatter
Cutting Parameters

Abstract

Accelerating with digital technologies in the world, Industry 4.0 is integrating into traditional production systems, transforming the production sector to a significant extent and aims to digitalize existing industrial processes. This digitalization is the biggest step of a manufacturing industry that is not dependent on human error, is smart and adaptable, has higher quality and efficiency, and is faster. In this study, a smart CNC Router that can optimize cutting parameters according to the required vibration level and quality was designed and assembled. In order for the CNC Router to estimate the cutting parameters and update them in real time, the machine control card, drivers, spindle, and power supply belonging to Stepcraft were changed. In addition, an interface design was carried out. As a result, an original CNC Router that can estimate the cutting parameters according to the required vibration level and expected quality, decide on the operation process in real time without operator intervention and adapt itself was obtained.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Endüstri 4.0, değer yaratma ekonomisini ve imalat endüstrisini geliştirmekte; üretim süreçleri, daha yüksek üretim verimliliği, daha iyi ürün kalitesi ve daha fazla müşteri memnuniyeti gerektirmektedir. İmalat sektöründe beklentiler artmışken, sürecin genel kalitesini korumak ve iyileştirmek de hayati önem taşımaktadır. Yazılım paketlerinin, gelişmiş istatistiksel süreç kontrolü ve büyük veri analitiği ile entegrasyonu bu iyileştirmeyi sağlamaktadır. Dijitalleşmedeki hızlı ilerleme, Nesnelerin İnterneti (IoT), yapay zeka (AI) ve daha pek çok yenilik ile Endüstri 4.0; tüm üretim sistemini etkilemiş ve imalatta "akıllı üretim" terimini ortaya çıkarmıştır. Akıllı üretim sistemi (AÜS), sensörler, bilgi işlem platformları, iletişim teknolojileri, simülasyon ve tahmine dayalı, gerçek zamanlı olarak yanıt veren, mühendislik ile entegre olan yeni bir üretim şeklidir [1-4]. Günümüzün imalat makineleri giderek daha karmaşık, daha hızlı ve özel hale gelmektedir, bu da daha yüksek maliyetlere ve enerji tüketimine yol açmaktadır [5]. Talaşlı imalat sektörü toplam enerjinin %30'undan, takım tezgahları ise imalat sanayisinde tüketilen enerjinin %74,7'sinden sorumludur [6]. İmalat endüstrisinin rekabet gücünü arttıran takım tezgahlarından olan Bilgisayarlı Sayısal Kontrol (CNC) otomotiv, havacılık ve savunma sanayi gibi çeşitli imalat endüstrilerinde yaygın olarak kullanılmaktadır [7]. CNC ile üretilen parçaların yüzey pürüzlüğü ve boyutsal toleransı,

*Corresponding author, e-mail: duygugurkan@gazi.edu.tr
DOI: 10.29109/gujsc.1633204

parça ömürleri ve çalışma veriminde önemli etkiye sahiptir [8]. Deneme-yanılma yöntemiyle en iyi parametrelerin bir kombinasyonunu elde etmek oldukça maliyetlidir ve daha fazla malzeme tüketilmesine neden olmaktadır [9]. Operatör deneyimleri yerine daha önceden elde edilen verileri kullanan akıllı üretim, endüstriyi daha verimli, karlı ve sürdürülebilir hale getirmektedir. Ayrıca CNClerde makine durumunun izlenmesi için çok yönlü, uyarlanabilir ve uygun maliyetli tekniklere ihtiyaç duyulmaktadır [10]. Akıllı üretim ve makine öğrenmesi, bu karmaşıklıkların önüne geçmek, üretim sürecini önceden tasarlamak, geliştirmek, optimize etmek ve üretim verimliliğini arttırmak için dijital olanaklar sağlamaktadır [11]. Söz konusu yeni sistem ve teknikler, kapsamlı bir enerji bilincine sahip ürün tasarımı yapılmasına, makine verimliliğinin iyileştirilmesine ve üretimin arttırılmasına yardımcı olacaktır [11-12]. Makine öğrenmesi yolu ile takım tezgahlarında yapılan iyileştirmeler, endüstrinin sürdürülebilir kalkınmayı gerçekleştirmesi için önemli bir enerji tasarrufu potansiyeline sahiptir [13-14]. Akıllı üretim, üretimin gelecekteki durumunu ifade etmekte, enerji ve malzeme kullanımını en aza indirerek operasyonların tüm yönlerinde dikkate değer iyileştirmeler sağlamaktadır [10].

Akıllı üretimin büyük bir parçası olan makine öğrenimi, bilgisayarlara deneyimlere dayalı modelleme ve gelecekteki olayları doğru bir şekilde tahmin etme konusunda yardımcı olan önemli bir yapay zeka araştırma alanıdır [15]. Makine öğrenimi yöntemlerinin ortaya çıkmasıyla birlikte üretim sistemleri gerçek zamanlı iletişim ve işbirliği yoluyla fiziksel süreçleri izleyebilmektedir. Makine öğrenmesi, imalat endüstrisinde ekipman arıza süresinin azaltılmasına, üretim hatalarının tespit edilmesine, tedarik zincirinin iyileştirilmesine ve tasarım sürelerinin kısaltılmasına olanak tanımaktadır [16]. Son birkaç yılda şirketlerdeki dijitalleşme, üretimden elde edilen veri miktarında artış sağlamıştır. Modern ve hızlı veri toplama sistemleri, yeni verilerin daha yüksek boyutlarda alınmasına yardımcı olmaktadır. Kaydedilen veriler, süreç analizi, üretkenliği artırmak ve ürün kalitesini tahmin etmek için kullanılabilecek yüksek düzeyde bilgi içermektedir. Yüksek bilgi işlem gücü, gerçek dünya uygulama senaryolarını uygun şekilde temsil etmek için daha büyük hacimli verilere sahip karmaşık modellerin verimli bir şekilde eğitilmesini sağlamaktadır. Özellikle takım tezgahlarına, Makine Öğrenimi yöntemlerinin uygulanması için gereken büyük miktarda veriyi sağlamak üzere birçok donanım eklenmektedir. Makine öğrenmesi CNC işleme teknolojisi ile hızlı bir şekilde entegre olmakta ve imalatta makine öğrenmesi tabanlı birçok çalışma rapor edilmektedir [17-20].

Çalışmalar talaşlı imalatta ve CNC'de genellikle arıza tespiti [12,21-23], kestirimci bakım [8,24], enerji tüketim tahmini [25-27] ve takım aşınması tahmini [11, 28-32] üzerine odaklanmıştır. Takım aşınması genellikle titreşim [33-34] ve kesme parametreleri [35] ile ilişkilendirilmiştir. Ragai ve arkadaşları, frezeleme operasyonunda kesme parametrelerinin takım titreşimi, akustik sinyaller ve güç tüketimi ile ilişkisini araştırmak için tam faktöriyel deney tasarımı yapmışlardır. Ortalama güç tüketiminin iki kesme parametresi ile de orantılı olarak değiştiği gözlemlenirken, ilerleme hızındaki değişimin güç ortalama değeri üzerinde daha yüksek bir etkisinin bulunduğu belirlenmiştir [36]. Guo ve arkadaşları, frezeleme operasyonunda kesme kuvveti ve titreşimi esas alarak MPAN algoritması ile takım aşınmasını tahmin etmeye çalışmışlardır. Yöntemin etkinliği ve uygulanabilirliği, yüksek hızlı frezeleme deneyleri ile doğrulanmıştır [37].

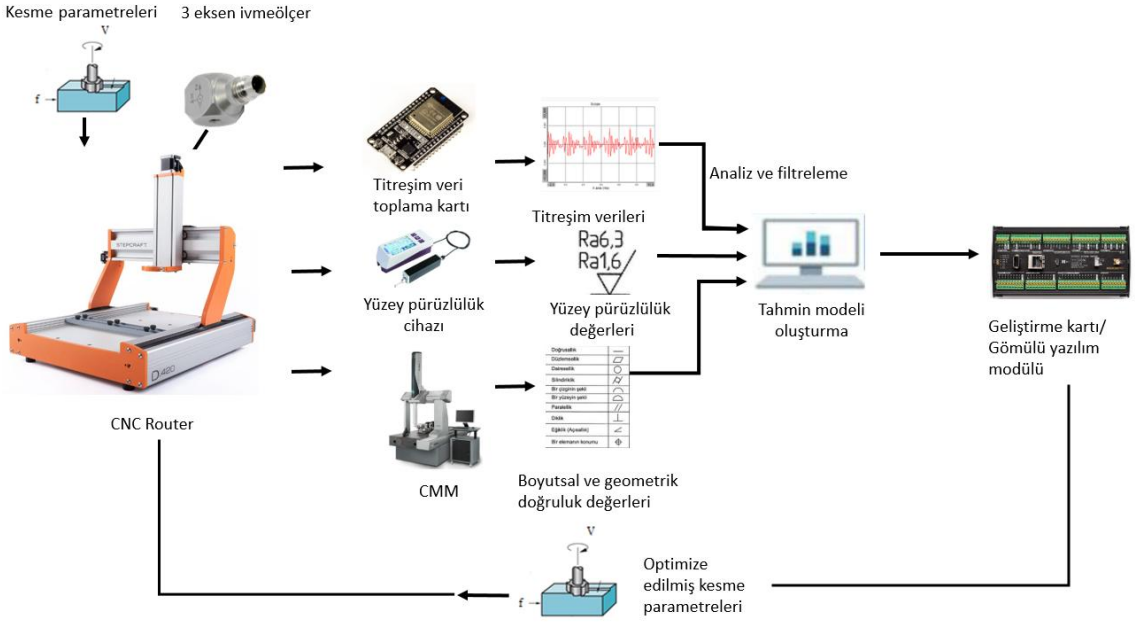
Literatür incelendiğinde, Endüstri 4.0'da sensör tabanlı veri toplamanın artmasına ve algoritmalar ile tahmin modellerinin geliştirilmesine rağmen, bu tahmin modellerinin makine öğrenmesi ile talaşlı imalat operasyonlarına gerçek zamanlı olarak entegre edilmesi henüz kısıtlıdır. Bu çalışmada, frezeleme operasyonunda kesme parametrelerinin titreşime, yüzey pürüzlülüğüne ve boyutsal doğruluğa olan etkisinin makine öğrenmesi algoritmaları ile "gerçek zamanlı" optimizasyonunu gerçekleştirebilecek özgün bir CNC Router tasarımı ve montajı gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, titreşim verilerini toplamak, makineye gerçek zamanlı olarak müdahale edebilmek için bir ara yüz tasarımı yapılmıştır. CNC Routerın eş zamanlı olarak titreşim tabanlı veri alıp göndermesi, kullanıcı müdahalesi olmadan makine öğrenimi destekli dinamik kesme parametresi optimizasyonu ve güncellemesi çalışmanın özgün yönünü oluşturmaktadır. Çalışma, Endüstri 4.0'ın temel bileşenlerini, yani gerçek zamanlı veri toplama, otomatik karar verme, ve kendini uyarlayabilme yeteneklerini bir araya getirmektedir. CNC Router'da yapılan donanımsal değişiklikler ve eklenen haberleşme sistemi, Endüstri 4.0'ın akıllı üretim hedeflerine uygun şekilde, geleneksel CNC Router'lara bir yenilik olarak kazandırılmıştır. Bu özellikler, CNC Router'da daha verimli ve kaliteli üretim yapılmasını sağlamaktadır. Söz konusu yönleriyle makale, CNC Router'lar için ileri seviye makine öğrenimi tabanlı bir optimizasyon sistemi sunarak literatüre özgün bir katkı sunmaktadır.

2. TASARIM VE MONTAJ (DESIGN AND ASSEMBLY)

CNC Router'ın veri toplaması ve titreşim seviyesine göre gerçek zamanlı olarak kesme parametrelerini optimize edebilmesi için Router üzerindeki cihaz ve bağlantılar tekrar düzenlenmiştir.

CNC Routerda üretici firmaya ait makine kontrol kartı bulunmaktadır. Ayrıca fener mili tek devirde dönmektedir. Deneylerin yapılabilmesi için kart, karta ait yazılım ve farklı devirlerde dönebilen fener miline ihtiyaç bulunmaktadır. Bu nedenle fener mili ve kontrol kartı değiştirilmiştir.

Sonraki aşamalarda farklı kesme şartlarında 600 deney yapılacaktır. Deneyler sırasında tezgaha montajı yapılan ivme ölçer ile tırlama verileri alınacak ve kaydedilecektir. Deney numunelerinin yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı ile yüzey kalitesi, CMM ile de boyutsal ve geometrik doğrulukları belirlenecektir. Ölçüm sonuçları tırlama verileri ile beraber tahmin modelini oluşturmak üzere kullanılacaktır. Veri seti kesme parametreleri, titreşim, yüzey pürüzlülük ve boyutsal doğruluk verilerinden oluşacaktır. Şekil 1'de sisteme ait şematik diyagram, Şekil 2'de deney düzeneği için yapılan değişiklikler görülmektedir.



Şekil 1. Sistem genel tasarımı (System design)



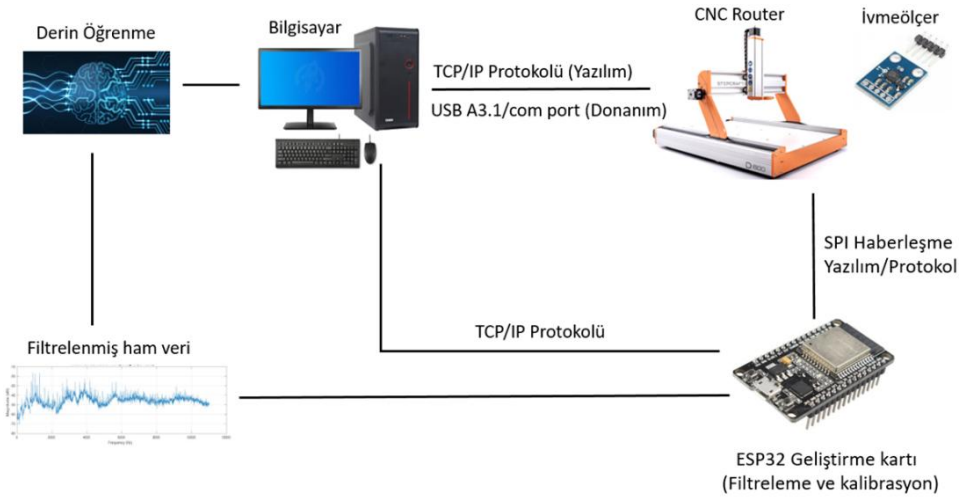
Şekil 2. Deney düzeneği için yapılan değişiklikler a. Routera ait önceki fener mili b. Değişken devirli fener mili c. Yeni tasarlanan pano ve değişen ekipmanlar (Changes made for the experimental setup a. Previous spindle of the router b. Variable speed spindle c. Newly designed panel and changed equipment)

Deneylerde titreşim verilerini almak amacı kullanılacak 3 eksen ivmeölçerin bilgisayara bağlantısı geliştirme kartı ile gerçekleştirilmiştir. Geliştirme kartları dijital verilerin toplanması,

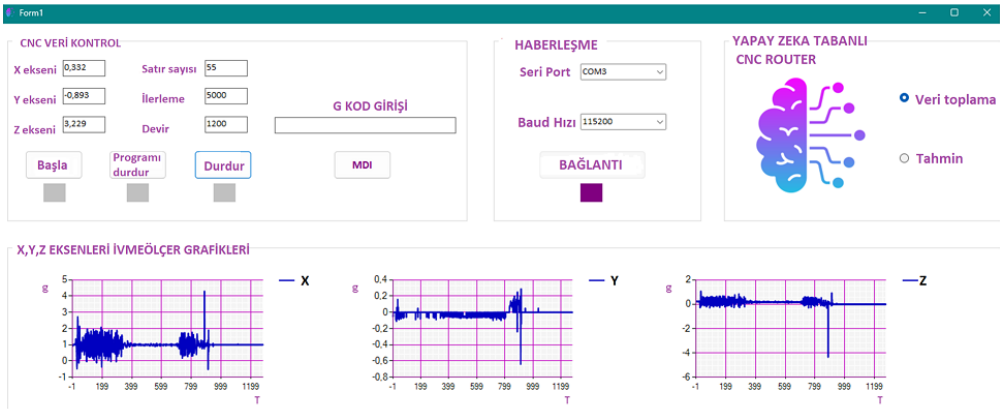
hesap kodlarının ve ara kodların işlenmesi vb. ön işlemleri yapmak için kullanılmaktadır. Ayrıca ana bilgisayarın çalışma performansını da arttırmakta, bilgisayar ile sensörün bağlantısını donanımsal olarak kolaylaştırmaktadır. İvmeölçer ve geliştirme kartı arasındaki haberleşme, SPI haberleşme protokolü ile sağlanmaktadır. CNC Router ve geliştirme kartının bilgisayara bağlantısında ise TCP/IP protokolleri kullanılmaktadır. Geliştirme kartındaki veri, kartın USB-Seri dönüştürücüsü aracılığıyla bilgisayara USB bağlantısı üzerinden iletilmektedir. Bilgisayar tarafında uygun bir seri iletişim yazılımı, USB-Seri dönüştürücü aracılığıyla gelen verileri almakta ve geliştirme kartına veri göndermek için gerekli komutları iletmektedir. Bu şekilde, geliştirme kartı üzerindeki sensör verileri bilgisayara USB bağlantısı aracılığıyla aktarılmakta ve uygun yazılım kullanılarak bu veriler gözlemlenmekte ve işlenebilmektedir. Şekil 3'te sistem tasarımı diyagramı gösterilmiştir.

3. VERİ TOPLAMA VE GERÇEK ZAMANLI MÜDAHALE İÇİN ARA YÜZ TASARIMI (INTERFACE DESIGN FOR DATA COLLECTION AND REAL-TIME INTERVENTION)

Makine Öğrenimi deneylerinde kullanılmak üzere gerçek zamanlı müdahale için ara yüz tasarlanmıştır. Tasarım C# Form ortamında gerçekleştirilmiştir. Aynı zamanda veriler bu ara yüz ile kaydedilmekte, X, Y,Z koordinatları, ilerleme, kesme hızı gibi parametreler bu ara yüz yardımıyla kontrol edilmektedir. İlk olarak haberleşme için seri port com 5 seçilir ve baudrate belirlenir. "COM5", bilgisayardaki belirli bir seri portun adını, baudrate bir saniyede iletilen sembol veya sinyal değişikliklerinin sayısını belirtir. 'Başla' operasyonu başlatmak, 'durdur' operasyonu durdurmak, 'programı durdur' operasyonu durdurmadan takımı durdurmak için kullanılır. Tasarlanan ara yüz ile birlikte doğru veri alış verişi sağlanabilmektedir. (Şekil 4)



Şekil 3. Kesme parametrelerini gerçek zamanlı olarak tahmin ve optimize edebilen haberleşme sistemi tasarımı (Communication system design that can estimate and optimize cutting parameters in real time)



Şekil 4. Ara yüz tasarımı (Interface design)

Gerekli modernizasyonu tamamlanmış CNC Router, C# Form uygulamasında yazılmış ara yüz üzerinden kontrol edilebilmekte, konum ve G-kod satır bilgilerini çekebilmektedir. Ara yüz, Mach3

CNC kontrol kartına OEM kodları ile bağlanarak CNC Router'ın kontrolünü sağlamaktadır (Şekil 4). Ara yüz ve kontrol yazılımındaki Veri Toplama Modu, verileri işleyip deneylerden önce manuel olarak veri seti oluşturulmasını sağlar. Ayrıca ara yüz üzerinde "Başla" butonuna basılır basılmaz arka planda ön işleme ve veri oluşturma prosesleri otomatik olarak başlatılmaktadır. Tahmin modu ise seçili iken arka planda Python uygulaması açılmakta ve tahmin sonuçlarını belirlenen bir klasöre kaydetmektedir. Elde edilen tahmin sonuçlarına göre operatörden bağımsız olarak parametrelere müdahale edebilmektedir. Arayüz Kontrol yazılımı her 10ms de bir bu klasördeki güncel tarihli sonuçları çekmektedir. Ayna Fener mili devir ve ilerleme hızı parametrelerini bu tahmine göre değiştirmektedir. Ara yüz yazılımı, fener mili devir sayısı ve ilerleme hızını anlık olarak ara yüz üzerinde göstermekte ve değiştirebilmektedir. Kalibrasyon ve filtre kodları (Şekil 5) geliştirme kartı içine kodlanmış ivme ölçer sensöründen anlık gelen veriler ile Mach3 CNC kontrol kartından gelen kesme hızı ve ilerleme verileri zamana bağlı olarak .CSV formatında bilgisayarda belirlenen bir klasöre kaydedilir. (Şekil 6a ve Şekil 6b). Aynı zamanda değişen kesme parametreleri ile üretilen numunelerin yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı ile yüzey kalitesi, CMM ile de boyutsal ve geometrik doğrulukları sınıflandırılarak yazılım tarafından oluşturulan .CSV formatındaki dosyalara eklenmektedir.

XYZaccel.ino

```
#include <Adafruit_MPU6050.h>
#include <Adafruit_Sensor.h>
#include <Wire.h>

Adafruit_MPU6050 mpu;
float accelX_offset = 0.4355;
float accelY_offset = -0.2765;
float accelZ_offset = 0.3735;

void setup() {
  Serial.begin(115200);

  if (!mpu.begin()) {
    Serial.println("MPU6050 sensörü bulunamadı!");
    while (1);
  }

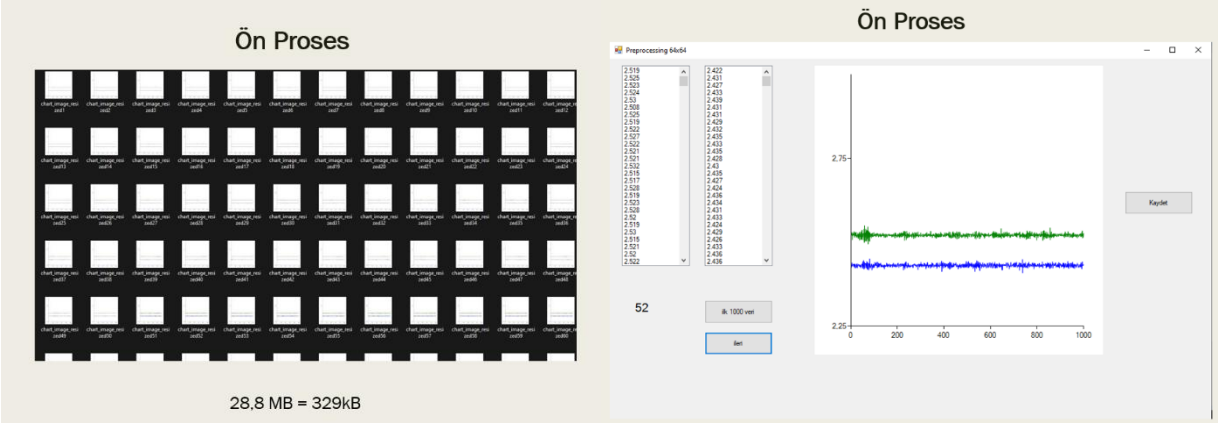
  mpu.setAccelerometerRange(MPU6050_RANGE_16_G);
  // Kalibrasyon adımı
}

void loop() {
  sensors_event_t accelEvent, gyroEvent, tempEvent;
  mpu.getEvent(&accelEvent, &gyroEvent, &tempEvent);

  float accelX_g = ((accelEvent.acceleration.x - accelX_offset) / 9.81);
  float accelY_g = ((accelEvent.acceleration.y - accelY_offset) / 9.81);
  float accelZ_g = ((accelEvent.acceleration.z - accelZ_offset) / 9.81);

  // Değerleri filtrele
  if (accelX_g >= 0.97 && accelX_g <= 1.03) {
    accelX_g = 1.0;
  }
  if (accelY_g >= -0.05 && accelY_g <= 0.05) {
    accelY_g = 0.0;
  }
  if (accelZ_g >= -0.05 && accelZ_g <= 0.05) {
    accelZ_g = 0.0;
  }
```

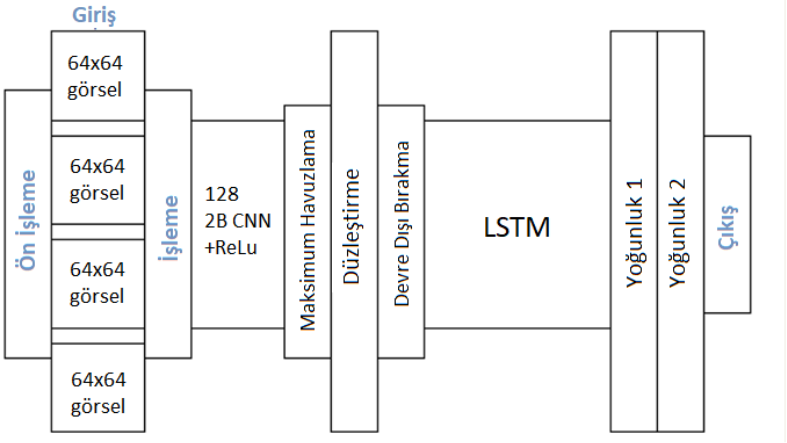
Şekil 5. İvmeölçer kalibrasyon ve filtreleme kodları (Accelerometer calibration and filtering codes)



Şekil 6a. Ön Proses verileri, b.ön proses ara yüzü (Pre-Process data, b.pre-process interface)

Parça işleme esnasında sekans veriler sayılmakta ve her 1000 veride bir ön işleme tabi tutulmaktadır. Ön proses verileri, bilgisayar içerisinde istenilen bir klasöre 64x64 piksel görüntü formatı ile sırası ile

kaydedilmektedir. Bu özgün yöntem ile yüksek boyutlu verilerin boyutu küçültülerek anlık veri işlemede hız ihtiyacının karşılanması sağlanmış ve verilerin optimizasyonunda kullanılacak olan CNN-LSTM mimarisi (Şekil 7) içerisinde işlenebilmesi hedeflenmiştir. Kaydedilen 64x64 piksel veri setleri arka planda tahmin mimari içerisinde işletilmektedir. Alınan titreşim verileri model eğitimi öncesi filtrelenecek ve gürültü azaltılacaktır. Verilerin %70'i eğitim, %15'i doğrulama, %15'i test için kullanılacaktır.



Şekil 7. Tahmin modelinde kullanılan CNN-LSTM yapısı (CNN-LSTM structure used in the prediction model)

İvmeölçer gibi zamana dayalı sinyal verileri üreten sensörlere dayalı tahmin modellerinde genellikle CNN-LSTM, CNN-RNN ve CNN-GRU hibrit mimarileri kullanılmaktadır [38-42]. Modelin girişine 64x64 piksel boyutlarında bir dizi görüntü verilir. Bu görüntüler, belirli bir süreçten veya ardışık görüntülerden oluşabilir. Giriş verileri, modelin daha verimli öğrenmesi için çeşitli ön işleme adımlarından geçebilir. Bu aşama genellikle gürültü azaltma, normalizasyon gibi adımları içermektedir. 2B CNN + ReLU aşamasında, 2 boyutlu bir Convolutional Neural Network (CNN) katmanı kullanılarak görüntülerdeki temel özellikler çıkarılır. CNN katmanı, görüntüdeki kenarlar, dokular ve diğer düşük seviyeli özellikleri öğrenir. ReLU (Rectified Linear Unit) aktivasyon fonksiyonu ise nonlineerlik ekler ve modelin daha karmaşık özellikleri öğrenmesine olanak tanır. Bu fonksiyon, negatif değerlerin sıfırlanmasını sağlar ve modelin daha hızlı öğrenmesini destekler. Bu örnekte 128 filtre kullanılmıştır. CNN katmanından sonra, boyutları küçültmek ve modelin hesaplama yükünü azaltmak için Maksimum Havuzlama uygulanır. Bu katman, her bir özellik haritasının belirli bir bölgesindeki maksimum değeri alır, böylece boyut küçültülürken önemli özellikler korunur. Düzleştirme aşamasında 2D özellik haritalarını tek boyutlu bir dizi haline getirerek LSTM katmanına hazırlık yapılır. Aşırı öğrenmeyi (overfitting) azaltmak için, bazı nöronların rastgele devre dışı bırakılır. LSTM katmanı, ardışık görüntüler arasındaki zamansal ilişkileri öğrenir. LSTM katmanı, uzun süreli bağımlılıkları öğrenebildiği için ardışık görüntülerdeki zamansal bilgiyi analiz eder ve çıkarır. LSTM katmanından gelen veriler, son katmanlar olan Yoğunluk katmanlarına aktarılır. Bu katmanlar, modelin çıktı sınıflarını veya tahmin edilen değerleri üretmesi için son hesaplamaları yapar. Son olarak, model belirli bir çıktıyı üretmektedir.

CNN-LSTM hibrit mimarisi, görüntüler arasındaki zamansal bilgiyi birlikte analiz ederek daha doğru tahminlerde bulunabilmek için geliştirilmiştir. CNN, görsel özellikleri çıkarırken, LSTM bu özelliklerin ardışıklığındaki zamansal bağımlılıkları öğrenmektedir.

Uzun vadede daha iyi öğrenme, daha az gradyan kaybı, daha esnek bellek yönetimi gibi avantajları nedeni ile LSTM (Long-Short Term Memory) tercih edilmiştir. Donanımsal ve yazılımsal olarak veri toplama ve anlık müdahaleye uygun hale getirilen CNC Router üzerinde farklı kesme parametreleri ile cep boşaltma operasyonu yapılacaktır. Kesme parametrelerinin titreşim, geometrik tolerans ve yüzey pürüzlülüğüne olan etkisi CNN-LSTM hibrit mimarisi ile modellenerek CNC Router'a entegre edilecektir.

4. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışmada, kesme parametrelerini titreşim seviyesine ve hedef kaliteye göre optimize eden bir akıllı sistem tasarımı ve montajı yapılmıştır. Bu doğrultuda Stepcraft'a ait bir CNC Router'ın donanımında değişiklikler yapılmış ve kesme parametrelerinin tahmin edilmesi, güncellenmesi için geliştirme kartları ve sensörler eklenmiştir.

CNC Router üzerinde yapılan fener mili ve kontrol kartı değişiklikleri, makinenin farklı devirlerde çalışabilmesini ve kesme hızını optimize edebilmesini sağlamıştır. Ayrıca, 3 eksenli ivmeölçer ve geliştirme kartı eklenerek, CNC Router'ın titreşim verilerini toplama yeteneği artırılmıştır. Bu eklemeler, sistemin titreşim seviyelerini gerçek zamanlı olarak izleyebilmesini ve kesme işlemi sırasında parametrelerin otomatik olarak optimize edilmesini mümkün kılmıştır. TCP/IP protokolü ile kurulan haberleşme altyapısı ise sistemin veri aktarım hızını artırarak gerçek zamanlı işlem kabiliyetini güçlendirmiştir. Ayrıca, C# tabanlı bir arayüz oluşturulmuş, bu arayüz CNC Router'ın gerçek zamanlı kontrolünü sağlamaktadır. Bu ara yüz, CNC Router'ın hem kullanıcıdan bağımsız olarak çalışmasını hem de elde edilen verileri işleyerek kendini optimize edebilmesini sağlamıştır. Arayüz yazılımı, aynı zamanda verileri belirli bir klasöre kaydetmekte, kullanıcıya geçmiş verileri analiz etme ve süreç performansını gözlemleme imkanı tanımaktadır.

Donanımsal ve yazılımsal olarak yapılan bu iyileştirmeler, CNC Router'ın performansını artırarak üretim sürecinin verimliliğini ve ürün kalitesini önemli ölçüde yükseltecektir. Sonraki çalışmalarda, deneyler ve ölçümler gerçekleştirilecektir. Frezeleme operasyonu sonrası elden edilen ürünlerin istenilen kalitede olması ve kalitede sürekliliğinin sağlanması için veriler üzerinden makine öğrenimi algoritmaları kullanılarak bir tahmin modeli geliştirilecektir. Oluşturulan model, CNC Router tezgahına entegre edilecek ve dinamik müdahale sistemi tamamlanacaktır.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi'ne FGA-2023-8959 numaralı projemize verdikleri destekten dolayı teşekkür ederiz. / We would like to thank Gazi University Scientific Research Projects Unit for their support to our FGA-2023-8959 project.

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)

***Duygu GÜRKAN*:** Tasarımı ve montajı yapmış, maklenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

She designed and assembled and performed the writing process.

***Ahmet MAVİ*:** Tasarım ve montajı yapmış, sonuçlarını analiz etmiştir.

He designed, assembled and analyzed the results

***İhsan KORKUT*:** Sonuçlarını analiz etmiştir.

He analyzed the results.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

There is no conflict of interest in this study.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

[1] A. G. Frank, L. S. Dalenogare, N. F Ayala, Industry 4.0 technologies: Implementation patterns in manufacturing companies. International Journal of Production Economics, 210 (2019) 15-26.

[2] X. Zhang, X. Ming, Z. Liu, D. Yin, Z. Chen, Y. Chang A reference framework and overall planning of industrial artificial intelligence (I-AI) for new application scenarios", The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 101(9), (2019) 2367-2389.

[3] M. Ammar, A. Haleem, M. Javaid, S. Bahl, A. S. Verma, Implementing Industry 4.0 technologies in self-healing materials and digitally managing the quality of manufacturing. Materials Today: Proceedings, 52 (2022) 2285-2294.

[4] Y. Cui, S. Kara, K. C. Chan, Manufacturing big data ecosystem: A systematic literature review. Robotics and computer-integrated Manufacturing, 62 (2020) 101861.

[5] S. Yağmur, AISI 1050 çeliğinin tornalanmasında minimum miktarda yağlamanın (MMY) kesme kuvvetleri ve yüzey pürüzlüğü üzerindeki etkisinin araştırılması. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım Ve Teknoloji, 11(4) (2023) 1024-1034.

[6] A. Giampieri, J. Ling-Chin, Z. Ma, A. Smallbone, Roskilly, A. P.. A review of the current automotive manufacturing practice from an energy perspective, Applied Energy, 261 (2020) 114074.

[7] Z. You, H. Gao, L. Guo, Y. Liu, J. Li, C. Li,. ”Machine vision based adaptive online condition monitoring for milling cutter under spindle rotation”, Mechanical Systems and Signal Processing, 171 (2022) 108904.
[8] B. S. Bayram, İ. Korkut, Parmak Frezelerde Kesme Kuvvetlerinin Modellenmesi. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım Ve Teknoloji, 10(4) (2022) 964-977.
[9] T. Debroy, W. Zhang, J. Turner, S. S. Babu, Building digital twins of 3D printing machines. Scripta Materialia, 135 (2017) 119-124.
[10] A. Kusiak, Smart manufacturing. International Journal of Production Research, 56(1-2) (2018) 508-517.
[11] J. Wang, Y. Ma, L. Zhang, R. X. Gao, D. Wu, Deep learning for smart manufacturing: Methods and applications. Journal of manufacturing systems, 48 (2018), 144-156.
[12] M. A. Tnani, M. Feil, K. Diepold, Smart Data Collection System for Brownfield CNC Milling Machines: A New Benchmark Dataset for Data-Driven Machine Monitoring. Procedia CIRP, 107 (2022) 131-136.
[13] W. Cai, F. Liu, H. Zhang, P. Liu, J. Tuo, Development of dynamic energy benchmark for mass production in machining systems for energy management and energy-efficiency improvement, Applied Energy, 202 (2017) 715-725.
[14] W. Cai, C. Liu, K. H. Lai, L. Li, J. Cunha, L. Hu, Energy performance certification in mechanical manufacturing industry: A review and analysis, Energy Conversion and Management, 186 (2019) 415-432.
[15] A. Dogan, D. Birant, Machine learning and data mining in manufacturing. Expert Systems with Applications, 166 (2021) 114060.
[16] E. Traini, G. Bruno, G. D’antonio, F. Lombardi, Machine learning framework for predictive maintenance in milling. IFAC-PapersOnLine, 52(13) (2019) 177-182.
[17] A. Aslan, Machine learning models and machinability analysis for comparison of various cooling and lubricating mediums during milling of Hardox 400 steel. Tribology International, 198 (2024) 109860.
[18] R. Teimouri, M. Grabowski. Effect of ultrasonic vibration on fatigue life of Inconel 718 machined by high-speed milling: Physics-enhanced machine learning approach. Mechanical Systems and Signal Processing, 224 (2025) 112115.
[19] H. K. Elminir, , M. A. El-Brawany, D. A. Ibrahim, H. M. Elattar, E. A.Ramadan, An efficient deep learning prognostic model for remaining useful life estimation of high speed CNC milling machine cutters. Results in Engineering, 24 (2024) 103420.
[20] V. H. Nguyen, T. T. Le, A. T. Nguyen, X. T. Hoang, N. T. Nguyen, N. K. Nguyen, Optimization of milling conditions for AISI 4140 steel using an integrated machine learning-multi objective optimization-multi criteria decision making framework. Measurement, 242 (2025) 115837.
[21] Y. Li, Y. Zeng, Y. Qing, G. B. Huang, Learning local discriminative representations via extreme learning machine for machine fault diagnosis. Neurocomputing, 409 (2020) 275-285.
[22] Y. Lei, B.Yang, X. Jiang, F. Jia, N. Li, A. K. Nandi, Applications of machine learning to machine fault diagnosis: A review and roadmap. Mechanical Systems and Signal Processing, 138 (2020) 106587
[23] Y. Yang, M. Huang, Z. Y. Wang, Q. B. Zhu, Robust scheduling based on extreme learning machine for bi-objective flexible job-shop problems with machine breakdowns. Expert Systems with Applications, 158 (2020) 113545.
[24] A. S. Roque, V. W. Krebs, I. C. Figueiro, N. Jazdi, An analysis of machine learning algorithms in rotating machines maintenance. IFAC-PapersOnLine, 55(2) (2022) 252-257.
[25] B. Dietrich, J. Walther, M. Weigold, E. Abele, Machine learning based very short term load forecasting of machine tools”, Applied Energy, 276 (2020) 115440.
[26] Y. He, P. Wu, Y. Li, Y. Wang, F. Tao, Y. Wang, A generic energy prediction model of machine tools using deep learning algorithms, Applied Energy, 275 (2020) 115402.
[27] M. Brillinger, M. Wuwer, M. A. Hadi, F. Haas, Energy prediction for CNC machining with machine learning, CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 35 (2021) 715-723.
[28] T. Mikołajczyk, K. Nowicki, A. Bustillo, D. Y. Pimenov, Predicting tool life in turning operations using neural networks and image processing, Mechanical systems and signal processing, 104 (2018), 503-513.
[29] T. Mikołajczyk, K. Nowicki, A. Kłodowski, D. Y. Pimenov, 2017 Neural network approach for automatic image analysis of cutting edge wear”, Mechanical Systems and Signal Processing, 88, 100-110.
[30] Z. Jurkovic, G. Cukor, M. Brezocnik, T. Brajkovic, A comparison of machine learning methods for cutting parameters prediction in high speed turning process. Journal of

Intelligent Manufacturing, 29(8) (2018) 1683-1693.

[31] X. Wu, Y. Liu, , Zhou, X., Mou, A. Automatic identification of tool wear based on convolutional neural network in face milling process", Sensors, 19(18) (2019) 3817.

[32] V. Parwal, B. K. Rout, Machine learning based approach for process supervision to predict tool wear during machining. Procedia CIRP, 98 (2021) 133-138.

[33] Z. Huang, J. Zhu, J. Lei, X. Li, F. Tian, Tool wear predicting based on multi-domain feature fusion by deep convolutional neural network in milling operations. Journal of Intelligent Manufacturing, 31(4) (2020) 953-966.

[34] I. Oleaga, C. Pardo, J. J. Zulaika, A. Bustillo, A machine-learning based solution for chatter prediction in heavy-duty milling machines. Measurement, 128 (2018) 34-44.

[35] M. Kuntoğlu, A. Aslan, D. Y. Pimenov, K. Giasin, T. Mikolajczyk, S. Sharma, "Modeling of cutting parameters and tool geometry for multi-criteria optimization of surface roughness and vibration via response surface methodology in turning of AISI 5140 steel. Materials, 13(19) (2020) 4242.

[36] I. Ragai, A. S. Abdalla, H. Abdeltawab, F. Qian, J. Ma, Toward smart manufacturing: Analysis and classification of cutting parameters and energy consumption patterns in turning processes. Journal of Manufacturing Systems, 2022

[37] H. Guo, Y. Zhang, K. Zhu, Interpretable deep learning approach for tool wear monitoring in high-speed milling. Computers in Industry, 138 (2022) 103638.

[38] E. Kim, T. Bui, J. Yuan, S. C. Mouli, B. Ribeiro, R. A. Yeh, M. B. Jun, Online real-time machining chatter sound detection using convolutional neural network by adopting expert knowledge. Manufacturing Letters, 41 (2024) 1386-1397

[39] J. Xie, P. Hu, J.Chen, W. Han, R. Wang, Deep learning-based instantaneous cutting force modeling of three-axis CNC milling. International Journal of Mechanical Sciences, 246 (2023) 108153.

[40] Z. Weiguo, Z. Jichao, G. Baosu, T. Weixiang, W. Fenghe, An optimized convolutional neural network for chatter detection in the milling of thin-walled parts, Int. J. Adv. Manuf. Technol. 106 (9) (2020) 3881–3895.

[41] W. Zhang, F. Teng, J. Li, Z. Zhang, L. Niu, D. Zhang, Z. Zhang, Denoising method based on CNN-LSTM and CEEMD for LDV signals from accelerometer shock testing. Measurement, 216 (2023) 112951.

[42] J. Duan, X. Zhang, T. Shi, A hybrid attention-based paralleled deep learning model for tool wear prediction. Expert Systems with Applications, 211 (2023), 118548.

Gazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Dergisi
PART C: TASARIM VE TEKNOLOJİ

Gazi University
Journal of Science
PART C: DESIGN AND TECHNOLOGY

GU J Sci, Part C, 13(2): 471-487 (2025)

Enhancement of Microstructure Evolution and Tribological Properties of Al6063 Alloy Through Grain Refinement via ECAP Technique

Taha Alper YILMAZ[1*]

[1]*Gazi University, Vocational School of Technical Sciences, Department of Machinery and Metal Technologies, Ankara, Turkey*

Article Info

Research article
Received: 19/03/2025
Revision: 20/03/2025
Accepted: 20/04/2025

Keywords

ECAP
Al6063
TEM
Tribological Properties

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 19/03/2025
Düzeltme: 20/03/2025
Kabul: 20/04/2025

Anahtar Kelimeler

EKAP
Al6063
TEM
Tribolojik Özellikler

Graphical/Tabular Abstract (Grafik Özet)

The ECAP technique effectively refines the grain structure of Al6063 alloy, improving its hardness and tribological performance. TEM and SEM analyses revealed microstructural evolution from coarse grains to equiaxed sub-micron grains. The 8 pass sample showed the lowest wear and friction values, indicating optimum structural enhancement for industrial use. / ECAP tekniği, Al6063 alaşımının tane yapısını etkili şekilde incelterek sertlik ve tribolojik performansını artırmaktadır. TEM ve SEM analizleri, iri tanelerden eş eksenli sub-mikron tanelere yapısal evrimi göstermiştir. 8 pasoluk numune en düşük aşınma ve sürtünme değerlerini sunarak endüstriyel kullanım için en uygun yapısal gelişimi sağlamıştır.

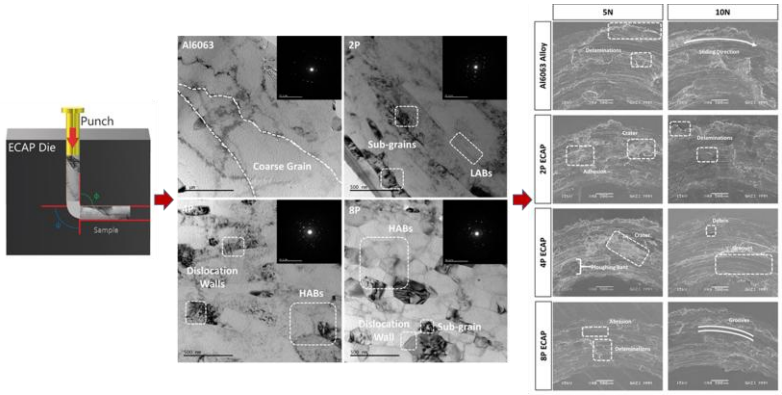


***Figure A**: ECAP prosesinde mikroyapısal ve worn surface süreci / **Şekil A:** ECAP prosesinde mikroyapısal ve worn surface süreci*

Highlights (Önemli noktalar)

- *Severe plastic deformation via ECAP was applied to Al6063 alloy at room temperature using route BC. / Al6063 alaşımına, Bc rotası kullanılarak oda sıcaklığında ECAP yöntemiyle şiddetli plastik şekil değiştirme uygulanmıştır.*
- *Microstructural evolution from coarse grains to equiaxed sub-micron/nano grains was observed with increasing ECAP passes. / Artan ECAP geçiş sayısıyla iri tanelerden eş eksenli sub-mikron/nano tanelere doğru mikro yapısal dönüşüm gözlemlenmiştir.*
- *After 8 passes, the sample showed the highest hardness (119 HV) and lowest coefficient of friction (0.398). / 8 geçiş sonrasında numune en yüksek sertlik (119 HV) ve en düşük sürtünme katsayısını (0.398) göstermiştir.*
- *ECAP significantly improved the tribological performance and wear resistance of Al6063 alloy. / ECAP işlemi, Al6063 alaşımının tribolojik performansını ve aşınma direncini önemli ölçüde artırmıştır.*

***Aim (Amaç):** This study aims to improve the microstructure and tribological properties of Al6063 alloy via ECAP at room temperature for advanced industrial applications. / Bu çalışma, Al6063 alaşımının mikro yapı ve tribolojik özelliklerini, oda sıcaklığında uygulanan ECAP ile geliştirmeyi amaçlamaktadır.*

***Originality (Özgünlük):** ECAP was applied with BC route at room temperature in 2, 4, and 8 passes. Advanced techniques such as TEM and 3D profilometry were used.. / ECAP işlemi BC rotasında ve 2, 4, 8 geçişle uygulanmış; TEM ve 3D profilometre gibi ileri teknikler kullanılmıştır.*

***Results (Bulgular):** With increasing passes, grain size decreased and hardness improved. After 8 passes, hardness reached 119 HV, and CoF dropped to 0.398. / Geçiş sayısı arttıkça tane boyutu küçüldü ve sertlik arttı. 8 geçişte 119 HV sertlik ve 0.398 CoF değeri elde edildi.*

***Conclusion (Sonuç):** ECAP significantly enhances the wear resistance and hardness of Al6063, offering potential for demanding applications. / ECAP işlemi, Al6063'ün aşınma direncini ve sertliğini artırarak zorlu uygulamalar için uygunluk sağlamaktadır..*

*Corresponding author, e-mail: tahaalperyilmaz@gazi.edu.tr
DOI: 10.29109/gujsc.1661391

GU J Sci, Part C, 13(2): 471-487 (2025)

Gazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Dergisi
PART C: TASARIM VE TEKNOLOJİ

Gazi University
Journal of Science
PART C: DESIGN AND TECHNOLOGY

http://dergipark.gov.tr/gujsc

Enhancement of Microstructure Evolution and Tribological Properties of Al6063 Alloy Through Grain Refinement via ECAP Technique

Taha Alper YILMAZ[1*]

[1]*Gazi University, Vocational School of Technical Sciences, Department of Machinery and Metal Technologies, Ankara, Turkey*

Article Info

Research article
Received: 19/03/2025
Revision: 20/03/2025
Accepted: 20/04/2025

Keywords

ECAP
Al6063
TEM
Tribological Properties

Abstract

Present study aimed to increase the applicability of the material in the aviation, aerospace, and automotive industries by improving the microstructural and tribological properties of Al6063 alloy using the ECAP technique at room temperature with different passes (2, 4 and 8) and by selecting the BC route. XRD, SEM, EDS/Mapping, 3D Profilometer, TEM and TEM/MapViewer methods were performed on all samples in the microstructural characterization processes. Microhardness and dry sliding wear tests were conducted to evaluate the mechanical and tribological properties. It was determined that with the number of passes being 8, the hardness of the equiaxed sub-micron/nano grains increased to 119HV and had the best tribological properties (CoF: 0.398 and Ra: 0.620).

ECAP Tekniği ile Tane İnceltme Yoluyla Al6063 Alaşımının Mikro Yapı Evrimi ve Tribolojik Özelliklerinin Geliştirilmesi

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 19/03/2025
Düzeltme: 20/03/2025
Kabul: 20/04/2025

Anahtar Kelimeler

EKAP
Al6063
TEM
Tribolojik Özellikler

Öz

Bu çalışma, oda sıcaklığında farklı geçişlerle (2, 4 ve 8) ve B_C rotası seçilerek ECAP tekniği kullanılarak Al6063 alaşımının mikro yapısal ve tribolojik özelliklerini iyileştirerek malzemenin havacılık, uzay ve otomotiv endüstrilerinde uygulanabilirliğini artırmayı amaçlamaktadır. Mikro yapısal karakterizasyon süreçlerinde tüm numunelerde XRD, SEM, EDS/Mapping, 3D Profilometer, TEM ve TEM/MapViewer yöntemleri gerçekleştirildi. Mekanik ve tribolojik özellikleri değerlendirmek için mikro sertlik ve kuru kayma aşınma testleri yapıldı. Geçiş sayısının 8 olmasıyla, eş eksenli alt mikron/nano taneciklerin sertliğinin 119HV'ye çıktığı ve en iyi tribolojik özelliklere sahip olduğu (CoF: 0,398 ve Ra: 0,620) belirlendi.

1. INTRODUCTION (GİRİŞ)

Powder metallurgy (PM) processes are widely used to produce ultrafine-grained (UFG) materials using nanoscale powders. This technology offers significant advantages because it efficiently produces nanoscale powders through pressing and sintering techniques. However, PM frequently encounters issues during the sintering phase, resulting in the formation of a porous microstructure that negatively affects the quality of the materials. Severe plastic deformation (SPD) techniques can be used as an alternative method to create microstructures with sub-micron or nanograined sizes [1–3]. This is achieved by extruding cast materials through a die with high strength. Equal Channel Angular Pressing (ECAP) is a very efficient and useful technology for severe plastic deformation (SPD) that enables the creation of refined materials at a low cost. This technique entails exerting pressure on a large quantity of material by passing it through a die with a predetermined angle Φ and a consistent cross-section [4,5]. The bulk sample goes through much shear stress during the pressing process. This causes it to deform while keeping its original cross-sectional area. Grains undergo homogeneous refinement due to dislocation motion [6]. Various methods are employed to rotate the sample around its axis for each pass. The process can be iterated until it reaches the minimum achievable grain size [7–9].

*Corresponding author, e-mail: tahaalperyilmaz@gazi.edu.tr
DOI: 10.29109/gujsc.1661391

Multiple studies have shown that ECAP and other SPD methods can efficiently refine the grain structure [10–16]. Dislocations created during the plastic deformation process moved toward grain boundaries with high angles along their slip planes as distortion continued. This action promotes the sub-grains creation by transferring dislocations to sites with lower energy [17]. Once the initial grains have been sufficiently deformed, they come into contact with each other and change into a structure of fine grains whose edges are twisted at a high angle [18–20]. The ECAP process is affected by the angle at which the two channels intersect within the die and the radius of curvature of these channels [21,22]. Figure 1 depicts the angles associated with the ECAP die. In most studies, the intersection angle (φ) is commonly fixed at 90°, whereas the curvature angle (ψ) is generally set at 0°. The geometry and orientation of the die have a tremendous impact on the flow of material, greatly aiding the process. The angle formed by the intersection of two channels of equal size is denoted as 'φ'. If the angle φ is less than 90°, a zone of undisturbed deformation can develop near the corner of the channel. Thus, setting φ = 90° is advisable to achieve optimal deformation characteristics and ensure effective deformation [7,23].

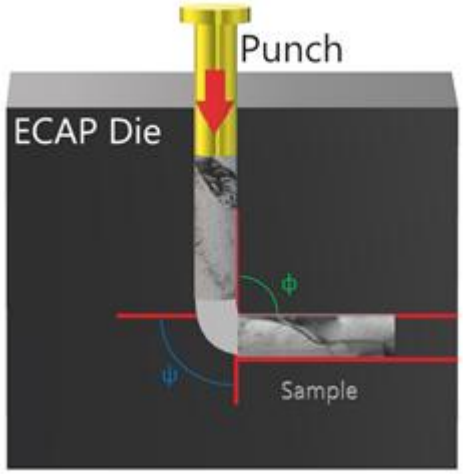


Figure 1. Angles in the ECAP pattern (EKAP kalbındaki açılar)

The ECAP process is an important method for improving the performance of aluminum (Al) alloys by significantly improving their mechanical properties, reducing their grain sizes equiaxially, and increasing their hardness values [24–26]. Grain refinement reduces the plastic deformation of the material and increases its resistance to surface damage that may occur during wear. Many early studies have shown that ECAP can significantly improve Al alloys' hardness and grain refinement. However, the tribological properties have not yet been fully optimized. Early studies have shown that the hardness and grain refinement can be significantly improved in Al alloys subjected to ECAP, while the tribological properties have not yet been fully optimized [27–29]. More studies are needed on how the properties such as wear rates, coefficient of friction and worn surface of the UFG grain structure can increase the overall strength of Al alloys. Ortiz-Ceuellar and his colleagues studied the tribological properties of the material. They used the ECAP process to look at the effect of severe plastic deformation on the microstructure of Al-Mg-Si alloys. They reported in their study that the hardness values increased with the increase in the number of passes in the ECAP process, increasing the wear resistance [30]. In another study, Gao and his colleagues conducted a review study due to the contradictory results previously given by different SPD techniques in the literature. In their study, they stated that grain size, hardness, and flexibility are important factors affecting the wear resistance of materials. They also stated in their study that many parameters, such as surface quality of materials, lubrication conditions, wear load, speed and temperature, are determinants of wear properties and emphasized the need for increased studies on the subject [31].

This study aims to enhance the microstructural characterization and tribological properties of Al6063 alloy by applying the ECAP process with 2, 4, and 8 passes, facilitating the formation of an equiaxed and homogeneous microstructure. There is a significant gap in the literature on the tribological properties of Al6063 alloys after ECAP. Due to its low cost, Al6063 alloy presents a compelling case for further enhancement, particularly in its tribological performance. This study highlights the necessity of improving these

properties to expand their potential applications in various industries, including aviation, defense, and automotive. Therefore, investigating and optimizing the microstructural, mechanical, and tribological properties of ECAP-processed Al6063 alloy is crucial for advancing its industrial usability.

2. MATERIALS AND METHODS (MATERYAL VE METOD)

2.1. Production of ECAP samples (ECAP Numunelerinin Üretimi)

The chemical composition of the Al6063 alloy on which the ECAP process was performed is given in Table 1. All samples were subjected to homogenization annealing at 400 ºC for 2 hours to eliminate residual stresses originating from production and to obtain a homogeneous internal structure. Rods with a diameter of 19.8 mm were used as samples. All ECAP processes were performed at room temperature.

Table 1. Chemical composition of Al 6063 alloy (Al6063 alaşımının kimyasal kompozisyonu)

Elements	Mg	Si	Fe	Cu	Mn	Cr	Zn	Al
% wt.	1,01	0,67	0,28	0,2	0,04	0,05	0,06	Balance

ECAP processes applied to Al6063 alloys were carried out at room temperature to prevent grain size increase and to better see the effects of severe plastic deformation. A split ECAP die with a channel angle (ϕ) of 90º and a corner curvature angle (ψ) of 20º was used for the severe plastic deformation. The BC route, which is accepted as the most effective route in the ECAP process, was preferred as the route. In order to examine the effects of the number of passes on grain refinement, 2, 4 and 8 pass ECAP processes were applied to the Al6063 alloy. The pressing speed in ECAP processes was determined as 0.025 mm/s. MoS2 was used as the mold lubricant. After the ECAP processes, the effects of different pass numbers applied against the untreated material were investigated.

2.2. Microstructure characterization (Mikroyapı Karakterizasyonu)

All samples were put through characterization processes after the 2, 4 and 8 pass ECAP processes were used on Al6063 alloys. SEM and EDS (JEOL JSM-6060) analyses were applied to the materials to examine the microstructural properties of the samples. The results were characterized using X'Pert HighScore Plus software, and reference codes were determined. Since the grain sizes were expected to be in submicron scales, the samples on which the ECAP process was applied were first cut to approximately 5x10µm dimensions and 90nm thickness in the Focused Ion Beam (FIB) device (FEI Nova 650). Then, they were placed on TEM grids in the device. The TEM process (JEOL 2100 JEM HRTEM) was performed on all ECAP samples to determine the microstructure and crystal structures. In addition, the atomic diffraction in the crystal structure was examined by applying the selected area electron diffraction (SAED) method. After the ECAP processes, the sample determined as the lowest grain size was subjected to EBSD analysis using the MapViewer software of the TEM device. The 3D Profilometer (Filmetrics Profilm 3D) device and software were used to determined the surface properties, wear rates, surface roughness, and wear marks of all the samples put through the wear process.

2.3. Mechanical and Tribological Properties (Mekanik ve Tribolojik Özellikler)

Microhardness tests were performed on the materials to determine their mechanical properties. In the operations performed with the microhardness device (Shimadzu HMV-2), 5x5 measurements were taken under HV1 load, and an average of 25 measurements was taken. After the hardness and strength properties, wear tests (Anton Paar TRB3) were applied to untreated Al6063 alloy and ECAP-treated samples to examine the tribological properties. The materials and parameters used in the wear tests are given in Table 2. Wear tests were performed at two different loads, 5 and 10N, according to ASTM G99-05. After the wear test, the friction coefficient-distance curves were drawn by obtaining the wear data from the device software.

The wear rates were calculated using the data determined from the 3D Profilometer device's software and the formula in Equation 1.

$$\omega = \frac{V}{L\ x\ N} \quad (1)$$

Where ω is the wear rate, V is the wear volume, L is the sliding distance, and N is the applied load.

Table 2. Wear test conditions of the samples subjected to ECAP process (EKAP işlemine tabi tutulan numunelerin aşınma test koşulları)

Parameters	Test Conditions
Applied Load (N)	5 and 10
Rotation Speed (rpm)	97
Trace Diameter (mm)	6
Ambient	Atmosphere
Temperature (°C)	22
Relative Humidity (%RH)	45-55
Distance (m)	100
Ball	ZrO_2

3. RESULTS AND DISCUSSION (SONUÇLAR VE TARTIŞMA)

3.1. XRD Analysis (XRD Analizi)

Figure 2 shows the X-ray diffraction patterns of the Al6063 alloy and the samples subjected to 2, 4, and 8 passes of ECAP. All samples were subjected to a homogenization process to eliminate the possible presence of residual stresses and intermetallic compounds in the structure before the ECAP process, which determined the main phases in the structure, Al and AlFeSi compounds. (Reference Cards: 00-001-1176 and 00-045-1206). The Mg_2Si phase reported previously in the literature was not found in the structure [32]. In the samples subjected to ECAP, minimal shifts were detected in the peaks due to the effect of severe plastic deformation. It is thought that the shifts that occurred were due to the increase in the dislocation density in the material during deformation and micro stresses. In addition, it was determined that the peaks widened with the reduction of grain size with the ECAP process [33].

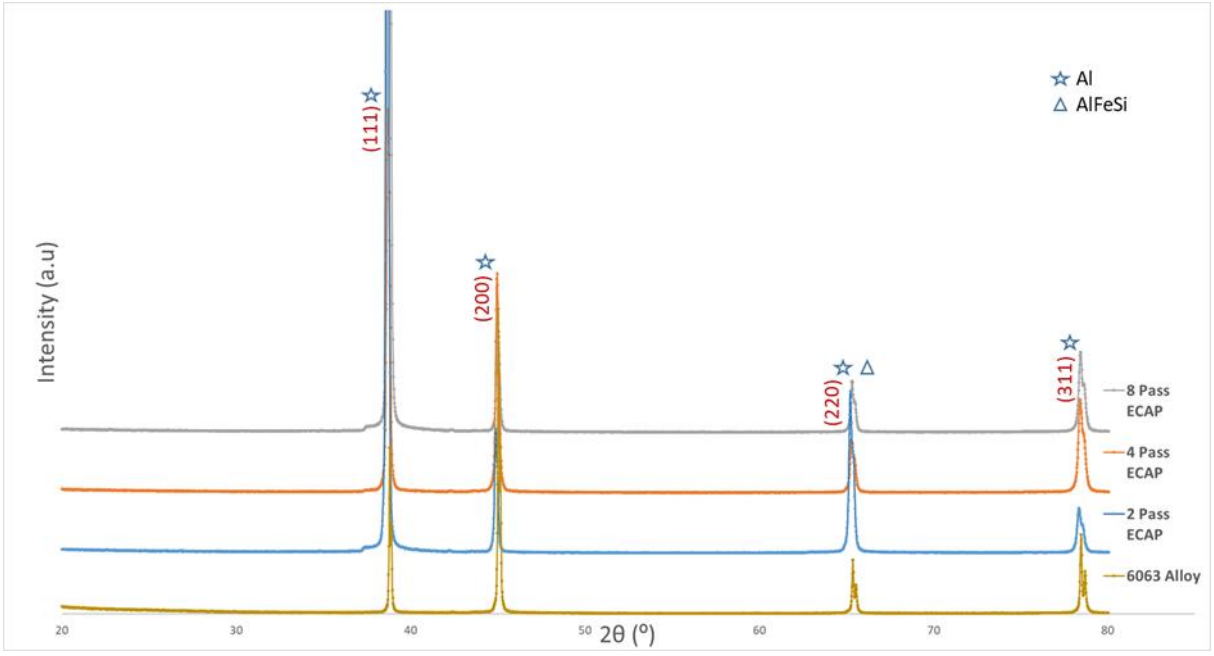


Figure 2. XRD patterns of Al6063 alloy, 2, 4 and 8 pass ECAP treated materials (Al6063 alaşımının, 2, 4 ve 8 geçişli EKAP ile işlenmiş malzemelerin XRD desenleri)

3.2. Microstructure Evolution (Mikroyapı Evrimi)

3.2.1. SEM and EDS/Mapping (SEM ve EDS/Map)

Figure 3 (a) shows SEM images of untreated Al6063 alloy and samples subjected to 2, 4 and 8 pass ECAP processes. When the SEM analysis is examined, it is seen that there is a homogeneous internal structure only in the homogenized Al6063 alloy. It is seen that shear stresses occur due to severe plastic deformation; thus, the slope of the grains begins with the sample subjected to 2 pass ECAP [34]. This slope continues to increase with the increase in the number of applied passes, and the orientation frequency in the extrusion direction continues to increase in 4 and 8 pass ECAP processes, respectively. The interaction of dislocations with each other becomes more complex with the increase in the number of passes. Dislocations gradually turn into nodes, then the dislocation walls dividing them into sub-grains become apparent in the microstructure. Since the increase in the number of passes will increase the number of sub-grains, grain orientation and the formation of equiaxed grains are expected [35].

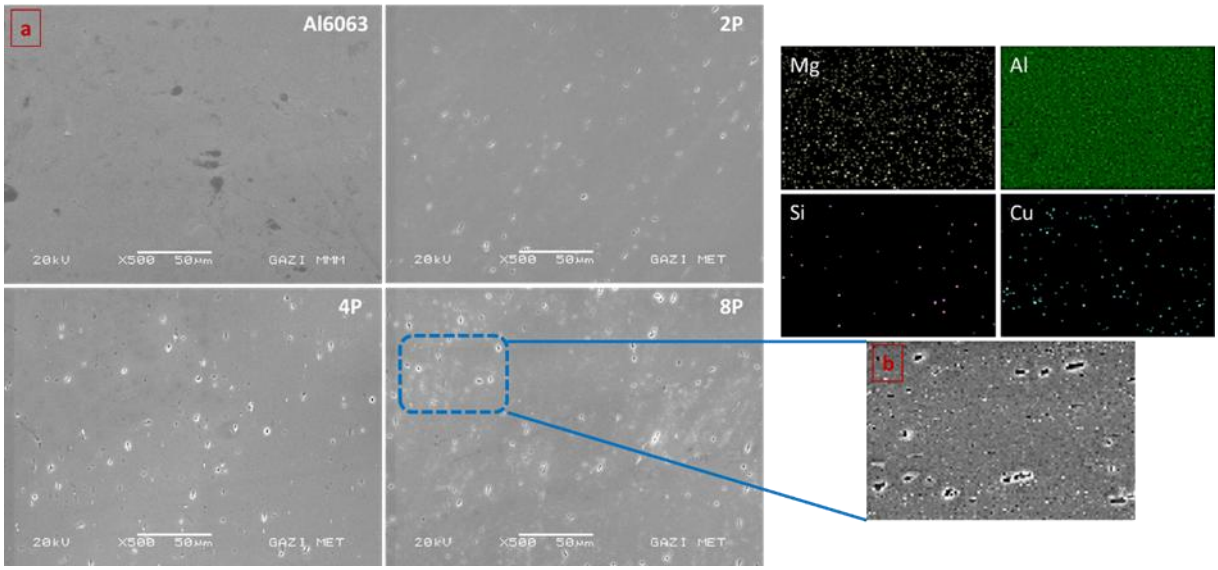


Figure 3. a) SEM images and b) EDS/Mapping images of Al6063 alloy samples subjected to 2, 4 and 8 pass ECAP process ((a) 2, 4 ve 8 geçişli ECAP işlemine tabi tutulan Al6063 alaşım numunelerinin SEM görüntüleri ve b) EDS/Haritalama görüntüleri)

Figure 3 (b) shows the EDS element mapping analysis of the sample with 8 passes of ECAP. In the EDS/Mapping analysis made from the SEM image, in addition to Al, which forms the main phase, the elements with the highest density to the lowest density are Mg, Si and Cu. Especially in the sample with the highest number of passes and 8 passes of ECAP, the elements forming the alloy were detected to have a homogeneous presence in the structure in the deformation zones formed. In addition, it cannot be said that severe plastic deformation affects on the elemental distribution [36]. The EDS/Mapping analysis also determined that the elements in the structure did not form another phase except for the AlFeSi intermetallic compound determined in the XRD analysis.

3.2.2. TEM Analysis and TEM/MapViewer (TEM Analizi ve TEM/MapViewer)

Figure 4 shows TEM and SAED images of Al6063 alloy samples subjected to 2, 4 and 8 pass ECAP processes. It was determined that only the homogenization process Al6063 alloy had large grain sizes. As seen from the TEM images, it was determined that sub-grains started forming in the sample subjected to the 2 pass ECAP process and the grain sizes decreased. However, it was observed that long grains were formed. This situation shows that the inter-grain angles in the 2 pass ECAP process have LABs [37]. With the number of passes being 4, LABs started to give way to HABs. It was determined that dislocation walls were formed in the microstructure with a gradual increase in the dislocation density. This situation is critically important in increasing the mechanical strength [38]. As the number of passes increases to 8, it is seen that the ultra-fine-grained Al6063 alloy shows an equiaxed and homogeneous distribution.

In the applied 2 and 4 pass ECAP processes, the insufficient deformation caused the materials to have an anisotropic structure. However, it was concluded that the grains forming the microstructure with the 8 pass ECAP process had a sufficient isotropic structure [39]. In the analysis of SAED patterns, it is thought that the grain boundaries, together with the deformation effect, decreased the continuity of the diffraction rings with high misorientation and HABs increase [40]. At the beginning stage of the deformation process (2 pass), grains with long and irregular geometries were determined. With the increase in the number of passes, the accumulation and rearrangement of dislocations resulted in a decrease in grain sizes and contributed to the formation of new grains. Increasing the number of passes to 8 passes causes the dislocations in the material to accumulate along the LABs and the boundaries to turn into HABs gradually. The formation of the equiaxial structure with the highest pass, the similarity of grain sizes, and the formation of submicron/nanograins. In a study conducted by Zhao et al. [41], they investigated the mechanical and microstructural properties of the material by applying a friction stir process to Al6063 alloy. They stated that the high density dislocations formed in the material with severe deformation transformed from LABs to HABs and that the grain refinement process was detected homogeneously in the microstructure. In another study, Rao et al. [42], investigated the mechanical and microstructural properties of the material by applying multidirectional forging to Al6061 alloy. The researchers reported in their study that the sub-grains formed an equiaxed structure with dense dislocation walls and formed with increasing cycle numbers. As can be understood from the studies, it was determined that the 6XXX series alloys, similar to this study, first support the formation of sub-grains by grain reduction with severe plastic deformation and then form an equiaxed and homogeneous microstructure.

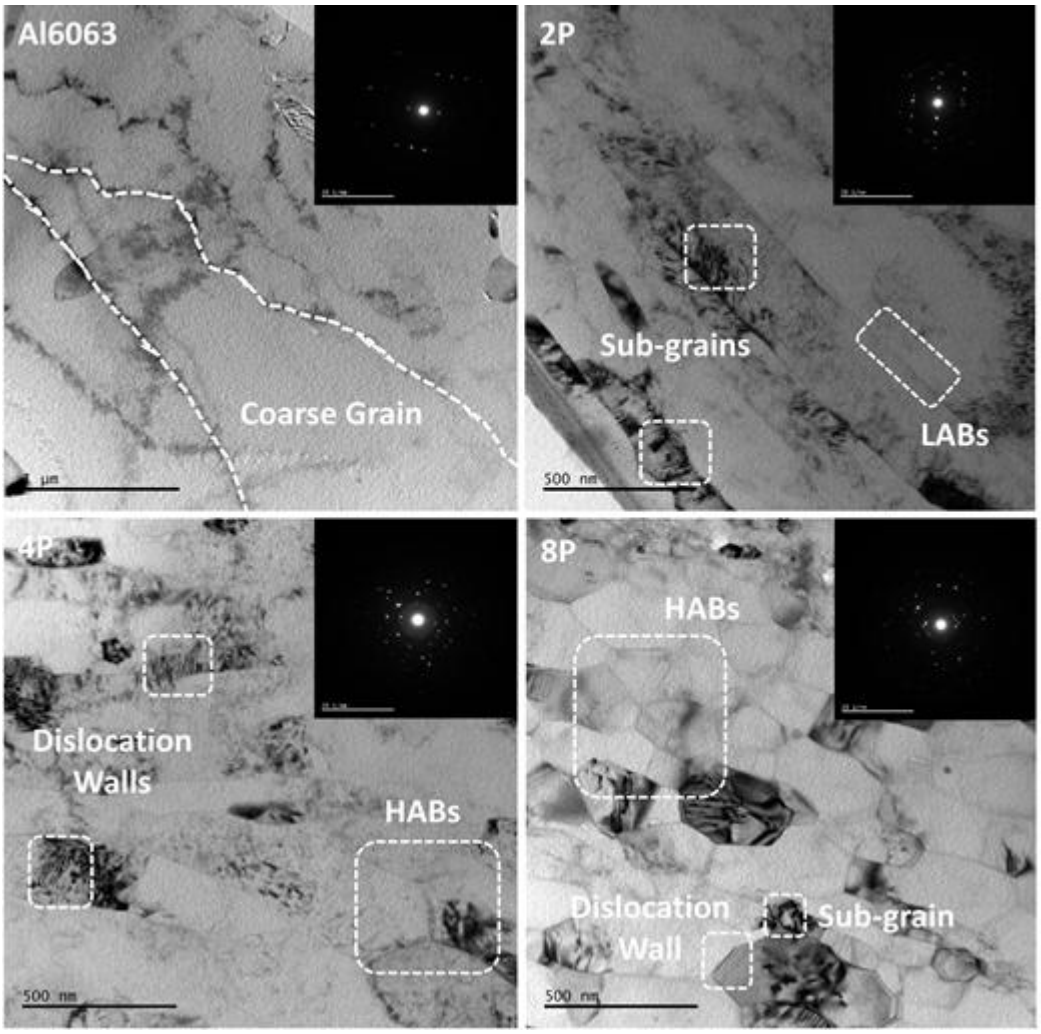


Figure 4. TEM and SAED images of Al6063 alloy samples subjected to 2, 4 and 8 pass ECAP process (2, 4 ve 8 geçişli ECAP işlemine tabi tutulan Al6063 alaşım numunelerinin TEM ve SAED görüntüleri)

Figure 5 shows the TEM analysis software MapViewer image of the sample with 8 pass ECAP process, together with this technique, similar to the EBSD method. It is seen that the grain sizes decrease to submicron/nano dimensions in the sample with the highest number of passes. In Figure 5 (a), it is also understood that the grains are in different orientations and different orientations. It is determined that the grains are generally oriented in the [111] plane, and then the orientation decreases in the [101] and [011] directions, respectively. A more distinct image of the grain boundaries is given in Figure 5 (b), independent of the orientation. Here, the grains are understood to consist of high-angle grain boundaries (HABs). This situation has made a significant contribution to the formation of an equiaxed and homogeneous internal structure. In Figure 5 (c) is used to determine the misorientation angle between two randomly determined grains in (a) and (b). When the figure is examined, it is determined that the angle between both grains is higher than 60º. During severe plastic deformation, high density dislocations accumulate in the material's microstructure and contribute to the formation of HABs [43,44]. HABs act as a strong substantial to the movement of dislocations. Large shear strains occur in the deformation formed by the ECAP process. Thus, additional shear systems actively form within the structure, allowing the intensive formation of new deformation-induced boundaries [45,46]. The fact that the material subjected to the ECAP process at room temperature has HABs is due to the selection of the appropriate pass (8) and route (B_C).

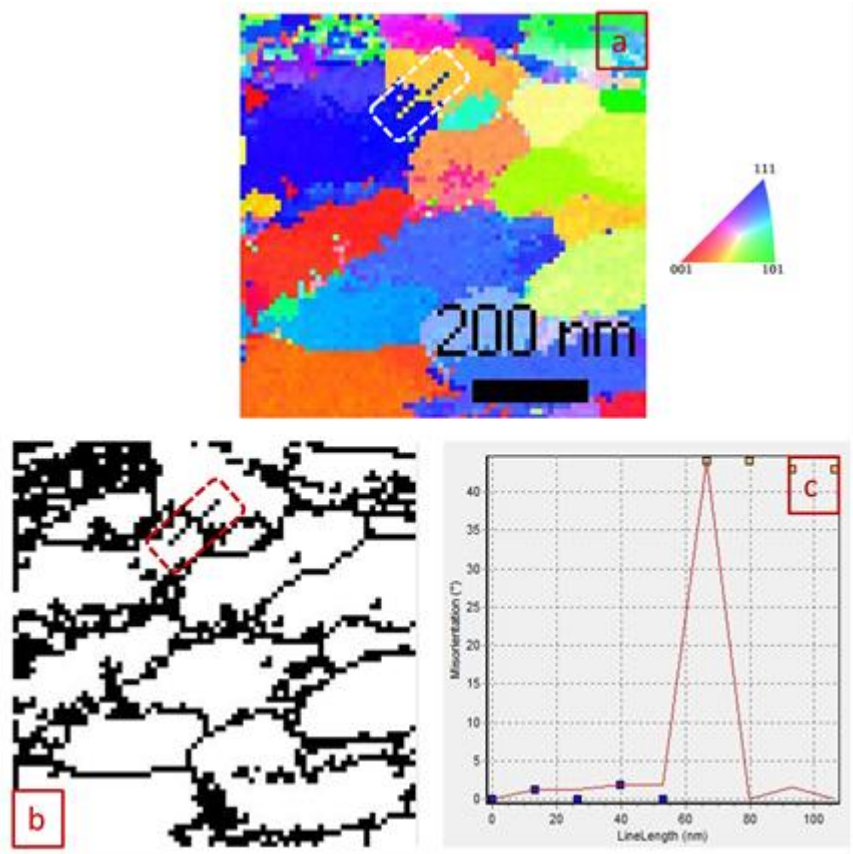


Figure 5. TEM/MapViewer analysis of 6063 alloy with 8 pass ECAP process (8 geçişli ECAP prosesi ile 6063 alaşımının TEM/MapViewer analizi)

3.3. Microhardness Test (Mikrosertlik Testi)

The microhardness test results of the sample with 2, 4 and 8 passes of ECAP process applied to Al6063 alloy and the untreated sample are given in Table 3. When the figure is examined, it is seen that the hardness values increase with the increase in the number of passes. As the deformation density increases with the number of ECAP passes, grain size decreases while strength increases. As it is known, the Hall-Petch equation expresses the effect of the grain refinement process on the strength of metallic materials [47]. In the Hall-Petch equation, the decrease in grain size increases the hardness and therefore, the strength of the material. This study reported that the grain sizes decrease and the equiaxial grain structure gradually forms, as in Figure 4. Since the decrease in grain size will create more grain boundaries and the movement of dislocations tends to oppose the grain boundaries

that act as barriers, it is thought that the increase in hardness is appropriate according to the equation in question. As a result, a hardness increase of approximately 86% was detected when the untreated Al6063 alloy was compared with the sample subjected to 8 pass ECAP process.

Table 3. Microhardness test results of Al6063 alloy samples subjected to 2, 4 and 8 pass ECAP process
(2, 4 ve 8 geçişli ECAP işlemine tabi tutulan Al6063 alaşım numunelerinin mikro sertlik test sonuçları)

Samples	Microhardness (HV1)
Al6063 Alloy	64
2 Pass ECAP	86
4 Pass ECAP	106
8 Pass ECAP	119

3.4. Wear Test (Aşınma Testi)

3.4.1. Coefficient of Friction (Sürtünme Katsayısı)

Figure 6 shows the friction coefficient curves of Al6063 alloy and 2, 4 and 8 pass ECAP samples at 100 m distance under 5 and 10N loads. When the figure is examined, it is seen that the friction coefficient values decrease with the increase in the number of passes in the dry sliding wear test performed with a 5N load. Similarly, a decrease in the friction coefficient values was determined with the increase in the number of passes in the dry sliding wear test performed with 10N. An increase and fluctuations in friction coefficient values were observed in all samples. It is thought that the reason for this is that particles or residues such as debris increase the tension at the contact point during the wear test [30,48]. It was determined that the Al6063 alloy with coarse grains gave the highest friction coefficient values in both tests, and the sample with 8 pass ECAP had the lowest friction coefficient values in both tests. This situation can be explained by the fact that the dislocation density increases with the decrease in grain size, transitioning to equiaxed submicron/nanograins, and the hardness decreases the friction coefficient values [48]. When the load was increased from 5N to 10N in the dry sliding wear test and all samples were evaluated among themselves, it was determined that there was an increase in the friction coefficient values of all samples except the sample that had undergone 2 pass ECAP treatment. With the increase in the load, the area between the contact surfaces increases, causing the adhesion forces to increase. Thus, the increased contact area and adhesion forces increase the friction coefficient. In addition, since the amount of plastic deformation occurring on the surface increases with the increase in the load, the formation of mechanical locking has been stated in previous studies [49]. It is thought that mechanical locking increases the friction coefficient by adhering the surfaces to each other more and creating an adhesive effect. When the friction coefficients performed in all wear tests were evaluated, it was determined that the highest wear rate at 5N load was in the Al6063 alloy with 0.540, and the lowest value was in the sample that underwent 8 passes of ECAP treatment with 0.398. Similarly, in the friction coefficient values of the wear tests performed with 10N, it was determined that the highest value was in the Al 6063 alloy with 0.566, and the lowest value was in the sample that underwent 8 passes of ECAP treatment with 0.417.

3.4.2. Specific Wear Rate and Wear Mass Loss
(Spesifik Aşınma Testi ve Aşınma Kütle Kaybı)

In Figure 7, the specific wear rates of the samples after the wear test under 5 and 10N loads for the Al6063 alloy and 2, 4 and 8 pass ECAP process were calculated from the 3D profilometer device software. When the figure is examined, the wear rates of the samples applied to both 5N and 10N wear tests decrease with the increase in the number of passes. However, when each sample is compared, the load increases the wear rate values. This situation created a wider wear area by increasing the force on the contact surface with the increase in the load. Similar to the friction coefficient curves, the wear rate also increased with the load.

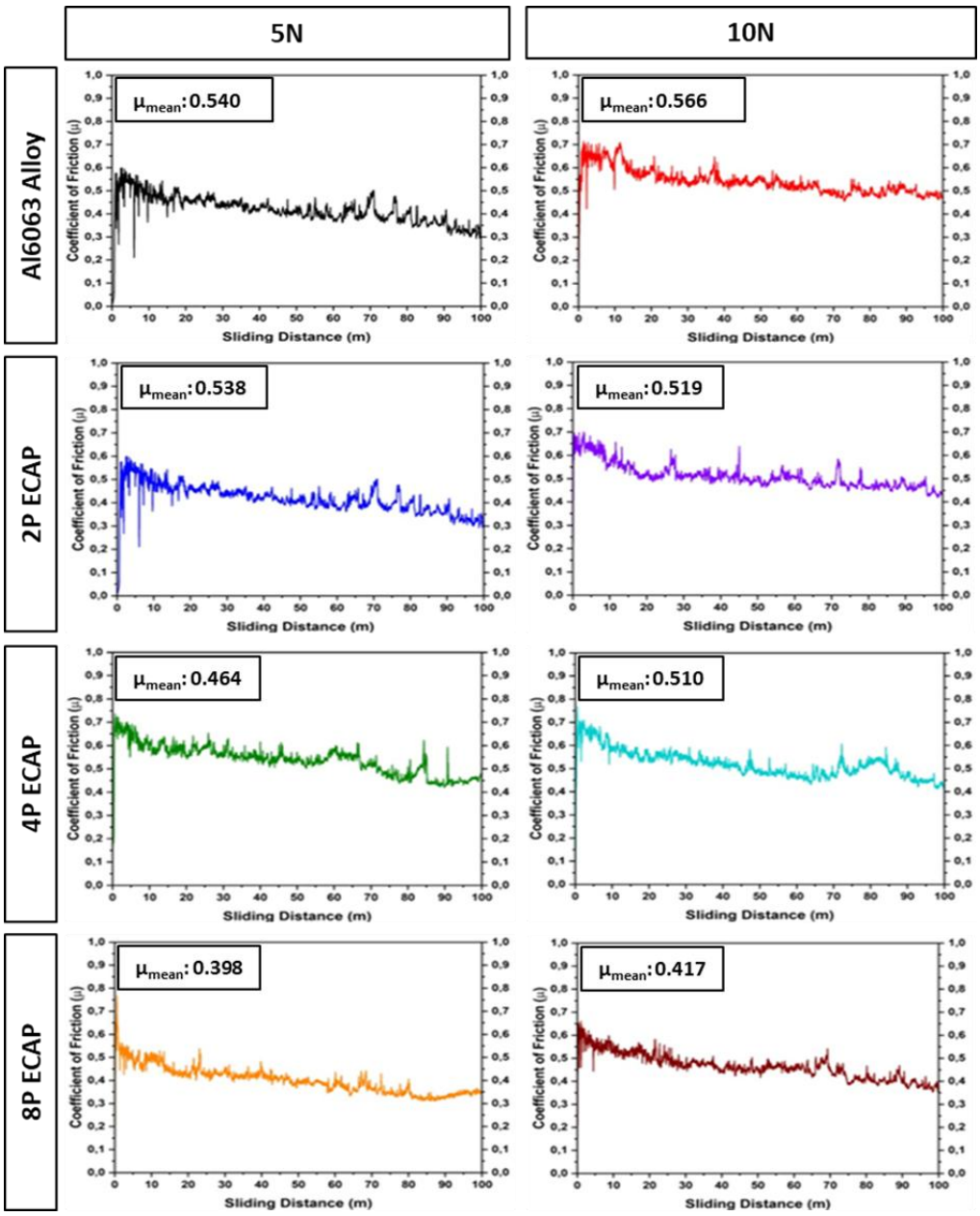


Figure 6. 5 and 10N friction coefficient – sliding distance curves of Al6063 alloy, 2, 4 and 8 pass ECAP treated samples (5 ve 10N sürtünme katsayısı - Al6063 alaşımının kayma mesafesi eğrileri, 2, 4 ve 8 geçişli ECAP ile işlenmiş numuneler)

In Figure 7, the specific wear rates of the samples after the wear test under 5 and 10N loads for the Al6063 alloy and 2, 4 and 8 pass ECAP process were calculated from the 3D profilometer device software. When the figure is examined, the wear rates of the samples applied to both 5N and 10N wear tests decrease with the increase in the number of passes. However, when each sample is compared, the load increases the wear rate values. This situation created a wider wear area by increasing the force on the contact surface with the increase in the load. Similar to the friction coefficient curves, the wear rate also increased with the load.

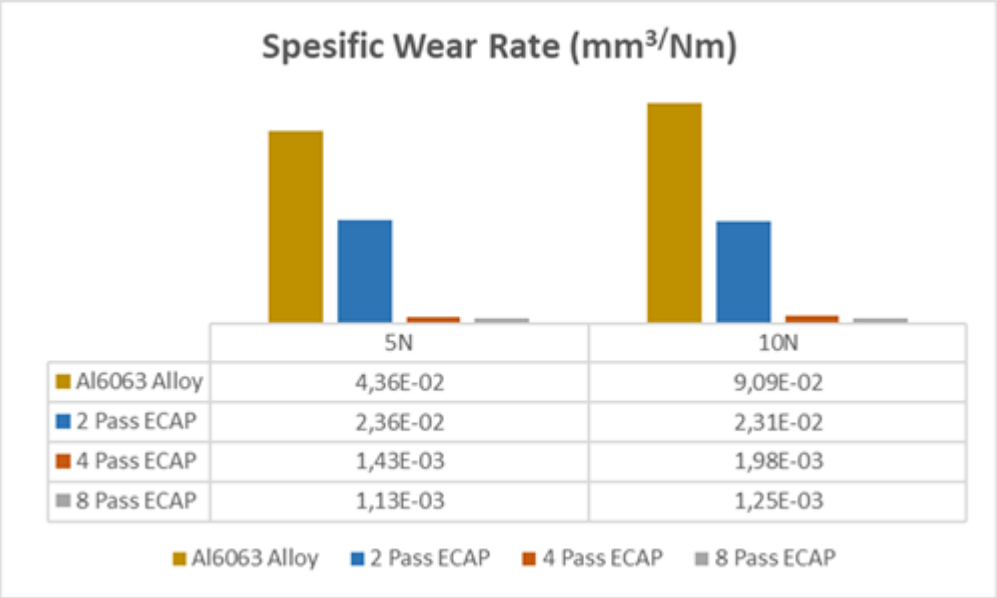


Figure 7. 5 and 10N specific wear rate curves and values of Al6063 alloy samples subjected to 2, 4 and 8 passes ECAP process

Figure 8 shows the mass loss of Al6063 alloy, which was subjected to wear tests at 5 and 10N loads, and samples subjected to 2, 4 and 8 passes of ECAP. In the figure, a decrease in mass loss values was determined with the increase in the number of passes. This situation can be explained by the decrease in grain size as the number of passes increases and the resulting increase in hardness. Similar to the coefficient of friction and wear rate, when each pass was evaluated within itself, it was determined that mass losses increased with increasing wear load. The resulting material loss is more significant since the increased applied load widens the plastic deformation zone [12,50].

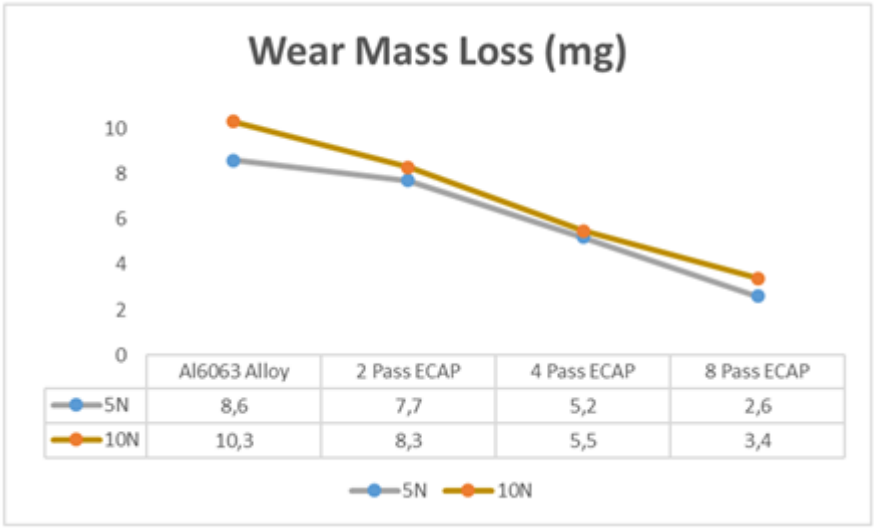


Figure 8. 5 and 10N wear mass loss curves and values of Al6063 alloy samples subjected to 2, 4 and 8 pass ECAP process (2, 4 ve 8 geçişli ECAP işlemine tabi tutulan Al6063 alaşım numunelerinin 5 ve 10N aşınma kütle kaybı eğrileri ve değerleri)

3.4.3. Worn Surface ve 3D Optical Profilometer

(Aşınmış Yüzey ve 3B Optik Profilometre)

The surface analyses of the Al6063 alloy samples subjected to 2, 4 and 8 pass ECAP process after wear under 5 and 10N loads are shown in Figure 9. When the worn surface images of the samples subjected to wear tests under 5N load are examined, it is seen that the wear track marks decrease with the increase in the number of passes. Similar results were obtained in the SEM images of the tests under 10N load. It was determined that the diameter of the trace formed in the wear tests conducted from 5N to 10N in all samples generally widened. Since a higher load increases the force applied to the contact surfaces, it results in higher pressure formation. Thus, the wear amount and rate of the samples cause deeper and wider worn surfaces to appear [51]. It is understood that the basic wear mechanism in all samples is adhesive wear. It is thought that this situation causes tension in the inner layers of the material due to the high pressure formed at the contact points as a result of microwelding [52]. The delamination amount is the highest in the Al6063 alloy sample without the ECAP process, with the lowest hardness value. With the increase in the number of passes, the amount of delamination in the samples subjected to the ECAP process tended to decrease. However, an utterly abrasive wear mechanism was not observed in all samples. Especially in the sample subjected to 8 passes of the ECAP process, a complex wear behavior was detected, and adhesive and abrasive wear mechanisms started to occur together. This situation can be explained by the increase in the hardness of the material and the decrease in grain size [53]. A study by Divya et al. investigated the effect of the route on wear properties by performing the ECAP process on AA2014 alloy. The study detected plastic deformation and cracks in wear tests performed at 10 and 30N. They stated that adhesive was the dominant wear mechanism observed with delamination under low load conditions. They mentioned in their study that a transition from adhesive wear to abrasive wear occurred with the increase in load conditions [54]. Similarly, in this study, as the material hardens and plasticity decreases, the formation of ploughing bands (4P ECAP, 5N) and grooves (8P ECAP, 10N) by the scraping effect of hard particles such as debris formed on the surface is due to a transition from adhesive wear to abrasive wear. This sample with the highest strength is thought to be due to the increased resistance of the material surface to deformation.

Figure 10 shows the 3D profilometer analysis of Al6063 alloy samples subjected to wear tests under 5 and 10N loads and 2, 4, and 8 passes of the ECAP process. When the figure is examined, it is determined that the sample with the highest wear surface volume in the tests conducted under 5N load is Al6063 alloy. Wear volume decreased as the number of passes increased. In addition, the surface roughness (Ra) values also decrease with the increasing number of passes. Similarly, after the wear test was conducted under a 10N load, it was determined that the sample with the highest wear surface volume was Al6063 alloy, and the lowest wear volume was in the sample subjected to 8 passes of the ECAP process. Ra values also show a decreasing trend with the increasing number of passes as 1.016, 0.966, 0.716 and 0.718µm, respectively. Each sample showed increases in Ra values with the increase in the wear load. The formation of a regular microstructure by the fine-grained structure with the increase in the number of passes contributes to the reduction of surface roughness and irregularities [55]. Since the fine-grained structure also increases hardness, the resistance of the sample surface to deformation increases. [56]. Both situations are valid for this study. Due to the decrease in grain size and the increase in hardness with the number of passes, wear volumes and surface roughness values were observed [57].

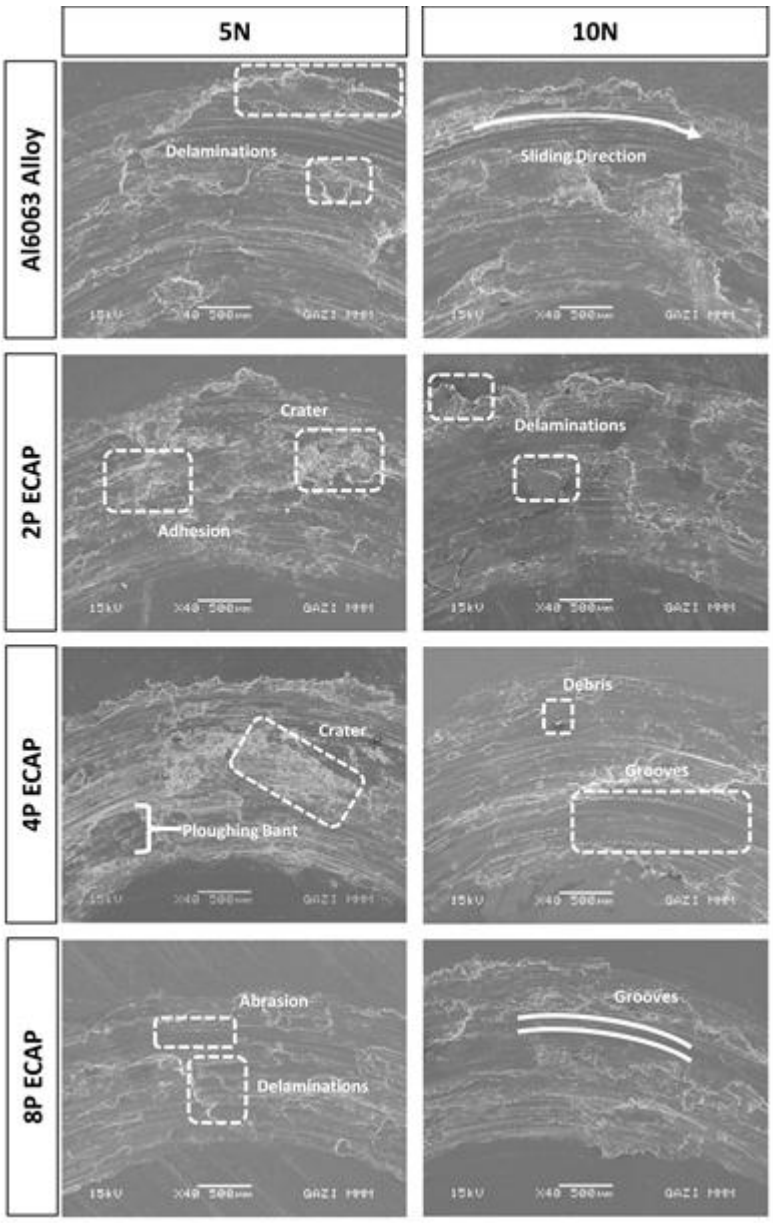


Figure 9. SEM analysis of 5 and 10N worn surfaces of Al6063 alloy, 2, 4 and 8 pass ECAP treated samples (Al6063 alaşımının 5 ve 10N aşınmış yüzeylerinin SEM analizi, 2, 4 ve 8 geçişli ECAP ile işlenmiş numuneler)

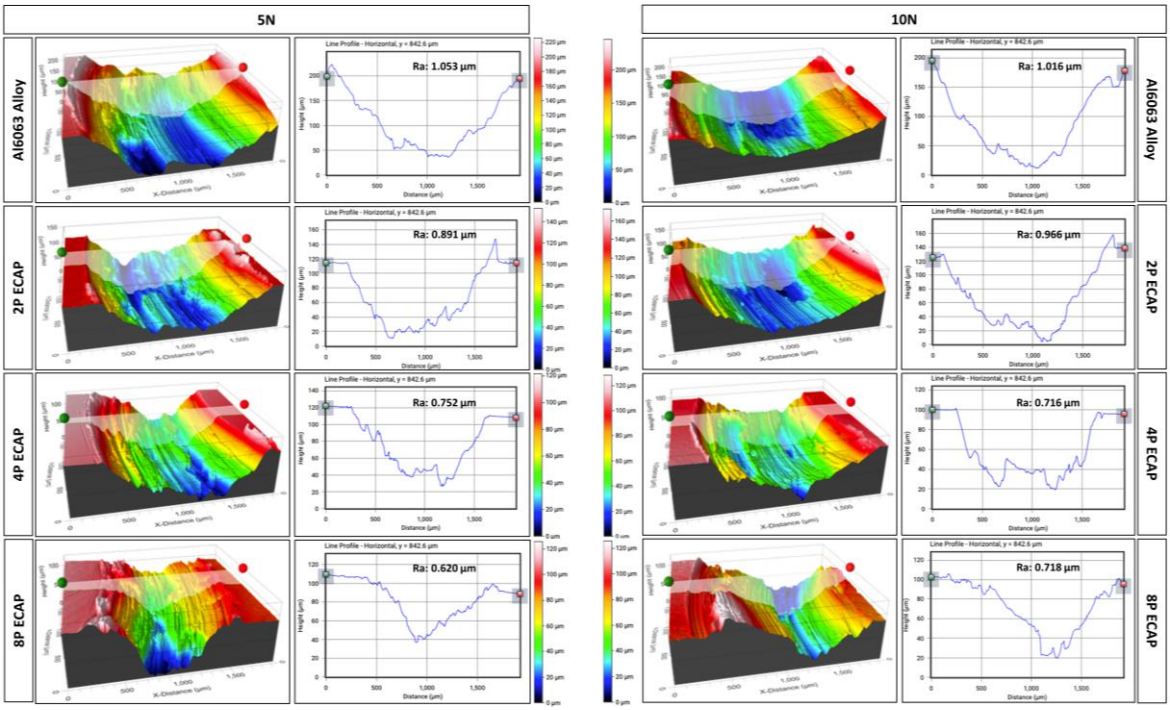


Figure 10. 3D profilometer analyses of Al6063 alloy samples with 2, 4 and 8 pass ECAP treatment under 5 and 10N loads (5 ve 10N yük altında 2, 4 ve 8 geçişli ECAP işlemine tabi tutulan Al6063 alaşım numunelerinin 3B profilometre analizleri)

4. CONCLUSIONS (SONUÇLAR)

The findings of this study, which investigated the microstructural and tribological properties of Al6063 alloy subjected to 2, 4, and 8 passes of ECAP, can be summarized as follows:

- Microstructural Evolution: XRD analysis identified Al and AlFeSi phases in the alloy, with peak shifts due to severe plastic deformation. SEM and TEM analyses revealed progressive grain refinement with increasing ECAP passes, leading to the formation of equiaxed sub-micron/nano grains at 8 passes. High-angle grain boundaries (HABs) became dominant in 4 and 8-pass samples, significantly contributing to mechanical strengthening.

- Mechanical Properties: The microhardness of the samples increased with the number of ECAP passes. The sample processed with 8 passes exhibited an 86% increase in hardness compared to the untreated Al6063 alloy.

- Tribological Performance: Wear test results indicated that an increasing number of ECAP passes resulted in lower friction coefficient values. The highest wear resistance was observed in the 8-pass sample, which had the lowest CoF and wear mass loss. 3D optical profilometry confirmed a decrease in worn surface area with increasing hardness.

- Wear Mechanisms: Adhesive wear was the dominant wear mechanism across all samples, while a transition to an abrasive wear mechanism was observed in the 8-pass ECAP sample due to increased hardness and grain refinement.

Overall, this study confirms that ECAP is an effective technique for significantly enhancing the microstructural, mechanical, and tribological properties of Al6063 alloy. The improvements observed in wear resistance and hardness suggest that ECAP-processed Al6063 alloy can be a promising material for applications in aerospace, automotive, and defense industries, where high performance and durability are critical.

ACKNOWLEDGMENTS (TEŞEKKÜR)

The Gazi University Scientific Research Projects Coordination Unit has provided financial assistance for this study under Project Number FKB-2023-8648. / Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi bu çalışmaya FKB-2023-8648 Proje Numarası altında maddi destek sağlamıştır.

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)

***Taha Alper YILMAZ*:** 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] Valiev RZ, Langdon TG. Principles of equal-channel angular pressing as a processing tool for grain refinement. Prog Mater Sci [Internet]. 2006;51(7):881–981.

[2] Meyers MA, Mishra A, Benson DJ. Mechanical properties of nanocrystalline materials. Prog Mater Sci [Internet]. 2006;51(4):427–556.

[3] Zhilyaev AP, Langdon TG. Using high-pressure torsion for metal processing: Fundamentals and applications. Prog Mater Sci [Internet]. 2008;53(6):893–979.

[4] Valiev RZ, Estrin Y, Horita Z, et al. Producing bulk ultrafine-grained materials by severe plastic deformation. JOM [Internet]. 2006;58(4):33–39.

[5] Iwahashi Y, Wang J, Horita Z, et al. Principle of equal-channel angular pressing for the processing of ultra-fine grained materials. Scr Mater [Internet]. 1996;35(2):143–146.

[6] Jeon JH, Jeon JG, Joo MR, et al. Deformation behavior of an A356 alloy containing small sub-grains with wide low-angle boundary. J Alloys Compd [Internet]. 2022;908:164550.

[7] Azushima A, Kopp R, Korhonen A, et al. Severe plastic deformation (SPD) processes for metals. CIRP Ann - Manuf Technol. 2008; doi: 10.1016/j.cirp.2008.09.005.

[8] Yilmaz TA, Totik Y, Lule Senoz GM, et al. Microstructure evolution and wear properties of ECAP-treated Al-Zn-Mg alloy: Effect of route, temperature and number of passes. Mater Today Commun [Internet]. 2022;33:104628.

[9] Furukawa M, Horita Z, Nemoto M, et al. Review: Processing of metals by equal-channel angular pressing. J Mater Sci [Internet]. 2001;36(12):2835–2843.

[10] Snopiński P, Hilšer O. Mechanism of Grain Refinement in 3D-Printed AlSi10Mg Alloy Subjected to Severe Plastic Deformation. Materials (Basel). 2024.

[11] Huang S-J, Wu S-Y, Subramani M. Effect of Zinc and Severe Plastic Deformation on Mechanical Properties of AZ61 Magnesium Alloy. Materials (Basel). 2024.

[12] Tolcha MA, Gebrehiwot TM, Lemu HG. Enhancing Mechanical Properties of Cast Ingot Al6061 Alloy Using ECAP Process. J Mater Eng Perform [Internet]. 2024; doi: 10.1007/s11665-024-09978-3.

[13] Chen Y, Liu Y, Zhang J, et al. Deformation-mediated cyclic evolution of precipitates in Al-Mg-Si-Cu alloy by multi-pass ECAP and thermal treatments. J Mater Sci Technol [Internet]. 2025;213:42–54.

[14] Ghosh A, Ghosh M, Gudimetla K, et al. Development of ultrafine grained Al–Zn–Mg–Cu alloy by equal channel angular pressing: microstructure, texture and mechanical properties. Arch Civ Mech Eng [Internet]. 2020;20(1):7.

[15] Soliman MS, El-Danaf EA, Almajid AA. Effect of Equal-Channel Angular Pressing Process on Properties of 1050 Al Alloy. Mater Manuf Process [Internet]. 2012;27(7):746–750.

[16] Baig M, Rehman AU, Mohammed JA, et al. Effect of Microstructure and Mechanical Properties of Al5083 Alloy Processed by ECAP at Room Temperature and High Temperature. Crystals. 2021.

[17] Elibol C, Sagir K, Dogan M. Effect of equal-channel angular pressing on microstructure,

aging kinetics and impact behavior in a 7075 aluminum alloy. Mater Today Commun [Internet]. 2024;39:108931.

[18] Korchef A, Souid I. Grain Refinement and Strengthening of an Aluminum Alloy Subjected to Severe Plastic Deformation through Equal-Channel Angular Pressing. Crystals. 2023.

[19] Sitdikov O, Avtokratova E, Markushev M, et al. Structural Characterization of Binary Al-Cu Alloy Processed by Equal Channel Angular Pressing at Half of the Melting Point. Metall Mater Trans A [Internet]. 2023;54(2):505–525.

[20] Khelfa T, Rekik MA, Muñoz-Bolaños JA, et al. Microstructure and strengthening mechanisms in an Al-Mg-Si alloy processed by equal channel angular pressing (ECAP). Int J Adv Manuf Technol [Internet]. 2018;95(1):1165–1177.

[21] Beyerlein IJ, Tóth LS. Texture evolution in equal-channel angular extrusion. Prog Mater Sci [Internet]. 2009;54(4):427–510.

[22] Valiev RZ, Zehetbauer MJ, Estrin Y, et al. The Innovation Potential of Bulk Nanostructured Materials. Adv Eng Mater [Internet]. 2007;9(7):527–533.

[23] Furukawa M, Iwahashi Y, Horita Z, et al. The shearing characteristics associated with equal-channel angular pressing. Mater Sci Eng A [Internet]. 1998;257(2):328–332.

[24] Kadiyan S, Sharma S, Aggarwal A, et al. Investigating the Influence of Thermomechanical Equal Channel Angular Pressing (ECAP) Improved Die on AA-6061. J Mater Eng Perform [Internet]. 2024; doi: 10.1007/s11665-024-10127-z.

[25] Judas J, Zapletal J, Adam O, et al. Microstructural stability and precipitate evolution of thermally treated 7075 aluminum alloy fabricated by cold spray. Mater Charact [Internet]. 2024;216:114259.

[26] Afifi MA, Hamdy M, Brechtl J, et al. Enhancing mechanical properties of Al-Zn-Mg-Cu alloys: The impact of high strain rate compression and subsequent heat treatment on microstructural evolution. Mater Today Commun [Internet]. 2024;40:110131.

[27] Zhang Z, Hosoda S, Kim I-S, et al. Grain refining performance for Al and Al–Si alloy casts by addition of equal-channel angular pressed Al–5mass% Ti alloy. Mater Sci Eng A [Internet]. 2006;425(1):55–63.

[28] Wang CT, Gao N, Wood RJK, et al. Wear behavior of an aluminum alloy processed by equal-channel angular pressing. J Mater Sci [Internet]. 2011;46(1):123–130.

[29] Aydın M, Heyal Y. Effect of equal channel angular pressing on microstructural and mechanical properties of as cast Al–20 wt-Zn alloy. Mater Sci Technol [Internet]. 2013;29(6):679–688.

[30] Ortiz-Cuellar E, Hernandez-Rodriguez MAL, García-Sanchez E. Evaluation of the tribological properties of an Al–Mg–Si alloy processed by severe plastic deformation. Wear [Internet]. 2011;271(9):1828–1832.

[31] Gao N, Wang CT, Wood RJK, et al. Tribological properties of ultrafine-grained materials processed by severe plastic deformation. J Mater Sci [Internet]. 2012;47(12):4779–4797.

[32] Panigrahi SK, Jayaganthan R. A study on the mechanical properties of cryorolled Al–Mg–Si alloy. Mater Sci Eng A [Internet]. 2008;480(1):299–305.

[33] Sakai T, Belyakov A, Kaibyshev R, et al. Dynamic and post-dynamic recrystallization under hot, cold and severe plastic deformation conditions. Prog Mater Sci [Internet]. 2014;60:130–207.

[34] Sherby OD, Klundt RH, Miller AK. Flow stress, subgrain size, and subgrain stability at elevated temperature. Metall Trans A [Internet]. 1977;8(6):843–850.

[35] Xu J, Li J, Zhu X, et al. Microstructural Evolution at Micro/Meso-Scale in an Ultrafine-Grained Pure Aluminum Processed by Equal-Channel Angular Pressing with Subsequent Annealing Treatment. Materials (Basel). 2015. p. 7447–7460.

[36] Lule Senoz GM, Yilmaz TA. Optimization of Equal Channel Angular Pressing Parameters for Improving the Hardness and Microstructure Properties of Al–Zn–Mg Alloy by Using Taguchi Method. Met Mater Int [Internet]. 2021;27(3):436–448.

[37] Reihanian M, Ebrahimi R, Moshksar MM, et al. Microstructure quantification and correlation with flow stress of ultrafine grained commercially pure Al fabricated by equal channel angular pressing (ECAP). Mater Charact [Internet]. 2008;59(9):1312–1323.

[38] Hosseinzadeh A, Radi A, Richter J, et al. Severe plastic deformation as a processing tool for strengthening of additive manufactured alloys. J Manuf Process [Internet]. 2021;68:788–795.

[39] Xu J, Li J, Shan D, et al. Microstructural evolution and micro/meso-deformation behavior in pure copper processed by equal-channel angular pressing. Mater Sci Eng A [Internet]. 2016;664:114–125.

[40] Shaeri MH, Shaeri M, Ebrahimi M, et al. Effect of ECAP temperature on microstructure and mechanical properties of Al–Zn–Mg–Cu alloy. Prog Nat Sci Mater Int [Internet]. 2016;26(2):182–191.

[41] Zhao H, Pan Q, Qin Q, et al. Effect of the processing parameters of friction stir processing on the microstructure and mechanical properties of 6063 aluminum alloy. Mater Sci Eng A [Internet]. 2019;751:70–79.

[42] Rao PN, Singh D, Jayaganthan R. Mechanical properties and microstructural evolution of Al 6061 alloy processed by multidirectional forging at liquid nitrogen temperature. Mater Des [Internet]. 2014;56:97–104.

[43] Raju KS, Krishna MG, Padmanabhan KA, et al. Grain size and grain boundary character distribution in ultra-fine grained (ECAP) nickel. Mater Sci Eng A [Internet]. 2008;491(1):1–7.

[44] Najafi S, Eivani AR, Samaee M, et al. A comprehensive investigation of the strengthening effects of dislocations, texture and low and high angle grain boundaries in ultrafine grained AA6063 aluminum alloy. Mater Charact [Internet]. 2018;136:60–68.

[45] Dyakonov GS, Yakovleva T V, Mironov SY, et al. Microstructure of the Advanced Titanium Alloy VT8M-1 Subjected to Rotary Swaging. Materials (Basel). 2023.

[46] Semiatin SL, Seetharaman V, Weiss I. Flow behavior and globularization kinetics during hot working of Ti–6Al–4V with a colony alpha microstructure. Mater Sci Eng A [Internet]. 1999;263(2):257–271.

[47] Horita Z, Fujinami T, Nemoto M, et al. Improvement of mechanical properties for Al alloys using equal-channel angular pressing. J Mater Process Technol [Internet]. 2001;117(3):288–292.

[48] Liu M, Chen J, Lin Y, et al. Microstructure, mechanical properties and wear resistance of an Al–Mg–Si alloy produced by equal channel angular pressing. Prog Nat Sci Mater Int [Internet]. 2020;30(4):485–493.

[49] Lyashenko IA, Pham TH, Popov VL. Controlling the Friction Coefficient and Adhesive Properties of a Contact by Varying the Indenter Geometry. Processes. 2024.

[50] Chang Y-P, Liu C-T, Chu L-M, et al. Wear mechanisms of aluminum 5083/6061/7075 with and without T6 treatment. Adv Mech Eng [Internet]. 2023;15(11):16878132231201000.

[51] Manjunath GK, Udaya Bhat K, Preetham Kumar G V, et al. Microstructure and Wear Performance of ECAP Processed Cast Al–Zn–Mg Alloys. Trans Indian Inst Met [Internet]. 2018;71(8):1919–1931.

[52] Filippov A V, Tarasov SY, Filippova EO. The Effect of Ultrafine-Grained (UFG) Structure Formed by Equal-Channel Angular Pressing in AA7075 on Wear and Friction in Sliding against Steel and Ceramic Counterbodies. Metals (Basel). 2024.

[53] K R G, H SN. Impact of ECAP on wear performance of Al–Mn magnesium alloy. Mater Res Express [Internet]. 2020;7(1):16550.

[54] Divya SP, Nagaraj M, Kesavamoorthy M, et al. Investigation on the Effect of ECAP Routes on the Wear Behavior of AA2014. Trans Indian Inst Met [Internet]. 2018;71(1):67–77.

[55] Kaya H. Solid particle erosion wear behavior of severe plastically deformed AA7075 alloys. 2018;60(9):885–891.

[56] Tasci U, Yilmaz TA, Bostan B. Investigation of microstructure, wear and transverse rupture strength of WE43/nano B4C composites produced by powder metallurgy method. Tribol Int [Internet]. 2023;180:108231.

[57] Taşcı U, Yılmaz TA, Karakoç H, et al. Enhancing Wear Resistance and Mechanical Behaviors of AA7020 Alloys Using Hybrid Fe3O4-GNP Reinforcement. Lubricants. 2024.

Gazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Dergisi
PART C: TASARIM VE TEKNOLOJİ

Gazi University
Journal of Science
PART C: DESIGN AND TECHNOLOGY

GU J Sci, Part C, 13(2): 488-498 (2025)

Production of D2 and 17-4 PH Bimetallic Materials and Investigation of Their Mechanical Properties in Atomic Diffusion Additive Manufacturing Method

Ufuk TAŞCI[1*]

[1]*Gazi University, Vocational School of Technical Sciences, Ankara, Turkey*

Article Info

Research article
Received: 21/03/2025
Revision: 22/04/2025
Accepted: 02/05/2025

Keywords

Additive manufacturing
17-4PH
D2 Tool Steel
Bimetallic

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 21/03/2025
Düzeltme: 22/04/2025
Kabul: 02/05/2025

Anahtar Kelimeler

Eklemeli İmalat
17-4PH
D2 Takım Çeliği
Bimetalik

Graphical/Tabular Abstract (Grafik Özet)

Bimetal structures were produced from D2 and 17-4 PH steels using the Atomic Diffusion Additive Manufacturing method with the Markforged Metal X device. The mechanical and chemical properties of the transition region were analyzed in detail. / Markforged Metal X cihazı Atomik Difüzyon Eklemeli İmalat yöntemi kullanılarak D2 ve 17-4 PH çeliklerinden bimetal yapı üretilmiş, geçiş bölgesinin mekanik ve kimyasal özellikleri detaylı şekilde analiz edilmiştir.

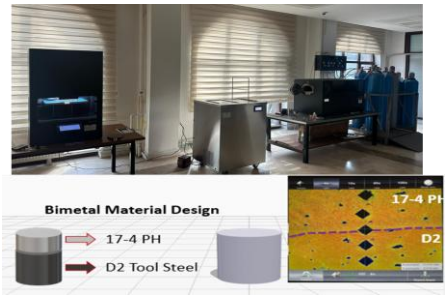


***Figure A**: Graphical abstract /**Şekil A:** Grafiksel özet*

Highlights (Önemli noktalar)

- *D2 and 17-4 PH steels were successfully combined in a single structure with ADAM technology. D2 ve 17-4 PH çelikleri ADAM teknolojisiyle tek yapıda başarıyla birleştirildi.*
- *Mechanical and chemical continuity was achieved in the bimetal transition region. Bimetal geçiş bölgesinde mekanik ve kimyasal süreklilik sağlandı.*
- *High-quality filament-based production was achieved with a density value of 95.4%. %95,4 yoğunluk değeri ile yüksek kaliteli filament bazlı üretim gerçekleştirildi.*

***Aim (Amaç):** This study aims to combine D2 tool steel and 17-4 PH stainless steel, which have different mechanical and physical properties, into a single bimetal structure using the Markforged Metal X device and examine the resulting interfacial behavior in detail. / Farklı mekanik ve fiziksel özelliklere sahip D2 takım çeliği ve 17-4 PH paslanmaz çeliğini, Markforged Metal X cihazı kullanarak tek bir bimetal yapıda birleştirmek ve ortaya çıkan arayüzey davranışlarını detaylı olarak incelemektir.*

***Originality (Özgünlük):** This study reports the first successful joining of D2 and 17-4 PH steels in a single production cycle using the ADAM method, a filament-based metal additive manufacturing technology. Microhardness, microstructure, and chemical distribution analyses evaluated the transition zone at the interface holistically. / Bu çalışmada, filament bazlı metal katkı üretim teknolojisi olan ADAM yöntemi ile D2 ve 17-4 PH çeliklerinin ilk kez tek üretim döngüsünde başarılı bir şekilde birleştirilmesini raporlamaktadır. Arayüzeydeki geçiş bölgesi mikrosertlik, mikroyapı ve kimyasal dağılım analizleriyle bütünsel olarak değerlendirilmiştir.*

***Results (Bulgular):** The produced bimetal samples had a density of 95.4%. Microhardness results showed that the transition region was homogeneous, and SEM/EDS/MAP analyses showed a controlled chemical transition of approximately 30 µm. In XRD analyses, ferrite was detected in D2, and martensite and austenite phases were detected in the 17-4 PH region. / Üretilen bimetal numunelerde %95,4 yoğunluk elde edilmiştir. Mikrosertlik sonuçları geçiş bölgesinin homojen olduğunu, SEM/EDS/MAP analizleri ise yaklaşık 30 µm'lik kontrollü kimyasal geçişin gerçekleştiğini göstermiştir. XRD analizlerinde D2'de ferrit, 17-4 PH bölgede ise martensit ve austenit fazları tespit edilmiştir.*

***Conclusion (Sonuç):** ADAM technology has proven to be a successful method for producing functional bimetals by integrating steels with different characteristics into a single structure. / ADAM teknolojisi, farklı karakteristiklere sahip çelikleri tek yapıda bütünleştirerek işlevsel bimetal üretimi için başarılı bir yöntem olduğunu göstermiştir. Bu yaklaşım, havacılık, otomotiv ve kalıpçılık gibi sektörlerde uygulamaya yönelik yüksek potansiyel sunmaktadır.*

*Corresponding author, e-mail: ufuktasci@gazi.edu.tr
DOI: 10.29109/gujsc.1662944

GU J Sci, Part C, 13(2): 488-498 (2025)

Gazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Dergisi
PART C: TASARIM VE TEKNOLOJİ

Gazi University
Journal of Science
PART C: DESIGN AND TECHNOLOGY

http://dergipark.gov.tr/gujsc

Production of D2 and 17-4 PH Bimetallic Materials and Investigation of Their Mechanical Properties in Atomic Diffusion Additive Manufacturing Method

Ufuk TAŞCI[1*]

[1]*Gazi University, Vocational School of Technical Sciences, Ankara, Turkey*

Article Info

Research article
Received: 21/03/2025
Revision: 22/04/2025
Accepted: 02/05/2025

Keywords

Additive manufacturing
17-4PH
D2 Tool Steel
Bimetallic

Abstract

The study focused on producing bimetallic structures consisting of 17-4 PH stainless steel and D2 tool steel using the Markforged brand Metal X device. It was investigated whether these two metals, which have different physical and mechanical properties, could be combined through layered production with suitable filament combinations. Samples with cylindrical geometry were printed according to the extrusion-based layered production principle and then subjected to debinding and sintering processes within the scope of the ADAM (Atomic Diffusion Additive Manufacturing) methodology. During the production process, the samples were processed by positioning them vertically in order to ensure interface compatibility and prevent interlayer accumulation. Density, X-ray diffraction (XRD), hardness, and microstructure analyses (SEM/EDS/MAP) were performed on the produced bimetal samples; a density value of 95.4%, which is considered relatively high for filament-based metal additive production, was reached. The findings revealed the Metal X device's suitability for producing bimetal and hybrid structured metal materials. This study offers significant application potential for producing high-performance and functional parts in defense, aerospace, automotive, and manufacturing sectors by combining materials with different mechanical and thermal properties within a single structure.

Atomik Difüzyon Eklemeli İmalat Yönteminde, D2 ve 17-4 PH Bimetalik Malzeme Üretimi ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 21/03/2025
Düzeltme: 22/04/2025
Kabul: 02/05/2025

Anahtar Kelimeler

Eklemeli İmalat
17-4PH
D2 Takım Çeliği
Bimetalik

Öz

Yapılan çalışmada, Markforged marka Metal X cihazı kullanılarak 17-4 PH paslanmaz çelik ve D2 takım çeliğinden oluşan bimetalik yapıların üretimi üzerine odaklanılmıştır. Fiziksel ve mekanik özellikleri birbirinden farklı olan bu iki metalin, uygun filament kombinasyonlarıyla katmanlı üretim yoluyla bir araya getirilebilmesi araştırılmıştır. Silindirik geometriye sahip numuneler, ekstrüzyon temelli katmanlı üretim prensibine göre basılmış ve ardından ADAM (Atomik Difüzyon Katkı Üretimi) metodolojisi kapsamında bağlayıcı giderme ve sinterleme süreçlerine tabi tutulmuştur. Üretim sürecinde özellikle arayüzey uyumunun sağlanması ve katmanlar arası yığılmaların önlenmesi amacıyla numuneler dikey yönde konumlandırılarak işlenmiştir. Üretilen bimetal numunelere yoğunluk, X-Ray Diffraction (XRD), sertlik ve mikroyapı analizleri (SEM/EDS/MAP) gerçekleştirilmiş; filament bazlı metal katkı üretimi için oldukça yüksek kabul edilen %95,4 yoğunluk değerine ulaşılmıştır. Elde edilen bulgular, Metal X cihazının bimetal ve hibrit yapıda metal malzeme üretimine olan uygunluğunu ortaya koymuştur. Bu çalışma, farklı mekanik ve termal özelliklere sahip malzemelerin tek bir yapı içinde birleştirilmesi ile birlikte savunma, havacılık, otomotiv ve üretim endüstrisi gibi sektörlerde yüksek performanslı ve işlevsel parçaların üretimi için önemli bir uygulama potansiyeli sunmaktadır.

1. INTRODUCTION (GİRİŞ)

Additive manufacturing (AM) emerged in the mid-1980s and was initially used only for prototyping. The stereolithography (SLA) method developed by Chuck Hull laid the foundation for this field [1]. Over time, with the advances in three-dimensional printer technologies, production has become possible not only with polymer-based but also with high-performance engineering materials such as metal and ceramic [2]. According to the classification developed by ASTM International, additive manufacturing technologies are divided into categories such as powder bed fusion (PBF),

*Corresponding author, e-mail: ufuktasci@gazi.edu.tr
DOI: 10.29109/gujsc.1662944

direct energy deposition (DED), material extrusion (FDM/FFF), binder injection, and vat photopolymerization [3]. These technologies have gained prominence as an alternative to conventional manufacturing in sectors including defense, aerospace, automotive, biomedical, and tooling industries [2-4].

Today, notable devices in metal-based additive manufacturing include EOS M290, Renishaw AM400, Desktop Metal Studio System, and Markforged Metal X [2, 5]. These systems operate on different sintering principles and provide cost-effective, high-precision manufacturing options tailored especially for small-scale production [4, 5]. Among them, the Markforged Metal X system stands out for its use of ADAM (Atomic Diffusion Additive Manufacturing) technology, which utilizes filament-based metal materials that are transformed into final parts through debinding and sintering [6]. With its wide material portfolio (e.g., 17-4 PH, H13, A2, D2, Cu), safe operation, and affordability, the Metal X system is increasingly preferred in small and medium-sized industrial settings [4-6]. ADAM technology stands out with its lower equipment cost, safer working environment, and simpler hardware requirements compared to traditional methods such as powder bed melting (PBF) and direct energy deposition (DED). Thanks to its filament-based production structure, it provides a more homogeneous density and excellent surface quality, creating an accessible and practical alternative in metal additive production [7]..

The development of multi-material structures offers numerous advantages, including a wide range of applications over traditional materials. Additive manufacturing enables not only monolithic but also bimetallic structures, which combine different materials to create components with enhanced mechanical and functional performance [8,9]. This approach allows for the local optimization of properties such as hardness, corrosion resistance, and wear resistance [10]. Bimetallic production offers significant advantages, especially in applications requiring mechanical properties such as strength and toughness in certain component areas. ADAM technology, on the other hand, can create a seamless metallurgical bond between dissimilar metals and overcome the limitations of traditional joining methods thanks to the layer-by-layer material deposition and controlled sintering process [11,12]. However, challenges including differences in thermal expansion coefficients, microstructural incompatibilities, and varying sintering behaviors complicate the reliable production of such multi-material components [13]. Therefore, evaluating the interfacial characteristics of these structures through microstructural examination and mechanical testing techniques—such as optical microscopy and hardness profiling—is essential, particularly when integrating dissimilar materials like D2 tool steel and 17-4 PH stainless steel [7,14].

2. MATERIALS AND METHODS (MATERYAL VE METOD)

In this study, two engineering materials with different properties were used to investigate the manufacturability of bimetallic structures by additive manufacturing methods: D2 tool steel and 17-4 PH stainless steel. Both materials were supplied in filament form compatible with the Markforged Metal X system.

Tool steel D2 has high wear resistance thanks to its alloy elements, especially its high carbon content, and is, therefore, widely used in the mold and cutting tool industry. 17-4 PH stainless steel is a frequently preferred material in the aviation, energy, and medical sectors thanks to its superior corrosion and mechanical properties, which can be improved with secondary heat treatments. The chemical compositions of the materials used are given in Table 1.

Table 1. Chemical composition of 17-4 PH and D2 Filament materials (17-4 PH ve D2 Filament Malzemelerinin Kimyasal Bileşimi)

Element	D2 Tool Steel (%)	17-4 PH SS (%)
C (Carbon)	1.40 – 1.60	0.07 – 0.10
Cr (Chromium)	11.0 – 13.0	15.0 – 17.5
Mo (Molybdenum)	0.70 – 1.20	≤ 0.60
V (Vanadium)	0.70 – 1.20	—
Mn (Manganese)	≤ 0.60	≤ 1.00
Si (Silicon)	≤ 0.60	≤ 1.00
Ni (Nickel)	—	3.0 – 5.0
Cu (Copper)	—	3.0 – 5.0
Nb/Cb (Niobium)	—	0.15 – 0.45
Fe (Iron)	Balance	Balance

This study produced samples using the Metal X device belonging to Markforged. This system is based on ADAM (Atomic Diffusion Additive Manufacturing) technology, which divides the production process into three basic steps. In the first step, filaments containing metal powder were extruded layer by layer to create a structure suitable for the specified geometry. The second step involved placing the completed green parts into a special solvent bath and removing the plastic binder. In the third and final stage, the parts were taken into a sintering furnace at high temperatures under a controlled atmosphere and combined at the atomic level, and a high-density structure was obtained. The manufacturer's recommendations carried out the sintering process in an N_2/H_2 gas mixture atmosphere at 1300 ° C for approximately 24 hours.

Printing processes were controlled by Markforged Eiger™ software and were based on standard parameters recommended by the manufacturer. However, parameters such as layer height and infill ratio were optimized to increase the interface integrity between the two different materials. The samples were designed as a structure where two different materials were combined, with 75% D2 and 25% 17-4 PH ratios. Changing the filament tank during the production process produced two materials sequentially along a vertical interface in a single printing cycle. This structure was designed to consist of 80 layers; the first 60 layers were produced using D2, and the last 20 layers were produced using 17-4 PH material. A solid infill structure was preferred, and a wall thickness of 4 mm was determined for the printing parameters to ensure optimum mechanical properties. This design was structured to increase mechanical strength and obtain a clear material transition. All processes during production were carried out with software support.

Various characterization studies were performed on the produced samples. Density measurements were applied according to the Archimedes principle. SEM (scanning electron microscopy) analyses were performed for microstructure characterization using JEOL JSM 6060 LV. EDS (Energy Dispersive X-ray spectroscopy) and MAP (element distribution) analyses to evaluate the chemical transition in the interface region were also taken with the same device and were performed with 20 kV acceleration voltage. XRD (X-ray Diffraction) studies for structural phase analyses were performed using a Bruker brand X-ray diffractometer. XRD measurements were performed by scanning in the range of $2\theta = 30^o$-90° with a step size of 0.02^o. The hardness profile was measured in different material regions using the micro-Vickers method, and the mechanical property differences in the transition region were evaluated. Figure 1 shows the design of Bimetal material production in the Eiger Program

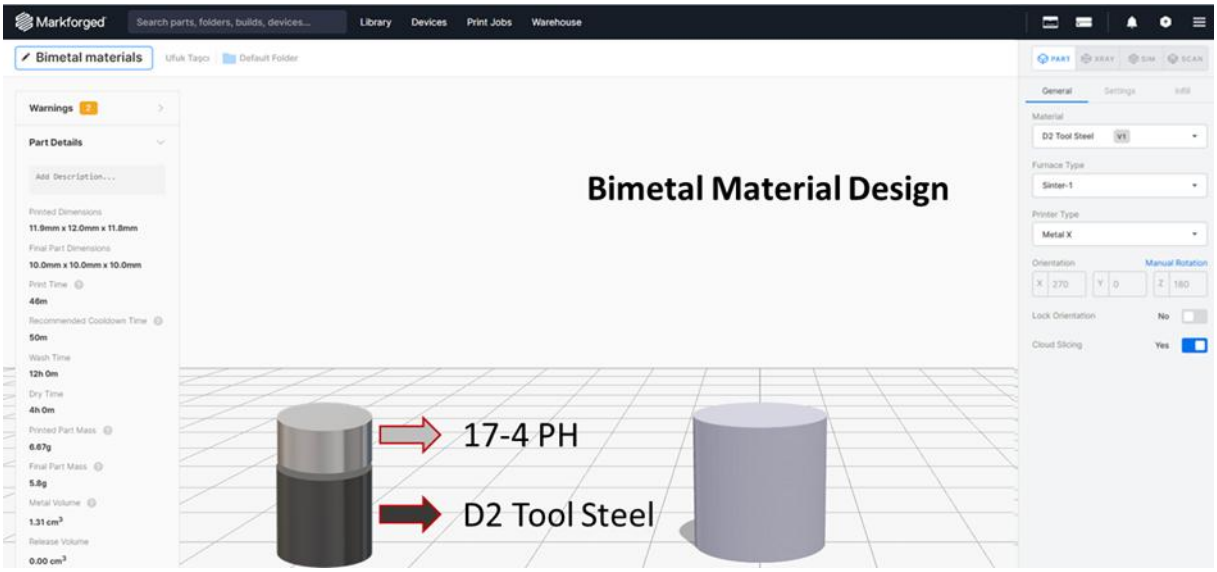


Figure 1. Design of bimetallic material production (Bimetalik malzeme üretiminin tasarımı)

The test samples were designed as cylindrical, especially with dimensions of 10x10 mm. The cylindrical geometry prevented problems such as accumulation and cracks that would occur during production steps. The produced sample was cut from the lateral section on the wire erosion machine for microstructure characterization. The transition region between the materials was positioned along the Z axis, i.e., in the vertical direction. Thanks to this configuration, microstructural differences that may occur after sintering could be observed, and the interfacial behavior could be analyzed in detail.

3. RESULTS AND DISCUSSION (SONUÇLAR VE TARTIŞMA)

D2 tool steel and 17-4 PH stainless steel used in bimetallic production can be processed in the same production cycle due to their similar sintering temperature ranges. In the sample used in this study, since the D2 material has a volume fraction of approximately 75%, the sintering process was planned according to the technical requirements of D2 and carried out in an atmosphere-controlled furnace. After sintering, classical metallography preparation processes were applied to the bimetal sample and then the microstructure of the D2/17-4 PH structure produced with the Markforged Metal X device is presented as an optical microscope image in Figure 2. In the microstructure examination, it was observed that successful sintering took place between the two different materials and continuity was provided at the interface. It is understood that the micropores detected in the sample were formed during the production process and are a natural result of the layered printing process in particular. These pores are related to the production process carried out without applying any external pressure and the removal of binders during washing and sintering at the green part stage. Therefore, porosity was considered as part of the microstructural characteristic of the material and interpreted as a property specific to the production method.

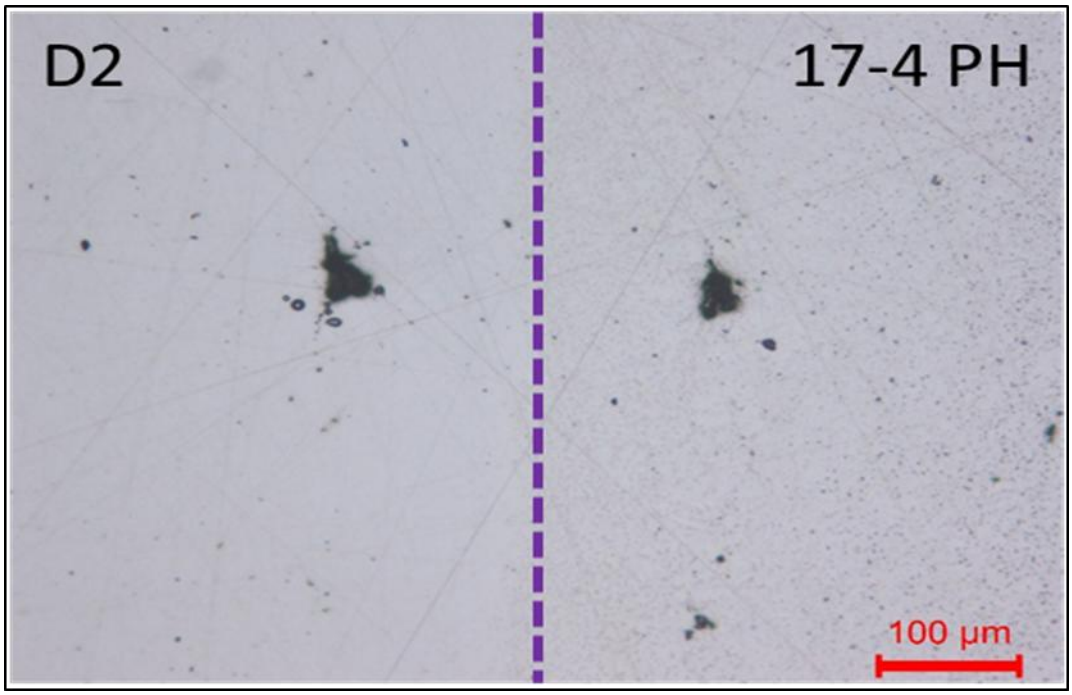


Figure 2. Optical microscope image of printed bimetallic material (Baskılı bimetalik malzemenin optik mikroskop görüntüsü)

Figure 3 shows the XRD patterns and crystal structure analysis results of the produced bimetal material. The prominent peaks of the 17-4 PH martensite phase were detected at 44.5, 65, and 82 at 2Θ. In the same analysis, the ferrite phases of the D2 material were also determined [14,15]. As a result of XRD analysis, it was determined that there were Fe-Cr, α-Fe and austenite phases in the bimetallic structure. These phases show that both materials (D2 and 17-4 PH) maintain their unique microstructural characteristics. The main thing to notice about the Fe-Cr phases is that D2 tool steel has a lot of chromium, which makes it very hard and resistant to wear. α-Fe (ferrite) phases are another phase typically seen in D2 steel and contribute to the mechanical strength of the structure [16]. The austenite phase, one of the characteristic peaks of the 17-4 PH region, represents the ductility and toughness of the material that can be improved by heat treatment [17]. This phase distribution shows that both materials maintain separate phases and that there is no significant phase transformation at the interface. Thus, it is understood that the produced bimetallic structure can carry functional differences and offer an advantageous mechanical profile for application areas.

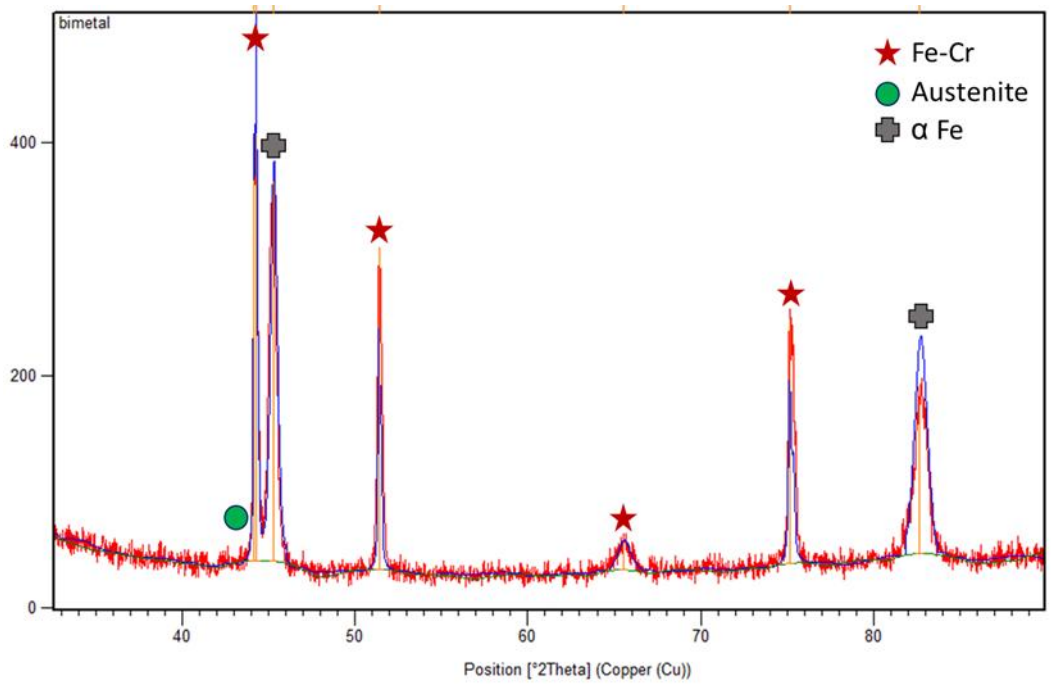


Figure 3. XRD patterns of printed bimetallic sample (Basılı bimetalik numunenin XRD desenleri)

The density value of the produced bimetallic sample was 95.4%, and the relevant measurement results are presented in Figure 4. This rate is a remarkable value when the limitations of the filament-based metal additive manufacturing technology are considered. Especially in ADAM (Atomic Diffusion Additive Manufacturing) technology, reaching densities above 90% is considered a technical success due to the gaps formed after sintering and the expansion differences between the materials. One of the highest density values obtained in the studies conducted with Markforged Metal X in the literature was reported as 92.9% [18,19]. In this context, the 95.4% density value obtained in our study is significant in showing both the suitability of the sintering parameters and the compatibility of D2 and 17-4 PH materials.

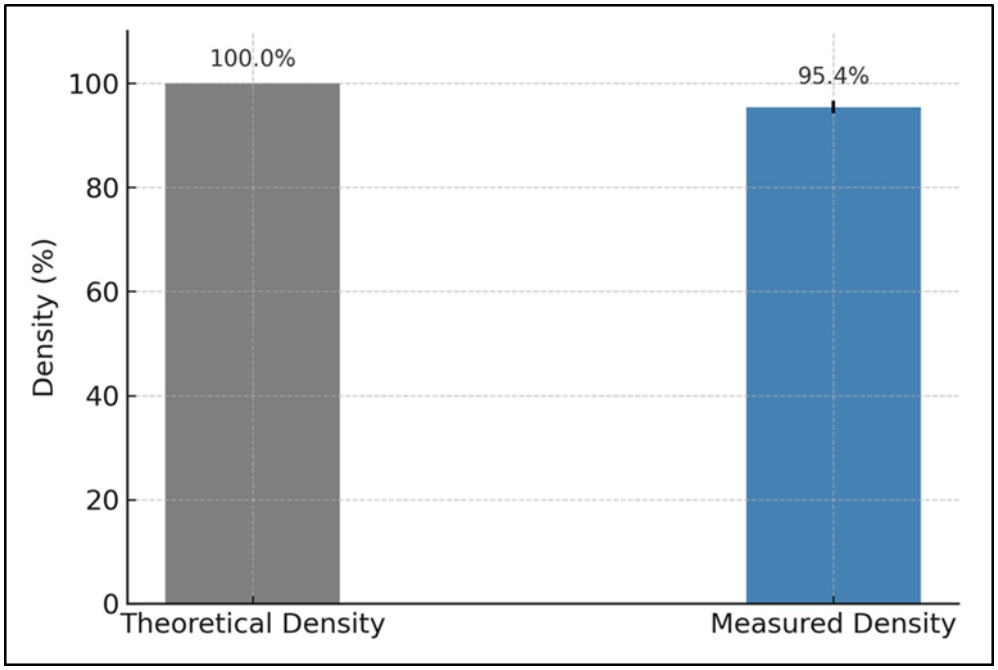


Figure 4. Density measurements for printed bimetallic samples (Baskılı bimetalik numuneler için yoğunluk ölçümleri)

Microhardness measurements provided important data for evaluating mechanical differences between D2 and 17-4 PH materials and the bimetallic transition region, and the relevant results are presented in Figure 5. According to the HV(0.5) load measurements, an average of 422.3 HV was obtained in the D2 tool steel region, 385.2 HV in the 17-4 PH stainless steel region, and 386.1 HV in the bimetallic transition region. It was observed that D2 exhibited a more complex and hard structure due to its higher carbon and alloying element content. On the other hand, 17-4 PH steel showed moderate hardness due to the precipitation hardening mechanism. The hardness value obtained in the transition region was measured very close to the 17-4 PH region and with a low deviation (±1 HV), indicating that no significant mechanical discontinuity occurred between the two materials. In addition, the fact that no sudden fluctuations, sharp drops, or jumps were observed in the measurements in the transition region revealed that the hardness profile progressed statistically continuously and in a curvilinear character. This supports the successful material diffusion after sintering and the fact that no sudden phase or structure changes occurred in the transition region. Therefore, the transition region was evaluated as "homogeneous" regarding the average value and the smooth trend of the hardness distribution [20].

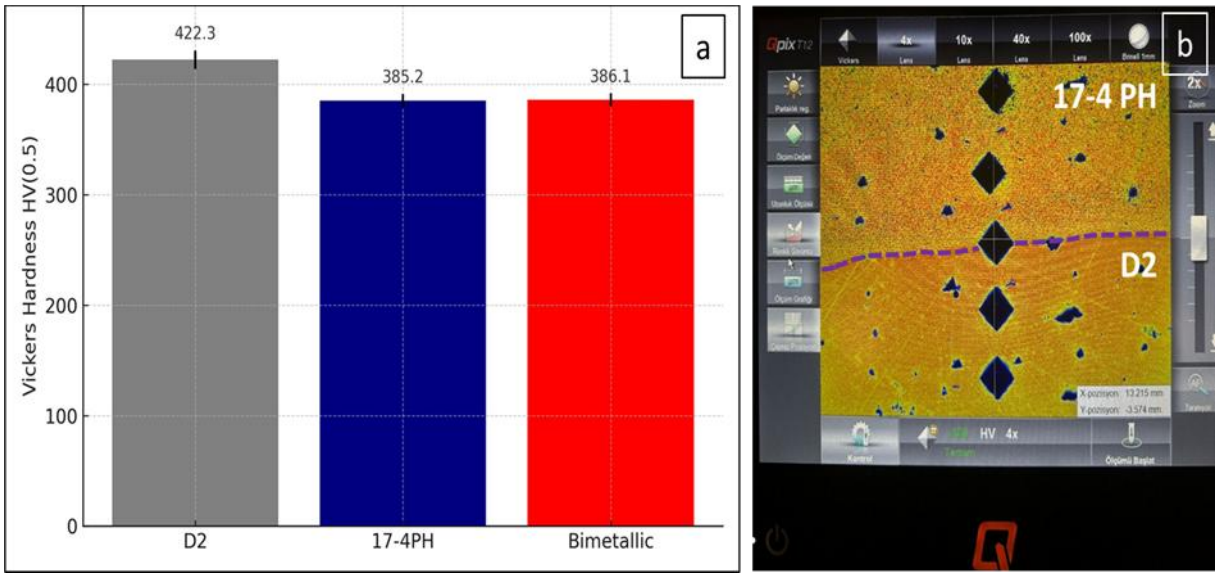


Figure 5. Hardness value of printed bimetallic material (a), analysis application image (b)(Baskılı bimetalik malzemenin sertlik değeri (a), analiz uygulama görüntüsü (b))

SEM/EDS analyses evaluated the elemental distribution and chemical transition at the interface between D2 tool steel and 17-4 PH stainless steel. The spectra taken from four different regions marked on the figure revealed the characteristic alloy elements of both materials. Regions 1 and 2 are located on the D2 side and are seen to contain high amounts of chromium (13.56–17.69%) and alloy elements such as vanadium, molybdenum and niobium associated with carbon. The fact that nickel and copper elements specific to 17-4 PH material are not found in these regions shows that the material boundaries are successfully protected. Regions 3 and 4 are located on the 17-4 PH side, and here, nickel, chromium, and copper elements contributing to precipitation hardening together with high iron content (69.90–74.99%) were also detected. Especially at point number 4, the significant increase in nickel (4.35%), chromium (24.55%), and copper (1.04%) ratios shows that the precipitation character is prominent in this region. The same point is also remarkable in representing the boundary region where the chemical transition starts, as it is close to the interface region. The EDS spectra, particularly in areas 1 and 3, show a clear but steady change in the amounts of the alloying elements Cr, Fe, and Ni. This gradual transition proves that ADAM technology successfully performs interatomic diffusion during sintering. According to the measurements made on the image, it was determined that the transition occurred with a width of approximately 30 µm. This numerical

value shows that the transition region has both microstructural and chemical continuity, i.e., a diffusion-based bond is formed instead of a clear boundary between the two materials. This situation offers a significant advantage in interfacial stability and long-term mechanical strength. All these findings reveal that two different materials are combined layer by layer during the printing process and that chemical contamination remains quite limited, thus confirming that the Markforged Metal X system can successfully manage material transitions in bimetallic production and support the continuity of the interface [21,22].

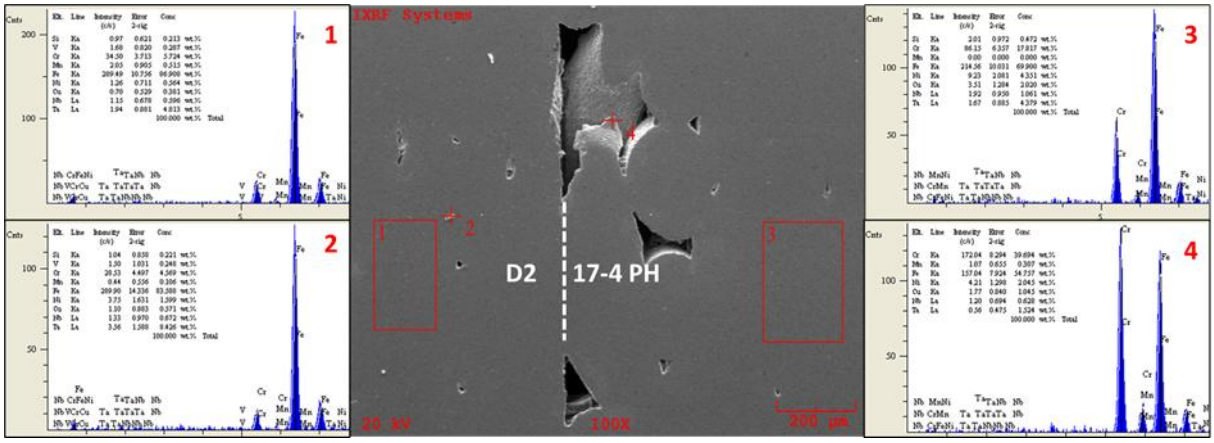


Figure 6. SEM/EDS analysis image of printed bimetallic samples (Basılı bimetalik numunelerin SEM/EDS analiz görüntüsü)

Figure 7 provides an element mapping (MAP) analysis to evaluate the distribution of main alloy elements on the surface of the bimetallic structure consisting of D2 and 17-4 PH materials. The distributions of Fe, Cr, Ni, Cu, Nb, Ta, Mn, and Si elements were mapped separately in the analyses performed in the regions determined on the SEM image. Since the iron (Fe) element constitutes the basic structure of both materials, it shows a homogeneous and dense distribution in both regions. Although the chromium (Cr) element is found in high amounts in both alloys, it has a more widespread superficial distribution, especially on the 17-4 PH side; this situation coincides with the high chromium content (15–17%) that provides the stainless property of the material. It was observed that the elements such as nickel (Ni) and copper (Cu), which play an active role in precipitation hardening, are predominantly localized in the 17-4 PH region and are more densely distributed there. Microalloying elements such as niobium (Nb) and tantalum (Ta) were found to be distributed homogeneously in both regions at low concentrations. Manganese (Mn) and silicon (Si) elements are found as additive elements in both materials but generally have a sparser distribution [23,24].

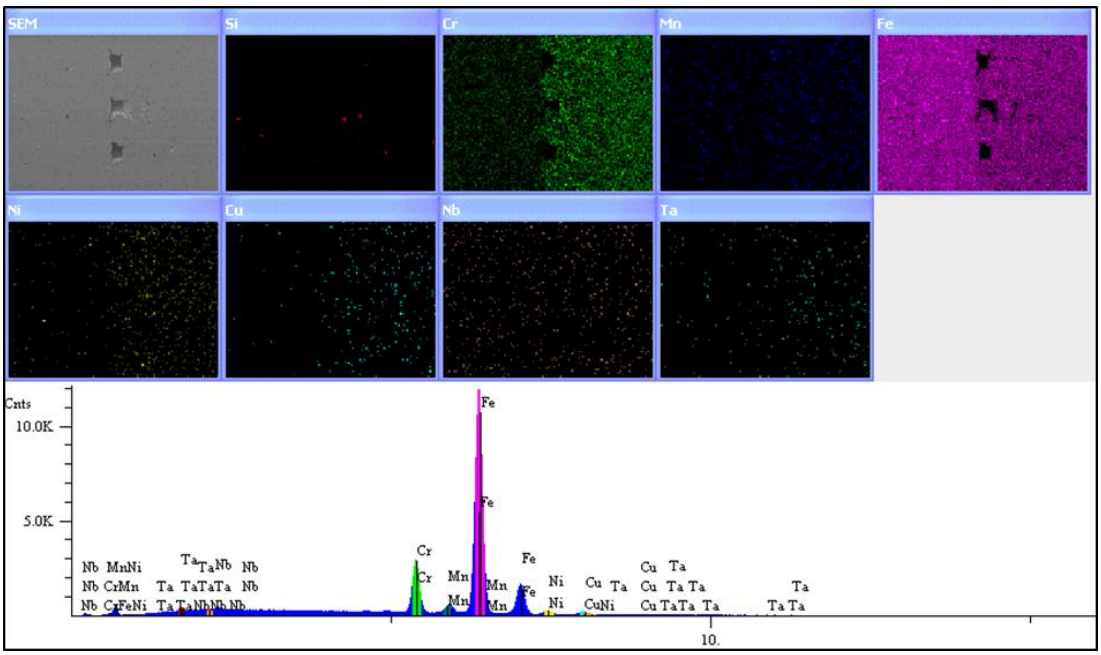


Figure 7. SEM/MAP analysis image of printed bimetallic samples (Basılı bimetalik numunelerin SEM/MAP analiz görüntüsü)

4. CONCLUSIONS (SONUÇLAR)

This study showed that D2 tool steel and 17-4 PH stainless steel could be successfully combined into a single bimetallic sample using a Markforged Metal X device. The properties of the bimetallic sample, such as density, microstructure characterization, and SEM/EDS/MAP, were investigated, and the experimental results are given below:

- D2 and 17-4 PH materials were successfully made together in the same production cycle because they have similar sintering temperature ranges, which indicated that ADAM technology is good for producing multiple materials at once.

- The 95.4% density value, which is uncommon in filament-based additive manufacturing systems, shows that the process optimization and sintering parameters are effective; this indicates that the production quality is good enough for industrial use.

- Microhardness tests indicated that there were no sudden changes in strength in the transition area, which confirms that a smooth transition was created at the interface without any breaks and kept the structure intact.

- The XRD analyses showed that the key microstructure features of both materials remained intact after sintering, and their functional properties were still preserved.

- SEM/EDS data indicate that the edge between the materials is well maintained, and there is a careful chemical change at the interface; this helps stop material separation and improves production quality.

- In MAP analyses, the typical arrangement of alloying elements like Cr, Ni, Fe, and Cu in both areas helps keep the material identifiable and maintains the separation of functions within the structure.

- The general production process and characterization results demonstrate the successful use of the Markforged Metal X system for bi-metal production and interface engineering.

- The findings show that cost-effective and functional bimetal components can be produced in applications requiring different mechanical demands within the same part, especially in mold, aviation, and automotive sectors.

ACKNOWLEDGMENTS (TEŞEKKÜR)

This study was supported by Gazi University BAP with the project number FBG-2022-7860 " Eklemeli İmalat Yöntemiyle Inconel 625 Matrisli B4C Katmanlı Fonksiyonel Derecelendirilmiş Kompozit Malzeme Üretimi Yapısal Mekanik Tribolojik ve

Radyoaktivite Özelliklerinin Araştırılması". / Bu çalışma Gazi Üniversitesi BAP tarafından FBG-2022-7860 "Eklemeli İmalat Yöntemiyle Inconel 625 Matrisli B4C Katmanlı Fonksiyonel Derecelendirilmiş Kompozit Malzeme Üretimi Yapısal Mekanik Tribolojik ve Radyoaktivite Özelliklerinin Araştırılması" proje numarası 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)

***Ufuk TAŞCI*:** 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] Hull, C. W. (1984). Apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography. United States Patent, Appl., No. 638905, Filed.

[2] Gibson, I., Rosen, D., Stucker, B., Khorasani, M., Rosen, D., Stucker, B., & Khorasani, M. (2021). Additive manufacturing technologies (Vol. 17, pp. 160-186). Cham, Switzerland: Springer.

[3] Standard, A. S. T. M. (2012). Standard terminology for additive manufacturing technologies. ASTM International F2792-12a, 46, 10918-10928.

[4] Guo, N., & Leu, M. C. (2013). Additive manufacturing: Technology, applications and research needs. Frontiers of Mechanical Engineering, 8(3), 215–243. https://doi.org/10.1007/s11465-013-0248-8

[5] 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. https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.02.012

[6] Markforged. (2023). Metal X system datasheet. Retrieved from https://markforged.com

[7] DebRoy, T., Wei, H. L., Zuback, J. S., Mukherjee, T., Elmer, J. W., Milewski, J. O., ... & Zhang, W. (2018). Additive manufacturing of metallic components–process, structure and properties. Progress in materials science, 92, 112-224. https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2017.10.001

[8] Liu, Y., Jiang, D., & Ning, F. (2025). Sintering Mechanisms in Metal Extrusion-based Sintering-assisted Additive Manufacturing: State-of-the-Art and Perspectives. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 1-70.. https://doi.org/10.1115/1.4068066

[9] Bandyopadhyay, A., & Heer, B. (2018). Additive manufacturing of multi-material structures. Materials Science and Engineering: R: Reports, 129, 1-16. https://doi.org/10.1016/j.mser.2018.04.001

[10] Tammas-Williams, S., & Withers, P. J. (2016). The application of additive manufacturing in the aerospace sector: A review. Materials Science and Technology, 32(8), 641–648. https://doi.org/10.1179/1743284715Y.0000000078

[11] Jang, D., Kim, J., & Oh, I. (2018). Interfacial bonding characteristics of dissimilar metal manufactured by additive manufacturing. Journal of Materials Processing Technology, 255, 715–722. https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.12.027

[12] Röttger, A., Wieczorek, L., Schmidtseifer, N., Katzwinkel, T., Blüm, M., & Löwer, M. (2025). Additive manufacturing of carbon-martensitic hardening ledeburitic cold work tool steels using Fused Filament Fabrication and subsequent Supersolidus Liquid-Phase Sintering. Progress in Additive Manufacturing, 10(1), 679-700. https://doi.org/10.1007/s40964-024-00650-9

[13] Jang, D., Kim, J., & Oh, I. (2018). Interfacial bonding characteristics of dissimilar metal manufactured by additive manufacturing. Journal of Materials Processing Technology, 255, 715–722. https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.12.027

[14] Röttger, A., Wieczorek, L., Schmidtseifer, N., Katzwinkel, T., Blüm, M., & Löwer, M. (2025). Additive manufacturing of carbon-martensitic hardening ledeburitic cold work tool steels using Fused Filament Fabrication and subsequent Supersolidus Liquid-Phase Sintering. Progress in Additive Manufacturing, 10(1), 679-700. https://doi.org/10.1007/s40964-024-00650-9

[15] Wieczorek, L., Katzwinkel, T., Blüm, M., Löwer, M., & Röttger, A. (2022). Supersolidus Liquid Phase Sintering and Heat Treatment on Atomic Diffusion Additive Manufacturing Produced Ledeburitic Cold Work Tool Steel. HTM Journal of Heat Treatment and Materials, 77(4), 269-283. https://doi.org/10.1515/htm-2022-1019

[16] Zou, J., Grosdidier, T., Zhang, K., & Dong, C. (2006). Mechanisms of nanostructure and metastable phase formations in the surface melted layers of a HCPEB-treated D2 steel. Acta Materialia, 54(20), 5409-5419. https://doi.org/10.1016/j.actamat.2006.05.053

[17] Sabooni, S., Chabok, A., Feng, S. C., Blaauw, H., Pijper, T. C., Yang, H. J., & Pei, Y. T. (2021). Laser powder bed fusion of 17–4 PH stainless steel: A comparative study on the effect of heat treatment on the microstructure evolution and mechanical properties. Additive Manufacturing, 46, 102176. https://doi.org/10.1016/j.addma.2021.102176

[18] Rodriguez, J., Zuriarrain, A., Madariaga, A., Arrazola, P. J., Dominguez, E., Fraile, I., & Soler, D. (2023). Mechanical Properties and Fatigue Performance of 17-4 PH Stainless Steel Manufactured by Atomic Diffusion Additive Manufacturing Technology. Journal of Manufacturing and Materials Processing, 7(5), 172. https://doi.org/10.3390/jmmp7050172

[19] Jacob, J., Pejak Simunec, D., Kandjani, A. E. Z., Trinchi, A., & Ippolito, S. (2024). A review of fused filament fabrication of metal parts (Metal FFF): Current developments and future challenges. **Technologies, 12**(12), 267. https://www.mdpi.com/2227-7080/12/12/267

[20] Reddy, V. V., Valli, P. M., & Kumar, A. (2015). Influence of process parameters on characteristics of electrical discharge machining of PH17-4 stainless steel. **Journal of Advanced Manufacturing Technology**, 9(3), 215–224. https://doi.org/10.1142/S0219686715500122

[21] Michla, J.R.J., Rajkumar, C.R. Surface Microstructure Evolution of Additively Manufactured 17-4 PH Stainless Steel by Nitroxy-Quenching Polishing Quenching Process. J. of Materi Eng and Perform (2025). https://doi.org/10.1007/s11665-025-10650-7

[22] Gholipour, A., Shamanian, M., & Ashrafizadeh, F. (2011). Microstructure and wear behavior of stellite 6 cladding on 17-4 PH stainless steel. Journal of Alloys and Compounds, 509(14), 4905-4909. https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2010.09.216

[23] Dong D, Wang J, Chen C, Tang X, Ye Y, Ren Z, Yin S, Yuan Z, Liu M, Zhou K. Influence of Aging Treatment Regimes on Microstructure and Mechanical Properties of Selective Laser Melted 17-4 PH Steel. Micromachines. 2023; 14(4):871. https://doi.org/10.3390/mi14040871

[24] Michla JRJ, Rajkumar CR. Corrosion behaviour of nitroxy-QPQ additively manufactured 17-4 PH steel on marine and nuclear reactor components. Surface Engineering. 2024;40(11-12):1113-1120. doi:10.1177/02670844241287344

Gazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Dergisi
PART C: TASARIM VE TEKNOLOJİ

Gazi University
Journal of Science
PART C: DESIGN AND TECHNOLOGY

GU J Sci, Part C, 13(2): 499-511 (2025)

Investigation of Mechanical Properties of Granite Waste Sludge and Sepiolite Substituted Self-Compacting Mortars

Aynur İRMAK ER[1*] Salih YAZICIOĞLU[2]

[1]*Kırşehir Ahi Evran University, Kaman vocational high school, Drilling technology, Kırşehir, Turkey*

[1]*Gazi University, Faculty of Technology, Civil Engineering Department, Ankara, Turkey*

[2]*Gazi University, Faculty of Technology, Civil Engineering Department, Ankara, Turkey*

Article Info

Research article
Received: 31/07/2024
Revision: 25/09/2024
Accepted: 08/10/2024

Keywords

Self-compacting mortar
Granite waste sludge
Sepiolite
Fresh properties
Mechanical properties

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 31/07/2024
Düzeltme: 25/09/2024
Kabul: 08/10/2024

Anahtar Kelimeler

Kendiliğinden yerleşen harç
Granit atık çamuru
Sepiyolit
Taze özellikleri
Mekanik özellikleri

Graphical/Tabular Abstract (Grafik Özet)

In this study, the mechanical properties of Self-Compacting Mortars (SCC) produced by replacing Portland Cement (PC) with Granite Waste Mud (GWM) and Sepiolite (SP) at different ratios were investigated./ Bu çalışma ile, Portland Çimentosu (PÇ) yerine farklı oranlarda Granit Atık Çamuru (GAÇ) ve Sepiyolit (SP) ilave edilerek üretilen Kendiliğinden Yerleşen Harçların (KYH) mekanik özellikleri araştırılmıştır.

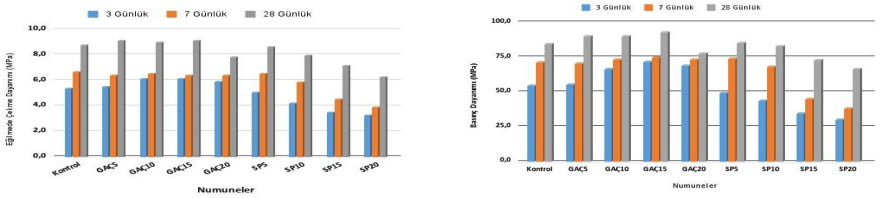


Figure A: *Compressive and flexural tensile strengths of self-compacting mortars containing a single type of mineral admixture. /* ***Şekil A:*** *Tek tip mineral katkı içeren kendiliğinden yerleşen harçların basınç ve eğilmede çekme dayanımları.*

Highlights (Önemli noktalar)

- *Determination of workability and consistency values of granite waste sludge and sepiolite in self-compacting mortars / Granit atık çamuru ve sepiyolitin kendiliğinden yerleşen harçlarda işlenebilirlik ve kıvam değerlerinin belirlenmesi*
- *Investigation of capillary water absorption, total water absorption and porosity values of granite waste sludge and sepiolite in self-compacting mortars / Granit atık çamuru ve sepiyolitin kendiliğinden yerleşen harçlarda kapiler su emme, toplam su emme ve porozite değerlerinin incelenmesi*
- *Investigation of compressive and flexural tensile strength of granite waste sludge and sepiolite in self-compacting mortars / Granit atık çamuru ve sepiyolitin kendiliğinden yerleşen harçlarda basınç ve eğilmede çekme dayanımlarının incelenmesi*

Aim (Amaç): *The aim of this study was to determine the mechanical properties of Self-Compacting Mortars (SCC) produced by replacing Portland Cement (PC) with Granite Waste Mud (GWM) and Sepiolite (SP) at different ratios. / Bu çalışma ile, Portland Çimentosu (PÇ) yerine farklı oranlarda Granit Atık Çamuru (GAÇ) ve Sepiyolit (SP) ilave edilerek üretilen Kendiliğinden Yerleşen Harçların (KYH) mekanik özelliklerinin belirlenmesi amaçlanmıştır.*

Originality (Özgünlük): *In this study, the mechanical properties of self-compacting mortars prepared using granite waste sludge and sepiolite were determined. / Bu çalışmada granit atık çamuru ve sepiyolit kullanılarak hazırlanan kendiliğinden yerleşen harçların mekanik özellikleri belirlenmiştir.*

Results (Bulgular): *The average flexural tensile strength and compressive strength of the specimens produced with granite waste sludge and sepiolite were 8.7-7.3 MPa and 87.6-76.8 MPa, respectively. / Granit atık çamuru ve sepiyolit ile üretilen numunelerin ortalama eğilmede çekme dayanımı 8,7-7,3 MPa ve basınç dayanımı 87,6-76,8 MPa sonuçları elde edilmiştir.*

Conclusion (Sonuç): *The highest strength was observed at 15% of GWC in KYH specimens where granite waste sludge and sepiolite were used as mineral additives. Better results were obtained than the control specimen by positively affecting the strength. While sepiolite increased the strength when used at low rates of 5%, it negatively affected the ultimate strength as the amount of powder increased. / Mineral katkı olarak granit atık çamuru ve sepiyolit kullanıldığı KYH numunelerinde GAÇ %15'te en yüksek dayanım gözlenmiştir. Dayanımı olumlu yönde etkileyerek kontrol numunesinden daha iyi sonuçlar elde edilmiştir. Sepiyolit düşük oranlarda %5 kullanıldığında dayanımı arttırırken toz miktarı arttıkça nihai dayanımınlarını olumsuz yönde etkilemiştir.*

*Corresponding author, e-mail: aynurirmak@ahievran.edu.tr
DOI: 10.29109/gujsc.1525887

GU J Sci, Part C, 13(2): 499-511 (2025)

Gazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Dergisi
PART C: TASARIM VE TEKNOLOJİ

Gazi University
Journal of Science
PART C: DESIGN AND TECHNOLOGY

http://dergipark.gov.tr/gujsc

Investigation of Mechanical Properties of Granite Waste Sludge and Sepiolite Substituted Self-Compacting Mortars

Aynur İRMAK ER[1*] Salih YAZICIOĞLU[2]

[1]*Kırşehir Ahi Evran University, Kaman vocational high school, Drilling technology, Kırşehir, Turkey*

[1]*Gazi University, Faculty of Technology, Civil Engineering Department, Ankara, Turkey*

[2]*Gazi University, Faculty of Technology, Civil Engineering Department, Ankara, Turkey*

Article Info

Research article
Received: 31/07/2024
Revision: 25/09/2024
Accepted: 08/10/2024

Keywords

Self-compacting mortar
Granite waste sludge
Sepiolite
Fresh properties
Mechanical properties

Abstract

In this study, the mechanical properties of Self-Compacting Mortars (SCC) produced by replacing Portland Cement (PC) with Granite Waste Sludge (GWS) and Sepiolite (SP) at different ratios were investigated. A total of 17 mortar specimens were produced by using GAC from Granitaş operation in Kırşehir and SP from Eskişehir Akmin Mineral and Mining together and separately. One of the important factors affecting the properties of self-compacting concretes is the freshness of mortars. In order to determine the workability of the mortars and to investigate their self-compacting properties, mini-slump-spread and mini V-moon tests were performed. Three-point flexural and compressive tests were performed on the prepared specimens at 3, 7 and 28 days periods. In addition, capillary water absorption tests were performed on 28-day old samples and then total porosity ratios, water absorption and densities of the samples were determined. When evaluated in terms of fresh and hardened properties of the mortars, it was determined that SP material can be used as a mineral admixture in mortars at substitution rates up to 15%, and SP can be used as a mineral admixture in mortars at low addition rates. The amount of water used in self-compacting mortars prepared with granite waste sludge decreased compared to the control sample. The specimens prepared with GCS gave better strength results than the control specimen and SP due to its more void-free structure. Since SP is a clay mineral, it required more water than the control sample. In addition, when the amount of SP mineral additive exceeded 5%, the tensile and compressive strength values in bending were lower.

Granit Atık Çamuru ve Sepiyolit İkameli Kendiliğinden Yerleşen Harçların Mekanik Özelliklerinin Araştırılması

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 31/07/2024
Düzeltme: 25/09/2024
Kabul: 08/10/2024

Anahtar Kelimeler

Kendiliğinden yerleşen harç
Granit atık çamuru
Sepiyolit
Taze özellikleri
Mekanik özellikleri

Öz

Bu çalışma ile, Portland Çimentosu (PÇ) yerine farklı oranlarda Granit Atık Çamuru (GAÇ) ve Sepiyolit (SP) ilave edilerek üretilen Kendiliğinden Yerleşen Harçların (KYH) mekanik özellikleri araştırılmıştır. Çimento yerine ikame yöntemiyle Kırşehir yöresinde bulunan Granitaş işletmesine ait GAÇ ve Eskişehir Akmin Mineral ve Madenciliğe ait SP'le birlikte ve ayrı ayrı kullanılarak, toplamda 17 adet harç numunesi üretilmiştir. Kendiliğinden yerleşen betonların özelliklerini etkileyen önemli faktörlerden biri harçların taze özelliğidir. Harçların, işlenebilirliğini belirlemek ve kendiliğinden yerleşebilirlik özelliklerini araştırmak amacıyla, mini çökme-yayılma ve mini V-hunisi deneyleri yapılmıştır. Hazırlanan numuneler üzerinde 3, 7 ve 28 günlük periyotlarda üç noktalı eğilme ve basınç deneyi yapılmıştır. Ayrıca 28 günlük numuneler üzerinde kapiler su emme deneyi yapılarak ve daha sonra numunelerin toplam porozite oranları, su emme ve yoğunlukları belirlenmiştir. GAÇ malzemesi, harçların taze ve sertleşmiş özellikleri bakımından değerlendirildiğinde %15 'e kadar ikame oranlarında harç içerisinde mineral bir katkı olarak kullanılabilir olduğu, kullanılan SP düşük ilave oranlarında harç içerisinde mineral bir katkı olarak değerlendirilebilir olduğu belirlenmiştir. Granit atık çamuru ile hazırlanan kendiliğinden yerleşen harçlarda kullanılan su miktarı kontrol numunesine göre azalmıştır. GAÇ ile hazırlanan numuneler daha boşluksuz bir yapıya sahip olması nedeniyle kontrol numunesi ve SP'den daha iyi dayanım sonuçları vermiştir. Ayrıca SP mineral katkı miktarı %5'i aştığında, eğilmede çekme ve basınç dayanım değerleri daha düşük sonuçlar vermiştir.

*Corresponding author, e-mail: aynurirmak@ahievran.edu.tr
DOI: 10.29109/gujsc.1525887

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Kendiliğinden yerleşen beton (KYB), ilk olarak 1980'lerin ikinci yarısında, konvansiyonel betonlarda meydana gelen dayanıklılık problemlerini ortadan kaldırmak amacıyla Japonya'da bir grup bilim adamı tarafından üretilmiştir [1]. KYB, kendi ağırlığı ile sık donatılı, dar ve derin kesitlere yerleşebilen, iç ve dış vibrasyon gerektirmeksizin, kendiliğinden sıkışabilen, bu özelliğini sağlarken ayrışma ve terleme gibi problemler yaratmayarak kohezyonunu (stabilitesini) koruyabilen, çok akıcı kıvamlı özel bir beton türüdür [2].

KYB, özellikle deprem sonrası onarım-güçlendirme işleri ve prefabrik sektörü başta olmak üzere inşaatın farklı alanlarında giderek daha fazla uygulanma olanağı bulmaktadır. KYB kolay yerleşmesi, vibrasyon gerektirmemesi, ayrışma direncinin yüksek oluşu, yüksek durabilite özelliği gibi nedenlerle yüksek performanslı beton üretiminde oldukça önemlidir. KYB'un bileşimi, etkin bir süper akışkanlaştırıcı yanında toplam ince malzeme miktarı, viskozite artırıcı katkı kullanımı, su/bağlayıcı oranı, maksimum agrega boyutu, kum/toplam agrega oranı ve toplam iri agrega miktarı gibi parametreler açısından geleneksel betondan farklılıklar gösterir [3]. Mineral katkıların ve beton tasarımına uygun olarak kullanımını sağlamak amacıyla yeni deney yöntemleri ve standartlar geliştirilmiştir. Bu çalışmada TS EN 12350-9 ve EFNARC (European Federation of National Trade Associations) tarafından yayınlanan standartlardan faydalanılmıştır [4-6]. EFNARC, kendiliğinden yerleşen betonun işlenebilirliğini değerlendirirken üç temel özelliğin sağlanmasını ister. Bunlar, betonun hacmi tamamen doldurma kapasitesi, akma oranıyla belirlenen uygun viskozite, dar kesitlerden geçiş yeteneği ve ayrışma (segregasyon) direncidir.[5].

Kendiliğinden yerleşen beton veya harçların en önemli sorunlarından biri maliyettir. Bu durum kimyasal katkı ve çimentonun yüksek miktarda kullanımından kaynaklanmaktadır. Kimyasal katkının kullanımı KYB için kaçınılmaz bir durum olduğundan çimento miktarı puzolanik veya toz haldeki mineral katkılar kullanılarak azaltılabilir. Mineral katkı maddeleri, çimentonun harç karışımlarında ve hafif beton, reaktif pudra, silindirle sıkıştırılmış ve kendiliğinden yerleşen beton gibi bazı beton türlerinde, puzolanik ve/veya kendinden kaynaklanan bağlama mekanik etkilerinden özellikleri ve dayanıklılığı arttırmak için kullanılmaktadır [7-9]. Bu mineral katkılara, silis dumanı, uçucu kül, sepiyolit, granit tozu, yüksek fırın cürufu vb. örnek verilebilir. Bu alanda yapılan çalışmalardan örnek verilirse, Şahmaran vd., kimyasal katkılar ile uçucu kül, tuğla tozu, kaolin ve kireçtaşı tozunun KYH üzerindeki etkilerini araştırırken, Kavas vd., sepiyolit takviyeli çimento kompozitlerin yapısal özellikleri ve optimum karışım oranlarını araştırılarak, %10 oranında sepiyolit (doğal kil minerali) liflerinin eklenmesinin harcın mekanik ve fiziksel özelliklerini iyileştirdiğini belirlemiştir [10, 11].

Menezes vd. (2005) ve Gomes vd, (2021) granit kesim artıklarının seramik materyallerde kullanılabilirliğini inceleyerek, fiziksel ve mineralojik yapı açısından olumlu sonuçlar elde etmişlerdir. [12, 13]. Uysal, mermer artık tozlarını kendiliğinden yerleşen betonda kullanmış olumlu sonuçlar elde etmiştir [14]. Sharma vd. (2008) granit artıklarının beton içinde parça agrega olarak kullanımını araştırmışlardır. Çalışmanın sonucunda, ürünlerin su emme, su geçirimliliği ve aşınma dayanımı özelliklerinde iyileşmeler gözlemlenirken, çekme ve basınç dayanımı değerlerinde azalma tespit edilmiştir. Ayrıca, bu artıkların yapay mermer üretiminde kullanılabilirliğine yönelik de bazı araştırmalar yapılmıştır.[15].

Samad & Rashid (2020) yaptıkları çalışmada dolomit ve granit artığı kullanarak yapay mermer üreterek, ürünlerin fiziksel ve mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Çalışmalarında ağırlıkça %10 granit atığını dolomit yerine kullanmanın basınç ve çekme dayanımı değerlerini artırdığını, su emme oranını düşürdüğünü belirlemişlerdir [16]. Barani (2016) çalışmasında granit ve mermer artıklarını kullanarak yapay mermer üretmiş ve ürünlerin doğal taşlara kıyasla yoğunluk, su emme, eğilme, basınç dayanımı değerlerinin daha iyi olduğunu belirlemişlerdir [17].

Boz (2019), yaptığı çalışmasında granitin bozunmuş hali olarak bilinen ve granit agregası

olarak adlandırılan doğal malzemenin filler olarak kullanılmasının beton üzerindeki etkilerini araştırmıştır. Karışımda CEM II/A-P 52.5 N Portland çimentosu tercih edilirken; çimentonun ağırlıkça % 5, % 10, % 15'i filler malzeme miktarı olarak belirlenip, bu miktar karışımda agregayla yer değiştirilmiştir. En yüksek basınç dayanımı ve eğilme dayanımı değerlerine sırasıyla % 15 ve % 10 filler katkılı numunelerde ulaşılmıştır. Filler miktarının artması ve kür süresinin uzun tutulmasının betonun mekanik özelliklerini olumlu yönde geliştirdiği sonucu ortaya konulmuştur [18].

KYH, KYB'na benzer mekanik ve dayanıklılık özellikleri sergiler ve KYB' un performans mekanizmalarını incelemek için kullanılabilir [10]. Harç, KYB işlenebilirlik özelliklerinin temelini oluşturduğundan dolayı bu özellikler KYH' lar ile değerlendirilebilir. Aslında, KYH'ların özelliklerini değerlendirmek KYB tasarımının ayrılmaz bir parçasıdır [10, 12]. Kendiliğinden yerleşen beton tasarım yöntemleri genellikle, hamur veya harç üzerinde ön çalışma gerektirmektedir. Domone ve Jin (1999) göre KYB'da harç deneylerinin üstünlükleri, KYB'nin geleneksel betona göre daha az iri agrega içermesinden (hacimce % 30) kaynaklanır; bu nedenle harç özellikleri baskındır, harç tasarımın temelini oluşturur ve harçta deney yapmak daha kolaydır [19].

Özellikle granit endüstrisi önemli bir atık kaynağı olarak kabul edilir. Dünya granit üretiminin yılda 309 ile 349 milyon m^2 olduğu tahmin edilmektedir [20]. Bunların yaklaşık %20-30'u atık haline geliyor [21]. Bu atık katı veya çamur olabilir ve granit taşının kesilmesinden kaynaklanan farklı boyutlar katı atık olarak kabul edilir. Çamur atığı, tozun kesme ve parlatma aletinin soğutma suyuyla karıştırıldığı taş boyutunun dönüştürülmesi ve küçültülmesi sırasında oluşur [22]. Böylece, granit atık çamuru, granit kesme atığı, granit tozu veya kırılmış granit ince agregası olarak geniş bir şekilde tanımlanabilen bir kolloidal atık oluşur. Ortalama granit çamuru miktarının kesilmiş bloğun hacminin %30'u olduğu tahmin edilmektedir [23]. Granit çamuru depolama yoluyla yönetildiğinde su buharlaştığında ciddi çevre sorunlarına yol açabilir. Bu atık, rüzgarla sürüklenebilen ve hayvanlar ve insanlar tarafından solunabilen ince kuru bir toza dönüşür. Ayrıca depolama alanlarına bitişik arazinin mekaniğini değiştirebilir, yeraltı suyu seviyesinde değişikliklere yol açabilir, suyu kirletebilir ve bitki örtüsüne ve ekinlere ulaşabilir [20].Bu nedenle bu atığı değerlendirmek için alternatif yollar aranmalıdır. Geçtiğimiz yıllarda, seramik tuğlalar ve fayanslar, çimento harcı , çatı kiremitleri ve beton kaldırım blokları ve tuğlaları gibi farklı türde katma değerli inşaat ürünlerinin üretimi için granit atığı incelenmiştir [24]. Chen ve ark. (2018) iki farklı endüstriyel atığın birleştirilmesinin betonun performansını önemli ölçüde artırabileceğini ve ayrıca endüstriyel atık birikimini önemli ölçüde azaltabileceğini bildirmiştir [25]. Khotbehsara ve ark. (2021) pomza ve bir kil minerali olan metakaolinin birlikte dahil edilmesiyle kendiliğinden yerleşen betonun gelişmiş performansını gözlemlediler [26]. Bu çalışmada kendiliğinden yerleşen harç (KYH) karışımlarında mineral katkı olarak çimento yerine GAÇ ve SP kullanılarak, bu katkıların KYH üzerindeki etkileri araştırılmıştır.

2. MATERYAL VE METOD (MATERIALS AND METHODS)

Bu çalışmada, GAÇ ve SP çimento ile ikame edilerek kendiliğinden yerleşen harç karışımlarında kullanılmıştır. GAÇ ve SP ayrı ayrı ve birlikte farklı oranlarda çimento yerine ikame edilerek kendiliğinden yerleşen harçlar oluşturulmuştur. GAÇ ve SP kullanılmadan kontrol harç karışımı hazırlanarak diğer harç karışımlarla karşılaştırılmıştır. Toplamda 17 tip harç karışımı ile çalışma 2 aşamada yürütülmüştür. İlk aşamada, harçların taze özellikleri belirlenerek mini çökme-yayılma ve mini V-hunisi deneyleri yapılmıştır. İkinci aşamada ise harçların sertleşmiş özellikleri için 3, 7 ve 28 günlük numunelerin basınç ve eğilmede çekme dayanımı deneyleri yapılmıştır. Ayrıca 28 günlük numuneler kapiler su emme deneyi yapılmıştır, daha sonra numunelerin toplam su emme kapasitesi ve porozite oranları belirlenmiştir.

2.1. Malzeme Özellikleri (Material Properties)

Çalışmada, CEM I 42,5 R tipi portland çimentosu kullanılmıştır. KYH için maksimum tane çapı 2 mm olan agreganın elek analizi Tablo 1'de gösterilmektedir. Agreganın kuru birim hacim ağırlığı 2,63 g/cm^3'tür. Kimyasal katkı malzemesi olarak, 1,08 g/cm^3 yoğunluğa sahip modifiye polikarboksilat esaslı polimer bir süper akışkanlaştırıcı (SA) 17 karışımda da 8,5 kg/m^3 oranında kullanılmıştır. Mineral katkı olarak

kullanılan GAÇ ve SP Şekil 1 ‘de gösterilmektedir. Tablo 2’de çimento, GAÇ ve SP’nin kimyasal bileşimi ve fiziksel özellikleri verilmiştir. Ayrıca GAÇ ve SP’nin standart kalitatif mineral analizi yapılarak Tablo 3’de gösterilmektedir.



Şekil 1. Kullanılan GAÇ, SP ve Agrega malzemeleri (GAÇ, SP and Aggregate materials used)

Tablo 1. İnce agrega elek analizi (Fine aggregate sieve analysis)

Elek no (mm)	Elekten üzerinde kalan miktar (%)
4 mm	0
2 mm	0
1 mm	18.25
0.5 mm	22.8
0.25 mm	39.4
0.125 mm	17.8
0.063 mm	1.75
Toplama kabı	0.0

Tablo 2. Çimento, GAÇ ve SP’nin kimyasal bileşimi ve fiziksel özellikleri(Chemical composition and physical properties of cement, GAC and SP)

	CEM I 42,5 R	Granit Atık Çamuru (GAÇ)	Sepiyolit (SP)
SiO_2 (%)	17.0	62.9	18
Al_2O_3 (%)	4.0	16.5	0.4
Fe_2O_3 (%)	3.4	4.2	0.2
CaO (%)	64.3	4.9	25.0
K_2O (%)	1.0	4.5	<0.1
MgO (%)	1.8	1.4	19.6
Kızdırma kaybı (%)	3.45	1.0	36.65
Özgül ağırlık (g/cm^3)	3.10	2.70	2.61
Özgül yüzey alanı (cm^2/g)	3410.0	5411.0	8406.0

Tablo 3. GAÇ ve SP’nin Standart kalitatif mineral analizi (Standard qualitative mineral analysis of GAC and SP)

GAÇ	SP
Kuvars	Sepiyolit
Plajiyoklaz	Dolomit
Amfibol Minerali	Kalsit
Mika Minerali	
İllit	
Alkali Feldispat	
Kaolinit	
Piroksen Minerali	

2.3. Karışım Oranları Ve Taze Harç Deneyleri
(Mıxıng ratıos And Fresh Mortar Experiments)

Karışımlar, içerdiği mineral katkı oranlarına göre adlandırılmıştır. Örneğin GAÇ15, harçta çimentonun ağırlıkça %15 ‘inin azaltılarak yerine GAÇ kullanıldığı anlamına gelmektedir. İçerisinde GAÇ ve SP bulunmayan karışım kontrol numunesi olarak isimlendirilmiştir. Kullanılan karışım oranları Tablo 4’te gösterilmektedir.

Tablo 4. Kullanılan karışım oranları (Mixing proportions used)

Karışım Kodu	Çimento (g)	GAÇ (g)	SP (g)	Kum (g)	Su (g)	Akışkanlaştırıcı (g)
Kontrol	660	0	0	1240	243	8,5
GAÇ5	627	33	0	1240	240	8,5
GAÇ10	594	66	0	1240	232	8,5
GAÇ15	561	99	0	1240	226	8,5
GAÇ20	528	132	0	1240	221	8,5
SP5	627	0	33	1240	257	8,5
SP10	594	0	66	1240	269	8,5
SP15	561	0	99	1240	300	8,5
SP20	528	0	132	1240	340	8,5
GAÇ5+SP5	594	33	33	1240	257	8,5
GAÇ5+SP10	561	33	66	1240	280	8,5
GAÇ10+SP5	561	66	33	1240	250	8,5
GAÇ10+SP10	528	66	66	1240	275	8,5
GAÇ15+SP5	528	99	33	1240	245	8,5
GAÇ15+SP10	495	99	66	1240	270	8,5
GAÇ20+SP5	495	132	33	1240	243	8,5
GAÇ20+SP10	462	132	66	1240	268	8,5

Karışımlarda kıvamı belirlemek için çökme-yayılma deneyi yapılmış ve TS EN 12350-9 ile EFNARC'da önerilen mini çökme-yayılma değerleri 240–260 mm arasında sabit tutulmuştur [4-5] (Şekil 2). Hazırlanan harç numunelerinde ASTM C109/C 109M–01'e uygun bir mikser kullanılmıştır [27].

Çökme-yayılma deneyinde, kesik koni düz bir yüzey üzerinde harçla doldurulmuş ve ardından yukarı kaldırılmıştır. Harcın çapı, iki dik boyutunun ortalaması alınarak ölçülmüş ve bu çapın 240-250 mm arasında kalması sağlanmıştır. V-hunisi deneyinde ise, huniyi harçla tamamen doldurduktan sonra alt çıkış kapağı açılarak harcın akması sağlanmıştır. Kapağın açıldığı andan itibaren üstten bakıldığında ışığın görüldüğü ana kadar geçen süre t olarak kaydedilmiştir. Kontrol harcı da dahil olmak üzere bütün harçların V-hunisi akma zamanı değerleri 8~10 s. arasında belirlenmiştir. EFNARC (2002)'ye göre bu zaman 7~11 s. arasında olmalıdır [5]. Mini çökme-yayılma ve mini V-hunisi (Şekil 2) deneyleri TS EN 12350-9 ve EFNARC standartlarına göre yapılmıştır [4, 5].



Şekil 2. Mini çökme-yayılma ve V-hunisi testi (Mini collapse-diffusion and V-hunting test)

2.4. Sertleşmiş Harç Deneyleri (Hardened Mortar Tests)

Taze harç deneyleri yapıldıktan sonra numuneler herhangi bir sıkıştırma ve vibrasyon işlemi olmaksızın 40x40x160 mm ve 50x50x50mm

boyutlarında kalıplara dökülmüştür. Kalıplarda 24±5 saat bekletilen numuneler kalıplardan alınmış ve 22±3ºC sıcaklığındaki suyun içerisinde küre bırakılmıştır. 3, 7 ve 28 günlük kür sürelerinin sonunda her numune, basınç ve üç noktalı eğilme deneyleri uygulanmıştır. Ayrıca 28 günlük 50x50x50 mm boyutlu numuneler, kapiler su emme deneyi yapılmıştır. Daha sonra numunelerin doygun kuru yüzey, etüv kurusu ve su içindeki ağırlıkları da belirlenerek toplam su emme kapasitesi, porozite oranları ve yoğunlukları hesaplanmıştır.

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

3.1. İşlenebilirlik Ve Kıvam (Workability And Consıstency)

Tablo 5'te GAÇ ve SP malzemelerinden hazırlanan harçların mini-çökme yayılma ve V hunisi deney değerleri görülmektedir.

Tablo 5. Harçların mini çökme-yayılma ve V hunisi deney değerleri (Mini slump-swelling and V funnel test values of mortars)

Karışım Kodu	Mini Çökme ve Yayılma Deneyi (240-260 mm)	V Hunisi Deneyi (7-11 sn)
Kontrol	246	8,9
GAÇ5	248	8,5
GAÇ10	246	8,8
GAÇ15	247	8,7
GAÇ20	247	8,4
SP5	247	8,5
SP10	248	8,3
SP15	246	8,7
SP20	249	8,1
GAÇ5+SP5	247	8,6
GAÇ5+SP10	248	8,7
GAÇ10+SP5	249	8,3
GAÇ10+SP10	246	8,5
GAÇ15+SP5	248	8,4
GAÇ15+SP10	249	8,2
GAÇ20+SP5	246	8,6
GAÇ20+SP10	247	8,6

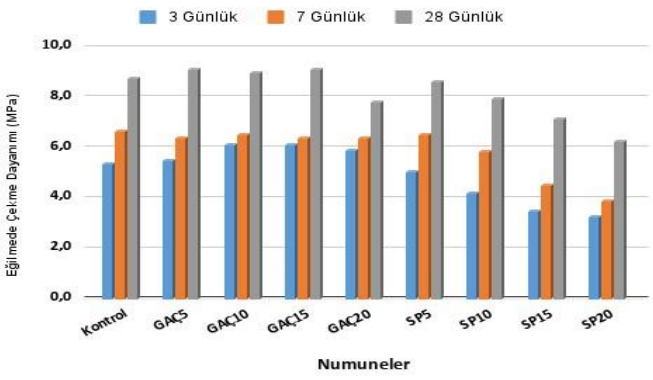
Kontrol harcının işlenebilirlik değerleri baz alındığında; GAÇ'nın % 5, %10, %15 ve %20 oranlarında hazırlanan karışımlarda kullanılan su miktarı azalmıştır. Ancak kil esaslı bir malzeme olan Sepiyolit, artan oranlarda akışkanlık için gerekli su miktarını bünyesinde absorbe ederek su ihtiyacını arttırmıştır. Hazırlanan numunelerdeki harcın çapı, iki dik boyutunun ortalaması alınarak ölçülmüş ve bu çapın 240-250 mm arasında kalması sağlanmıştır. Kontrol harcı da dahil olmak üzere bütün harçların V-hunisi akma zamanı değerleri 8~10 s. arasında belirlenmiştir. Tüm karışımlar TS EN 12350-9 ve EFNARC'ın belirttiği sınır değerler arasında olması sağlanmıştır [4, 5].

3.2. Eğilmede Çekme Dayanımı (Flexural Tensile Strength)

Kendiliğinden yerleşen harçların sertleşmiş özelliklerini belirlemek için 3, 7 ve 28 günlük kür sürelerinin sonunda numuneler üzerinde ASTM C348 standartlarına göre üç noktalı eğilme testi gerçekleştirilmiştir [27]. Elde edilen eğilmede çekme dayanımı sonuçları Tablo 6 ve 7'de, grafikleri Şekil 3 ve 4'te görülmektedir.

Tablo 6. Tek tip mineral katkı içeren KYH'ların eğilmede çekme dayanım sonuçları (Flexural tensile strength results of PBFs containing a single type of mineral admixture)

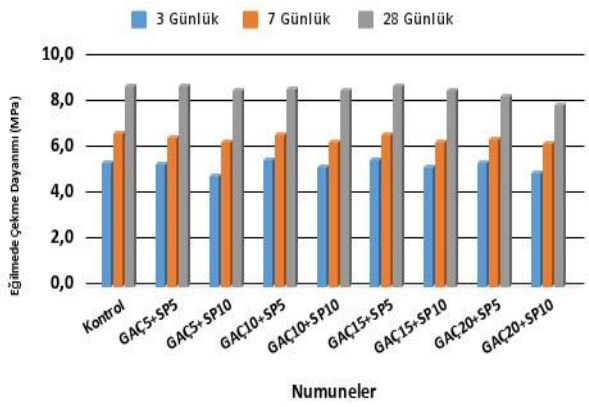
Numuneler	3 Günlük Eğilmede Çekme Dayanımı (MPa)	7 Günlük Eğilmede Çekme Dayanımı (MPa)	28 Günlük Eğilmede Çekme Dayanımı (MPa)
Kontrol	5,4	6,6	8,7
GAÇ5	5,5	6,4	9,1
GAÇ10	6,1	6,5	9,0
GAÇ15	6,1	6,4	9,1
GAÇ20	5,9	6,4	7,8
SP5	5,0	6,5	8,6
SP10	4,2	5,8	7,9
SP15	3,5	4,5	7,1
SP20	3,2	3,9	6,2



Şekil 3. Tek tip mineral katkı içeren KYH'ların eğilmede çekme dayanımları (Flexural tensile strength of PBFs containing a single type of mineral admixture)

Tablo 7. İki tip mineral katkı içeren KYH'ların eğilmede çekme dayanım sonuçları (Flexural tensile strength results of PBFs containing two types of mineral additives)

Numuneler	3 Günlük Eğilmede Çekme Dayanımı (MPa)	7 Günlük Eğilmede Çekme Dayanımı (MPa)	28 Günlük Eğilmede Çekme Dayanımı (MPa)
Kontrol	5,4	6,6	8,7
GAÇ5+SP5	5,3	6,5	8,7
GAÇ5+SP10	4,8	6,3	8,5
GAÇ10+SP5	5,5	6,6	8,6
GAÇ10+SP10	5,2	6,3	8,5
GAÇ15+SP5	5,5	6,6	8,7
GAÇ15+SP10	5,2	6,3	8,5
GAÇ20+SP5	5,4	6,4	8,3
GAÇ20+SP10	4,9	6,2	7,9



Şekil 4. İki tip mineral katkı içeren KYH'ların eğilmede çekme dayanımları (Flexural tensile strength of PBFs containing two types of mineral additives)

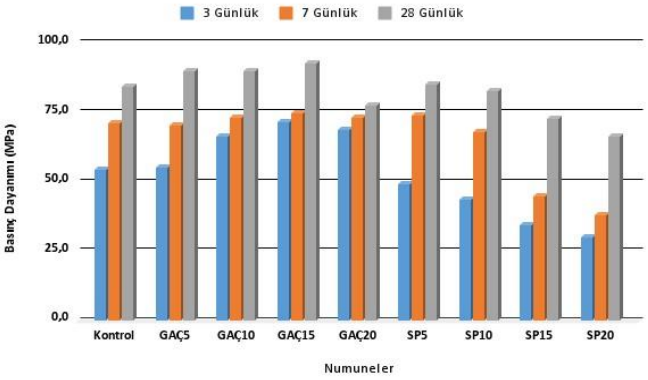
Şekil 3'de tek başına GAÇ veya SP içeren numunelerin eğilmede çekme dayanımları görülmektedir. Buna göre, kontrol numunesinin dayanımlarıyla karşılaştırıldıklarında GAÇ, % 15 oranına kadar 3,7 ve 28 günlük dayanımlarda kontrolden daha iyi performans göstererek dayanımı olumlu yönde etkilemiştir. %20 GAÇ ise ilk 3 günlük dayanımı kontrolden daha iyi olmasına rağmen sonraki kür periyotlarında dayanımı düşürmüştür. Yapılan önceki çalışmalarla sonuçlar benzerlik göstermektedir [16],[18], [20],[28],[29]. SP kür periyotlarında % 5 oranında dayanımı olumlu yönde etkileyerek artmıştır. Ancak SP %5'ten fazla oranlarda kullanıldığında eğilmede çekme dayanımını düşürmüştür. Şekil 3 ve Şekil 4 incelendiğinde GAÇ'nin 3, 7 ve 28 günlük eğilmede çekme dayanımlarında daha etkili sonuçlar elde edildiğini söyleyebiliriz. GAÇ %15 kadar 28 günlük eğilmede çekme dayanımları olumlu yönde etkileyerek artmıştır. SP %5'ten fazla kullanıldığında eğilmede çekme dayanım değerleri azalmıştır. Daha önceki yapılan çalışmalar ile benzerlik göstermektedir [11],[30].

3.3. Basınç Dayanımı (Compressive Strength)

Hazırlanan numuneler 3, 7 ve 28 günlük kür süresinden sonra tek eksenli basınç deneyi uygulanmıştır. Elde edilen değerler Tablo 8 ve 9'da, grafikler Şekil 5 ve Şekil 6'da verilmiştir. 28 günlük basınç dayanımları incelendiğinde GAÇ5, GAÇ10 ve GAÇ15'te sırasıyla %6,5, %6,9 ve %9,8 artış gözlenmiştir. Ancak GAÇ20 de %8,1 azalma gözlenmiştir. Elde edilen sonuçlar Boz, (2019) ile benzerlik göstermektedir [18].

Tablo 8. Tek tip mineral katkı içeren KYH'ların basınç dayanım sonuçları (Compressive strength results of PBFs containing a single type of mineral admixture)

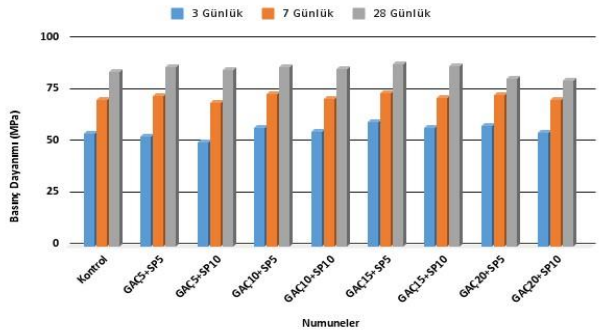
Numuneler	3 Günlük Basınç Dayanımı (MPa)	7 Günlük Basınç Dayanımı (MPa)	28 Günlük Basınç Dayanımı (MPa)
Kontrol	54,4	71,1	84,4
GAÇ5	55,2	71,4	89,9
GAÇ10	66,3	73,0	90,2
GAÇ15	71,7	74,7	92,7
GAÇ20	68,7	73,3	77,6
SP5	49,3	74,2	85,2
SP10	43,5	68,0	82,9
SP15	34,4	44,8	72,9
SP20	30,1	38,0	66,2



Şekil 5. Tek tip mineral katkı içeren KYH'ların basınç dayanımları (Compressive strength of PBFs containing a single type of mineral admixture)

Tablo 9. İki tip mineral katkı içeren KYH'ların basınç dayanım sonuçları (Compressive strength results of PBFs containing two types of mineral additives)

Numuneler	3 Günlük Basınç Dayanımı (MPa)	7 Günlük Basınç Dayanımı (MPa)	28 Günlük Basınç Dayanımı (MPa)
Kontrol	54,4	71,1	84,4
GAÇ5+SP5	53,0	72,8	86,9
GAÇ5+SP10	50,5	69,4	85,6
GAÇ10+SP5	57,2	73,9	87,0
GAÇ10+SP10	55,4	71,3	85,9
GAÇ15+SP5	60,1	74,4	88,3
GAÇ15+SP10	57,4	72,1	87,4
GAÇ20+SP5	58,2	73,4	81,4
GAÇ20+SP10	55,0	70,8	80,2



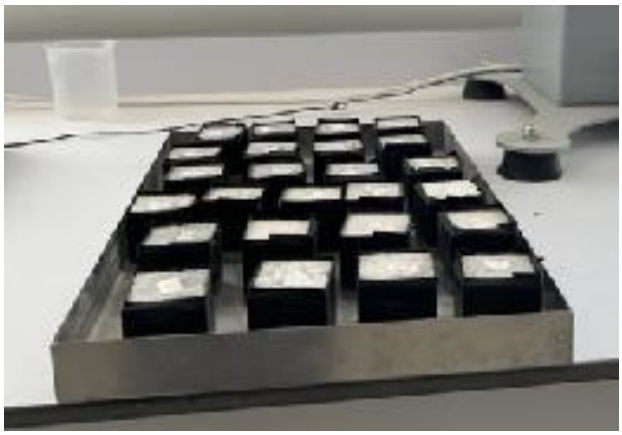
Şekil 6. İki tip mineral katkı içeren KYH'ların basınç dayanımları (Compressive strength of PBFs containing two types of mineral additives)

SP5 ve SP10 numuneleri kontrol numunesine yakın dayanım değerleri verirken SP15 ve SP20'nin 28 günlük basınç dayanımlarının azaldığı gözlemlenmiştir. Daha önceki çalışmalarda Sepiyolit takviyeli çimento kompozitlerin yapısal özellikleri ve optimum karışım oranları araştırılmıştır. %10 oranında sepiyolit (doğal kil minerali) liflerinin eklenmesinin harcın mekanik ve fiziksel özelliklerini iyileştirdiği gösterilmiştir. Portland çimento karışımına göre 2, 7 ve 28 günlük basınç dayanımı değerlerinde sırasıyla %3,5, %6,2 ve %7,7 ve eğilme dayanımı değerlerinde %12,7, %5,7 ve %6,3'lük iyileşmeler elde edilmiştir. Taramalı elektron mikroskobu resimlerine dayanarak, bu gelişme, çimento matrisi içinde bir ağ yapısı oluşturan sepiyolit lifleri yoluyla harcın reolojisinin modifikasyonuna dayandırılır [11].

Basınç dayanımındaki azalma oranının en yüksek SP20 karışımında olması mineral katkı oranının belli bir orandan fazla olmasının yanı sıra bir kil minerali olan SP kullanılan suyu bünyesinde absorbe edip akışkanlığa engel olduğu için mekanik özelliklerini önemli bir şekilde düşürdüğünü göstermektedir. SP5 ve SP10 ile yüksek dayanım elde edildiği için GAÇ ile beraber ikili karışımlar hazırlanmıştır. GAÇ5SP5, GAÇ5SP10, GAÇ10SP5, GAÇ10SP10, GAÇ15SP5, GAÇ15SP10, GAÇ20SP5 ve GAÇ20SP10 karışımları hazırlanarak dayanımları 28 günlük kür sonucunda incelenmiştir. Daha küçük boyutlu granit atık çamuru parçacıklarının çimento ve kum parçacıkları arasındaki boşlukları etkili bir şekilde doldurduğundan dolayı kontrol numunesine göre daha iyi sonuçlar verdiği söylenebilir. Sonuçlar önceki araştırmacıların sonuçlarıyla uyuşmaktadır [28],[21],[29]. 28 günlük basınç dayanımları incelendiği zaman GAÇ5SP5, GAÇ5SP10, GAÇ10SP5, GAÇ10SP10, GAÇ15SP5 ve GAÇ15SP10'da sırasıyla %2,96, %1,42, %3,08, %%1,78, %4,62 ve %3,55 artış gözlenirken GAÇ20SP5 ve GAÇ20SP10'da ise sırasıyla %3,55 ve %4,98 azalma gözlemlenmiştir. SP ve GAÇ de yüksek dayanım verdiği oranlarda elde edilen KYH numunelerde de yüksek dayanımlar elde edilerek çimento yerine yaklaşık %25 azaltılarak ikame yöntemiyle GAÇ15SP10 koyulduğu zaman basınç dayanımında artış gözlemlenmiştir.

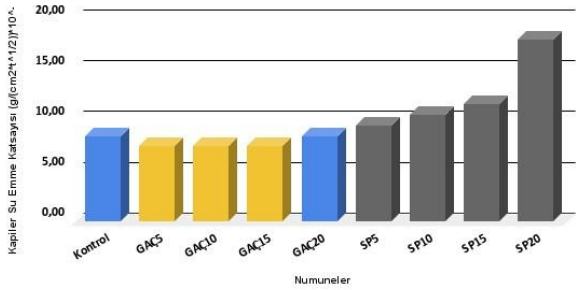
3.4. Kapiler Su Emme (Capillary Water Absorption)

Harçlar 50x50x50 mm'lik numuneler üzerinde 28 gün suda kür edilerek kapiler su emme katsayıları belirlenmiştir. Numuneler sabit ağırlığa gelinceye kadar 105 ^{o}C ± 5'te hava sirkülasyonlu etüvde bekletilmiştir. Numunelerin yan yüzeyleri izole edilerek, saf suya 5 mm batacak şekilde bir düzeneğe yerleştirilmiştir (Şekil 7). Numuneler, 5, 10, 20, 30, 60, 180, 360 ve 1440 dakikalık sürelerde suya maruz bırakılmıştır. Sürelerin sonunda, numunelerin yüzeylerindeki serbest su, nemli bir bezle silinmiş ve 0.01 gram hassasiyetli bir tartı ile kütle artışları ölçülmüştür. Başlangıçtaki ağırlıklarına göre ağırlık farkları hesaplanarak kapiler su emme değerleri belirlenmiştir. Kapiler su emme testi, TS 4045 standardına uygun olarak yapılmıştır [31].

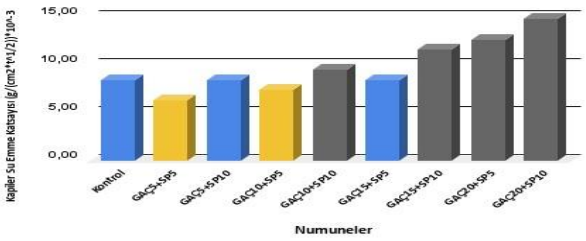


Şekil 7. Kapiler su emme deneyi (Capillary water absorption test)

28 günlük numuneler üzerinde yapılan kapiler su emme deneyi sonucunda Şekil 8 ve 9'daki grafikler elde edilmiştir. Buna göre GAÇ numunelerin geçirimliliğini bir miktar azaltırken, SP numunelerin geçirimliliğini arttırmıştır. GAÇ'nin %5, %10 ve %15 kullanımı geçirimliliği azaltırken GAÇ' nin %20 kullanımı geçirimliliğe önemli bir katkı sağladığı görülememiştir. SP %5'ten itibaren geçirimliliği arttırmıştır. GAÇ ve SP'nin birlikte kullanıldığı GAÇ5SP5 ve GAÇ10SP5 karışımlarda geçirimlilik azalırken, diğer altı karışımda ise geçirimliliği arttırmıştır. Yine de grafiklerin 10^{-3} mertebesinde çizildiği göz önünde bulundurulduğunda kapiler su emme kat sayısındaki bu artışın ihmal edilebilir sınırlar içerisinde olduğu görülür [31].



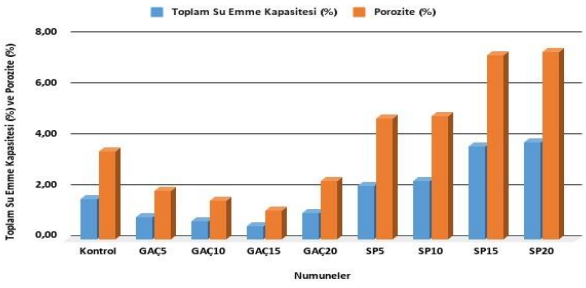
Şekil 8. Tek tip mineral katkı içeren numunelerin kapiler su emme katsayıları (Capillary water absorption coefficients of specimens containing a single type of mineral additive)



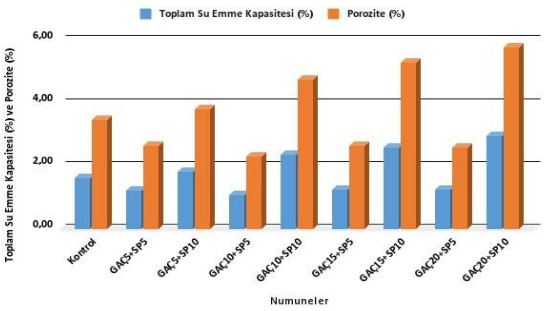
Şekil 9. İki tip mineral katkı içeren numunelerin kapiler su emme katsayıları (Capillary water absorption coefficients of specimens containing two types of mineral additives)

3.5. Toplam Su Emme ve Porozite(Total water Absorptıon and Porosıty)

GAÇ ve SP'nin ayrı ayrı ve birlikte kullanıldığı numuneler için yapılan toplam su emme ve porozite oranı tayinlerinin sonuçları Şekil 10 ve 11'de gösterilmektedir. Şekil 10 incelendiğinde, GAÇ ikamesinin toplam su emme ve porozite oranlarının kontrol numunesine göre daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. Ancak, SP'nin artan oranlarının numunelerin boşluk oranını kontrol numunesine kıyasla belirgin bir şekilde artırdığı gözlemlenmiştir (Şekil 10 ve 11). Numunelerin boşluk oranları (porozite) yükseldikçe, toplam su emme oranları da buna bağlı olarak artış göstermiştir. Çalışmada kullanılan SP, numunelerin geçirgenliğini arttırırken, GAÇ ikamesi %20 oranına kadar numuneleri daha geçirimsiz hale getirmiştir. Elde edilen sonuçlar daha önce yapılan çalışmalarla benzerlik göstermektedir [16],[11],[30]. GAÇ ve SP birlikte kullanıldıklarında SP oranının artması toplam su emme ve porozite oranını arttırdığı ve GAÇ'nin SP %5 ile kullanılarak poroziteyi arttırmadığı gözlemlenmiştir (Şekil 10 ve 11).



Şekil 10. Tek tip mineral katkı içeren numunelerin toplam su emme kapasitesi ve porozite (Total water absorption capacity and porosity of specimens containing a single type of mineral additive)



Şekil 11. İki tip mineral katkı içeren numunelerin toplam su emme kapasitesi ve porozite (Total water absorption capacity and porosity of specimens containing two types of mineral additives)

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

- Mineral katkı olarak granit atık çamurunun kullanıldığı KYH numunelerde GAÇ %10 ve %15'te en yüksek dayanım verdiği görülmüştür. Sepiyolitin %5 ikame edilmesi dayanımı arttırırken %5 in üzerinde kullanılması nihai dayanımları olumsuz yönde etkilemiştir.

- Numunelerde sepiyolit miktarının artması ile boşluk miktarı artmış ve hem daha geçirimli hem de basınç ve eğilme dayanımı düşük harç numuneleri elde edilmiştir.

- GAÇ'nin %20'ye kadar kullanılması, harçların kapiler, toplam su emme ve porozitesini azaltan bir sonuç göstermiştir.

- Kırşehir Granitaş işletmesine ait GAÇ malzemesi, harçların taze ve sertleşmiş özellikleri bakımından değerlendirildiğinde %15 'e kadar ikame oranlarında harç içerisinde mineral bir katkı olarak kullanılabilir olduğu görülmüştür.

- Eskişehir Akmin Mineral ve Madencilik işletmesine ait SP, düşük ikame oranlarında (%5) harç içerisinde mineral bir katkı olarak kullanılmak üzere değerlendirilebilir.

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)

Aynur İRMAK ER: Literatür taramasını, deneylerin yapımını, sonuçların analiz edilmesini ve makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

Literature review, conducting experiments, analyzing results, and paper composition.

Salih YAZICIOĞLU: Literatür taramasını, sonuçların analiz edilmesini ve makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

Literature review, analyzing results, and paper composition.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

There is no conflict of interest in this study.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

[1] Ozawa, K. High performance concrete based on the durability design of concrete structures. in The Second East Asia-Pasific Conference on Structural Engineering & Construction. 1989.

[2] Felekoğlu, B. and B. Baradan. Kendiliğinden yerleşen betonların mekanik özellikleri. (2004).

[3] Açıkgenç, M., M. Karataş, Z.Ç. Ulucan. Elazığ yöresine ait atık tuğla ve kireç taşı tozunun kendiliğinden yerleşen harcın mühendislik özelliklerine etkisi. Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi. 19(6), 249-255, (2013).

[4] TS EN 12350-9. 2011. BetonTaze Beton Deneyleri-Bölüm 9: Kendiliğinden Yerleşen Beton Çökme-V Hunisi Deneyi. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

[5] EFNARC, F. Specification and guidelines for self-compacting concrete. European federation of specialist construction chemicals and concrete system. (2002).

[6] EFNARC, 2005. "European Guidelines for Self-Compacting Concrete, Specification and

Production and Use", EFNARC, May 2005, Association House, UK, (www.efnarc.org), 68p, May 2005.

[7] Mardani-Aghabaglou, A., G.I. Sezer, K. Ramyar. Comparison of fly ash, silica fume and metakaolin from mechanical properties and durability performance of mortar mixtures view point. Construction and Building Materials. 70 17-25, (2014).

[8] Mohamed, O.A. and O.F. Najm. Compressive strength and stability of sustainable self-consolidating concrete containing fly ash, silica fume, and GGBS. Frontiers of Structural and Civil Engineering. 11 406-411, (2017).

[9] Li, L.G., et al. Effects of Micro-silica and Nano-silica on Fresh Properties of Mortar. Materials science. 23(4), 362-371, (2017).

[10] Şahmaran, M., H.A. Christianto, İ.Ö. Yaman. The effect of chemical admixtures and mineral additives on the properties of self-compacting mortars. Cement and concrete composites. 28(5), 432-440, (2006).

[11] Kavas, T., E. Sabah, M. Çelik. Structural properties of sepiolite-reinforced cement composite. Cement and Concrete Research. 34(11), 2135-2139, (2004).

[12] Gomes, M.L.P., et al. Mechanical and physical investigation of an artificial stone produced with granite residue and epoxy resin. Journal of Composite Materials. 55(9), 1247-1254, (2021).

[13] Menezes, R.R., et al. Use of granite sawing wastes in the production of ceramic bricks and tiles. Journal of the European Ceramic Society. 25(7), 1149-1158, (2005).

[14] Uysal, M. The Use of Waste Maroon Marble Powder and Iron Oxide Pigment in the Production of Coloured Self-Compacting Concrete. Advances in Civil Engineering. 2018(1), 8093576, (2018).

[15] Sharma, P. and T. Singh. A correlation between P-wave velocity, impact strength index, slake durability index and uniaxial compressive strength. Bulletin of Engineering Geology and the Environment. 67 17-22, (2008).

[16] Samad, H.A. and R. Abd Rashid. Influence of dolomite and granite waste content on the properties of artificial marble. in IOP Conference Series. Materials Science and Engineering. 2020. IOP Publishing.

[17] Barani, K. and H. Esmaili. Production of artificial stone slabs using waste granite and marble stone sludge samples. (2016).

[18] Boz, A.K., *Granit arenasının beton içerisinde filler malzeme olarak kullanılması ve performans analizi*. 2019, Fen Bilimleri Enstitüsü.

[19] Domone, P. and J. JIN. Properties of mortar for self-compacting concrete. in Self-compacting concrete (Stockholm, 13-14 September 1999). 1999.

[20] Lozano-Lunar, A., et al. Performance of self-compacting mortars with granite sludge as aggregate. Construction and Building Materials. 251 118998, (2020).

[21] Vijayalakshmi, M. and A. Sekar. Strength and durability properties of concrete made with granite industry waste. Construction and Building Materials. 46 1-7, (2013).

[22] Mármol, I., et al. Use of granite sludge wastes for the production of coloured cement-based mortars. Cement and Concrete Composites. 32(8), 617-622, (2010).

[23] Allam, M., E. Bakhoum, G. Garas. Re-use of granite sludge in producing green concrete. Journal of Engineering and Applied Sciences. 9(12), 2731-2737, (2014).

[24] Jain, A., R. Gupta, S. Chaudhary. Sustainable development of self-compacting concrete by using granite waste and fly ash. Construction and Building Materials. 262 120516, (2020).

[25] Chen, Z., J.S. Li, C.S. Poon. Combined use of sewage sludge ash and recycled glass cullet

for the production of concrete blocks. Journal of Cleaner Production. 171 1447-1459, (2018).

[26] Khotbehsara, M., et al., *Durability Characteristics of Self-Compacting Concrete Incorporating Pumice and Metakaolin (Retraction of Vol 29, art no 04017218, 2017)*. 2021, ASCE-AMER SOC CIVIL ENGINEERS 1801 ALEXANDER BELL DR, RESTON, VA 20191-4400 USA.

[27] ASTM C348, (2002) "Standard test method for flexural strength of hydraulic cement mortars", Annual book of ASTM standards, USA.

[28] Ghannam, S., H. Najm, R. Vasconez. Experimental study of concrete made with granite and iron powders as partial replacement of sand. Sustainable Materials and Technologies. 9 1-9, (2016).

[29] Singh, S., et al. Experimental investigation of sustainable concrete made with granite industry by-product. Journal of Materials in Civil Engineering. 29(6), 04017017, (2017).

[30] Angeline Jemina, J., et al. Durability Studies on Self-Compacting Concrete Containing Sepiolite Powder and Recycled Coarse Aggregates. in International Conference on Interdisciplinary Approaches in Civil Engineering for Sustainable Development. 2023. Springer.

[31] TS 4045, 1984, Yapı malzemelerinde kapiler su emme tayini, TSE, Ankara

Gazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Dergisi
PART C: TASARIM VE TEKNOLOJİ

Gazi University
Journal of Science
PART C: DESIGN AND TECHNOLOGY

GU J Sci, Part C, 13(2): 512-525 (2025)

Assessing Unconfined Vapor Cloud Explosions (UVCE) Physical Effects: A Software Built for Modelling with BST Methodology

Tahsin Aykan KEPEKLİ[1*]

[1]*Istanbul Yeni Yuzyil University, Faculty of Health Sciences, Department of Occupational Health and Safety, Istanbul, Turkey*

Article Info

Research article
Received: 22/02/2022
Revision: 16/11/2022
Accepted: 06/01/2023

Keywords

Fire and Explosion Analysis
Risk Assessment
Hazards Evaluation
Major Accidental Hazards

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 22/02/2022
Düzeltme: 16/11/2022
Kabul: 06/01/2023

Anahtar Kelimeler

Yangın ve Patlama Analizi
Risk Değerlendirme
Tehlike Değerlendirme
Büyük Endüstriyel Kazalar

Graphical/Tabular Abstract (Grafik Özet)

The calculation of physical effects of unconfined vapor cloud explosions (UVCE), which are caused by explosive atmosphere, is important for risk assessment studies. In this study, an overpressure calculation software called ExCALc has been coded for use in UVCE risk assessment studies. ExCALc uses Baker-Strehlow-Tang (BST) model. / Patlayıcı atmosferin neden olduğu sınırlandırılmamış buhar bulutu patlamalarının (UVCE) fiziksel etkilerinin hesaplanması, risk değerlendirme çalışmaları için önemlidir. Bu çalışmada, UVCE risk değerlendirme çalışmalarında kullanılmak üzere ExCALc adı verilen bir fazla basınç hesaplama yazılımı kodlanmıştır. ExCALc, Baker-Strehlow-Tang (BST) modelini kullanır.

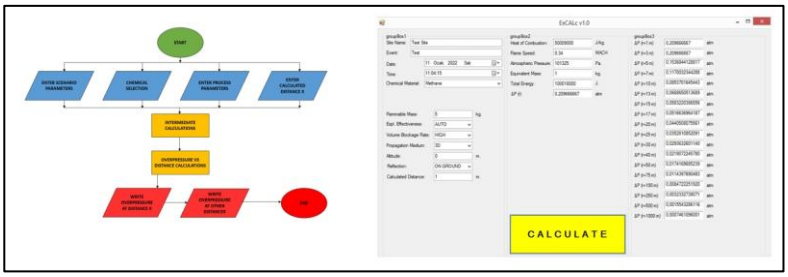


Figure A*: ExCALc algorithm and screen image /* ***Şekil A:****. ExCALc algoritması ve ekran görüntüsü*

Highlights (Önemli noktalar)

- *UVCE etki modellemeleri yapılan bir yazılım geliştirilmiştir. / A software that models UVCE effects has been developed*
- *Yazılım; kütle, ortam geometrik özellikleri, kimyasal madde özellikleri ve rakıma göre atmosfer basıncı gibi etkenleri dikkate alarak hesaplama yapmaktadır. / The software makes calculations by considering factors like mass, geometrical properties of the medium, chemical properties and atmospheric pressure related to altitude.*
- *Yazılım; Patlamadan Korunma Dokümanı gibi projelerde kullanılabilecek şekilde Fazla Basınç sonuçlarını hesaplamaktadır. / The Software calculates overpressure results which can be used in projects like Explosion Protection Documents.*

Aim (Amaç): *The aim of the study is to develop a software to evaluate explosion effects properly to be used in explosive atmosphere risk assessments. / Çalışmanın amacı, patlayıcı ortam risk değerlendirmelerinde kullanılabilecek, paylama etkilerini uygun bir şekilde değerlendiren bir yazılım geliştirmektir.*

Originality (Özgünlük): *The capabilities of the output software of this study is very rarely encountered in free to use process safety solutions of its kind and has unique features like calculation atmospheric pressure related to altitude. / Bu çalışmanın çıktı yazılımının yetenekleri, kendi türünde ücretsiz proses güvenliği çözümlerinde çok nadiren karşılaşılır ve rakım ile ilgili atmosferik basıncın hesaplanması gibi yeni özelliklere sahiptir.*

Results (Bulgular): *The final RMSE value of comparison samples (sample size of 392 calculations) was found to be 2.5637×10^{-3}. / Karşılaştırma örneklerinin nihai RMSE değeri (392 hesaplamalı örneklem büyüklüğü) $2{,}5637 \times 10^{-3}$ olarak bulunmuştur.*

Conclusion (Sonuç): *The prepared code is able to predict explosion overpressure for vapor clouds with a very small margin of error. / Hazırlanan kod, buhar bulutları için patlama fazla basıncını çok küçük bir hata payı ile tahmin edebilmektedir.*

*Corresponding author, e-mail: tahsinaykan.kepekli@yeniyuzyil.edu.tr
DOI: 10.29109/gujsc.1077377

GU J Sci, Part C, 13(2): 512-525 (2025)

Gazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Dergisi
PART C: TASARIM VE TEKNOLOJİ

Gazi University
Journal of Science
PART C: DESIGN AND TECHNOLOGY

http://dergipark.gov.tr/gujsc

Assessing Unconfined Vapor Cloud Explosions (UVCE) Physical Effects: A Software Built for Modelling with BST Methodology

Tahsin Aykan KEPEKLİ[1*]

[1] *Istanbul Yeni Yuzyil University, Faculty of Health Sciences, Department of Occupational Health and Safety, Istanbul, Turkey*

Article Info

Research article
Received: 22/02/2022
Revision: 16/11/2022
Accepted: 06/01/2023

Keywords

Fire and Explosion Analysis
Risk Assessment
Hazards Evaluation
Major Accidental Hazards

Abstract

The calculation of physical effects of unconfined vapor cloud explosions (UVCE), which are caused by explosive atmosphere, is important for risk assessment studies. During the evaluation of explosive atmospheres, effects of a possible explosion are determined in order to take safety measures. There are various algorithms for calculating the overpressure. In physical effect calculations, evaluation of the surrounding environment and chemical reaction are important criteria for accuracy of the results. Usually, a large portion of risk assessment studies neglect overpressure damage assessment as these algorithms cannot be understood or implemented easily due to difficulties in usage. There are various software used in calculating explosion overpressure, however these software generally are run without assessing operating limits and scenario parameters correctly. Thereby, explosion effects cannot be evaluated properly in many explosive atmosphere risk assessments. Taking this as the basis for our aim, an overpressure calculation software called ExCALc has been coded for use in UVCE risk assessment studies. ExCALc uses Baker-Strehlow-Tang (BST) model. The parameters are input in a user-friendly way and the scenario results are calculated for varying distances. It is thought that for complex methodology used in assessments, simplifying tools will benefit industrial safety in the long term.

Sınırlandırılmamış Buhar Bulutu Patlamalarının (UVCE) Fiziksel Etkilerinin Değerlendirilmesi: BST Metodolojisi ile Modelleme İçin Oluşturulmuş Bir Yazılım

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 22/02/2022
Düzeltme: 16/11/2022
Kabul: 06/01/2023

Anahtar Kelimeler

Yangın ve Patlama Analizi
Risk Değerlendirme
Tehlike Değerlendirme
Büyük Endüstriyel Kazalar

Öz

Patlayıcı atmosferin neden olduğu sınırlandırılmamış buhar bulutu patlamalarının (UVCE) fiziksel etkilerinin hesaplanması, risk değerlendirme çalışmaları için önemlidir. Patlayıcı ortamların değerlendirilmesi sırasında, güvenlik önlemlerinin alınması amacıyla olası bir patlamanın etkileri belirlenmektedir. Fazla basıncı hesaplamak için çeşitli algoritmalar vardır. Fiziksel etki hesaplamalarında, çevredeki ortamın ve kimyasal reaksiyonun değerlendirilmesi, sonuçların doğruluğu için önemli kriterlerdir. Genellikle, risk değerlendirme çalışmalarının büyük bir kısmı, kullanımdaki zorluklar nedeniyle bu algoritmalar kolayca anlaşılamadığı veya uygulanamadığı için aşırı basınç hasar değerlendirmesini ihmal eder. Patlama fazla basıncının hesaplanmasında kullanılan çeşitli yazılımlar vardır, ancak bu yazılımlar genellikle işletme limitleri ve senaryo parametreleri doğru bir şekilde değerlendirilmeden çalıştırılır. Bu nedenle, birçok patlayıcı atmosfer risk değerlendirmesinde patlama etkileri düzgün bir şekilde değerlendirilememektedir. Amacımızın temelinden yola çıkarak, UVCE risk değerlendirme çalışmalarında kullanılmak üzere ExCALc adı verilen bir aşırı basınç hesaplama yazılımı kodlanmıştır. ExCALc, Baker-Strehlow-Tang (BST) modelini kullanır. Parametreler kullanıcı dostu bir şekilde girilir ve senaryo sonuçları değişen mesafeler için hesaplanır. Değerlendirmelerde kullanılan karmaşık metodoloji için araçların basitleştirilmesinin uzun vadede endüstriyel güvenliğe fayda sağlayacağı düşünülmektedir.

1. INTRODUCTION (GİRİŞ)

Flammable gases and liquids are widely used in various fields, not only in industry but also in our daily life. Some of the common ones can be summed as: fuels, solvents, alcohols etc. In terms of chemical risk factors of flammable gases and liquid vapors, one of the most important risks besides fire and other health-environmental effects is Gas / Vapor Cloud Explosions that may occur as a result

*Corresponding author, e-mail: tahsinaykan.kepekli@yeniyuzyil.edu.tr tr
DOI: 10.29109/gujsc.1077377

of ignition of the explosive atmosphere or cloudy dispersions where gas is homogeneously mixed with air as a flammable mixture in mainly gaseous form. This mixture is called Explosive Environment, and the explosion of these environments is called Vapor Cloud Explosion or Unconfined Vapor Cloud Explosion if it occurs in the open area [1].

Within the scope of Occupational Health and Safety, the evaluation of the hazard and risks that explosive environments may pose has gained importance in recent years. Explosive environments caused by flammable gases, liquid vapors and dust clouds pose great risks in both industry and our daily living environment. In many countries, legislation backed risk assessment studies for explosive atmosphere stipulates that the hazardous zones of explosive environments should be determined and safety measures to be taken should be determined for each of these areas [2]. One of the most important steps in evaluating the risks of explosive environments is to determine the physical effects of the explosion that may occur as a result of possible ignition and to take safety measures to protect employees from these effects. As overpressure of a shock or pressure wave is potentially the most damaging effect of an explosion for considerable distances; calculating overpressure for a possible accident scenario where an explosion may occur becomes very important for these risk assessments. Usually, these assessments are applied to GIS media to show hazardous zones around surrounding points of interest (an example is given in Figure 1).

The most reliable assessment for these kinds of studies would be a quantitative assessment where the damage and probability are tied to real values. Usually for explosions, overpressure is calculated by blast – energy formulas and damage are assessed by empirical probit equations or by comparing the results to observations from previous studies where explosion damages for overpressures are reported. As these calculations have an important amount of mathematical load, usually several software that apply these formulas to obtain overpressure – damage results are used in such studies [1-2].

2.MATERIALS AND METHODS (MATERYAL VE METOD)

In physical impact modelling studies, the change of selected physical effect according to the distance of an event is investigated using various algorithms and methods. Explosions have various effects such as a shock - pressure wave, intense light and sound propagation, formation of a possible flame or a fireball. The most important explosion physical impact investigated in Major Industrial Accidents and Explosion Protection Risk Assessment studies are shock - pressure wave and its spread. During an assessment study to model these effects, the aim is to determine the change of pressure generated by the explosion, with increasing distance from the event center. There are several algorithms for calculating the overpressure effects that can be effective at very long distances depending on the size of the explosion. Commonly used and generally accepted ones are TNT Equivalent model, Multi-Energy model (TNO) and Baker-Strehlow-Tang (BST) model [3]. Of these, the TNT Equivalent model is mainly explosions of reactive explosives, where the phenomena are usually single centered and propagate in a uniform way. For multi-centered Vapor Cloud Explosions, the event usually depends on various other environmental factors like confinement and propagation medium. There are two widely used methods developed especially for these types of explosions. These are the Multi-Energy and BST methods, both of which are used for flares of gas-vapor cloud spreading over a large volume.

TNT Equivalent Method

TNT Equivalency is a very commonly used method for solid explosives for military purposes and TNT explosions are among the most observed and experimented ones. The shock overpressure varying with distance and associated with the propagating energy, which in turn is associated with the amount of explosive mass is observed with many field experiments. Therefore, made with gathered data from these tests, the overpressure vs. normalized distance curve of TNT blasts is usually well defined as shown in Figure 2 [3].

The main factor determining the level of overpressure in explosions is the amount of energy released as a result of the chemical reaction. In TNT Equivalent method, the amount of energy of the unit mass of the chemical examined (the lower heat of combustion: Lower Thermal Value resulting from the combustion) will be proportioned with the energy that will occur as a result of the explosion of the same amount of TNT. The next step involves finding the total energy resulting from the reaction; factor in the reflection, blast propagation to find a normalized distance (r') to compare with maximum overpressure (Pmax) curve. The model assumes single value for overpressure and a point symmetric blast propagation [4].

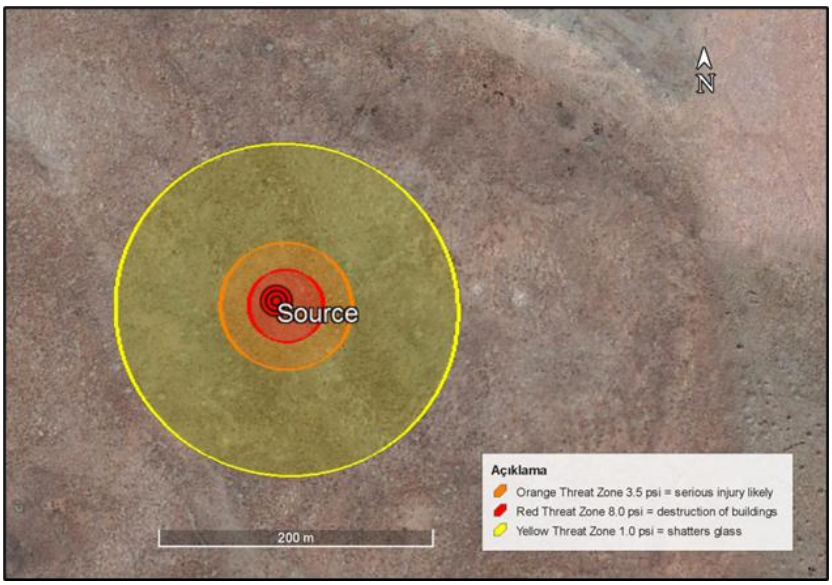


Figure 1. An exemplary explosion event overpressure - effects association (Örnek bir patlama olayı fazla basınç - etki ilişkisi)

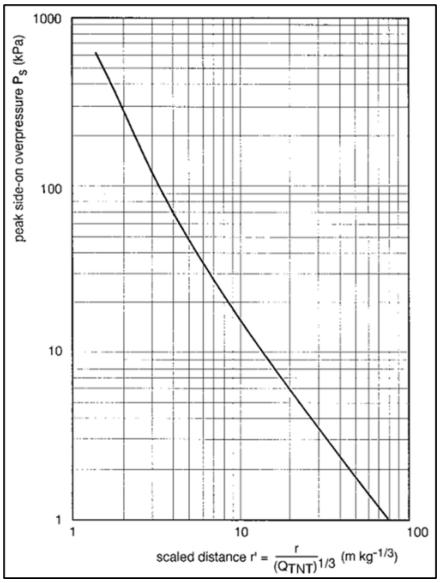


Figure 2. TNT Equivalent Model curve [3] (TNT Eşdeğer Modeli eğrisi)

Common factors for gas / vapor cloud explosions such as the presence of obstacles that may affect the overpressure, their location, the state of the ignition sources and the cloud's multi-centering are not considered in this method. For this reason, TNT Equivalent method is ideal for effect calculation in explosions of single center reactive explosives, but it is insufficient in gas / vapor cloud explosions.

TNO Multi Energy Method

In this method, developed by Van Den Berg (1985) at the TNO Institute, the methodology for determining the blast impact is basically based on the method of calculating the normalized distance derived from the amount of combustion heat. On the other hand, the main innovation of the method is 10 different distance - overpressure curves obtained by experiments that will correspond to 12 different scenarios that vary depending on the parameters: surface obstructions, parallel limiting structures and the ignition energy amount (Figure 3). These factors define the geometric parameters of a possible multi-centered and dispersed explosive atmosphere in an industrial facility. The assessment team would be interested in selecting the appropriate curve according to these scenario parameters to find the overpressure of the Vapor Cloud Explosion [5]. There has been a major improvement to Multi-Energy model by TNO as GAME model to determine the correct blast curve [6-7]. Characteristic overpressure – impulse curves using Multi-Energy method have been prepared by other researchers for ease of usage as both overpressure and impulse can be determined in one step making simulations of explosions simpler and faster [8].

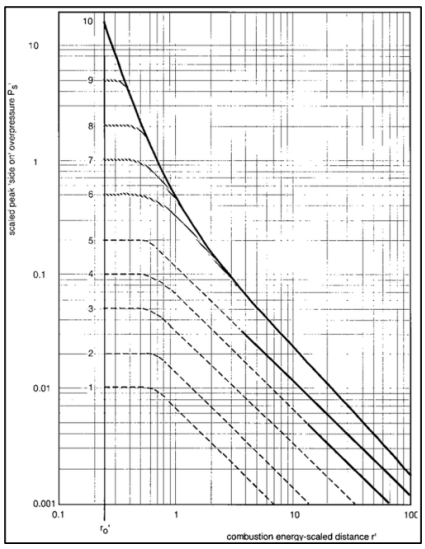


Figure 3. TNO Multi-Energy Model curves [5] (TNO Multi-Enerji Modeli Eğrileri)

Baker-Strehlow-Tang (BST) Method

The basic approach is the same as TNO Multi-Energy, however this time blast curves are determined directly by 9 blast shock wave (reaction front) velocities resulting from different environmental medium and chemical properties. Curve selection is made depending on the parameters of medium dimensions (2 dimensional, 3 dimensional etc.); presence of and blockage effect of obstacles and the reactivity of the chemical substance (classified by laminar burning rate) (Table 1). In this method curves are experimentally derived for each flame speed (Figure 4) [13].

The highest curve in this method is 5.2 MACH curve for DDT (Deflagration - Detonation Transition) which corresponds to curve number 10 in the Multi Energy method. Validation of calculated blast curves by comparing them with real experimental data from vapor cloud explosion studies have been made [9]. After the initial model was presented [10-11] the curves and methodology of BST was updated in later studies [12-13].

There have also been efforts to use the results of GAME methodology by TNO to associate with the blast curves of BST; a notable study has made the Quest Model for Estimation of Flames Speeds (QMEFS) which linked the GAME curve estimation P_{max} value to flame speed, therefore also enabling an approach to choose or extrapolate a realistic blast curve for BST model [14]. Also, the curves of BST were subjected for correction due to ground effect and validated in other studies [15].

Although events of Vapor Cloud Explosions are not expected to be as intense as full detonations; the factors such as confinement to smaller number of dimensions, increased blockage ratio or high combustive properties of the chemical will aid in speeding up the reaction, which may change a regular deflagration into a detonation [13]. Detailed calculation steps for this method are described in later section for software methodology.

Table 1. Flame Speeds (MACH) for different settings in Baker-Strehlow-Tang (Baker-Strehlow-Tang'da farklı ayarlar için Alev Hızları (MACH))

3D	**Congestion**		
Reactivity	***Low***	***Medium***	***High***
High	0.36	5.2	5.2
Medium	0.11	0.44	0.5
Low	0.026	0.23	0.34

2.5D	**Congestion**		
Reactivity	***Low***	***Medium***	***High***
High	0.47	5.2	5.2
Medium	0.29	0.55	1
Low	0.053	0.35	0.5

2D	**Congestion**		
Reactivity	***Low***	***Medium***	***High***
High	0.59	5.2	5.2
Medium	0.47	0.66	1.6
Low	0.079	0.47	0.66

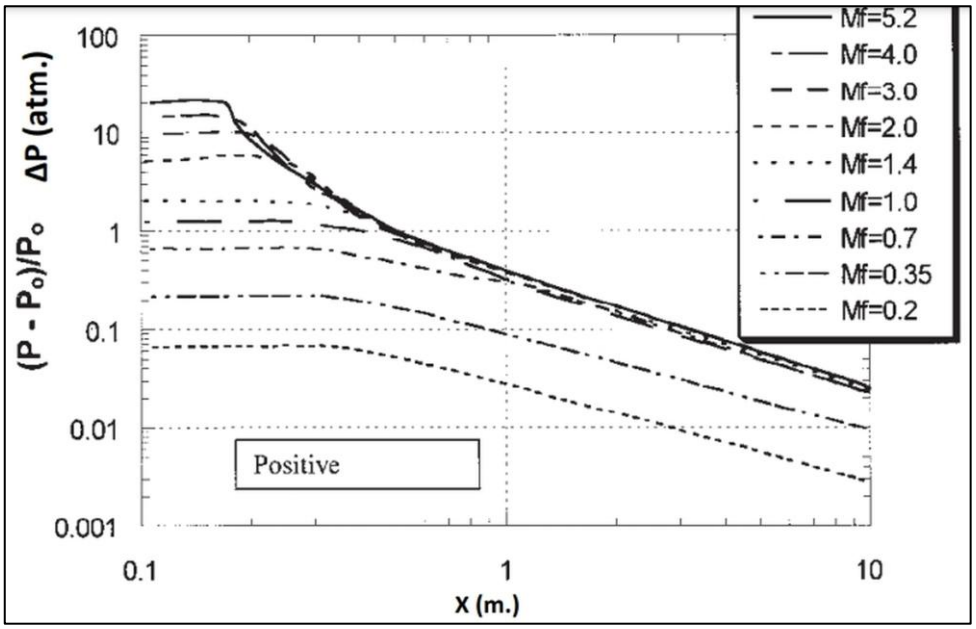


Figure 4. Curves for Baker-Strehlow-Tang (BST) [13] (Baker-Strehlow-Tang (BST) için eğriler)

3. COMPARISON OF MODELS (MODELLERİN KARŞILAŞTIRMASI)

There is a need to identify the result producing capacity of each model and compare them in order to determine the strong and weak points of the models. A previous study has compared these two models in terms of structural response and explosion damage and found that TNO Multi-Energy method predicts higher overpressures at shorter distances than BST and mostly agrees with BST results at longer distances [16-17].

There are two studies involving Hydrogen-Air mixture explosions that also use both methods for prediction and correlates them. The SRI H_2 explosion study performed a test in open space and the results were correlated with predictions of the methods. They found that inside near field both methods predicted 10-20% lower than and whole range values show good agreement with actual results. It is further argued that BST curves do not show a good prediction if the flame speed varies during propagation. Although this assumption can also be thought to be true for both methods as both of them have fixed curves for defined scenarios. The study found that Multi-Energy method results better fit the test data as the peak overpressure is well defined for the method than BST model [18].

Another study analyses the consequences of a scenario where VCE of H_2 that is leaked from a Hydrogen Holder in a chlor-alkali plant. The analyses were done with both Multi-Energy and BST methods and were correlated. The overpressure at 8 meters from the ignition centre, Multi-Energy method predicted 5.5 bars and BST method predicted 4.2 bars of overpressure. And at 25 meters from the ignition centre, overpressure values were found to be 0.4 bars for Multi-Energy and 0.3 bars for BST models whereas at 100 meters, overpressure values were 50 mbars for Multi-Energy and 90 mbars for BST models [19].

It can be generalized that Multi-Energy model predicts higher values in near field and at far field some analyses show good agreement while others show BST method predicting higher than Multi-Energy method. However experiences show the basic models of both TNO Multi-Energy (without using GAME method) and BST method are usually ambiguous in curve selection. Therefore if quantitative factors of maximum overpressure or flame speed cannot be determined for the scenario, choosing criteria like obstruction and propagation medium has to be determined well enough to choose the appropriate curve. And this results in varying results for different methods. Such an exemplary scenario with specific parameters was chosen for model comparison to analyse and evaluate the results (without using GAME method and/or BST maximum pressure – flame speed functional correlation).

Critical Loss of Containment (LOC) Event:

An atmospheric tank filled with Hexane has a feed line in which liquid Hexane is pumped for storage. A total failure of pump O-ring due to inadequate maintenance conditions is the expected scenario. This Loss of Containment (LOC) event will result with a Hexane spillage into the surrounding bund. This in turn will result in an evaporating pool and formation of a flammable vapor cloud that will

spread and disperse due to atmospheric conditions. This cloud is thought to be indirectly ignited by an ignition source present in the surrounding environment sometime after the start of LOC event and will hence undergo a Vapor Cloud Explosion (VCE).

First, in order to determine the combustion mass of chemical, the cloud's dispersion has to be modelled. This was done with NOAA-EPA ALOHA software which uses typical spillage and evaporation models to calculate the mass/time parameter for the source of the cloud as described in its technical documentation [20].

Chemical Parameters:
Molecular Weight (MW): 86.18 g/mol
Density (liquid) (ρ_{liq}): 655 kg/m^3
Boiling Point (BP): 68.4 ºC
Vapor Pressure: (@ 30 ºC): ~0.25 bar
Lower Flammability Limit (LFL): %1.2 (v/v)
Upper Flammability Limit (UFL): %7.2 (v/v)
Process and Equipment Parameters:
LOC Equipment: O-ring failure of pump on the tank
Pressure in line (P): 8 bars
Temperature in line (T): 20 ºC
Sectional area of the outflow (S): 5 mm^2 (derived from pump O-ring failure sectional area from IEC60079-10-1 standard [21].

Atmospheric conditions were chosen to represent a calm air midnight scenario with average humidity. Total outflow time at ignition moment (tLOC) is taken to be 30 minutes. ALOHA uses DEGADIS model[20] for dense cloud dispersions. As usual for all Vapor Cloud Explosion cases it defines the reference concentration as the Lower Flammability Limit (LFL) of the chemical, in order to find the maximum spread area possible. The model then determines a cloud average height and finds the total volume and mass of the cloud. The resulting dispersion from our scenario found the explosive mass as 3 kg. This value will be taken as the mass to ignite and undergo combustion to result into a vapor cloud explosion.

For the VCE set parameters and derived factors of the scenario are:

Chemical Parameters:
Chemical Material: N-Hexane (C_6H_{14})
Laminar Burning Speed (LBS): 50 cm/s
Reactivity: Medium
Heat of Combustion (lower) ($H_{c,low}$): 4.48 × 10^7 J/kg
Total vapor mass in combustion (M): 3 kg
Equivalent mass in explosive reaction (M_{eq}): 0.6 kg
Surrounding Environmental Parameters:
Ignition source is a general spark (no shock compression is present)
Altitude (Hgt): 0 meters
Atmospheric Pressure (P_0): 101325 Pa
Explosion on the ground
Reflection factor (ref): 2
Volume Blockage Ratio (VBR)
Obstructions: HIGH
Shock/Pressure Propagation Medium: 3D
Unconfined (no parallel plane confinement)

For BST model these settings point to:
Flame (Reaction Front) Speed: 0.5 MACH
And for Multi-Energy model this correlates to blast category 7 and 5th Blast Curve.
Total combustion Energy (E): 53702400 J
Real geometric distance: 10 meters
Normalized Distance (r' – X): 1.23568 meters
Overpressure (BST model) (ΔP): 148 mbar
Overpressure (Multi-Energy model) (ΔP): 101 mbar

The calculations done with set scenario parameters (and some chosen parameters of environmental propagation to correlate between two methods) found overpressure (ΔP) values of 148 mbar for BST method and 101 mbar for TNO Multi-Energy method. Not reported here as it is the expected result: TNT Equivalent model almost always results in higher overpressure values. Results of BST model 0.5 MACH curve is plotted as an overpressure – distance diagram and is shown in Figure 5.

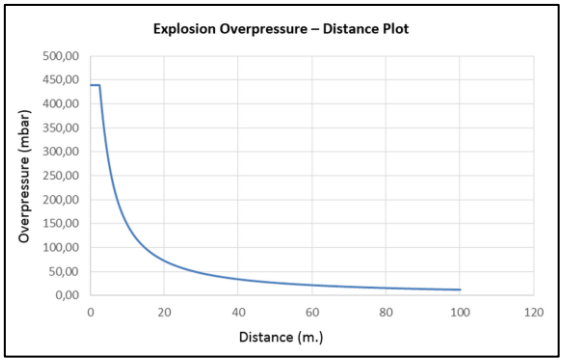


Figure 5. Overpressure – distance plot of the example scenario (Örnek senaryonun Fazla basınç – Mesafe grafiği)

Although both models use similar trending blast curves; when the correlating curves are analysed it can be seen that Multi-Energy model results are usually higher for the same normalized distance. This could have been also true for the curves used in the example scenario for which curve class 5 was selected (the highest available class from the class possibilities of a blast strength category 7 type scenario) to best identify the obstruction, confinement and ignition energy in Multi-Energy model and if the reactivity of the chemical was low then in BST model resulting curve would have been 0.35 MACH, which would produce lower overpressure results than the Multi-Energy model. However, as the chemical in the scenario has higher reactivity than a lower one like Methane gas, the resulting curve to be used is 0.5 MACH which produced higher overpressure results than the Multi-Energy model results. This is one of the most important factors to lean on BST model for Vapor Cloud Explosion overpressure modelling unless maximum overpressure and/or flame speed cannot be determined precisely. So it can be argued that although both models are derived from empirical data gathered from many experiments; BST defines the factors for scenario input understandably better (reactivity factor is present along with better definitions of the propagation environment, a better definition of Volume Blockage Ratio (VBR) etc.).

An important aspect of Vapor Cloud Explosions is the determination of the flammable mass. Several research have argued on different criteria for congested volume to be taken in calculations [3, 22]. Pitblado et al. (2014) have developed a detailed method for identifying the correct congestion volume which uses geometrical criteria that is defined with real site examples and this method, although developed for TNO Multi-Energy model, can also be used in conjunction with BST model.

There are also many research that defines the damage – impact to physical assets and/or health. These usually link the damage model (like Probit) to the overpressure values obtained from the consequence analyses and find the resulting damage ratio [23-25].

4. CODE FOR CALCULATING VCE OVERPRESSURE (VCE FAZLA BASINÇ HESAPLAMA KODU)

The need for a computerized executable code stems from the complexity and time consummation of all the previously mentioned calculations. Therefore, software specialized for methodological calculations are used regularly. Oftentimes some aspects of software, like scenario limitations, parameter selection criteria, output format are overlooked and all produced results are readily accepted as is. This raises questions of validity for various safety risk assessments involving complex methods.

For this study, a code was written to overcome this problem. Compiled into an executable named ExCALc software, the code was written in C# language for Windows desktop usage. It was prepared in Visual Studio environment. The software has built-in database for some common flammable chemicals and their parameters relevant to vapor cloud explosion physical effect calculations. The scenario definition includes an input to select the chemical (which in turn calls its properties from the database); inputs for environment geometry and the amount of material to go into combustion to result into an explosion. Basic algorithms for the execution steps are given in Figure 6.

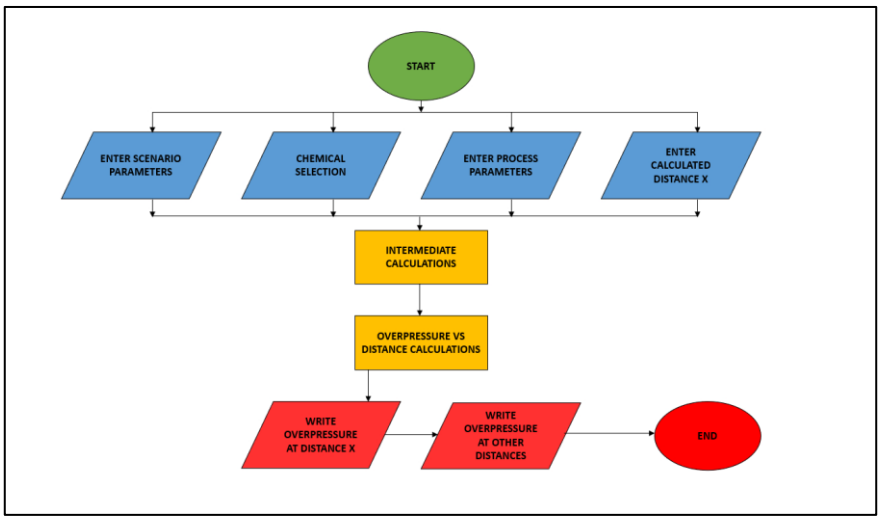


Figure 6. ExCALc basic algorithm and execution steps (ExCALc temel algoritması ve yürütme adımları)

For the methodology of calculation, the approach defined in BST is chosen as basis. This choice arises from facts gathered by comparing the VCE overpressure calculation methods described previously.

According to the method, first a reflection factor (ref) is chosen. For surface explosions as the ground will be mostly a rigid indestructible and unmoveable medium covering the lower half of the sphere of propagation, and hence the energy will only be able to do work on the upper half of the sphere, the ref factor will be a factor of ×2. If the explosion is taking place in air, then all directions will be free for work done and pressure propagation and therefore the ref factor will be ×1.

The next step includes the calculation of energy (Formula 1) that is formed by the combustion reaction that will result into the scenario explosion. This energy of combustion (E) is a factor of reflection factor (ref), lower heat of combustion ($H_{c,low}$) and equivalent mass of the flammable chemical taking part in the cloud (M_{eq}) which is usually a factor of 0.2 of total flammable mass in the cloud. This function is given in equation (1). The database includes values for lower heat of combustion ($H_{c,low}$) for some common flammables. Built-in database refers to DIPPR database for these values [26-28]. The database values for Hc,low are given in Table 2.

$$E = ref \times H_{c,low} \times M_{eq} \quad (1)$$

The next calculation step is finding the normalized distance (X) which is a function (Formula 2) of the real geometric distance (r), atmospheric pressure (P_0) and combustion energy (E).

$$X = r \times (P_0 / E)^{1/3} \quad (2)$$

Real distance (r) can either be user input or a differing parameter from 0 meters (the centre) to a maximum distance of outward reaches. It is also important to note the factor of atmospheric pressure (P_0) which will decrease with increasing altitude from the sea level. Many assessment studies overlook this factor to take it as some generic value like ~100000 Pascals to resemble sea level even though the scenario takes place far from the shore like an inland mountainous region. Therefore, on screen input for this factor is not the pressure value itself but the user is expected to enter the altitude from the sea level where the scenario will take place. Then the atmospheric pressure (P_0) is calculated from this altitude value. The last step includes selection of a typical blast curve (categorized with differing flame speeds) which according to experiments is dependent on these factors: the propagation medium (i.e. a 3D or 2D environment or in between), the ratio of blockage in the propagation volume (VBR) and the reactivity of the chemical itself (i.e. flammables like hydrogen and acetylene will be more reactive than slower reactives like methane). The reactivity is derived into 3 categories which the method chooses according to the laminar burning speed (LBS) values of the chemical. The database of chemicals included in the code has laminar burning speed (LBS) values for some common flammable materials to execute this categorization. The VBR is also categorized into 3 different settings. All these factors are typically found to result in explosive reactions with some typical flame speeds. The code will assess this flame speed and use the blast curve associated with that speed value. The curve will produce the overpressure ($\Delta P/P_0$) and is a function of normalized distance (X) [13].

Table 2. Database HC,low parameter values of chemicals (Veritabanı kimyasalların HC,düşük parametre değerleri)

Chemical	HC,low (J/kgK)	Chemical	HC,low (J/kgK)	Chemical	HC,low (J/kgK)
Methane	50009000	Isobutane	45613000	n-Butanol	33075000
Ethane	47794000	Cyclopentane	44636000	Dimethyl Ether	28703000
Propane	46357000	Etylene	47195000	Acetone	28548000
Butane	45752000	Propylene	45799000	Hydrogen	120971000
Pentane	45357000	Acetylene	48241000	Carbon monoxide	10112000
Hexane	44752000	Benzene	40170000	Ammonia	18646000
Heptane	44566000	Toluene	40589000	Gasoline	47000000
Octane	44427000	Xylene	4096100	Diesel Fuel	43400000
Nonane	44311000	Methanol	19930000	Natural Gas	54000000
Decane	44240000	Ethanol	28865000	Kerosene	43000000
Undecane	44194000	Isopropanol	30447000	Ethyl Acrylate	27630000
Dodecane	44147000	Formaldehyde	17259000	Ethyl Acetate	23510000
Cyclohexane	43450000	Acetaldehyde	24156000		

This product is the main output of the calculation code and the assessor can later use these output values to assess the expected damage by comparing it with some previous studies in which overpressure damage is well documented through experimental studies or real events. Short code blocks for the main calculation steps are given below:

```
Meq = M * Eff;
E = Ref * HC * Meq;
X = (r * (Math.Pow((Patm / E), (1.0 / 3.0))));
if (X < cX0) { dP = 1 * cD; };
if (X >= cX0) { dP = 1 * (cA * (Math.Pow(cB, (1.0 / X))) * (Math.Pow(X, cC))); };
```

The output is given in two forms. The code uses the geometric distance (r) in two ways for these outputs. These are: 1) As there is a distance input for the user, this is used to calculate the exact overpressure at that point of distance from the event centre and 2) There are also a set of automatic calculations which take distance from 0 meters to a maximum of 1000 meters with increments of 0.1 meters to prepare a final distance – overpressure XY diagram. A calculation example is given in Figure 7.

5. VALIDATION OF CODE CALCULATIONS
(KOD HESAPLAMALARI DOĞRULAMALARI)

In order to validate the product results of the code, comparison approach with literature and an approach to compare code results with results from a different software that uses the same methodology (BST model) that can define a scenario with similar details are taken. There are many software that uses BST method for the calculation of side-on overpressure. Some examples include DNV PHAST, TNO EFFECTS, NOAA-EPA ALOHA. Almost all of them can calculate results for each step of a scenario starting from source LOC up to the various branches of the event tree like outflow, evaporation, dispersion, fire heat radiation, explosion overpressure, toxic concentration of cloud etc. Other than the usual consequence analysis of physical effects, damage definitions like death ratio, health effect ratios can also be calculated. It is not the aim of this study to compare these software as the aim is to develop a new code and validate it by comparison. As any of the above solutions are widely used and accepted in industry, the best and easily available one amongst them which is NOAA-EPA ALOHA is chosen for its ease of access.

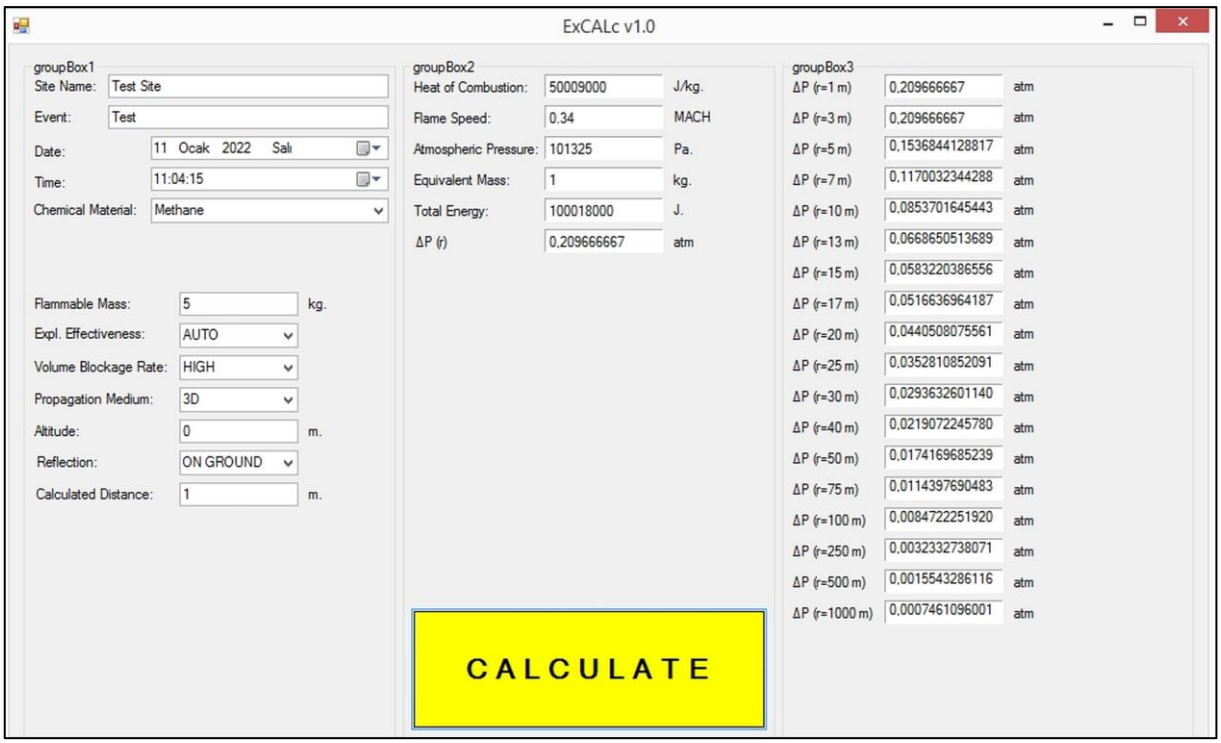


Figure 7. ExCALc screen image of a calculation example (Bir hesaplama örneğinin ExCALc ekran görüntüsü)

Literature comparison is made with two previous studies. Soman (2012) reports Hydrogen VCE overpressure values of 0.7, 0.3 and 0.09 atm. for 0.64, 1.06 and 4.25 meters of scaled distances respectively for 1.77 MACH curve [19]. As 1.77 MACH curve is not calculated in the code, the nearest one (1.6 MACH) is taken for comparison which produced results: 0.51, 0.29 and 0.057 atm. for the same set of scaled distances respectively. These results show good agreement with the general trend of overpressure change but as the curves are different, there are differences in near and far field results. Also, Kang (2010) reports Hydrogen VCE test results which are: 0.15, 0.065 and 0.028 atm. for 2, 4 and 7.5 meters of scaled distances respectively for the 5.2 MACH blast curve [18]. Using the same speed in ExCALc code the calculated results for comparison are: 0.155, 0.064 and 0.03 atm. for the same scaled distances respectively. These results show good agreement with the test values reported by Kang (2010).

For the tests 30 different scenarios, involving 3 different chemical materials are devised. Selected chemicals are Methane, Hexane and Hydrogen. These are selected to represent each class of reactivity for BST calculations. The scenarios for each chemical are 5 different explosive masses (0.01 kg., 0.1 kg., 1 kg., 10 kg. and 50 kg. for Methane; N-Hexane and 40 kg. for Hydrogen) for both congested and uncongested 3D environments. Each of them is run for 18 different distance values which are 1, 3, 5, 7, 10, 13, 15, 17, 20, 25, 30, 40, 50, 75, 100, 250, 500 and 1000 meters. A total of 540 calculations with unique scenario settings are run at first in ALOHA and then ExCALc and their results are compared. Out of the 540 calculations, only 392 of them produced meaningful results as rest of them were reported by ALOHA as insignificant. These scenarios are associated with lower mass and farther distances. Residual results of ALOHA and ExCALc runs are given in Table 3. Items marked in red indicate to values above 5 ‰.

For comparison, Root Mean Square Error (RMSE) is measured with residuals of observed ALOHA values and ExCALc estimated values for each unique scenario set. RMSE is described in Formula (3) where Yt is the observed value; $\bar{Y}t$ is the estimated value and T is the total sample size [29-30]. The sample size for comparison consists of outputs from the 392 scenarios that produced meaningful results.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^{T}(\bar{Y}_t - Y_t)^2}{T}} \qquad (3)$$

The final RMSE value was found to be 2.5637×10^{-3}. Majority of the differences are found in low obstruction medium Hydrogen scenarios at near the source fields. Although mean deviations are found to be low in general, the maximum deviation seen in scenarios is determined as 1.3397 %. This value is only detected in near field results of Hydrogen explosion scenarios in a low obstructed 3D propagation environment. There are several possible reasons for this deviation. There may be minor differences in the chemical database heat of combustion values, which ALOHA uses DIPPR licenced values. However, the main reason for the deviation is thought to be differences in curve fit function constants. Although for both applications, the constants are derived from the same source [13] and since the source does not include curves for every possible flame speed MACH number, the curves in-between the known ones are extrapolated. This extrapolation difference is notably detected in only a single flame speed of 0.36 MACH, which is associated with explosions of highly reactive chemicals (i.e. Hydrogen, Acetylene) in a low obstructed 3D environment. And for this curve, only the near source field values are affected and other values for farther distances are in an acceptable range. The other scenarios also use extrapolated curves and constants and results for these flame speeds are also in acceptable ranges both for near and farther from the source fields. It should also be noted that ALOHA only models high and low 3D propagation environments, which coupled with three classes of reactivity amounts to only 6 different possible flame speeds for scenarios. Except the 5.2 MACH DDT curve, all of them are extrapolated for in-between flame speeds which are not defined as a curve in the source literature.

Overpressure values are usually associated with expected damage using methods like probit curves in explosion risk assessment studies. Therefore, significant changes for damage ratio would be meaningful in these assessments. Even the maximum deviation observed in independent scenarios is unlikely to produce a meaningful change in expected damage ratios as the margin is too small and both solutions would predict similar damages. It can be deduced from these facts that the prepared code for this study is performing adequately to fulfil its mission.

Table 3. Residual results of ALOHA and ExCALc scenario runs (red cells indicate values above 5 ‰) (ALOHA ve ExCALc senaryo çalıştırmalarının artık sonuçları (kırmızı hücreler 5 ‰'nin üzerindeki değerleri gösterir))

		Distance (meters)																	
		1	**3**	**5**	**7**	**10**	**13**	**15**	**17**	**20**	**25**	**30**	**40**	**50**	**75**	**100**	**250**	**500**	**1000**
		3D / Low VBR / Methane																	
Mass (kg)	**0.01**	0.00051	0.00085	0.00144	0.00011														
	0.1	0.00020	0.00075	0.00206	0.00222	0.00426	0.00036	0.00024	0.00006	0.00091									
	1	0.00024	0.00038	0.00034	0.00039	0.00053	0.00044	0.00156	0.00307	0.00372	0.00063	0.00007	0.00017						
	10	0.00024	0.00024	0.00101	0.00006	0.00051	0.00020	0.00017	0.00014	0.00014	0.00013	0.00085	0.00092	0.00144	0.00041				
	50	0.00024	0.00024	0.00024	0.00024	0.00055	0.00085	0.00103	0.00078	0.00077	0.00096	0.00182	0.00155	0.00105	0.00201	0.00015			
		3D / High VBR / Methane																	
Mass (kg)	**0.01**	0.00183	0.00072	0.00134	0.00196	0.00307	0.00411	0.00271	0.00052	0.00035	0.00037	0.00044							
	0.1	0.00020	0.00370	0.00004	0.00081	0.00059	0.00158	0.00073	0.00117	0.00148	0.00225	0.00113	0.00012	0.00057					
	1	0.00366	0.00198	0.00355	0.00205	0.00010	0.00002	0.00063	0.00115	0.00054	0.00088	0.00109	0.00016	0.00235	0.00034	0.00003			
	10	0.00366	0.00366	0.00110	0.00001	0.00183	0.00072	0.00229	0.00055	0.00061	0.00067	0.00072	0.00112	0.00134	0.00129	0.00307	0.00037		
	50	0.00366	0.00366	0.00366	0.00122	0.00044	0.00200	0.00153	0.00047	0.00167	0.00319	0.00050	0.00078	0.00092	0.00008	0.00125	0.00425	0.00011	
		3D / Low VBR / N-Hexane																	
Mass (kg)	**0.01**	0.00171	0.00236																
	0.1	0.00101	0.00084	0.00051	0.00201	0.00232													
	1	0.00024	0.00063	0.00203	0.00023	0.00079	0.00038	0.00112	0.00153	0.00104									
	10	0.00024	0.00024	0.00078	0.00173	0.00171	0.00214	0.00096	0.00028	0.00212	0.00092	0.00236	0.00169						
	50	0.00024	0.00024	0.00024	0.00024	0.00014	0.00025	0.00070	0.00050	0.00127	0.00040	0.00071	0.00170	0.00067	0.00216				
		3D / High VBR / N-Hexane																	
Mass (kg)	**0.01**	0.00008	0.00000	0.00072	0.00023	0.00004	0.00205	0.00256	0.00126	0.00491									
	0.1	0.00000	0.00279	0.00271	0.00086	0.00168	0.00105	0.00141	0.00032	0.00222	0.00009	0.00029	0.00284	0.00426					
	1	0.00002	0.00201	0.00162	0.00046	0.00225	0.00039	0.00128	0.00174	0.00088	0.00160	0.00113	0.00088	0.00151	0.00445	0.00034			
	10	0.00002	0.00002	0.00175	0.00015	0.00008	0.00047	0.00359	0.00111	0.00321	0.00522	0.00000	0.00219	0.00237	0.00229	0.00004			
	50	0.00002	0.00002	0.00002	0.00072	0.00024	0.00101	0.00152	0.00101	0.00003	0.00144	0.00174	0.00367	0.00086	0.00036	0.00042	0.00137		
		3D / Low VBR / Hydrogen																	
Mass (kg)	**0.01**	0.00102	0.00010	0.00049	0.00058	0.00152	0.00072	0.00192	0.00235	0.00310	0.00043	0.00022	0.00035						
	0.1	0.01340	0.00271	0.00392	0.00056	0.00097	0.00018	0.00078	0.00152	0.00028	0.00075	0.00265	0.00088	0.00052	0.00062				
	1	0.01340	0.00096	0.00169	0.00009	0.00222	0.00054	0.00058	0.00011	0.00069	0.00086	0.00118	0.00099	0.00115	0.00080	0.00122			
	10	0.01340	0.01340	0.01340	0.00044	0.00102	0.00090	0.00165	0.00034	0.00502	0.00111	0.00132	0.00050	0.00155	0.00006	0.00152			
	40	0.01340	0.01340	0.01340	0.01340	0.00125	0.00148	0.00045	0.00161	0.00148	0.00015	0.00056	0.00056	0.00022	0.00026	0.00126	0.00096		
		3D / High VBR / Hydrogen																	
Mass (kg)	**0.01**	0.00051	0.00029	0.00089	0.00030	0.00246	0.00018	0.00032	0.00084	0.00053	0.00120	0.00077	0.00192	0.00082	0.00044	0.00024			
	0.1	0.00129	0.00131	0.00071	0.00084	0.00004	0.00103	0.00162	0.00088	0.00248	0.00017	0.00031	0.00074	0.00107	0.00126	0.00109	0.00017		
	1	0.00028	0.00111	0.00125	0.00158	0.00055	0.00030	0.00075	0.00027	0.00084	0.00161	0.00168	0.00134	0.00206	0.00082	0.00032	0.00204	0.00009	
	10	0.00028	0.00028	0.00537	0.00314	0.00310	0.00142	0.00029	0.00356	0.00118	0.00124	0.00205	0.00152	0.00089	0.00023	0.00246	0.00120	0.00082	0.00116
	40	0.00028	0.00028	0.00028	0.00028	0.00460	0.00121	0.00122	0.00171	0.00138	0.00282	0.00478	0.00007	0.00137	0.00097	0.00002	0.00020	0.00108	0.00018

6. CONCLUSIONS (SONUÇLAR)

Overpressure estimation is an important assessment where an explosion event is expected. This event can be as limited as an occupational safety issue (which may still pose a danger to life and/or health) to as large a one that can cause a major disaster. As an explosion is a violent and highly destructive event, capability to estimate based on live experimental observations beforehand is very limited for many sites and parties. Mathematical estimation based on empirical data or computational fluid dynamics have been and are still widely used tools for these assessments.

The prepared code associated with a user interface as a small software package is found to be useful for risk assessment arising from explosions as it is able to predict explosion overpressure for vapor clouds with a very small margin of error compared to industry regularly used software that is also used for this purpose amongst other assessment possibilities.

Whichever tool is used it should always be ensured that the physical variables and criteria for the explosion like mass or propagation environment must be chosen accurately by the professional making the assessment to obtain as realistic results as possible.

FUTURE WORK (GELECEK ÇALIŞMALAR)

Future works are planned for coding to involve calculation using several available research methods defined for overpressure – flame speed association; determination of correct VBR and congestion volume (therefore calculating the realistic mass).

AVAILABILITY OF DATA AND ASSETS (VERİ VE VARLIKLARIN KULLANILABİLİRLİĞİ)

The raw data for scenario runs and the software in Windows executable format are freely available upon correspondence.

ACKNOWLEDGEMENTS (TEŞEKKÜR)

The author would like to acknowledge Dr. Tolga BARIŞIK (from Istanbul Yeni Yuzyil University Occupational Health and Safety Department) for his contribution on determining the validation method for the code calculation results.

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)

***Tahsin Aykan KEPEKLİ*:** Devised the algorithm, researched the methods and coded them into a software. Also, conducted the test studies and analyzed the results.

Algoritmayı geliştirmiş, metotları araştırmış ve onları kodlayarak yazılım haline getirmiştir. Ayrıca, test çalışmalarını yapmış ve sonuçları analiz etmiştir.

CONFLICT OF INTEREST (ÇIKAR ÇATIŞMASI)

There is no conflict of interest in this study.

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

REFERENCES (KAYNAKLAR)

[1] Mannan S. *Lees' Loss Prevention in the Process Industries: Hazard Identification, Assessment and Control (4th ed.)*. Butterworth-Heinemann; 2012.

[2] DIRECTIVE 1999/92/EC OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL On minimum requirements for improving the safety and health of workers potentially at risk from explosive atmospheres. (2000). Official Journal of the European Communities, L23, 57-64.

[3] Van den Bosch C, Weterings R (Eds.). *Methods for the Calculation of Physical Effects CPR14E (Yellow Book) (3rd ed.)*. NL: Committee for the Prevention of Disasters; 2005.

[4] Mercx WP, Van den Berg AC, Hayhurst CJ, Robertson NJ, Moran KC. Developments in vapour cloud explosion blast modeling. *Journal of Hazardous Materials* 2000;71(1-3):301-319. https://doi.org/10.1016/S0304-3894(99)00085-0

[5] Van den Berg AC. The Multi-Energy Method - a framework for vapor cloud Explosion blast prediction. *Journal of Hazardous Materials* 1985;12:1-10. https://doi.org/10.1016/0304-3894(85)80022-4

[6] Van den Berg AC, Eggen J. *GAME: Guidance for the Application of the Multi-Energy Method. 2nd International Specialist Meeting on Fuel-Air Explosions*. Bergen, Norway: TNO; 1996.

[7] Eggen JBMM. TNO Prins Maurits Laboratory. *GAME: Development of Guidance for the Application of the Multi-Energy Method*. HSE Books; 1998.

[8] Alonso FD, Ferradás EG, Perez JF, Aznar AM, Gimeno JR, Alonso JM. Characteristic overpressure-impulse-distance curves for vapour cloud explosions using the TNO Multi-Energy Model. *Journal of Hazardous Materials* 2006;137(2):734-741. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2006.04.005

[9] Tang MJ, Baker QA. Comparison of blast curves from vapor cloud explosions. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 2000;13(3-5):433-438. https://doi.org/10.1016/S0950-4230(99)00040-6

[10] Baker QA, Tang MJ, Scheier EA. Vapor cloud explosion analysis. Paper presented at: AIChe 28th Loss Prevention Symposium. 1994, Atlanta, Georgia, USA.

[11] Baker QA, Tang MJ, Scheier EA, Silva GJ. Vapor cloud explosion analysis. *Process Safety Progress* 1996;15(2):106-109. https://doi.org/10.1002/prs.680150211

[12] Tang MJ, Baker, QA. A new set of blast curves from vapor cloud explosion. *Process Safety Progress* 1999;18(4):235-240. https://doi.org/10.1002/prs.680180412

[13] Pierorazio AJ, Thomas JK, Baker QA, Ketchum DE. An update to the Baker-Strehlow-Tang vapor cloud explosion prediction methodology flame speed table. *Process Safety Progress* 2005;24(1):59-65. https://doi.org/10.1002/prs.10048

[14] Melton TA, Marx JD. Estimating flame speeds for use with the BST blast curves. *Process Safety Progress* 2009;28(1):5-10. https://doi.org/10.1002/prs.10281

[15] Xu Y, Worthington DR, Oke A. Correcting the predictions by Baker-Strehlow-Tang (BST) Model for the ground effect. Paper presented at: Hazards XXI Symposium, November 10-12, 2009, Manchester, UK.

[16] Sari A. Comparison of TNO Multienergy and Baker-Strehlow-Tang Models. *Process Safety Progress* 2011;30(1):23-26. https://doi.org/10.1002/prs.10424

[17] Turner T, Sari A. Vapor cloud explosion prediction methods - comparison of TNO Multi-Energy (ME) and Baker-Strehlow-Tang (BST) Models in terms of vulnerability of structural damage caused by an explosion. Paper presented at: Structures Congress. March 29-31, 2012, Chicago, Illinois, USA.

[18] Kang HS, Kim SB, Kim MH, No HC. Overpressure predictions by the MEM and the Baker-Strehlow-Tang blast curves for the SRI H_2 explosion test in the open space. Paper presented at: Transactions of the Korean Nuclear Society Spring Meeting, May 27-28, 2010, Pyeongchang, Korea.

[19] Soman AR, Sundararaj G. Consequence assessment of vapor cloud explosion involving hydrogen release. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering* 2012;2(11):291-296.

[20] Jones R, Lehr W, Simecek-Beatty D, Reynolds RM. *ALOHA (Areal Locations of Hazardous Atmospheres) 5.4.4 Technical Documentation. Technical Memorandum NOS QR&R*. NOAA; 2013.

[21] *IEC 60079-10-1: 2015-09, Explosive Atmospheres - Part 10-1: Classification of areas - Explosive Gas Atmospheres*, International Electrotechnical Commission; 2015.

[22] Pitblado R, Alderman J, Thomas JK. Faciliating consistent siting hazard distance predictions using the TNO Multi-Energy Model. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 2014;30:287-295. https://doi.org/10.1016/j.jlp.2014.04.010

[23] Alonso FD, Ferradás EG, Sánchez TD, Aznar AM, Gimeno JR, Alonso JM. Consequence analysis to determine the damage to humans from vapour cloud explosions using characteristic curves. *Journal of Hazardous*

Materials 2008;150(1):146-152. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.04.089

[24] Hellas MS, Chaib R, Verzea I. Abacus to determine the probability of death or glass breakage to the overpressure effect by two methods: TNT and TNO Multi-Energy. *Scientific Bulletin UPB Series D* 2020;82(1):239-254.

[25] Cavanagh NJ, Xu Y, Worthington DR. A software model for assessing fatality risk from explosion hazards using the Multi Energy method and Baker Strehlow Tang approach. Paper presented at: Hazards XXI Symposium. November 10-12, 2009, Manchester, UK.

[26] Green DW, Perry RH. *Perry's Chemical Engineers' Handbook (8th ed.)*. McGraw-Hill Education; 2008.

[27] Rogers TN, Zei DA, Rowley RL, et. al. *DIPPR Data Compilation of Pure Chemical Properties. Design Institute for Physical Properties*. New York: AIChE; 2007.

[28] Wilding WV, Rowley RL, Oscarson JL. DIPPR Project 801 evaluated process design data. *Fluid Phase Equilibria* 1998;150:413-420. https://doi.org/10.1016/S0378-3812(98)00341-0

[29] Chai T, Draxler RR. Root Mean Square Error (RMSE) or Mean Absolute Error (MAE)? - Arguments against avoiding RMSE in the Literature. *Geoscientific Model Development* 2014;7(3):1247-1250. https://doi.org/10.5194/gmd-7-1247-2014

[30] Chicco D, Warrens MJ, Jurman G. The coefficient of determination R-Squared is more informative than SMAPE, MAE, MAPE, MSE and RMSE in regression analysis evaluation. *PeerJ Computer Science* 2021;7(e623). doi:10.7717/peerj-cs.623 https://doi.org/10.7717/peerj-cs.623

Gazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Dergisi
PART C: TASARIM VE TEKNOLOJİ

Gazi University
Journal of Science
PART C: DESIGN AND TECHNOLOGY

GU J Sci, Part C, 13(2): 526-537 (2025)

The PIDA Controller Analysis Simulator

Metin HATUN[1], Fahri VATANSEVER[1*]

[1]*Bursa Uludağ University, Faculty of Engineering, Electrical-Electronics Engineering Dept., Bursa/Türkiye*

Article Info

Research article
Received: 27/12/2024
Revision: 19/02/2025
Accepted: 23/03/2025

Keywords

Control system
PIDA controller
Simulator

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 27/12/2024
Düzeltme: 19/02/2025
Kabul: 23/03/2025

Anahtar Kelimeler

Kontrol sistemi
PIDA denetleyici
Simülatör

Graphical/Tabular Abstract (Grafik Özet)

In this study; a software tool with a user-friendly interface has been designed that performs control systems simulations with different type PIDA controllers in an accurate, effective, fast and simple manner. / Bu çalışmada; farklı tipteki PIDA denetleyicilerle kontrol sistemlerinin simülasyonlarını doğru, etkili, hızlı ve basit bir şekilde gerçekleştiren, kullanıcı dostu arayüze sahip bir yazılım aracı tasarlanmıştır.

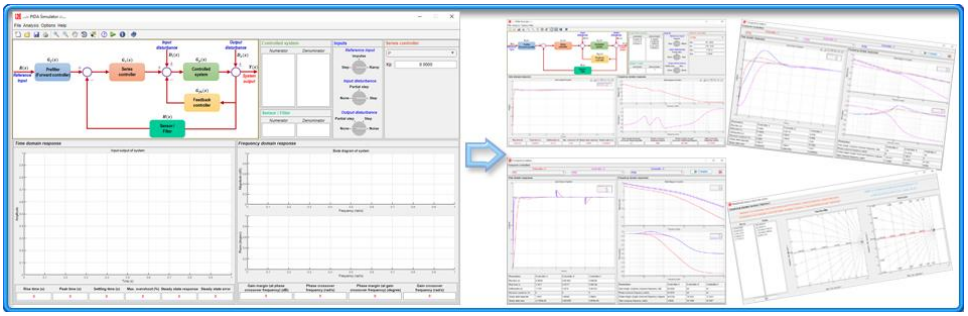


***Figure A**: The designed simulator / **Şekil A:** Tasarlanan simülatör*

Highlights (Önemli noktalar)

- *An interactive simulator was designed for the PIDA controllers in the control systems. / Kontrol sistemlerinde PIDA denetleyicileri için etkileşimli bir simülatör tasarlandı.*
- *Performance evaluations of PID and PIDA type controllers can be easily performed with time and frequency domain analysis. / PID ve PIDA tipi kontrolörlerin performans değerlendirmeleri zaman ve frekans domeni analizi ile kolayca gerçekleştirilebilir.*
- *The designed simulator has capabilities such as comparative analysis of the effects of reference and disturbance inputs and comparative analysis of some performance parameters related to time/frequency response. / Tasarlanan simülatör referans ve bozucu girişlerinin etkilerinin karşılaştırmalı analizi ve zaman/frekans cevabı ile ilgili bazı performans parametrelerinin karşılaştırmalı analizi gibi yeteneklere sahiptir.*

***Aim (Amaç):** This study aims to design of software tool to analyze effects of the PIDA controllers to the system performance. / Bu çalışma, PIDA denetleyicilerinin sistem performansına olan etkilerini analiz etmek için bir yazılım aracının tasarlanmasını amaçlamaktadır.*

***Originality (Özgünlük):** The originality of this study is the development of a new software tool (simulator) that performs comprehensive analysis for PIDA controllers. / Bu çalışmanın özgünlüğü, PIDA denetleyiciler için kapsamlı analizler gerçekleştiren yeni bir yazılım aracının (simülatör) geliştirilmesidir.*

***Results (Bulgular):** The important features of the developed simulator are demonstrated with three case studies (maglev vehicle suspension system, automatic voltage regulator, induction motor system) performed in the work. / Geliştirilen simülatörün önemli özellikleri çalışmada gerçekleştirilen üç örnek (maglev araç süspansiyon sistemi, otomatik voltaj regülatörü, endüksiyon motor sistemi) ile ortaya konmuştur.*

***Conclusion (Sonuç):** The developed interactive simulator provides effective computer support for analyzing the PIDA type controllers. / Geliştirilen etkileşimli simülatör, PIDA tipi denetleyicileri analiz etmek için etkili bilgisayar desteği sunar.*

*Corresponding author, e-mail: fahriv@uludag.edu.tr
DOI: 10.29109/gujsc.1608341

GU J Sci, Part C, 13(2): 526-537 (2025)

Gazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Dergisi
PART C: TASARIM VE TEKNOLOJİ

Gazi University
Journal of Science
PART C: DESIGN AND TECHNOLOGY

http://dergipark.gov.tr/gujsc

The PIDA Controller Analysis Simulator

Metin HATUN[1], Fahri VATANSEVER[1*]

[1]*Bursa Uludağ University, Faculty of Engineering, Electrical-Electronics Engineering Dept., Bursa/Türkiye*

Article Info

Research article
Received: 27/12/2024
Revision: 19/02/2025
Accepted: 23/03/2025

Keywords

Control system
PIDA controller
Simulator

Abstract

The Proportional-Integral-Derivative (PID) is a traditional controller type widely used in industrial control systems. However, sometimes they may be insufficient in controlling higher degree systems. In these cases, the Proportional-Integral-Derivative-Acceleration (PIDA) controllers can be preferred. In this study; a software tool with a user-friendly interface has been designed that performs control systems simulations with different type PIDA controllers in an accurate, effective, fast and simple manner, produced single or comparative numerical and graphical results (performance parameters, time and frequency domain responses, etc.). The features and capabilities of the designed simulator have been tested with some sample systems: maglev vehicle suspension system, automatic voltage regulator and induction motor systems. The developed simulator with ease and contents is suitable for all students, engineers, and users from this area.

PIDA Denetleyici Analiz Simülatörü

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 27/12/2024
Düzeltme: 19/02/2025
Kabul: 23/03/2025

Anahtar Kelimeler

Kontrol sistemi
PIDA denetleyici
Simülatör

Öz

Oransal-İntegral-Türev (PID), endüstriyel kontrol sistemlerinde yaygın olarak kullanılan geleneksel bir denetleyici türüdür. Ancak, bazen daha yüksek dereceli sistemlerin kontrolünde yetersiz kalabilmektedirler. Bu durumlarda Oransal-İntegral-Türev-İvme (PIDA) denetleyiciler tercih edilebilir. Bu çalışmada; farklı tip PIDA denetleyicilerle kontrol sistemleri simülasyonlarını doğru, etkili, hızlı ve basit bir şekilde gerçekleştiren, tek veya karşılaştırmalı sayısal ve grafiksel sonuçlar (performans parametreleri, zaman ve frekans alanı tepkileri vb.) üreten, kullanıcı dostu arayüze sahip bir yazılım aracı tasarlanmıştır. Tasarlanan simülatörün özellikleri ve yetenekleri bazı örnek sistemlerle test edilmiştir: maglev araç süspansiyon sistemi, otomatik voltaj regülatörü ve endüksiyon motor sistemleri. Geliştirilen simülatör, kullanım kolaylığı ve içeriği ile bu alandaki tüm öğrenciler, mühendisler ve kullanıcılar için uygundur.

1. INTRODUCTION (GİRİŞ)

The Proportional-Integral-Derivative (PID) controller is the most preferred and widely used controller type in industrial control systems due to its easy design and implementation [1-2]. However, if the degree of the controlled system is three or greater, the two zeros provided by the PID controller may be insufficient to obtain the desired response accurately. To overcome this problem and obtain the desired system response more accurately, Jung and Dorf proposed Proportional-Integral-Derivative-Acceleration (PIDA) controller and an analytical method to determine the coefficients of this controller [3-4]. The PIDA controller, also known in the literature as the PID double derivative (PIDD2 or PIDD^2) controller, has a second derivative operator in addition to the PID controller, thus adding three zeros to the system. Therefore, it provides more phase-lead to the system, further improving the transient response of the system and providing extra robustness against disturbance inputs.

The PIDA controller has attracted the attention of researchers in recent years for third order systems [3-14], fourth orders systems [15-18], integral plus dead time systems [19-22], double integrator plus dead time systems [23], first order plus dead time systems [24], second order plus dead time systems [25], second order oscillatory with time delay system [26-28], second-order oscillatory model with zero plus dead time systems [29], third order plus dead time systems [30-31], different higher order systems [32], higher order time delay systems [33-36], higher order systems with integral and dead time [37], non-minimum phase second order system [38], two-input two-output nonlinear system [39],

*Corresponding author, e-mail: fahriv@uludag.edu.tr
DOI: 10.29109/gujsc.1608341

uncertain time delay systems [40], nonlinear uncertain systems [41], interconnected time delay systems [10, 31, 42-44]. Some generalized PID type controllers have also been proposed by adding higher order derivative terms to PIDA controllers [45-49]. These studies also include the PIDA controller.

While there are many simulators created for PID, only a few simulators with limited features have been developed for PIDA. A few simulation tools were designed in the literature to understand the PIDA controllers [50-54]. A software tool for the disturbance analysis of PID with higher derivative degrees was developed by Bisták. Graphical results in the simulator also include performance measurements and noise characteristics with time domain responses [50]. In a different study the designed simulation tool provides a comparison of set-point and step disturbance responses in the higher derivative degree PID controller circuit with the first order time-delayed controlled system influenced by a noise [51]. In another work, Bisták and Huba developed online software tool to help with dissemination of PID controllers with higher derivative degree [52]. In the simulation tool developed by Ferrari and Visioli can modify the PIDA parameters and analyze the corresponding changes in system responses in time (reference input, step disturbance and noise rejection performance) and frequency domain [53]. In another study a simple interactive educational tool for teaching PID and PIDA control is presented [54].

The aim of this study is to design a comprehensive analysis simulator that includes different PIDA controllers in the literature. Existing simulators usually contain limited controller structures and also have limited features. In this study, an interactive simulator is designed for basic PID and PIDA controllers. This simulator, which includes P, PI, PD, PID, PIDA, I-PD, I-PDA, PID with prefilter and PIDA with prefilter controllers and can be used for educational and application purposes, can perform single and comparative analyses. As a result of the analysis of user-defined systems with selected controllers under different conditions (input disturbance, output disturbance etc.), many numerical and graphical results such as time and frequency responses, response parameters, system properties are obtained. Thus, the suitability/efficiency/performance of the relevant controllers for the defined systems under the specified conditions can be evaluated quickly, easily and effectively.

This paper is organized as follows: In Section 2, PIDA controllers are summarized. In Section 3, the designed PIDA analysis simulator is explained and some sample applications are given. Finally, Section 4 contains conclusions.

2. PIDA CONTROLLERS (PIDA DENETLEYİCİLER)

The classical PIDA controller (Figure 1) can be written as follows in time-domain and s-domain, respectively:

$$u(t) = K_p.e(t) + K_i \int_0^t e(\tau)d\tau + K_d \frac{d}{dt}e(t) + K_a \frac{d^2}{dt^2}e(t) \quad (1)$$

$$U(s) = \left(K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s + K_a s^2\right) E(s) \quad (2)$$

If the derivative filter is used in the PIDA controller, it can be written as follows; where, a, b, c are controller zeros, and d, e are controller poles [3-4]:

$$U(s) = \left(K_p + \frac{K_i}{s} + \frac{K_d s}{(s+d)} + \frac{K_a s^2}{(s+d)(s+e)}\right) E(s) = K\frac{(s+a)(s+b)(s+c)}{s(s+d)(s+e)} E(s) \quad (3)$$

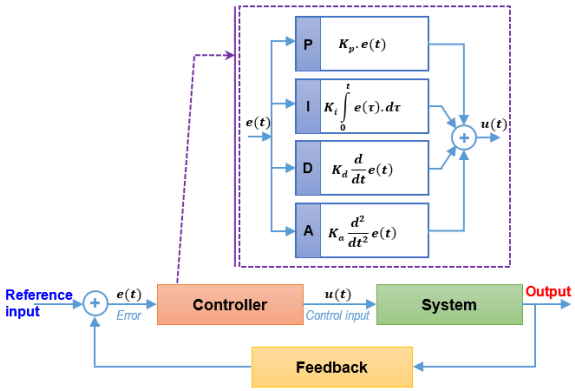


Figure 1. The feedback control system and PIDA controller (Geribeslemeli kontrol sistemi ve PIDA denetleyici)

In the PIDA controller, it can be written as follows, where α, β and γ are set-point weighting parameters for proportional, derivative and acceleration parts, respectively:

$$U(s) = K_p[\alpha R(s) - Y(s)] + \frac{K_i}{s}E(s) + K_d s[\beta R(s) - Y(s)] + K_a s^2[\gamma R(s) - Y(s)] \quad (4)$$

By taking the set-point weighting parameters as zero, I-PDA controller is obtained [55]:

$$U(s) = \frac{K_i}{s}E(s) - \left(K_p + K_d s + K_a s^2\right)Y(s) \quad (5)$$

If the set-point weighting and derivative filter are used together in the PIDA controller, the following equation can be written:

$$U(s) = K_p[\alpha R(s) - Y(s)] + \frac{K_i}{s}E(s) + \frac{K_d s}{(s+d)}[\beta R(s) - Y(s)] + \frac{K_a s^2}{(s+d)(s+e)}[\gamma R(s) - Y(s)] \quad (6)$$

3. DESIGNED TOOL and APPLICATIONS
(TASARLANAN ARAÇ VE UYGULAMALARI)

In this study, an interactive simulator was designed using MATLAB App Designer [56] for PID and PIDA controllers with different types. This simulator includes P, PI, PD, PID, PIDA, I-PD, I-PDA, PID with prefilter and PIDA with prefilter controllers. The general block diagram of the system used for analysis is seen on the simulator main screen in Figure 2. The main screen, toolbar and main menu of designed simulator with their descriptions are given in Figure 2 and Table 1-2, respectively. On the simulator main screen (Figure 2):

- The transfer function of the controlled system can be entered as numerator and denominator coefficients.
- The transfer function of the feedback system (sensor/filter) can be entered as numerator and denominator coefficients.
- Impulse, step and ramp can be selected as reference input.
- If available, user-defined step and partial step can be set as input disturbance.
- If available, user-defined step, partial step and noise can be set as output disturbance.
- The series controller is selected and its coefficients are entered. In comparative analyses, three series controllers are selected and their coefficients are entered separately.
- As a result of single analysis, time and frequency domain responses are plotted. In addition, the parameters in the relevant domains (for time domain: rise time, peak time, settling time, overshoot percentage, steady state response, steady state error; for frequency domain: gain margin, phase margin, gain crossover frequency, phase crossover frequency) are also displayed on the screen.
- As a result of the comparative analysis, the time and frequency domain responses are plotted comparatively with the adjusted controllers. In addition, the parameters in the relevant domains are given comparatively in tables.

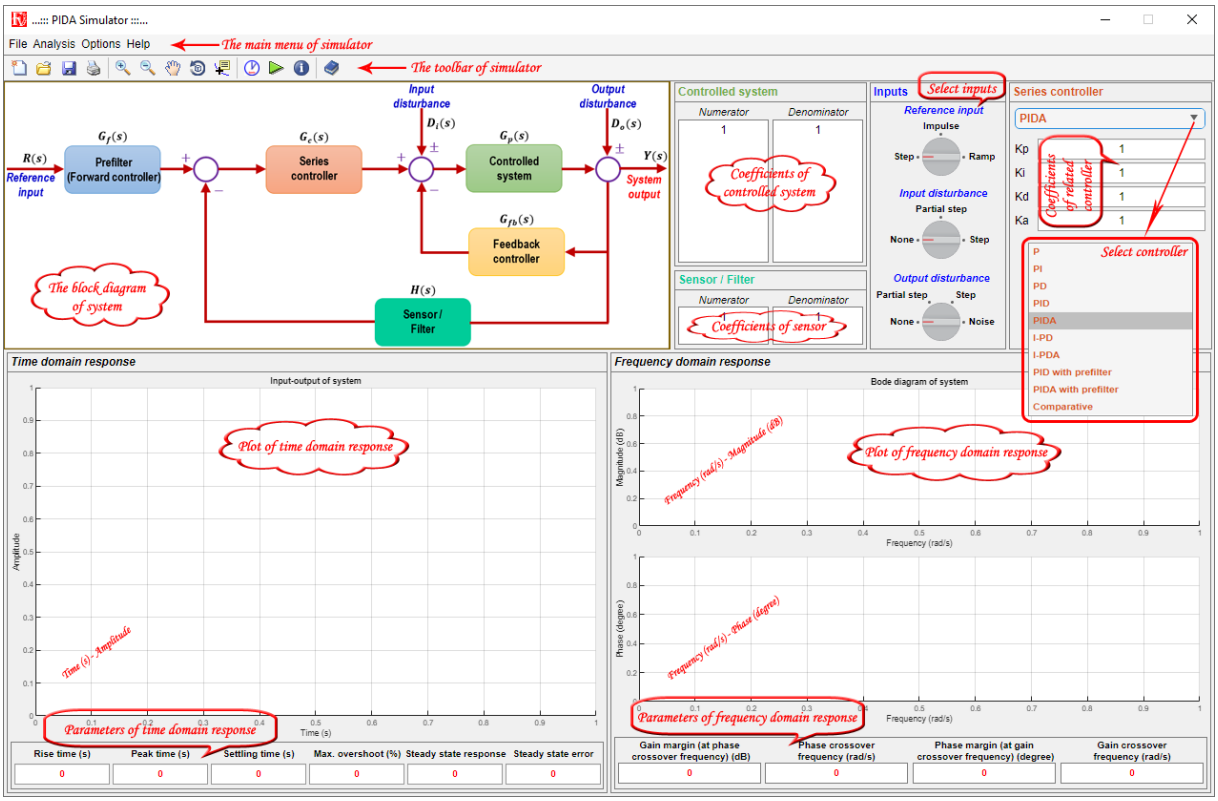


Figure 2. The main screenshot of designed simulator (Tasarlanan simülatörün ana ekranı)

Table 1. The toolbar of designed simulator (Tasarlanan simülatörün araç çubuğu)



New	Open	Save	Print	Zoom in	Zoom out	Pan	Rotate	Data cursor	Simulation time	Run	Detailed information	Help

Table 2. The main menu of designed simulator (Tasarlanan simülatörün ana menüsü)

File	Analysis	Options	Help
New Ctrl+N Open Ctrl+O Save Print Ctrl+P Exit	Single Ctrl+S Comparative Ctrl+C	Simulation range → Time / Frequency Format Graphics	Contents Ctrl+H About
Basic operations for simulation: new, open, save (as data or image) and print	Performing single or comparative simulations/analysis	Simulation (time/frequency interval) and display (format, graphic properties, etc.) options	Simulator content/user guide

Case study-1: Maglev vehicle suspension system

The maglev vehicle can be modeled as a one-dimensional vehicle model consisting of a primary part (chassis) and a secondary part (passenger cabin). Transfer function model of the maglev suspension system from the guideway disturbance to position of the passenger cabin is given as

$$G_p(s)=\frac{b_p b_s s^2+(b_p k_s+b_s k_p)s+k_p k_s}{m_p m_s s^4+[m_p b_s+m_s(b_p+b_s)]s^3+[m_p k_s+m_s(k_p+k_s)+b_p b_s]s^2+(b_p k_s+b_s k_p)s+k_p k_s} \quad (7)$$

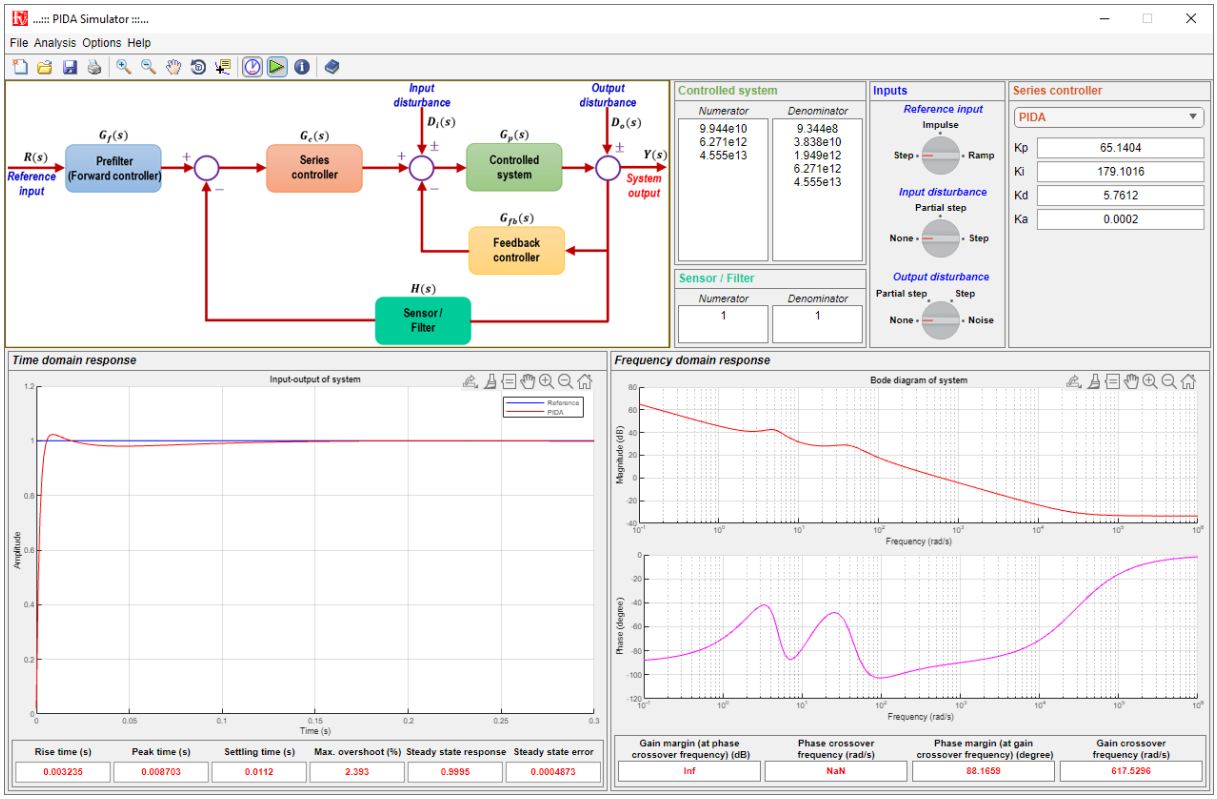
where masses m_p and m_s, stiffnesses k_p and k_s, and dampings b_p and b_s are the model parameters of the primer and seconder parts. Using the values for the model parameters given in [16], the following transfer function is obtained:

$$G_p(s)=\frac{9.944\cdot10^{10}s^2+6.271\cdot10^{12}s+4.555\cdot10^{13}}{9.344\cdot10^{8}s^4+3.838\cdot10^{10}s^3+1.949\cdot10^{12}s^2+6.271\cdot10^{12}s+4.555\cdot10^{13}} \quad (8)$$

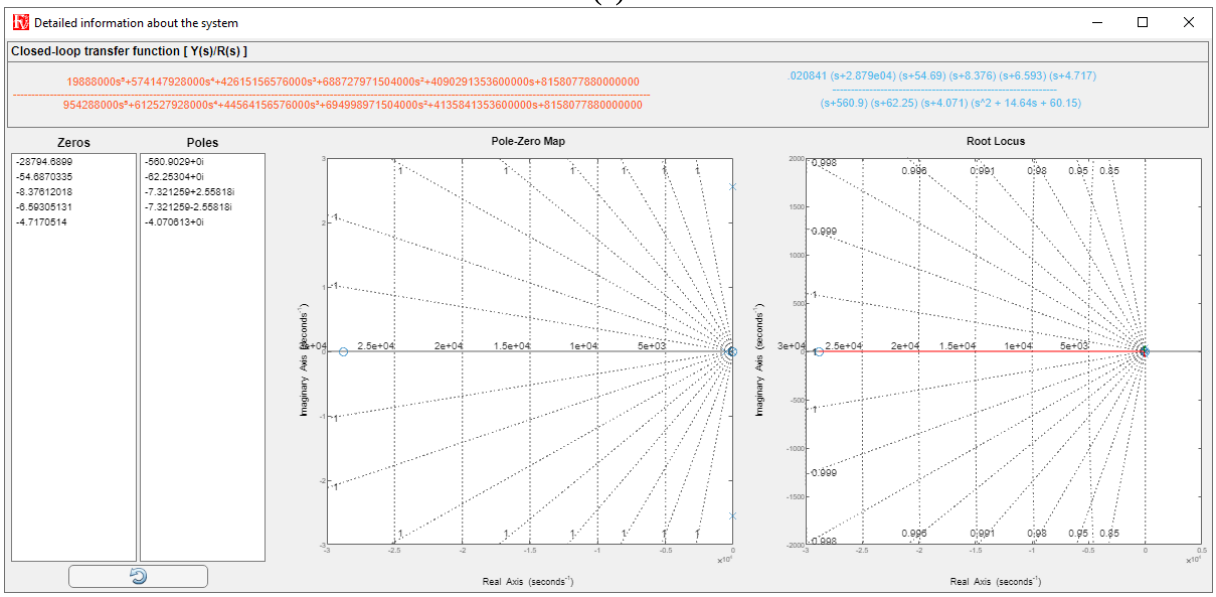
In the first simulation, the following PIDA controller given in [16] was used to control the maglev vehicle suspension system.

$$\left.\begin{aligned} G_c(s)&=65.1404+\frac{179.1016}{s}+5.7612s+0.0002s^2\\ H(s)&=1\end{aligned}\right\} \quad (9)$$

The simulation result screen is shown in Figure 3a. Here, the time and frequency domain responses and related response parameters are included. Thus, the performance of the user-defined system with the specified controller can be clearly seen. If the desired specifications are not satisfied in the system response, simulations can be easily repeated by changing the controller and its coefficients. In addition, the window in Figure 3b is opened with the "Detailed information" icon. Here, the closed-loop transfer function of the system is printed in different ways, the zeros and poles of the system are listed and mapped, and the root locus curve is shown.



(a)



(b)

Figure 3. The screenshots for first application (Birinci uygulama için ekran görüntüleri)

Case study-2: Automatic voltage regulator system

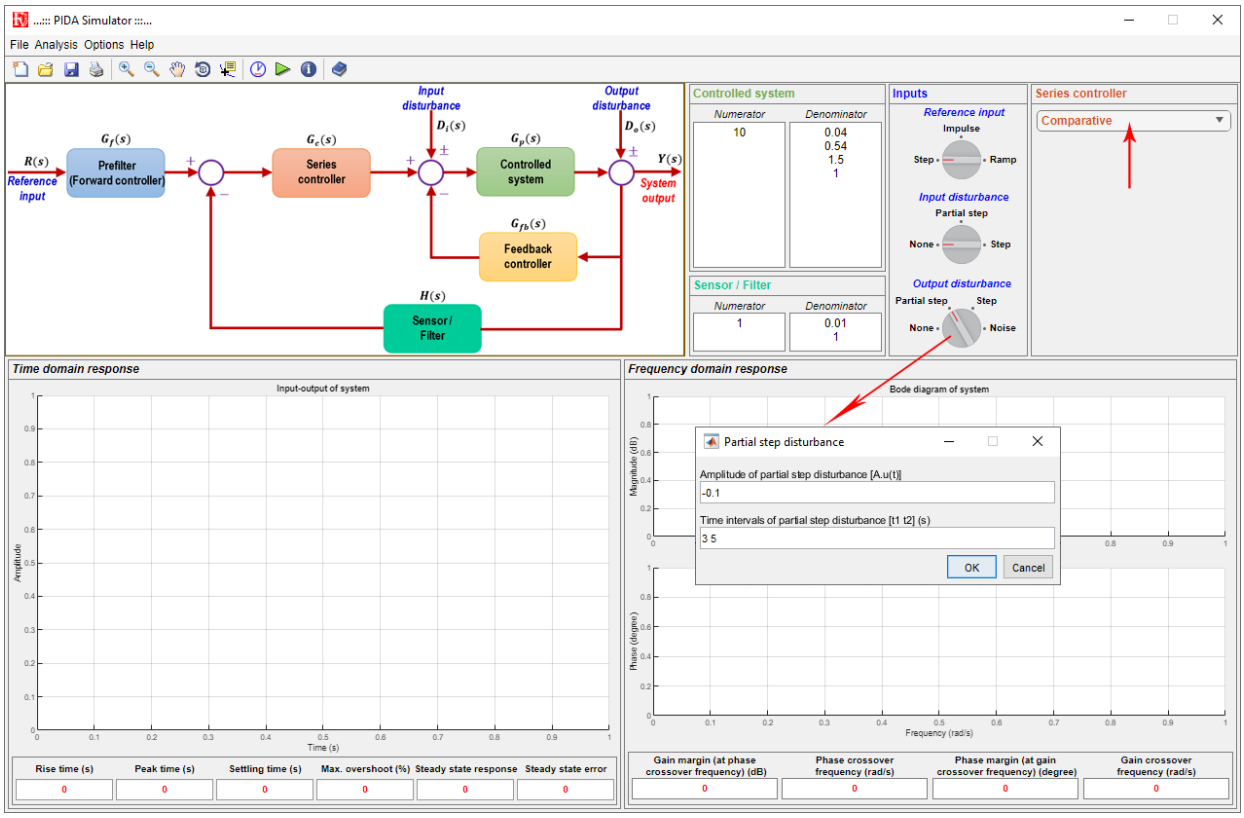
The second application is comparative control (PID, PIDA, PIDA) of automatic voltage regulator (AVR) system. An AVR system is used to regulate the generator voltage in a power system and consists of amplifier, exciter and generator blocks connected in series on forward path and a sensor on feedback path of the control system. An error information is obtained by measuring the terminal voltage of the generator with a sensor and comparing it with the reference voltage. Any designed controller processes this error signal and produces a control input that is used to excite the series-connected amplifier, exciter, generator blocks. Each block in the AVR system is modeled with a first-order system model defined by a gain and a time constant, and using the model parameters given in [15, 57-58] for each block, the following transfer function is obtained; where k_a, k_e, k_g, k_s are the gains and τ_a, τ_e, τ_g, τ_s are the time constants of the amplifier, exciter, generator and sensor blocks, respectively.

$$\left.\begin{aligned} G_p(S) &= \frac{k_a}{1+\tau_a s}\cdot\frac{k_e}{1+\tau_e s}\cdot\frac{k_g}{1+\tau_g s} \\ &= \frac{10}{0.04s^3+0.54s^2+1.5s+1} \\ H(S) &= \frac{k_s}{1+\tau_s s} = \frac{1}{0.01s+1} \end{aligned}\right\} \quad (10)$$

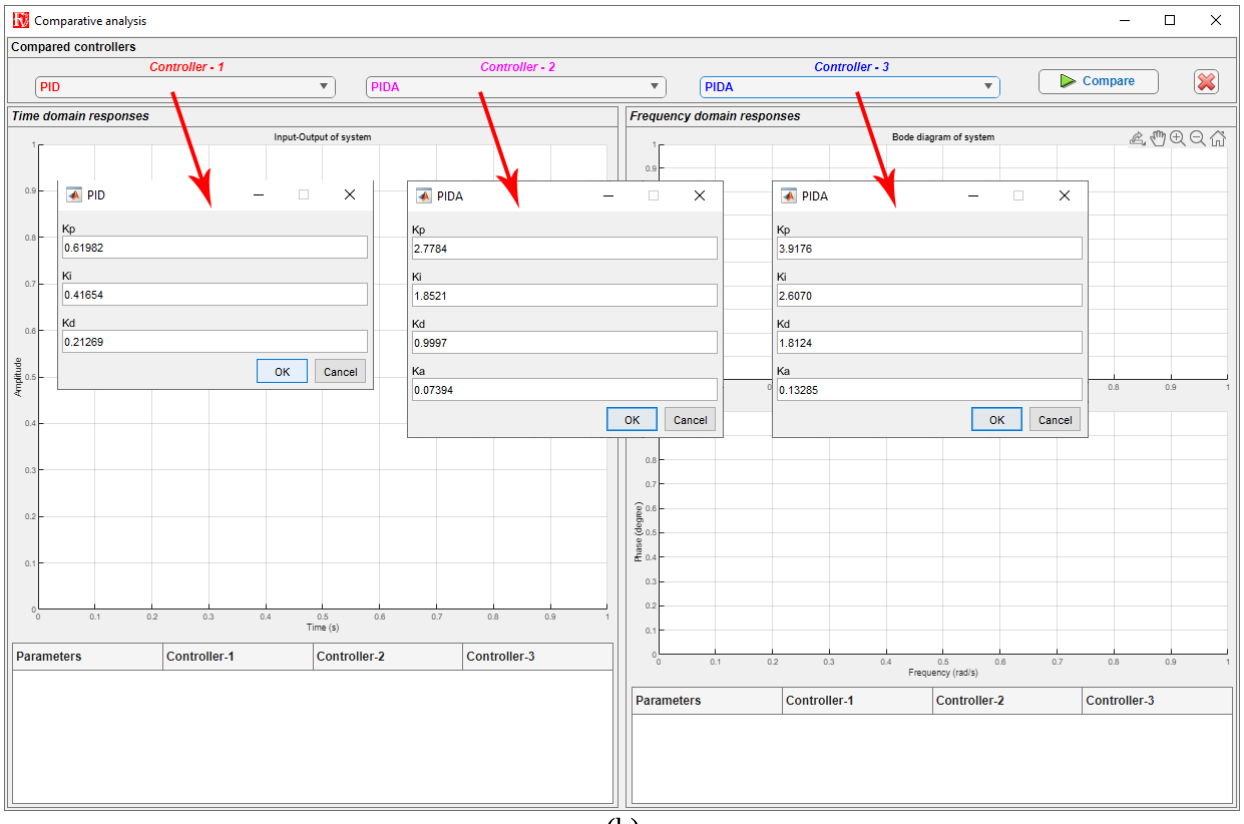
In the second simulation, the performances of the PID controller given in [57] and the PIDA controllers given in [15] and [58] were compared by using the AVR control system. Also, a step disturbance with an amplitude of 0.1 V was applied to the system output at $t = 3$ s, and removed at $t = 5$ s.

$$\left.\begin{aligned} G_{c_{PID}}(s) &= K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \\ &= 0.61982 + \frac{0.41654}{s} + 0.21269s \\ G_{c_{PIDA}}(s) &= K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s + K_a s^2 \\ &= 2.7784 + \frac{1.8521}{s} + 0.9997s + 0.07394s^2 \\ G_{c_{PIDA}}(s) &= K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s + K_a s^2 \\ &= 3.9176 + \frac{2.6070}{s} + 1.8124s + 0.13285s^2 \end{aligned}\right\} \quad (11)$$

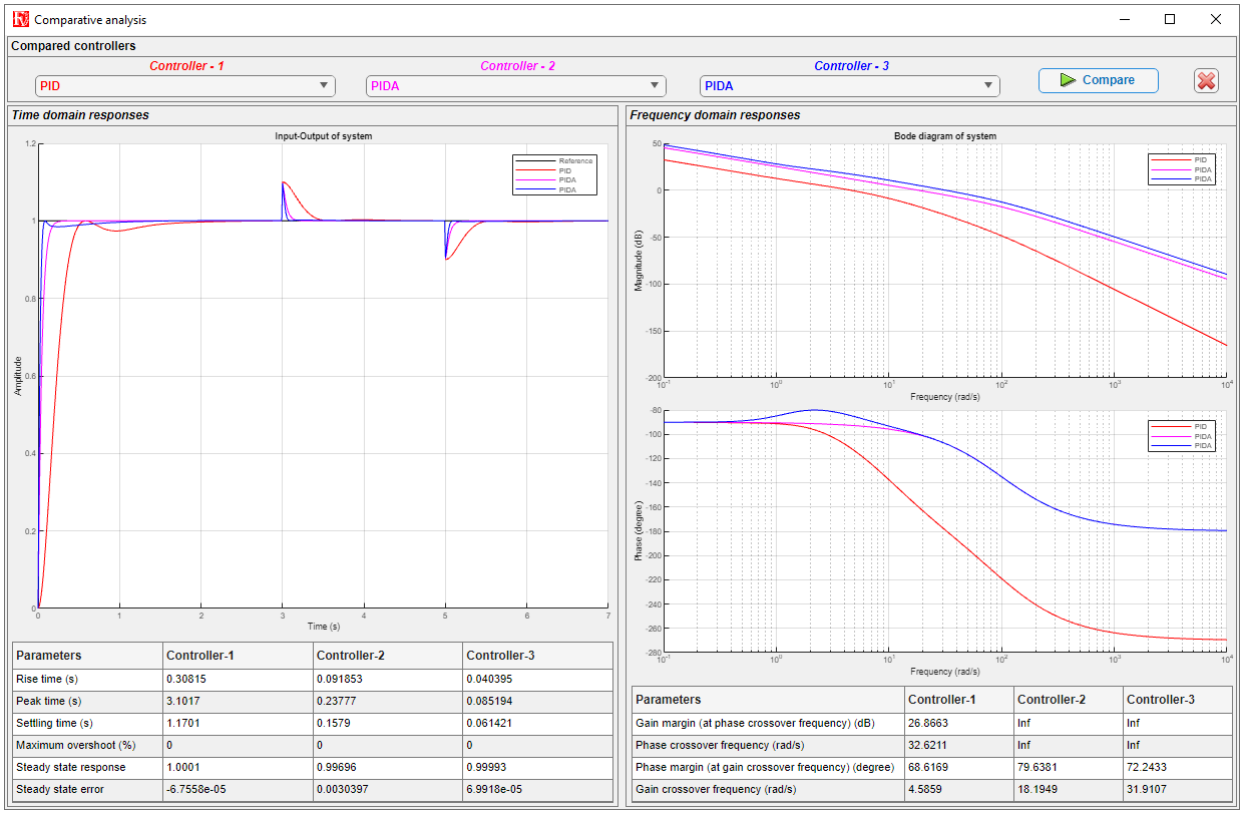
The input of the system parameters, reference input and partial step output disturbance is shown in Figure 4a. When "Comparative" is selected as the controller, the screen in Figure 4b opens and the parameters of the controllers to be compared are entered. By clicking the "Compare" button, the comparative simulation results are displayed as in Figure 4c. Here, in addition to the time and frequency domain comparative system responses, the relevant domain parameters are also displayed in tables. Thus, it is presented to the user which controller is more suitable for the defined system.


..... PIDA Simulator :::....
File Analysis Options Help
Input disturbance
Output disturbance
Prefilter (Forward controller)
Series controller
Controlled system
Feedback controller
Sensor / Filter
Reference input
System output
Controlled system
Numerator
Denominator
Inputs
Reference input
Impulse
Step
Ramp
Input disturbance
Partial step
None
Step
Output disturbance
Partial step
Step
None
Noise
Series controller
Comparative
Sensor / Filter
Time domain response
Input-output of system
Frequency domain response
Bode diagram of system
Partial step disturbance
Amplitude of partial step disturbance [A.u(t)]
-0.1
Time intervals of partial step disturbance [t1 t2] (s)
3 5
OK
Cancel
Rise time (s)
Peak time (s)
Settling time (s)
Max. overshoot (%)
Steady state response
Steady state error
Gain margin (at phase crossover frequency) (dB)
Phase crossover frequency (rad/s)
Phase margin (at gain crossover frequency) (degree)
Gain crossover frequency (rad/s)

(a)


Comparative analysis
Compared controllers
Controller - 1
Controller - 2
Controller - 3
PID
PIDA
PIDA
Compare
Time domain responses
Input-Output of system
Frequency domain responses
Bode diagram of system
PID
Kp
0.61982
Ki
0.41654
Kd
0.21269
OK
Cancel
PIDA
Kp
2.7784
Ki
1.8521
Kd
0.9997
Ka
0.07394
OK
Cancel
PIDA
Kp
3.9176
Ki
2.6070
Kd
1.8124
Ka
0.13285
OK
Cancel
Parameters
Controller-1
Controller-2
Controller-3
Parameters
Controller-1
Controller-2
Controller-3

(b)



Parameters	Controller-1	Controller-2	Controller-3
Rise time (s)	0.30815	0.091853	0.040395
Peak time (s)	3.1017	0.23777	0.085194
Settling time (s)	1.1701	0.1579	0.061421
Maximum overshoot (%)	0	0	0
Steady state response	1.0001	0.99696	0.99993
Steady state error	-6.7558e-05	0.0030397	6.9918e-05

Parameters	Controller-1	Controller-2	Controller-3
Gain margin (at phase crossover frequency) (dB)	26.8663	Inf	Inf
Phase crossover frequency (rad/s)	32.6211	Inf	Inf
Phase margin (at gain crossover frequency) (degree)	68.6169	79.6381	72.2433
Gain crossover frequency (rad/s)	4.5859	18.1949	31.9107

(c)

Figure 4. The screenshots for second application (İkinci uygulama için ekran görüntüleri)

Case study-3: Induction motor system

In the third application, a cascade control structure is used to control a simplified asynchronous motor model obtained by neglecting the electrical subsystem model. An Integral-Proportional (I-P) controller is used as speed controller in inner control loop, and a PIDA controller is used as position controller in outer loop. The following transfer function for the I-P controlled speed control loop is obtained by using the model parameters given in [4, 8, 55]; where k_i , k_p are the I-P controller parameters, and J, b, k_t are mechanical inertia constant, total friction coefficient, and torque constant of the motor, respectively.

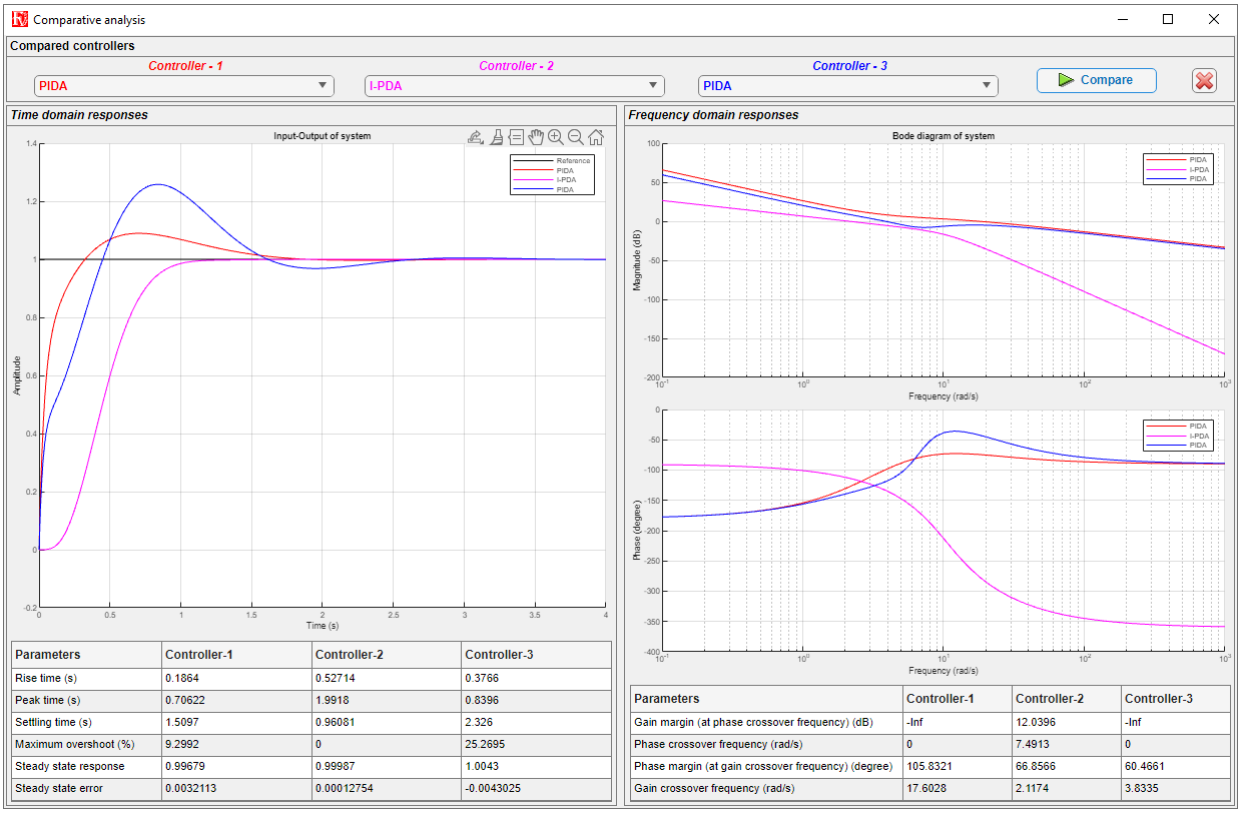
$$G_p(s) = \frac{k_i k_t}{Js^2+(b+k_i k_t)s+k_i k_t} = \frac{168.0436}{s^3+25.921s^2+168.0436s} \quad (12)$$

In the third simulation, the performances of the following three PIDA controllers with $H(s) = 1$ (PIDA-Jung&Dorf, I-PDA, PIDA-Kitty) were compared.

$$\left.\begin{aligned} G_{c_{PIDA-Jung\&Dorf}}(s) &= K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s + K_a s^2 \\ &= 11.8966 + \frac{19.5138}{s} + 2.445s + 0.1266s^2 \\ G_{c_{I-PDA}}(s) &= \begin{cases} G_c(s) = \frac{K_i}{s} = \frac{18.734}{s} \\ G_{fb}(s) = K_p + K_d s + K_a s^2 \\ = 8.842 + 0.669s + 0.0033s^2 \end{cases} \\ G_{c_{PIDA-Kitty}}(s) &= K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s + K_a s^2 \\ &= 5.6672 + \frac{9.3764}{s} + 0.7027s + 0.0248s^2 \end{aligned}\right\} \quad (13)$$

After the data entries are completed, the comparative simulation results screen shown as in Figure 5.

The comparison of the developed simulator in this study with other simulators in the literature is summarized in Table 3.



Parameters	Controller-1	Controller-2	Controller-3
Rise time (s)	0.1864	0.52714	0.3766
Peak time (s)	0.70622	1.9918	0.8396
Settling time (s)	1.5097	0.96081	2.326
Maximum overshoot (%)	9.2992	0	25.2695
Steady state response	0.99679	0.99987	1.0043
Steady state error	0.0032113	0.00012754	-0.0043025

Parameters	Controller-1	Controller-2	Controller-3
Gain margin (at phase crossover frequency) (dB)	-Inf	12.0396	-Inf
Phase crossover frequency (rad/s)	0	7.4913	0
Phase margin (at gain crossover frequency) (degree)	105.8321	66.8566	60.4661
Gain crossover frequency (rad/s)	17.6028	2.1174	3.8335

Figure 5. The screenshot for third application (Üçüncü uygulama için ekran görüntüsü)

Table 3. The comparison of simulators' properties (Simülatör özelliklerinin karşılaştırılması)

Properties			Ref. [50]	Ref. [51]	Ref. [52]	Ref. [53]	Ref. [54]	This study
Reference input	*Step*		√	√	√	√	√	√
	Impulse							√
	Ramp							√
Input disturbance	*Step*		√	√	√			√
	Delayed step				√			√
	Partial step							√
Output disturbance	*Step*							√
	Partial step							√
	Noise		√	√	√			√
Controlled system definition			√	√	√	√	√	√
Sensor / Filter definition								√
Series controller	*PID (P, PI, PD, PID)*		√	√	√	√	√	√
	PIDA		√	√	√	√	√	√
	I-PD							√
	I-PDA							√
	PID with prefilter							√
	PIDA with prefilter							√
Analysis type	*Single*		√	√	√	√	√	√
	Comparative		√	√	√	√	√	√
Responses	*Time domain plot*	*Reference tracking*	√	√	√	√	√	√
		Disturbance rejection	√	√	√	√		√
	Time domain parameters					√	√	√
	Frequency domain plot					√		√
	Frequency domain parameters					√		√
System information	*Closed-loop transfer function*							√
	Pole-zeros listing							√
	Pole-zeros mapping							√
	Root locus							√
Basic operations (save, print etc.)								√
Basic graphical operations (zoom in, zoom out, etc.)								√

4. CONCLUSIONS (SONUÇLAR)

Traditional PID controllers are used in many industrial applications. However, as the degree of the controlled system increases, the performance in the control process may decrease. This situation can be compensated by using PIDA controllers. In this study, an interactive simulator was designed for

students and people who will use the relevant controllers in the control area. With this developed simulator, performance evaluations of PID and PIDA type controller systems can be easily performed with time and frequency domain analysis. In addition, the simulator has capabilities such as comparative analysis, analysis of input and output disturbance effects, and analysis of different reference input responses. In addition, it can provide detailed information about the relevant systems (closed-loop transfer functions, pole-zero mapping/listing, root locus plot, time and frequency performance parameters etc.). These features of the developed simulator are demonstrated with three case studies (maglev vehicle suspension system, automatic voltage regulator, induction motor system) performed in the work. As future work, it is planned to develop a web-based simulator and to extend by adding different controllers.

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)

***Metin Hatun*:** Conceptualization, Methodology, Investigation, Validation, Visualization, and Writing.

Kavramsallaştırma, Metodoloji, Araştırma, Doğrulama, Görselleştirme ve Yazma.

***Fahri Vatansever*:** Conceptualization, Methodology, Investigation, Software Development, Validation, Visualization, Writing-Reviewing and Editing.

Kavramsallaştırma, Metodoloji, Araştırma, Yazılım Geliştirme, Doğrulama, Görselleştirme, Yazma-İnceleme ve Düzenleme.

CONFLICT OF INTEREST (ÇIKAR ÇATIŞMASI)

There is no conflict of interest in this study.

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

REFERENCES (KAYNAKLAR)

[1] O'dwyer, A., (2009). Handbook of PI and PID controller tuning rules (third edition). London: Imperial College Press.

[2] Åström K.J. and Hägglund T. (2006). Advanced PID Control. ISA-The Instrumentation, Systems and Automation Society.

[3] Jung S. and Dorf R.C., Novel analytic technique for PID and PIDA controller design, IFAC Proceedings Volumes, 29 No. 1 (1996) 1146-1151. doi: 10.1016/S1474-6670(17)57819-2

[4] Jung S. and Dorf R.C., Analytic PIDA controller design technique for a third order system, Proceedings of 35th IEEE Conference on Decision and Control, (1996), 2513-2518. doi: 10.1109/CDC.1996.573472

[5] Patu P., Jongkol L, Kitti T., Noriyuki K., Shunji M., PIDA controller design by CDM, Proceedings of the 13th KACC, (1998) 395-400.

[6] Dal-Young H., Ihn-Yong L., Young-Seung C., Young-Do L., Boo-Kwi C., The design of PIDA controller with pre-compensator, 2001 IEEE International Symposium on Industrial Electronics Proceedings (ISIE 2001), (2001) 798-804. doi: 10.1109/ISIE.2001.931570

[7] Ukakimaparn P., Pannil P., Boonchuay P., Trisuwannawat T., PIDA controller designed by Kitti's method, 2009 ICROS-SICE International Joint Conference, (2009) 1547-1550.

[8] Sambariya D.K., Paliwal D., Comparative design and analysis of PIDA controller using Kitti's and Jung-Dorf approach for third order practical systems, Journal of Advances in Mathematics and Computer Science, 16 No. 5 (2016) 1-16. doi: 10.9734/BJMCS/2016/26223

[9] Bhandari M. and Rathore A., Comparative study of design of PIDA controller for induction motor, 2016 10th International Conference on Intelligent Systems and Control (ISCO), (2016) 1-5. doi: 10.1109/ISCO.2016.7726968

[10] Kumar M., Hote Y.V., Robust CDA-PIDA control scheme for load frequency control of interconnected power systems, IFAC-PapersOnLine, 51 No. 4 (2018) 616-621. doi: 10.1016/j.ifacol.2018.06.164

[11] Jitwang T., Nawikavatan A., Puangdownreong D., Optimal PIDA controller design for three-tank liquid-level control system with model uncertainty by cuckoo search, International Journal of Circuits, Systems and Signal Processing, 13 (2019) 60-65.

[12] Kumar M. and Hote, Y.V., Graphic RCRA-PIDA tuning based on maximum sensitivity for automatic generation control of thermal and hydro power systems, IET Generation, Transmission & Distribution, 14 No. 26 (2020) 6427-6439. doi: 10.1049/iet-gtd.2020.0618

[13] Kumar M. and Hote, Y.V., Maximum sensitivity-constrained coefficient diagram method-based PIDA controller design: application for load frequency control of an isolated microgrid, Electrical Engineering, 103 No. 5 (2021) 2415-2429. doi: 10.1007/s00202-021-01226-4

[14] Kumar M., Hote Y.V., Sikander A., A novel cascaded CDM-IMC based PIDA controller design and its application, 2023 IEEE IAS Global Conference on Renewable Energy and Hydrogen Technologies (GlobConHT), (2023) 1-7. doi: 10.1109/GlobConHT56829.2023.10087714

[15] Sahib M.A., A novel optimal PID plus second order derivative controller for AVR system, Engineering Science and Technology, An International Journal, 18 No. 2 (2015) 194-206. doi: 10.1016/j.jestch.2014.11.006

[16] Hlangnamthip S. and Puangdownreong D., Optimal PIDA controller design for Maglev vehicle suspension system by Lévy-Flight Firefly algorithm, SWU Engineering Journal, 14 No. 1 (2019) 12-22.

[17] Romsai W. and Nawikavatan A., Optimal PIDA controller design for quarter car suspension system by intensified current search, 2019 17th International Conference on ICT and Knowledge Engineering (ICT&KE), (2019) 1-5. doi: 10.1109/ICTKE47035.2019.8966863

[18] Kumar M. and Hote Y.V., A novel PIDA controller design for a single-axis gimbal system, 2020 IEEE 17th India Council International Conference (INDICON), (2020) 1-6. doi: 10.1109/INDICON49873.2020.9342153

[19] Huba M., Bistak P., Vrancic D., Optimizing constrained series PIDA controller for speed loops inspired by Ziegler-Nichols, 2023 International Conference on Electrical Drives and Power Electronics (EDPE), (2023) 1-6. doi: 10.1109/EDPE58625.2023.10274033

[20] Huba M., Bistak P., Vrancic D., Parametrization and optimal tuning of constrained series PIDA controller for IPDT models, Mathematics, 11 No. 20 (2023) 4229. doi: 10.3390/math11204229

[21] Huba M., Bistak P., Vrancic D., Series PIDA controller design for IPDT processes, Applied Sciences, 13 No. 4 (2023) 2040. doi: 10.3390/app13042040

[22] Huba M., Bistak P., Brieznik J., Vrancic D., Constrained series PI, PID and PIDA controller design inspired by Ziegler-Nichols, Power Electronics and Drives, 9 No. 1 (2024) 331-346. doi: 10.2478/pead-2024-0021

[23] Huba M., Filtered PIDA controller for the double integrator plus dead time, IFAC-PapersOnLine, 52 No. 27 (2019) 106-113. doi: 10.1016/j.ifacol.2019.12.741

[24] Huba M. and Vrančič D., Comparing filtered PI, PID and PIDD^2 control for the FOTD plants, IFAC-PapersOnLine, 51 No. 4 (2018) 954-959. doi: 10.1016/j.ifacol.2018.06.099

[25] Heo J.P., Lim S., Im C.G., Ryu K.H., Sung S.W., New non-interactive form of the proportional-integral-derivative-acceleration (PIDA) controller and its explicit tuning rule, Korean Journal of Chemical Engineering, 40 (2023) 1277-1283. doi: 10.1007/s11814-022-1356-0

[26] Hu X., Hou G., Tan W., Tuning of PIDD2 controllers for oscillatory systems with time delays, Frontiers in Control Engineering, 3 (2023) 1-17. doi: 10.3389/fcteg.2022.1083419

[27] Hu X., Tan W., Hou G., Tuning of PID/PIDD2 controllers for second-order oscillatory systems with time delays, Electronics, 12 No. 14 (2023) 3168. doi: 10.3390/electronics12143168

[28] Li Z., Zhang H., Tan W., Comparison of PI/PID/PIDD2 controllers for higher order processes, IFAC-PapersOnLine, 58 No. 7 (2024) 340-345. doi: 10.1016/j.ifacol.2024.08.085

[29] Hu X., Tan W., Hou G., PIDD2 control of large wind turbines pitch angle, Energies, 16 No. 13 (2023) 1-22. doi: 10.3390/en16135096

[30] Kumar M. and Hote Y.V., Robust IMC-PIDA controller design for load frequency control of a time delayed power system, 2019 IEEE 58th Conference on Decision and Control (CDC), (2019) 8380-8385. doi: 10.1109/CDC40024.2019.9029259

[31] Kumar M. and Hote Y.V., Robust PIDD2 controller design for perturbed load frequency control of an interconnected time-delayed power systems, IEEE Transactions on Control Systems Technology, 29 No. 6 (2021) 2662-2669. doi: 10.1109/TCST.2020.3043447

[32] Anwar M.N., Siddiqui M.A., Laskar S.H., Yadav A., PIDA controller design for higher order stable process with inverse response characteristic, 2018 International Conference on Computational and Characterization Techniques in Engineering & Sciences (CCTES), (2018) 236-240. doi: 10.1109/CCTES.2018.8674158

[33] Huba M. and Vrancic D., Extending the model-based controller design to higher-order plant models and measurement noise, Symmetry, 13 No. 5 (2021) 1-44. doi: 10.3390/sym13050798

[34] Arulvadivu J., Manoharan S., Lal Raja Singh R., Giriprasad S., Optimal design of proportional integral derivative acceleration controller for higher-order nonlinear time delay system using m-MBOA technique, International Journal of Numerical Modelling: Electronic Networks, Devices and Fields, 35 No. 6 (2022) 1-24. doi: 10.1002/jnm.3016

[35] Visioli A. and Sánchez-Moreno J., IMC-based tuning of PIDA controllers: a comparison with PID control, IFAC-PapersOnLine, 58 No. 7 (2024) 1-6. doi: 10.1016/j.ifacol.2024.08.001

[36] Visioli A. and Sánchez-Moreno J., A relay-feedback automatic tuning methodology of PIDA controllers for high-order processes, International Journal of Control, 97 No. 1 (2024) 51-58. doi: 10.1080/00207179.2022.2135019

[37] Visioli A. and Sanchez-Moreno J., Design of PIDA controllers for high-order integral processes, 2023 IEEE 28th International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), (2023) 1-8. doi: 10.1109/ETFA54631.2023.10275379

[38] Kumar M. and Hote Y.V., PIDD2 Controller design based on internal model control approach for a non-ideal DC-DC boost converter, 2021 IEEE Texas Power and Energy Conference (TPEC), (2021) 1-6. doi: 10.1109/TPEC51183.2021.9384954

[39] Kumar M. and Hote Y.V. Real-time performance analysis of PIDD2 controller for nonlinear twin rotor TITO aerodynamical system, Journal of Intelligent & Robotic Systems, 101 No. 55 (2021) 1-16. doi: 10.1007/s10846-021-01322-4

[40] Kumar M., Mahadeva R., Patole S.P., Non-fragile PIDA controller design for time-delayed uncertain system, IEEE Access, 12 (2024) 81156-81169. doi: 10.1109/ACCESS.2024.3411146

[41] Zandavi S.M., Chung V., Anaissi A., Accelerated control using stochastic dual simplex algorithm and genetic filter for drone application, IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 58 No. 3 (2022) 2180-2191. doi: 10.1109/TAES.2021.3134751

[42] Saikia L.C. and Sinha, N., Automatic generation control of a multi-area system using ant lion optimizer algorithm based PID plus second order derivative controller, International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 80 (2016) 52-63. doi: 10.1016/j.ijepes.2016.01.037

[43] Kumar M., Altaf A., Biswas, D., Cheetah optimizer based PIDA controller design for cyber-physical power system under cyberattacks and uncertainty, 2023 IEEE 3rd International Conference on Smart Technologies for Power, Energy and Control (STPEC), (2023) 1-5. doi: 10.1109/STPEC59253.2023.10431040

[44] Kumar M., Resilient PIDA control design based frequency regulation of interconnected time-delayed microgrid under cyber-attacks, IEEE Transactions on Industry Applications, 59 No. 1 (2023) 492-502. doi: 10.1109/TIA.2022.3205280

[45] Huba M., Vrancic D., Bistak P., PID control with higher order derivative degrees for IPDT plant models, IEEE Access, 9 (2021) 2478-2495. doi: 10.1109/ACCESS.2020.3047351

[46] Bistak P., Huba M., Vrancic D., Chamraz S., IPDT Model-Based Ziegler–Nichols Tuning Generalized to Controllers with Higher-Order Derivatives, Sensors, 23 No. 8 (2023) 3787. doi: 10.3390/s23083787

[47] Huba M., Vrancic D., Bistak P., Series PID control with higher-order derivatives for

processes approximated by IPDT models, IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 21 No. 3 (2024) 4406-4418. doi: 10.1109/TASE.2023.3296201

[48] Huba M., Bistak P., Brieznik J., Vrancic D., Constrained series PI, PID and PIDA controller design Inspired by Ziegler-Nichols, Power Electronics and Drives, 9 No. 1 (2024) 331-346. doi: 10.2478/pead-2024-0021

[49] Vrančić D. and Huba M., High-order filtered PID controller tuning based on magnitude optimum, Mathematics, 9 No. 12 (2021) 1-24. soi: 10.3390/math9121340

[50] Bisták P., Disturbance analysis virtual laboratory for PID controllers with higher derivative degrees, 2018 16th International Conference on Emerging eLearning Technologies and Applications (ICETA), (2018) 69-74. doi: 10.1109/ICETA.2018.8572065

[51] Bisták P. and Huba M., Analysis of higher derivative degree PID controllers via virtual laboratory, 2019 27th Mediterranean Conference on Control and Automation (MED), (2019) 356-361. doi: 10.1109/MED.2019.8798527

[52] Bisták P. and Huba M., Interactive software tool for design of higher derivative degree PID controllers, IFAC-PapersOnLine, 53 No. 20 (2020) 17198-17203. doi: 10.1016/j.ifacol.2020.12.1736

[53] Ferrari M. and Visioli A., A software tool to understand the design of PIDA controllers, IFAC-PapersOnLine, 55 No. 17 (2022) 249-254. doi: 10.1016/j.ifacol.2022.09.287

[54] Žáková K., Matišák J., Šefčík J., Contribution to PID and PIDA interactive educational tools, IFAC-PapersOnLine, 58 No. 7 (2024) 115-119. doi: 10.1016/j.ifacol.2024.08.020

[55] Numsomran A., Sriratana W., Julsereewong P., Kongratana V., Tirasesth K., I-PDA controller designed by CDM, Proceedings of the 14th KACC, (1999) 284-287.

[56] The MathWorks Inc. (2022). MATLAB, App Designer.

[57] Bingül Z. and Karahan O., A novel performance criterion approach to optimum design of PID controller using cuckoo search algorithm for AVR system, Journal of the Franklin Institute, 355 No. 13 (2018) 5534-5559. doi: 10.1016/j.jfranklin.2018.05.056

[58] İzci D., Ekinci S., Mirjalili S., Optimal PID plus second-order derivative controller design for AVR system using a modified Runge Kutta optimizer and Bode's ideal reference model, International Journal of Dynamics and Control, 11 No. 3 (2023) 1247-1264. doi: 10.1007/s40435-022-01046-9

Gazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Dergisi
PART C: TASARIM VE TEKNOLOJİ

Gazi University
Journal of Science
PART C: DESIGN AND TECHNOLOGY

GU J Sci, Part C, 13(2): 538-552 (2025)

Effects of Adhesive Type and Surface Preparation on the Mechanical Strength of Thermoplastic and CFRP Structures

Emin ÖZTÜRK[1], Mert KILINÇEL[1*], Gülden KABAKÇI[2], Ahmet KÖMÜRCÜ[1]

[1]*Duzce University, Faculty of Engineering, Department of Mechanical Engineering, Duzce, Turkey*

[2]*Düzce University, Department of Mechanical Engineering, Düzce Vocational School, Düzce, Türkiye*

Article Info

Research article
Received: 23/01/2025
Revision: 28/03/2025
Accepted: 06/04/2025

Keywords

Composite
Thermoplastic
Thermoset
Mechanical Strength
Adhesive Type
Surface Preparation

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 23/01/2025
Düzeltme: 28/03/2025
Kabul: 06/04/2025

Anahtar Kelimeler

Kompozit
Termoplastik
Termoset
Mekanik Dayanım
Yapıştırıcı Türü
Yüzey Hazırlığı

Graphical/Tabular Abstract (Grafik Özet)

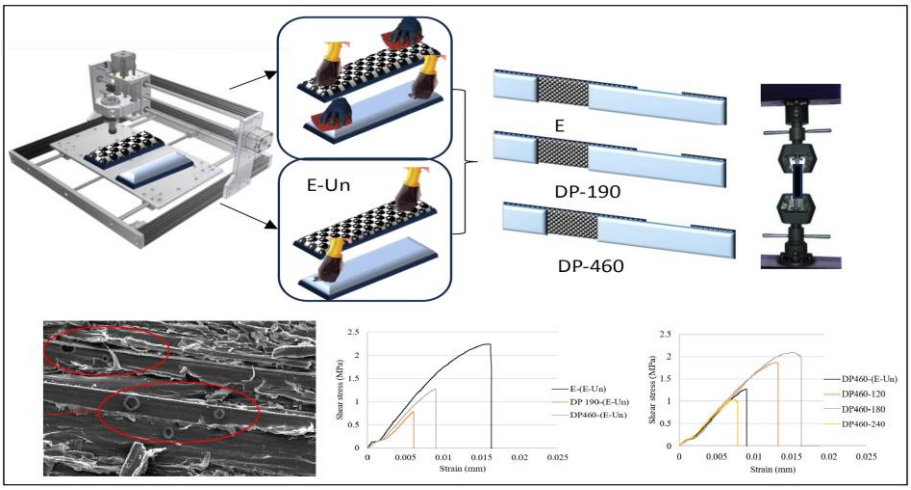


***Figure A**: Shear strength comparison of adhesives on HDPE-CFRP joints. /**Şekil A:**.HDPE-CFRP birleşimlerinde yapıştırıcıların kesme dayanımı karşılaştırması*

Highlights (Önemli noktalar)

- *HDPE-CFRP birleşimlerinde yapıştırıcı türü ve yüzey hazırlığının mekanik dayanım üzerindeki etkisi incelenmiştir. /The effect of adhesive type and surface preparation on the mechanical strength of HDPE-CFRP joints was examined.*
- *Tüm yapıştırıcılar arasında 120 numara zımparayla uygulanan DP190 en yüksek kesme dayanımını (~25 MPa) göstermiştir. / Among all adhesives, DP190 with 120-grit sanding showed the highest shear strength (~25 MPa).*
- *Epoksi dengeli bir performans sergilerken, DP460 HDPE'ye karşı zayıf yapışma göstermiştir. / Epoxy achieved balanced performance, while DP460 exhibited insufficient bonding to HDPE.*

Aim (Amaç): *To investigate the effects of adhesive type and surface preparation on the mechanical performance of CFRP-HDPE joints. / CFRP ve HDPE birleşimlerinde yapıştırıcı türü ve yüzey hazırlığının mekanik performansa etkisinin araştırılması amaçlanmıştır.*

Originality (Özgünlük): *This study provides a comparative mechanical analysis of different adhesive systems (epoxy, DP190, DP460) with controlled surface preparations for CFRP-HDPE bonding, including SEM-supported failure mechanisms. / Bu çalışma, CFRP-HDPE yapıştırma uygulamalarında farklı yapıştırıcı sistemlerinin (epoksi, DP190, DP460) kontrollü yüzey hazırlıklarıyla karşılaştırmalı mekanik analizini ve SEM destekli hasar incelemesini sunmaktadır.*

Results (Bulgular): *DP190 demonstrated superior bonding strength (~25 MPa) with 120-grit sanding, while DP460 failed to bond effectively with HDPE. Epoxy showed moderate bonding with balanced elongation and strength. / DP190, 120 numara zımparalama ile üstün yapışma dayanımı (~25 MPa) gösterirken, DP460 HDPE'ye etkili şekilde yapışamamıştır. Epoksi ise dengeli uzama ve dayanım ile orta seviyede bir yapışma sergilemiştir.*

Conclusion (Sonuç): *Surface preparation is critical for improving adhesive bonding in CFRP-HDPE joints. DP190 is identified as the most suitable adhesive, while DP460 should be avoided for flexible thermoplastic bonding. / CFRP-HDPE birleşimlerinde yapıştırıcı performansını artırmada yüzey hazırlığı kritik öneme sahiptir. DP190 en uygun yapıştırıcı olarak öne çıkarken, DP460 esnek termoplastik yapıştırmalarda tercih edilmemelidir.*

*Corresponding author, e-mail: mertkilincel@duzce.edu.tr
DOI: 10.29109/gujsc.1625639

GU J Sci, Part C, 13(2): 538-552 (2025)

Gazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Dergisi
PART C: TASARIM VE TEKNOLOJİ

Gazi University
Journal of Science
PART C: DESIGN AND TECHNOLOGY

http://dergipark.gov.tr/gujsc

Effects of Adhesive Type and Surface Preparation on the Mechanical Strength of Thermoplastic and CFRP Structures

Emin ÖZTÜRK[1], Mert KILINÇEL[1*], Gülden KABAKÇI[2], Ahmet KÖMÜRCÜ[1]

[1]*Duzce University, Faculty of Engineering, Department of Mechanical Engineering, Duzce, Turkey*

[2]*Düzce University, Department of Mechanical Engineering, Düzce Vocational School, Düzce, Türkiye*

Article Info

Research article
Received: 23/01/2025
Revision: 28/03/2025
Accepted: 06/04/2025

Keywords

Composite
Thermoplastic
Thermoset
Mechanical Strength
Adhesive Type
Surface Preparation

Abstract

Composite materials are widely used in industries for their lightweight, durability, and flexibility. Carbon fiber-reinforced composites are particularly demanded and used in aerospace, automotive, and space industries due to their high strength and low weight. They are also critical in manufacturing high-pressure hydrogen storage tanks, where the interfacial strength between thermoplastic and thermoset materials is crucial. This study investigates the effects of adhesive type and surface preparation on the mechanical strength of carbon fiber-reinforced composites bonded with high-density polyethylene (HDPE). Tensile tests were performed according to ASTM D5868, and scanning electron microscope (SEM) analyses were conducted to evaluate damage mechanisms. The results show that, DP 190-120 demonstrated the highest performance, providing a 108% higher shear stress (25 MPa) compared to other adhesives. In epoxy-bonded joints, the maximum shear stress (12 MPa) was observed in sample E-240. This value corresponds to only 48% of the performance of DP 190-240. Among the joints made with DP 460, DP 460-180 showed the best performance. However, with only 2.1 MPa shear stress, it reached just 8.4% of the performance of DP 190-180. These findings contribute to enhancing the safety of Type-IV hydrogen tanks and developing more reliable bonding methods for industrial applications.

Termoplastik ve CFRP Yapıların Birleştirilmesinde Yapıştırıcı Cinsi ve Yüzey Hazırlığının Malzemenin Mekanik Dayanımı Üzerindeki Etkileri

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 23/01/2025
Düzeltme: 28/03/2025
Kabul: 06/04/2025

Anahtar Kelimeler

Kompozit
Termoplastik
Termoset
Mekanik Dayanım
Yapıştırıcı Türü
Yüzey Hazırlığı

Öz

Kompozit malzemeler, hafiflik, dayanıklılık ve esneklikleriyle birçok endüstride tercih edilmektedir. Havacılık, otomotiv ve uzay endüstrilerinde yaygın olan karbon fiber takviyeli kompozitler, yüksek dayanım ve düşük ağırlıklarıyla dikkat çekmektedir. Yüksek basınçlı hidrojen depolama tanklarının üretiminde de sıklıkla kullanılan bu malzemeler, termoplastik ve termoset yapıların birleşim bölgelerindeki dayanımlarıyla önem kazanmaktadır. Bu çalışmada, karbon fiber epoksi kompozitlerin yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE) malzemelerle birleştirilmesinde yapıştırıcı türü ve yüzey hazırlığının mekanik dayanım üzerindeki etkileri araştırılmıştır. ASTM D5868 standardına uygun çekme testleri yapılmış, taramalı elektron mikroskobu (SEM) analizleriyle hasar mekanizmaları incelenmiştir. Sonuç olarak; DP 190-120 en yüksek performansı göstererek, diğer yapıştırıcılara göre %108 daha yüksek kesme gerilmesi (25 MPa) sağlamıştır. Epoksi ile yapılan birleşmelerde maksimum kesme gerilmesi (12 MPa) E-240 numunede gözlenmiştir. Bu değer, DP 190-240'ın performansının %48'ine karşılık gelmektedir. DP 460 ile yapılan birleştirmelerde DP 460-180 en iyi performansı göstermiştir. Ancak sadece 2.1 MPa kesme gerilmesi sağlayarak DP 190-DP 180'in performansının sadece %8.4'üne ulaşabilmiştir. Bu bulgular, Tip-IV hidrojen tanklarının güvenliğini artırmak ve endüstriyel uygulamalarda daha etkin birleştirme yöntemleri geliştirmek adına önemli bir katkı sunmaktadır.

1. INTRODUCTION (GİRİŞ)

In recent years, the diversification of industrial applications and increasing demand for advanced material properties have driven significant progress in material technologies [1]. Research in materials science and engineering has contributed substantially to the synthesis of new materials, enhancement of existing ones, and the joining of dissimilar materials [2–4]. Composite materials and

*Corresponding author, e-mail: mertkilincel@duzce.edu.tr
DOI: 10.29109/gujsc.1625639

thermoplastics are among the most widely studied and preferred materials in industrial applications [5, 6]. Composite materials—particularly carbon fiber-reinforced composites—are extensively used in aerospace, automotive, and defense industries due to their high strength-to-weight ratio [7–10]. Thermoplastics, such as high-density polyethylene (HDPE), are favored in structural mass production and advanced engineering applications (e.g., Type-IV hydrogen tank liners) because of their high strength and thermal conductivity [11–14].

Hydrogen tanks, critical to hydrogen storage technology, are classified into five types. Type-I, II, and III tanks are traditionally manufactured from metal alloys (e.g., stainless steel, aluminum), offering high strength and durability for safe hydrogen storage [15–17]. In contrast, Type-IV and Type-V tanks employ non-metallic materials. Type-IV tanks, designed for high mechanical and thermal resilience, consist of carbon fiber-reinforced composite shells over polymer liners [18–20]. Type-V tanks, fully composite and not yet commercialized, promise safer, more efficient, and cost-effective hydrogen storage, supporting the transition to sustainable energy [18].

Type-IV tanks provide pressure resistance at lower weights than metal tanks due to their low-density structure [19], enabling higher hydrogen storage capacity per volume. They also offer advantages such as lower production costs, superior corrosion/oxidation resistance, high fatigue strength, and extended service life compared to Type-I/II/III tanks [20]. However, hydrogen's high diffusivity leads to blister formation at material interfaces, weakening structural integrity and increasing explosion risks during depressurization [21, 23]. Such damage poses significant safety concerns [24–26], making blister mitigation critical for industrial safety standards [27]. Uncontrolled progression of these damage mechanisms may induce buckling, leading to catastrophic failure [28–30]. Studies are underway to reinforce interfaces and reduce blistering through adhesive bonding [31–33].

Another challenge in Type-IV tanks is thermal stress accumulation during filling/emptying cycles, necessitating improved thermal conductivity in liner materials [34–36]. Research has thus focused on enhancing thermal conductivity in liner design and manufacturing [37–39].

Literature highlights efforts to strengthen interfacial bonds in Type-IV tanks, particularly between thermoset composites and thermoplastics (e.g., HDPE) [40, 41]. A key challenge is achieving strong adhesion, as thermosets form a cross-linked 3D network upon curing, while thermoplastics exhibit linear/branched polymer chains, hindering chemical bonding. Solutions include chemical modifications (oxidation, plasma treatment), adhesives, and mechanical surface treatments [42, 43]. Epoxy-based adhesives, with their reactive functional groups, promote chemical bonding between thermoplastics and thermosets [44, 45]. Mechanical surface treatments (e.g., grinding) enhance adhesion by increasing roughness and mechanical interlocking, eliminating the need for chemical bonding [46].

Surface roughness directly influences adhesive performance [47]. Optimal roughness improves mechanical interlocking and bond strength, but excessive roughness causes stress concentrations and weakens the interface [48]. Studies investigating abrasive grit sizes provide critical data for determining optimal roughness values [49].

This study examines the mechanical strength of epoxy-bonded joints between carbon fiber-reinforced composites and thermoplastics (HDPE), with controlled surface roughness achieved via varying grit sizes. The findings advance the mechanical performance of single-lap joints in Type-IV tanks, offering reliable bonding methods for industrial applications. These results serve as a valuable resource for researchers, engineers, and manufacturers in materials engineering.

2. MATERIALS AND METHODS (MATERYAL VE METOD)

In this study, which focuses on the bonding of cured CFRP and HDPE plates, the CFRP plates were manufactured using epoxy-matrix prepreg materials with a density of 500 gsm. Prior to production, the prepreg materials were stored in a deep freezer and were brought to room temperature for 2 hours after removal. Subsequently, they were laminated in layers and cured under vacuum in a PLC-controlled heating oven at a curing rate of 5°C/min until reaching a target temperature of 120°C, where they were maintained for 2 hours. This process resulted in 5 mm thick CFRP plates. All test specimens used in the bonding experiments were cut from the same plate. Following this, bonding and adhesion performance were

evaluated using two commercially available, proven structural adhesives (DP460 and DP190) and compared with a commonly used commercial epoxy set, specifically the Hexion brand MGS Lamination Epoxy System L285/H287.

Composite plates were cut into shapes and dimensions specified by the ASTM D568 standard using a CNC router, making them suitable for bonding. To enhance the adhesion strength (optimize surface roughness) of the surfaces where HDPE would be bonded with the carbon plate, a sanding process was applied. Sandpapers with grit sizes of 120, 180, and 240, which have been reported to yield the best results in improving adhesion strength, were used [47–49]. Finally, the surfaces were subjected to sandblasting and cleaned with thinner.

Table 1. Properties of DP190 and DP460 Adhesives (DP190 ve DP460 Yapıştırıcıların Özellikleri)

Adhesive Type	DP190	DP460
Cure Time	7 day	7 day
Shear Strength	55°C'de 24 MPa	55°C'de 31 MPa
Strain	%30	-
Tensile Strength	24.1317 MPa	-
Viscosity	150 Pa/sec	275 Pa/sec
Max. Operating Temperature	+24°C	+23°C

Each sample, measuring 25.4 x 101.6 mm, was bonded using pure epoxy and two different adhesives (DP190 and DP460) from the 3M Scotch-Weld brand. The schematic representation of the bonded specimens is shown in Figure 1.

In order to ensure balanced load transfer and minimize any potential misalignment or thickness-induced stress concentrations during tensile testing, the tab regions were prepared by bonding CFRP and HDPE plates of equal surface area on both ends of the specimens. This configuration was deliberately chosen prior to testing to eliminate the effects of possible thickness mismatches between the two materials. By using identical bonding dimensions and surface preparations, a symmetrical geometry was achieved, allowing both tab ends to contribute equally to the load transfer during mechanical testing. This hybrid tab design was also intended to prevent premature failure or damage at the tab interfaces, which is a critical factor in obtaining reliable test results.

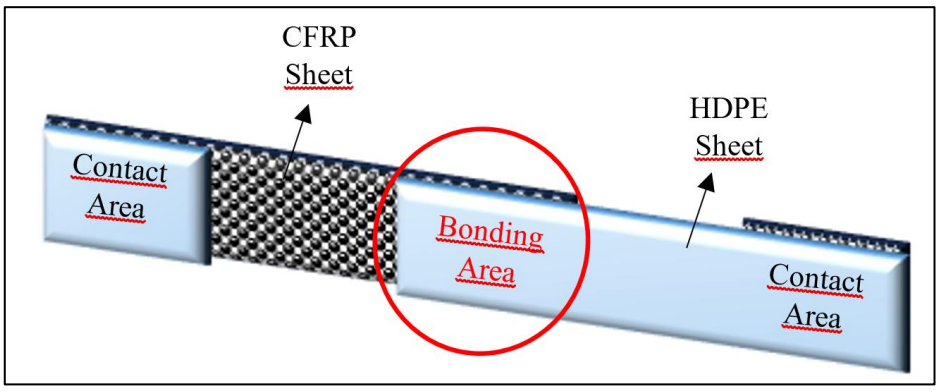


Figure 1. Single-Lap Joint Tensile Test Specimen. (Tek bindirmeli çekme testi numunesi)

The manufacturer states that DP190 and DP460 adhesives, whose technical specifications are given in Table 1., provide high strength by forming robust bonds in metal, plastic, and composite joints. These adhesives (particularly when surface preparation is applied) have also significantly improved bonding strength in HDPE joints [50].

To ensure consistent axial alignment during lap shear testing, particular attention was paid to the bonding stage of specimen preparation. All composite and HDPE plates were assembled on a flat reference surface, and a standardized alignment template was used to control the overlap length and maintain consistent positioning of the adherends. This manual alignment procedure was applied

uniformly across all specimens to minimize potential eccentricities and misalignments during subsequent mechanical testing. Although no specialized mechanical fixture was employed during the tensile tests, this careful assembly method provided a reliable and repeatable alignment across the test set. The adhesive bonding length in the joints was selected as 25.4 mm to prevent deformation from occurring in the lower layers. A universal tensile testing machine manufactured by UTEST was used to analyse the single-lap joints. The test specimens, as shown in Figure 2, were placed in the grips of the universal testing machine and subjected to tensile testing at a speed of 1.3 mm/min until failure. Tensile tests play a crucial role in evaluating the strength of single-lap joints.

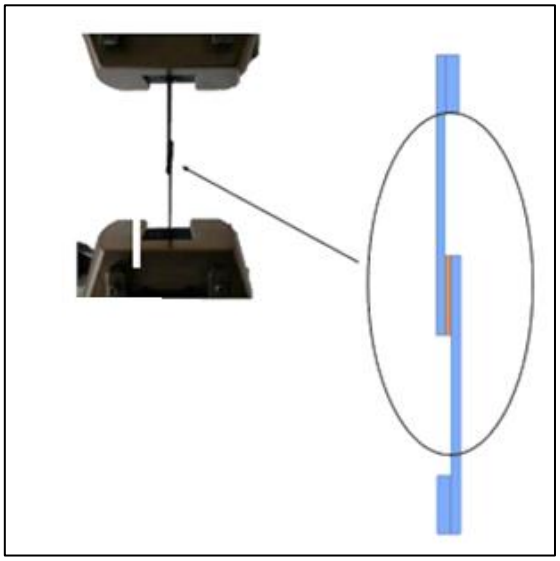


Figure 2. Schematic representation of the specimen during tensile testing (Çekme testi sırasında numunenin şematik gösterimi)

To prevent eccentric loading (reduce bending loads), the ends of the specimens were supported with additional parts to create gripping areas.

3. FINDINGS AND DISCUSSION (BULGULAR VE TARTIŞMA)

3.1. Mechanical Analysis Results (Mekanik Analiz Sonuçları)

This study evaluated how the bonding properties of composite structures vary depending on adhesive type and surface roughness. Five specimens were fabricated and tested for each sandpaper grit size. The obtained results were analyzed through graphical representation. A summary table of tensile test results is provided in Table 2.

Table 2. Tensile test data- summary table (Çekme testi verileri – özet tablo)

Sandpaper Grit Size	Shear Stress (MPa)		
	Epoxy	DP 190	DP 460
E-Un	2.1	2	1.2
120	3	25	1.9
180	2.5	13	2.1
240	12	12.8	1

For DP 190 adhesive, the standard deviation values calculated for E-Un, 120, 180, and 240 test coupons were 0.08, 0.01, 0.1, and 0.1 MPa, respectively. According to Figure 3., the use of 120-grit sandpaper on specimens bonded with DP190 provided the highest strength [51]. For specimens

bonded with DP190 without sanding, the shear stress was measured at approximately 2 MPa, with an elongation of 0.5%. This indicates that unsmoothed surfaces significantly limit bonding performance. In the DP190-120 specimen (sanded with 120-grit), the shear stress increased from 2 MPa to 25 MPa, while elongation rose from 0.5% to 2.3%, showing a significant improvement. This demonstrates that surface roughening with 120-grit sandpaper enhances both mechanical interlocking and bonding performance. Similarly, Kinloch's study emphasized that controlled surface roughness after sanding increases both strength and elongation capacity [52].

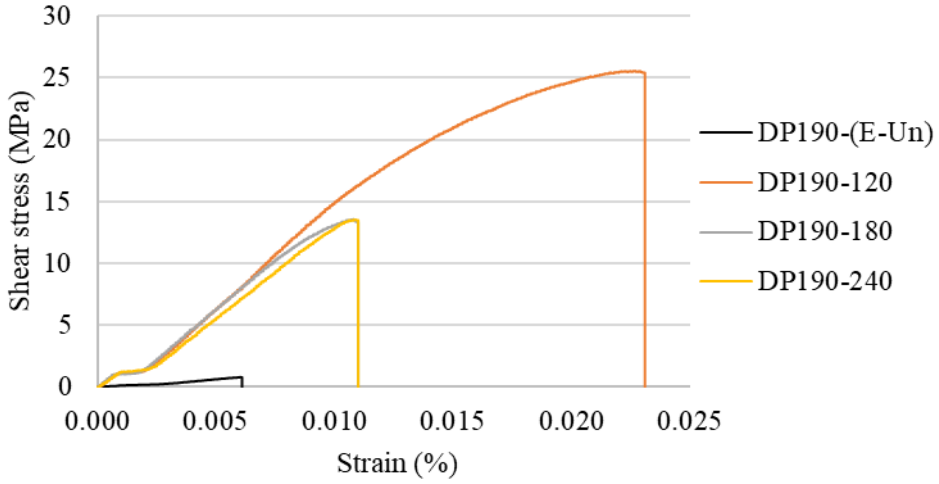


Figure 3. Shear stress-strain curve of the specimen bonded with DP190 and processed with different sandpaper grit sizes (Farklı zımpara numaralarıyla işlenmiş ve DP190 ile yapıştırılmış numunenin kesme gerilmesi-gerinim eğrisi.)

For DP 460 adhesive, the standard deviation values for E-Un, 120, 180, and 240 test specimens were determined as 0.02, 0.1, 0.1, and 0.1 MPa, respectively. Figure 4 shows that for the DP190-180 specimen (sanded with 180-grit), the shear stress increased to ~13 MPa compared to the unsanded specimen (E-Un), with elongation reaching 1.2%. However, the performance of 180-grit sandpaper was lower compared to 120-grit. The DP190-240 specimen (sanded with 240-grit) exhibited a similar curve to DP190-180.

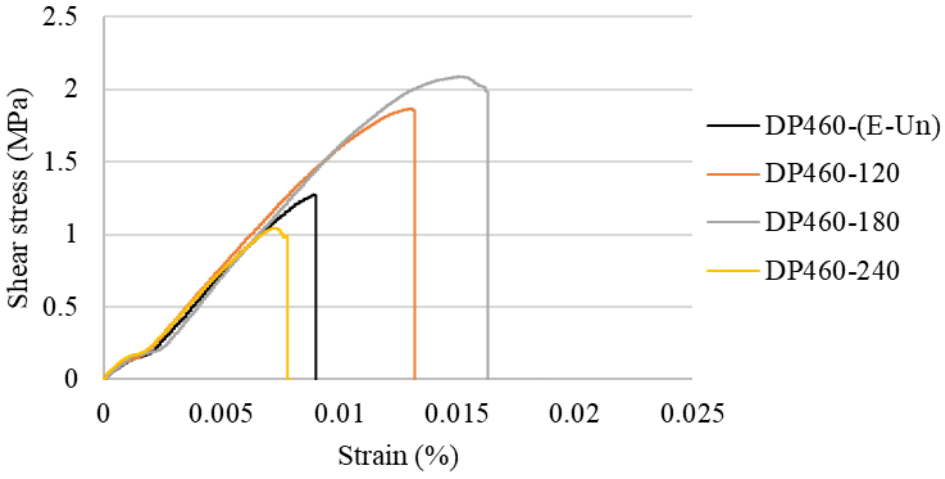


Figure 4. Shear Stress-Strain Curves of Specimens Bonded with DP460 (DP460 ile yapıştırılmış numunelere ait kesme gerilmesi-gerinim eğrileri)

The shear stress-strain curves of specimens bonded using DP460 adhesive are shown in Figure 4. According to the results, the DP460-(E-Un) specimen exhibited a shear stress of 1.2 MPa and an elongation of 0.8%. Compared to other specimens, the unsanded surface significantly limited bonding

performance, reducing mechanical interlocking and adhesion strength. When comparing the DP460-120 specimen to the unsanded specimen, the shear stress increased by approximately 58%, reaching 1.9 MPa, and the elongation rose by about 75% to 1.4%. The use of 120-grit sandpaper notably improved bonding strength by enhancing mechanical interlocking. The DP460-180 specimen demonstrated the best performance among the samples. Its shear stress increased by approximately 75% to 2.1 MPa, and elongation reached 1.6%. This improvement can be attributed to achieving optimal surface roughness, as expressed in ASTM D4541-17, allowing the adhesive to achieve maximum adhesion. In contrast, the DP460-240 specimen showed a decrease in shear stress of approximately 16%, dropping to 1.0 MPa, and a reduction in elongation of about 10%, reaching 0.7%. Accordingly, for DP 460 adhesive applications, it has been observed that surface preparation with excessively fine-grit abrasives fails to achieve adequate mechanical interlocking.

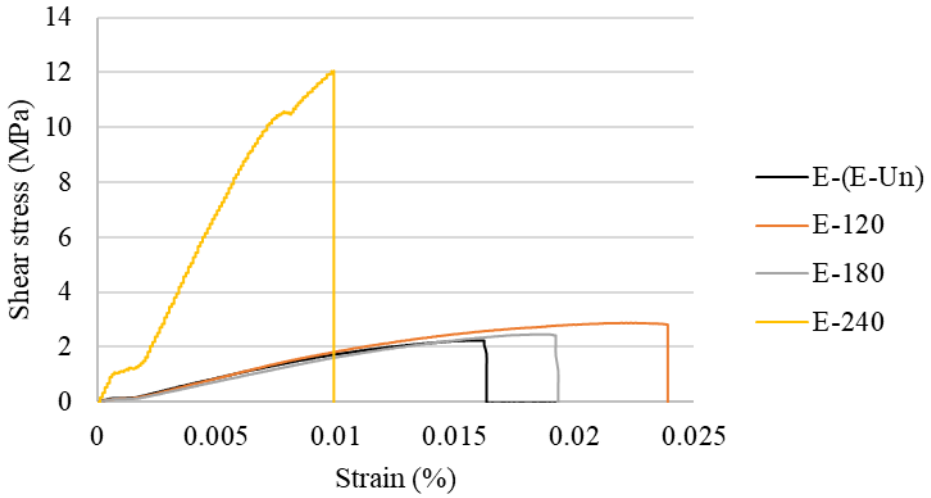


Figure 5. Shear Stress-Strain Curves of Specimens Bonded with Epoxy (Epoksi ile yapıştırılmış numunelere ait kesme gerilmesi-gerinim eğrileri).

For the epoxy adhesive, the standard deviation values for E-Un, 120, 180, and 240 test specimens were calculated as 0.03, 0.04, 0.08, and 0.04 MPa, respectively. The shear stress-strain graphs for specimens bonded with epoxy are presented in Figure 5. The specimen bonded without sanding exhibited a shear strength of ~2.1 MPa and an elongation of 1.6%, resulting in the lowest shear strength and limited elongation capacity. This indicates that epoxy bonding is significantly affected by surface preparation. For the specimen sanded with 120-grit sandpaper, the shear stress was ~3 MPa, and the elongation reached 2.4%. The controlled surface roughness provided a stronger adhesion capacity. The surface prepared with 180-grit sandpaper exhibited a shear stress of ~2.5 MPa and an elongation capacity of 1.9%, offering a balanced performance. The E-240 specimen, with finer surface roughness, showed both higher maximum stress (12 MPa) and shorter elongation (1%). This indicates that a finer surface roughness for the epoxy adhesive results in a structure with higher strength but lower elongation capacity. [53, 54].

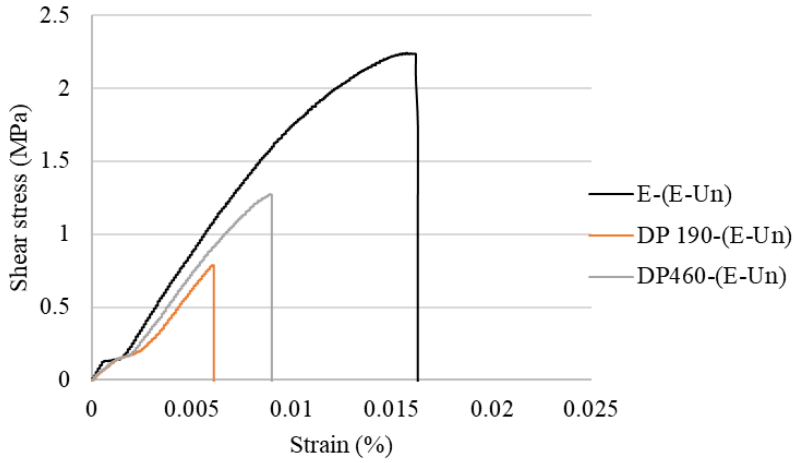


Figure 6. The Effect of Adhesive Type on Shear Stress (Yapıştırıcı türünün kesme gerilmesi üzerindeki etkisi).

As shown in Figure 6. the E-(E-Un) specimen (bonded with epoxy) exhibited the highest maximum shear stress (~2.3 MPa) and the greatest elongation capacity (1.6%). Consequently, the epoxy adhesive demonstrates superior shear stress and elongation characteristics compared to DP190 and DP460 adhesives, indicating its enhanced mechanical properties and high deformation capacity [55]. The DP190 adhesive exhibits the lowest maximum shear stress (~0.8 MPa) and elongation capacity (~0.5%), suggesting its suitability for low-strength applications. The DP460 adhesive shows intermediate performance between E-(E-Un) and DP190, with ~1.4 MPa shear stress and 0.8% elongation – representing a 75% higher shear strength and 60% greater elongation capacity than DP190. These results demonstrate DP460's applicability in medium-to-high strength applications. The findings align with material properties reported in literature for DP190 and DP460 [54].

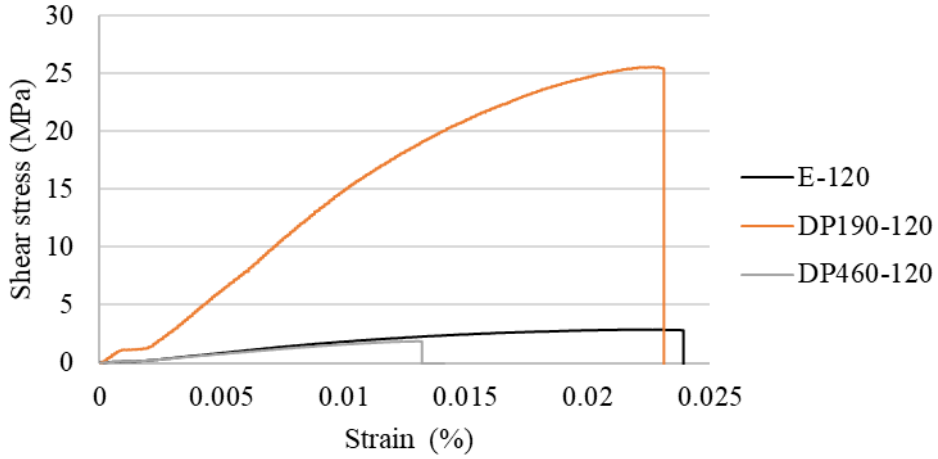


Figure 7. The Effect of Adhesive Type on Shear Stress in Specimens Processed with 120-Grit Sandpaper
(120 numara zımpara ile işlenmiş numunelerde yapıştırıcı türünün kesme gerilmesine etkisi) .

Figure 7. presents E-120 demonstrated a shear stress of ~3 MPa with ~2.4% elongation. While exhibiting lower shear stress compared to DP190-120, it outperformed DP460-120.

DP190 achieved the highest maximum shear stress (~25 MPa) and greatest elongation capacity (~2.2%), indicating its superior bonding performance and effective energy absorption capability on 120-grit abraded surfaces. It showed significantly better performance than both E-120 and DP460-120 in both shear stress and elongation. DP460 displayed the lowest maximum shear stress (~2 MPa) and elongation capacity (~1.3%), revealing its relatively weak performance on 120-grit surfaces. Compared to E-120, DP460 showed 33% lower shear stress and 45% reduced elongation capacity. DP190 generally exhibits higher elasticity and energy absorption capacity. DP460 provides greater rigidity but shows less sensitivity to surface

roughness variations [56] DP190-120 demonstrated optimal performance in both shear stress and elongation metrics, confirming its excellent surface compatibility when used with 120-grit abrasion treatment.

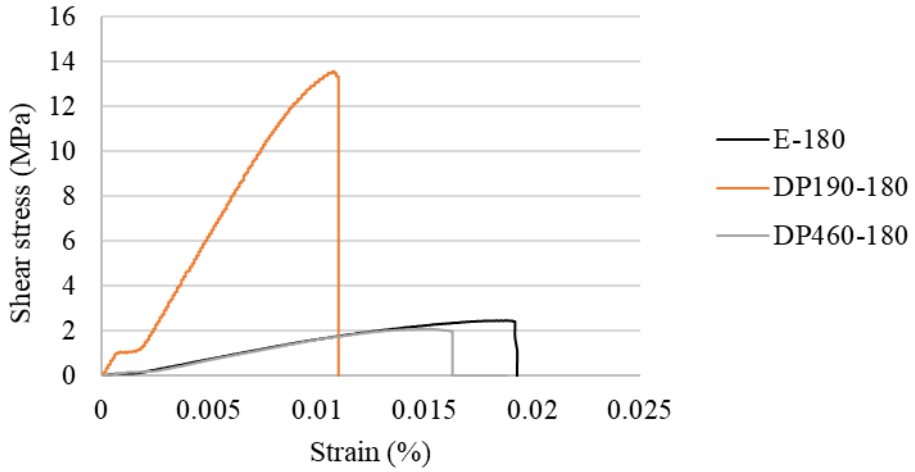


Figure 8. The Effect of Adhesive Type on Shear Stress in Specimens Processed with 180-Grit Sandpaper
(180 numara zımpara ile işlenmiş numunelerde yapıştırıcı türünün kesme gerilmesine etkisi).

Figure 8. presents the shear stress-elongation curves of test specimens prepared with 180-grit abrasion, showing adhesive performance effects. The epoxy-bonded specimen (E-180) initially exhibited gradual shear stress increase, reaching maximum values of approximately 2.5 MPa shear stress and 2% elongation. E-180 demonstrated approximately 100% greater deformation capacity compared to DP190. DP190 adhesive achieved the highest shear stress performance (~14 MPa), showing 460% greater strength than the epoxy adhesive at maximum shear stress. However, DP190 displayed limited deformation capacity, reaching maximum shear stress at only ~1.2% elongation. For DP460 adhesive, maximum values measured ~2 MPa shear stress and ~1.8% elongation - representing 20% lower shear stress and 10% reduced deformation capacity compared to E-180.

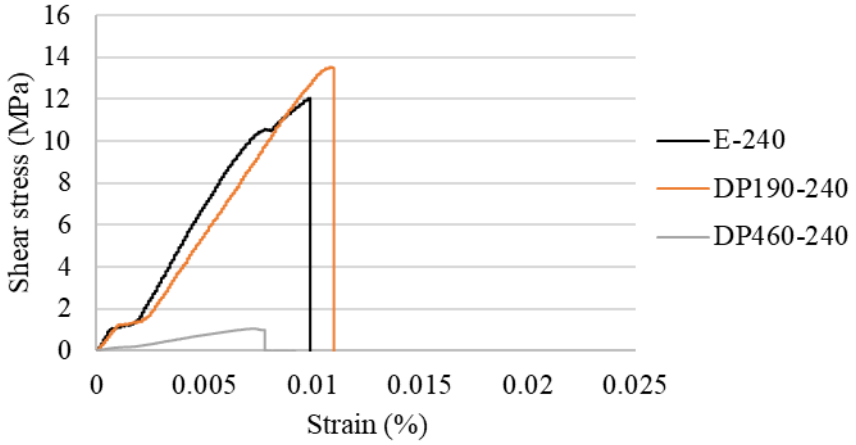


Figure 9. The Effect of Adhesive Type on Shear Stress in Specimens Processed with 240-Grit Sandpaper
(240 numara zımpara ile işlenmiş numunelerde yapıştırıcı türünün kesme gerilmesine etkisi) .

According to Figure 9., E-240 (epoxy adhesive) reached maximum shear stress of approximately 12 MPa with 1.1% elongation. Compared to E-180 (using 180-grit), E-240 showed a 380% increase in shear stress but a 45% reduction in elongation capacity. For DP190-240 adhesive, maximum shear stress measured 14 MPa with 1.2% elongation - showing no change in deformation capacity or

strength improvement versus 180-grit DP190. The DP460 adhesive demonstrated maximum shear stress of ~1 MPa and ~0.8% elongation capacity.

3.2. Fracture Surface Analysis (Kopma Yüzeyi Analizi)

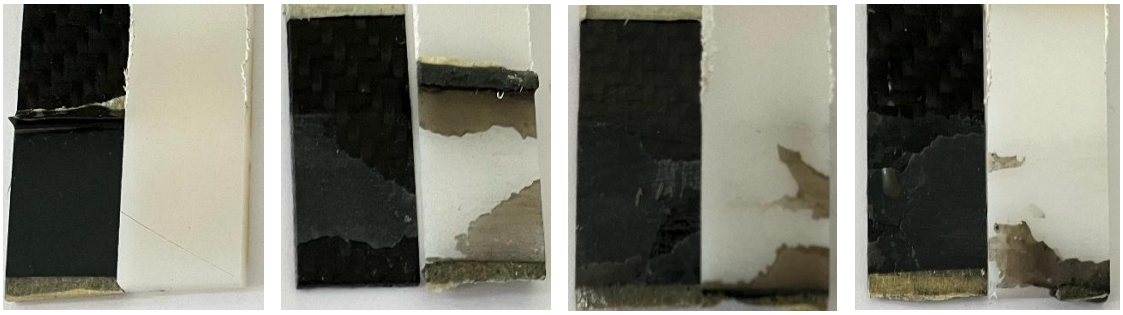
For comprehensive analysis of tensile test results, examination of failure modes at bonding interfaces is essential. In adhesive-bonded joints, failures are characterized as either adhesive or cohesive failure. Adhesive failure refers to separation at the adhesive/substrate interface, while cohesive failure indicates internal fracture within the adhesive material itself. Figures 10., 11., and 12. present visual documentation of fracture surfaces from tested specimens.



a) b) c) d)

Figure 10. Fracture surfaces of epoxy-bonded specimens (Epoksi ile yapıştırılmış numunelerin kopma yüzeyleri) .
a) E-Un, b) E-120, c) E-180, d) E-240

Figure 10. clearly demonstrates that the non-abraded specimen failed via adhesive failure. For E-120 and E-180 specimens, mixed adhesive/cohesive failure modes were observed. While E-240 specimens showed increased cohesive failure characteristics, the dominant failure mode remained adhesive. All epoxy-bonded specimens ultimately failed at the HDPE surface interface, indicating superior epoxy adhesion to the CFRP substrate.

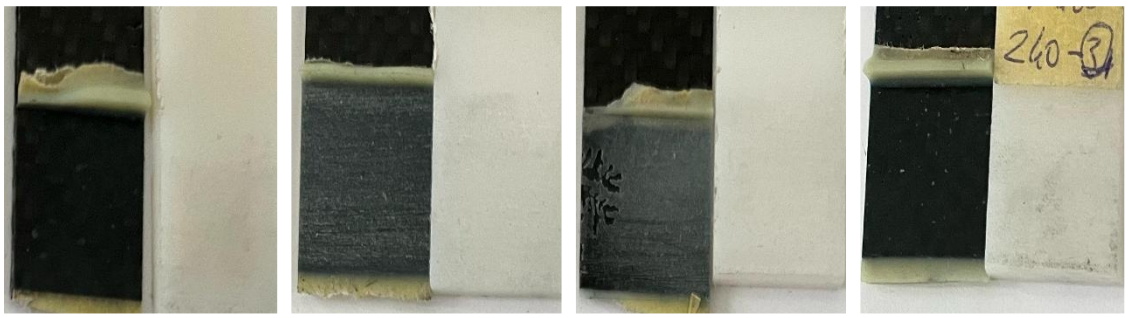


a) b) c) d)

Figure 11. Fracture surfaces of specimens bonded with DP-190 adhesive (DP-190 yapıştırıcısı ile birleştirilmiş numunelerin kırılma yüzeyleri) :

a) E-Un, b) E-120, c) E-180, d) E-240

As observed in Figure 11., the non-abraded specimen exhibited adhesive failure similar to the epoxy-bonded case, confirming DP 190's effective adhesion to CFRP surfaces. Visual analysis revealed optimal bonding performance in DP 190-180 specimens, while all abraded specimens demonstrated mixed adhesive/cohesive failure modes. Cohesive failure patterns were observed simultaneously on both CFRP and HDPE surfaces, indicating that surface abrasion enhances DP 190 adhesive's bonding performance with HDPE substrates.



a) b) c) d)

Figure 12. Fracture surfaces of specimens bonded with DP-460 adhesive (DP-460 yapıştırıcısı ile birleştirilmiş numunelerin kırılma yüzeyleri):

a) E-Un, b) E-120, c) E-180, d) E-240

Figure 12. demonstrates that in DP 460 adhesive joints, both non-abraded specimens and DP 460-240 specimens failed via adhesive failure, indicating DP 460's effective bonding with CFRP. However, DP 460-120 and DP 460-180 specimens exhibited mixed adhesive/cohesive failure modes, with cohesive failure becoming more pronounced in DP 460-180 specimens. Critically, all specimens ultimately failed at the HDPE interface, revealing DP 460's poor adhesion compatibility with HDPE substrates.

3.2. SEM Analysis Results (SEM Analiz Sonuçları)

In structures formed by bonding thermoset-based composite materials with HDPE, the significant causes of failure identified via SEM analysis during tensile testing are the blister effect and fiber-matrix separation [57]. Fiber-matrix separation is one of the primary mechanisms of fracture [58]. In SEM images related to this effect, the exposure of fibers and their detachment from the matrix material are notable. The bubbles observed in SEM (scanning electron microscope) images, known as 'blisters,' typically result from voids or gas accumulations within the material's internal structure [53]. This effect significantly reduces the material's strength. Blister formations generally arise from weaknesses at the adhesive interface, gas bubbles present in the adhesive, or incompatibility between materials [59].

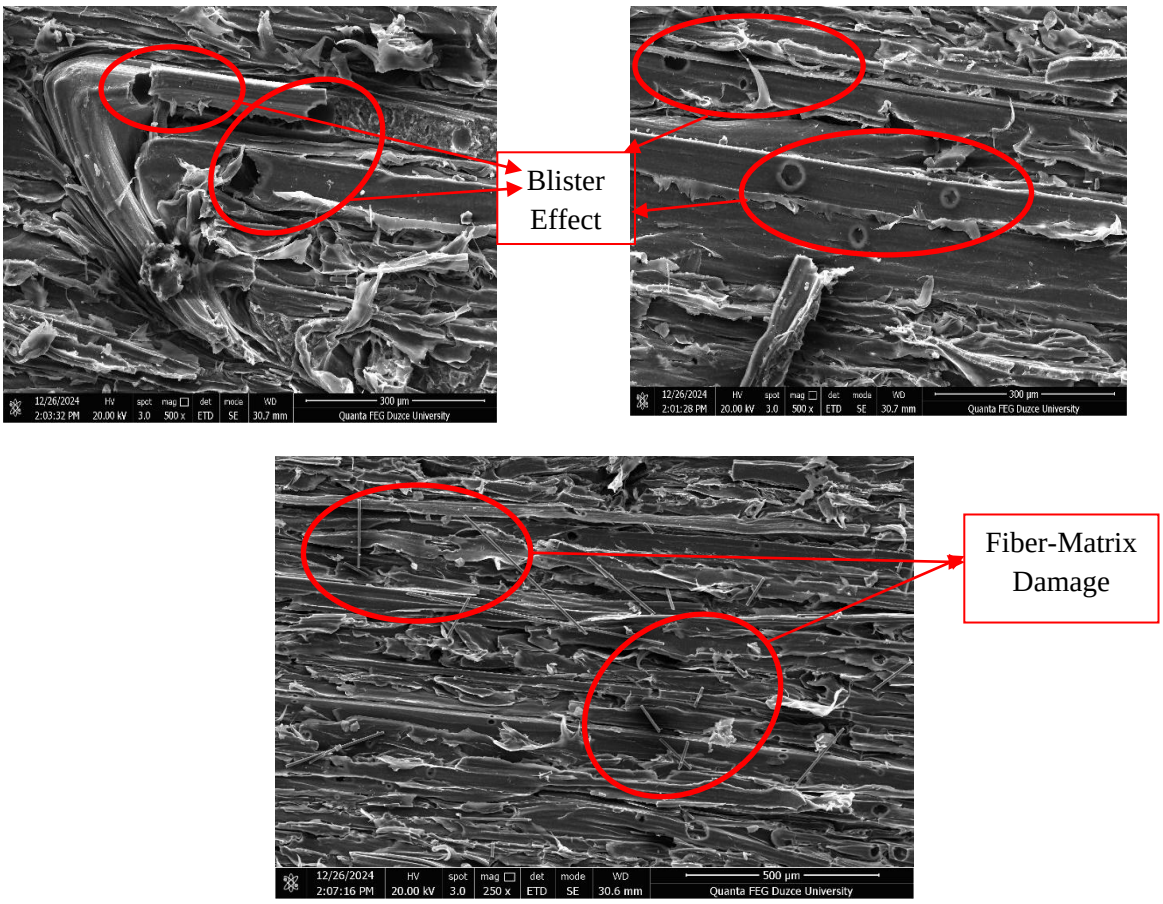
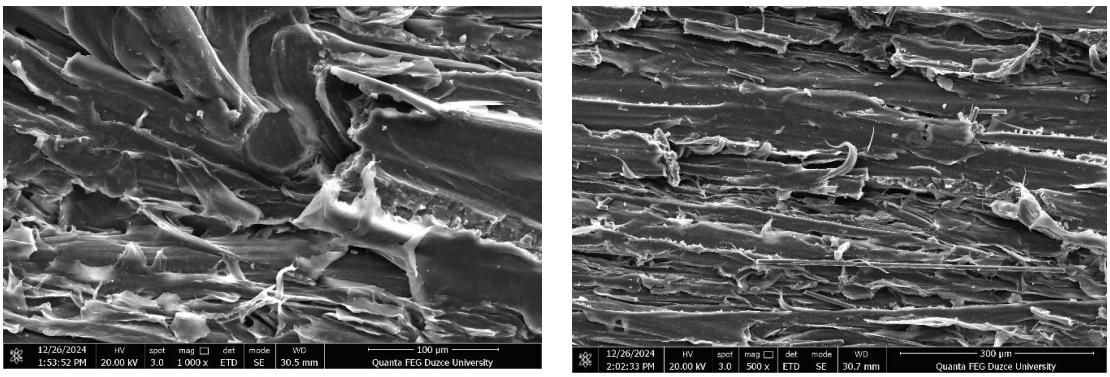


Figure 13. SEM Images of the specimen bonded with DP190 adhesive without surface preparation (Yüzey hazırlığı yapılmamış, DP190 yapıştırıcısı ile birleştirilmiş numuneye ait SEM görüntüleri).

When evaluating the data obtained from the mechanical tests, the highest shear stress results were achieved in the samples using DP190 adhesive with surface preparation. In the SEM images provided in Figure 13., blister bubbles and fiber-matrix damage in the bonded area, which contribute to this effect, are clearly visible.



a) b)

Figure 14. 100x and 300x zoomed SEM Images of the sample bonded with DP190 adhesive: a) Sample treated with 180-grit sandpaper, b) Sample treated with 240-grit sandpaper (DP190 yapıştırıcısı ile birleştirilmiş numuneye ait 100x ve 300x büyütülmüş SEM görüntüleri: a) 180 numara zımpara ile işlenmiş numune, b) 240 numara zımpara ile işlenmiş numune).

Although the shear stress shows a decrease with 180 and 240-grit sandpaper treatment compared to 120-grit, it still remains at a higher level than untreated surfaces. No blister effect was observed in the SEM images presented in Figure 14.

4.CONCLUSION (SONUÇLAR)

According to the results obtained from the study, it is observed that surface preparation directly affects the bonding performance of composite materials and that optimal sanding thicknesses may vary depending on the type of adhesive. To ensure optimal bonding properties, the selection of adhesive type and surface preparation should be carefully made based on application requirements. The detailed findings are as follows.

• For DP190 and DP460 adhesives, optimal performance was achieved at 120-grit and 180-grit sanding, respectively. For DP460, excessive surface roughness or unsanded surfaces negatively affect bond strength. In epoxy-bonded joints, 120-grit sanding provided the most balanced performance, while 240-grit sanding resulted in notably high shear stress.

• Across all adhesive types, the lowest performance was observed in unsanded specimens due to insufficient surface preparation.

• Epoxy can be used for HDPE-CFRP bonding, but it does not provide as high strength as DP 190.

• DP 190 demonstrated strong adhesion with CFRP and, with proper mechanical surface preparation, also bonded well with HDPE. Additionally, due to its flexible nature, it is expected to better accommodate the thermal behavior of HDPE.

• DP460 was not found suitable for HDPE-CFRP bonding. It should instead be preferred for stiffer structural applications (e.g., metal-CFRP) under light loads.

In the present study, the elongation values presented in the stress–strain graphs are expressed in percentage (%), and the initial version of the manuscript contained a unit error, which has been corrected. It is important to note that the measured elongation reflects the global deformation behavior of the bonded joints, including the adhesive and substrates. While no extensometer was used along the bondline, the displacement data were obtained from the universal testing machine via crosshead movement. Therefore, the elongation values represent an integrated response rather than the local strain at the adhesive interface. A separate tensile test for the unbonded composite substrates was not conducted within the scope of this study; however, the difference in elongation between adhesive types indirectly reflects their influence on joint flexibility and strain accommodation. In future studies, inclusion of reference data for the neat composites and localized strain measurement tools such as digital image correlation (DIC) or bondline extensometers would provide more detailed insights into adhesive behavior under shear loading.

ACKNOWLEDGMENTS (TEŞEKKÜR)

This paper was supported by the Duzce University Scientific Research Projects (DUBAP) under grant 2024.06.05.1466 project number and Kompozit Malzemelerde Yapıştırma Yöntemlerinin İncelenmesi Project name.

AUTHORS' CONTRIBUTIONS (YAZARLARIN KATKILARI)

***Emin Öztürk*:** He conducted the experiments, analyzed the results and performed the writing process.
Deneyleri yapmış, sonuçlarını analiz etmiş ve maklenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.
Mert Kılınçel: He analyzed the results.
Sonuçları analiz etti.
Gülden Kabakçı: She performed the writing process.
Yazım sürecini gerçekleştirdi.
Ahmet Kömürcü: 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]Fava RA. Polymers (1980). Part C, Physical Properties Methods of Experimental Physics ; V. 16. 1,554

[2] Nielsen LE. Models for the Permeability of Filled Polymer Systems. Journal of Macromolecular Science: Part A - Chemistry. 1967; 1(5):929–42.

[3] Cussler EL, Hughes SE, Ward WJ, Aris R. Barrier membranes. J Memb Sci. 1988; 38(2):161–74.

[4] Kim HM, Lee JK, Lee HS. Transparent and high gas barrier films based on poly(vinyl alcohol)/graphene oxide composites. Thin Solid Films. 2011; 519(22):7766–71.

[5] Sun L, Boo WJ, Clearfield A, Sue HJ, Pham HQ. Barrier properties of model epoxy nanocomposites. J Memb Sci. 2008; 318(1–2):129–36.

[6] Drozdov AD, Christiansen J de C. Micromechanical modeling of barrier properties of polymer nanocomposites. Compos Sci Technol. 2020; 189.

[7] Huang HD, Ren PG, Xu JZ, Xu L, Zhong GJ, Hsiao BS, et al. Improved barrier properties of poly(lactic acid) with randomly dispersed graphene oxide nanosheets. J Memb Sci. 2014; 464:110–8.

[8] Minelli M, Baschetti MG, Doghieri F. Analysis of modeling results for barrier properties in ordered nanocomposite systems. J Memb Sci. 2009; 327(1–2):208–15.

[9] Huang HD, Ren PG, Chen J, Zhang WQ, Ji X, Li ZM. High barrier graphene oxide nanosheet/poly(vinyl alcohol) nanocomposite films. J Memb Sci. 2012; 409–410:156–63.

[10] Govindaraj P, Sokolova A, Salim N, Juodkazis S, Fuss FK, Fox B, et al. Distribution states of graphene in polymer nanocomposites: A review. 2021: Vol. 226, Composites Part B: Engineering.

[11] Carrera MC, Erdmann E, Destéfanis HA. Barrier properties and structural study of nanocomposite of HDPE/montmorillonite modified with polyvinylalcohol. Journal of Chemistry.Vol. 2013; 1-7.

[12] Rueda F, Marquez A, Otegui JL, Frontini PM. Buckling collapse of HDPE liners: Experimental set-up and FEM simulations. Thin-Walled Structures. 2016; 109:103–12.

[13] Li X, Tabil LG, Oguocha IN, Panigrahi S. Thermal diffusivity, thermal conductivity, and specific heat of flax fiber-HDPE biocomposites at processing temperatures. Compos Sci Technol. 2008; 68(7–8):1753–8.

[14] Luo S, Fu J, Zhou Y, Yi C. The production of hydrogen-rich gas by catalytic pyrolysis of biomass using waste heat from blast-furnace slag. Renew Energy. 2017;101:1030–6.

[15] Warner M, Jeng T, Ayar S, Sekhar S, Marin D, Engler A, et al. Reduced graphene oxide catalytically enhances the rate of cyanate ester curing under variable frequency microwave heating. J Appl Polym Sci. 2023;140(21).

[16] Warner M, Jeng T, Ayar S, Sekhar S, Marin D, Engler A, et al. Reduced graphene oxide catalytically enhances the rate of cyanate ester curing under variable frequency microwave heating. J Appl Polym Sci. 2023;140(21).

[17] Ma Q, Rejab MRM, Azeem M, Hassan SA, Yang B, Kumar AP. Opportunities and challenges on composite pressure vessels (CPVs) from advanced filament winding machinery: A short communication. Int J Hydrogen Energy. 2024; 57:1364–72.

[18] Hu Z, Chen M, Pan B. Simulation and burst validation of 70 MPa type IV hydrogen storage vessel with dome reinforcement. Int J Hydrogen Energy. 2021;46(46):23779–94.

[19] Air A, Oromiehie E, Prusty BG. Design and manufacture of a Type V composite pressure vessel using automated fibre placement. Compos B Eng. 2023;266.

[20] Wang X, Tian M, Chen X, Xie P, Yang J, Chen J, et al. Advances on materials design and manufacture technology of plastic liner of type IV hydrogen storage vessel. Vol. 47, International Journal of Hydrogen Energy. Elsevier Ltd; 2022. p. 8382–408.

[21] Sharma P, Burolia AK, Adak NC, Daiya J, Sardar HH, Neogi S. Effect of tension on liner buckling and performance of a type-4 cylinder for storage of compressed gases with experimental validation. Thin-Walled Structures. 2023;189.

[22] Fang Q, Ji D. Molecular simulation of hydrogen permeation behavior in liner polymer materials of Type IV hydrogen storage vessels. Mater Today Commun. 2023;35.

[23] Condé-Wolter J, Ruf MG, Liebsch A, Lebelt T, Koch I, Drechsler K, et al. Hydrogen permeability of thermoplastic composites and liner systems for future mobility applications. Compos Part A Appl Sci Manuf. 2023;167.

[24] Condé-Wolter J, Ruf MG, Liebsch A, Lebelt T, Koch I, Drechsler K, et al. Hydrogen permeability of thermoplastic composites and liner systems for future mobility applications. Compos Part A Appl Sci Manuf. 2023;167.

[25] Hu Z, Chen M, Pan B. Simulation and burst validation of 70 MPa type IV hydrogen storage vessel with dome reinforcement. Int J Hydrogen Energy. 2021;46(46):23779–94.

[26] Sun Y, Lv H, Zhou W, Zhang C. Research on hydrogen permeability of polyamide 6 as the liner material for type IV hydrogen storage tank. Int J Hydrogen Energy. 2020;45(46):24980–90.

[27] Barthélémy H. Hydrogen storage - Industrial prospectives. Int J Hydrogen Energy. 2012;37(22):17364–72.

[28] Rueda F, Torres JP, Machado M, Frontini PM, Otegui JL. External pressure induced buckling

collapse of high density polyethylene (HDPE) liners: FEM modeling and predictions. Thin-Walled Structures. 2015;96:56–63.

[29] Rueda F, Otegui JL, Frontini P. Numerical tool to model collapse of polymeric liners in pipelines. Eng Fail Anal. 2012;20:25–34.

[30] Bo K, Feng H, Jiang Y, Deng G, Wang D, Zhang Y. Study of blister phenomena on polymer liner of type IV hydrogen storage cylinders. Int J Hydrogen Energy. 2024;54:922–36.

[31] Huang HD, Ren PG, Xu JZ, Xu L, Zhong GJ, Hsiao BS, et al. Improved barrier properties of poly(lactic acid) with randomly dispersed graphene oxide nanosheets. J Memb Sci. 2014;464:110–8.

[32] Bo K, Feng H, Jiang Y, Deng G, Wang D, Zhang Y. Study of blister phenomena on polymer liner of type IV hydrogen storage cylinders. Int J Hydrogen Energy. 2024;54:922–36.

[33] Blanc-Vannet P, Papin P, Weber M, Renault P, Pepin J, Lainé E, et al. Sample scale testing method to prevent collapse of plastic liners in composite pressure vessels. Int J Hydrogen Energy. 2019;8682–91.

[34] Mariscal G, Depcik C, Chao H, Wu G, Li X. Technical and economic feasibility of applying fuel cells as the power source of unmanned aerial vehicles. Energy Convers Manag. 2024;301.

[35] Liu M, Lin K, Zhou M, Wallwork A, Bissett MA, Young RJ, et al. Mechanism of gas barrier improvement of graphene/polypropylene nanocomposites for new-generation light-weight hydrogen storage. Compos Sci Technol [Internet]. 2024;110483.Availablefrom:https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0266353824000538

[36] Su Y, Lv H, Feng C, Zhang C. Hydrogen permeability of polyamide 6 as the liner material of Type IV hydrogen storage tanks: A molecular dynamics investigation. Int J Hydrogen Energy. 2024;50:1598–606.

[37] Sapre S, Pareek K, Vyas M. Investigation of structural stability of type IV compressed hydrogen storage tank during refueling of fuel cell vehicle. Energy Storage. 2020;2(4).

[38] Liu G, Zhang X, Yang Z, Wang L, Yang F, Wang R. Effects of interfaces and ordered microstructures on thermal properties of graphene flakes/polyethylene composites. Polym Compos. 2023;44(2):1371–80.

[39] Blanco-Aguilera R, Martinez-Agirre M, Berasategi J, Penalba M, Bou-Ali MM, Shevtsova V. Effect of liner thermal properties and liner pre-cooling on the thermal management of fast-filling of hydrogen tanks. Int J Hydrogen Energy. 2024;52:1159–72.

[40] Drozdov AD, Christiansen J de C. Micromechanical modeling of barrier properties of polymer nanocomposites. Compos Sci Technol. 2020;189.

[41] Balasooriya W, Clute C, Schrittesser B, Pinter G. A Review on Applicability, Limitations, and Improvements of Polymeric Materials in High-Pressure Hydrogen Gas Atmospheres. Vol. 62, Polymer Reviews. Taylor and Francis Ltd.; 2022. p. 175–209.

[42] K. Nemani et al., “Surface Modification: Surface Modification of Polymers: Methods and Applications (Adv. Mater. Interfaces 24/2018),” Adv. Mater. Interfaces, vol.5,2018, doi: 10.1002/admi.201870121.

[43] E. M. Liston, M. L., and M. R. and Wertheimer, “Plasma surface modification of polymers for improved adhesion: a critical review,” J. Adhes. Sci. Technol., vol. 7, no. 10, pp. 1091–1127, 1993, doi: 10.1163/156856193X00600.

[44] Pizzi, A., & Mittal, K.L. (Eds.). (2003). Handbook of Adhesive Technology, Revised and Expanded (2nd ed.). CRC Press. https://doi.org/10.1201/9780203912225

[45] E. M. Petrie, Epoxy Adhesive Formulations. in McGraw Hill professional. McGraw Hill LLC, 2005; [Online]. Available: https://books.google.com.tr/books?id=738MPfO5FEkC

[46] A. J. Kinloch, Adhesion and adhesives: science and technology. Springer Science & Business Media, 1987;

[47] Yudhanto, Arief & Alfano, Marco & Lubineau, Gilles. Surface preparation strategies in secondary bonded thermoset-based composite materials: A review. Composites Part A Applied Science and Manufacturing. 2021; 147. 106443. 10.1016/j.compositesa.2021.106443.

[48] Nasiry Khanlar L, Revilla-León M, Barmak AB, Ikeda M, Alsandi Q, Tagami J, Zandinejad A. Surface roughness and shear bond strength to composite resin of additively manufactured interim restorative material with different printing orientations. J Prosthet Dent. 2023 May;129(5):788-795. doi: 10.1016/j.prosdent.2021.08.010. Epub 2021 Oct 1. PMID: 34602276.

[49] Budhe, S., Ghumatkar, A., Birajdar, N. et al. Effect of surface roughness using different adherend materials on the adhesive bond strength.

Appl Adhes Sci 3, 20 2015; https://doi.org/10.1186/s40563-015-0050-4.

[50] S. Saha, D. Kocaefe, Y. Boluk, V. Mshvildadze, J. Legault, and A. Pichette, "Boreal forest conifer extracts: potential natural additives for acrylic polyurethane coatings for the protection of heat-treated jack pine," J. Coatings Technol. Res., vol. 10, no. 1, pp. 109–122, 2013, doi: 10.1007/s11998-012-9435-5.

[51] M., Rawat, P., Sai, L., Behera, R. P., Singh, K. K., & Zhu, D. (2021). Shear performance of MWCNTs modified single-lap joints of glass/epoxy laminates . Journal of Adhesion Science and Technology, 36(22), 2418–2437. https://doi.org/10.1080/01694243.2021.2011825.

[52] Kinloch, A.J. (1987) Adhesion and Adhesives: Science and Technology. Chapman and Hall, London. http://dx.doi.org/10.1007/978-94-015-7764-9

[53] Naito, K., Hirakata, H., & Fuj, T. (1997). Effect of surface treatment for steel adherends on static and fatigue crack growth of epoxy adhesives. Composite Interfaces, 5(4), 345–361. https://doi.org/10.1163/156855498X00126..

[54] Dadian, A., Rahnama, S., & Zolfaghari, A. (2020). Experimental study of the CTBN effect on mechanical properties and mode I and II fracture toughness of a new epoxy resin. Journal of Adhesion Science and Technology, 34(22), 2389–2404. https://doi.org/10.1080/01694243.2020.1763540

[55] Kabakçı, G., Kılınçel, M. & Tezel, G.B. Nanofiller Effects on the Isothermal Curing Kinetics of Epoxy Resin. Theor Found Chem Eng 2023; 57,1490–1502. https://doi.org/10.1134/S004057952306009X.

[56] R. Sahin, S. Akpinar. The effects of adherend thickness on the fatigue strength of adhesively bonded single-lap joints, International Journal of Adhesion and Adhesives, 107, 2021. https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2021.102845.

[57] Hernandez, D. A., Soufen, C. A., & Orlandi, M. O. (2017). Carbon fiber reinforced polymer and epoxy adhesive tensile test failure analysis using scanning electron microscopy. Materials Research, 20(4), 951-961.

[58] L. Scott Chumbley, Larry D. Hanke, Scanning Electron Microscopy for Failure Analysis, Failure Analysis and Prevention, Vol 11, 2021 ed., ASM Handbook, Edited By Brett A. Miller, Roch J. Shipley, Ronald J. Parrington, Daniel P. Dennies, ASM International, 2021; p 240–250, https://doi.org/10.31399/asm.hb.v11.a0006769

[59] Kobayashi, M., Ishikawa, T. and Takahara, A. (2013). Adhesion and Tribological Characteristics of Ion-Containing Polymer Brushes Prepared by Controlled Radical Polymerization. In Polymer Adhesion, Friction, and Lubrication, H. Zeng (Ed.). https://doi.org/10.1002/9781118505175.ch2

Gazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Dergisi
PART C: TASARIM VE TEKNOLOJİ

Gazi University
Journal of Science
PART C: DESIGN AND TECHNOLOGY

GU J Sci, Part C, 13(2): 553-566 (2025)

Comparison of GUM and Monte Carlo Methods in Uncertainty Analysis of Airflow Measurement Systems

M. Saim SOYSAL[1], Hacı Mehmet ŞAHİN[1]*

[1] Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği, Ankara, Turkey*

Article Info

Research article
Received: 12/02/2025
Revision: 25/03/2025
Accepted: 26/03/2025

Keywords

Measurement Uncertainty
Nonlinear Measurement Systems
Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM)
Monte Carlo Simulation
Validation

Makale Bilgisi

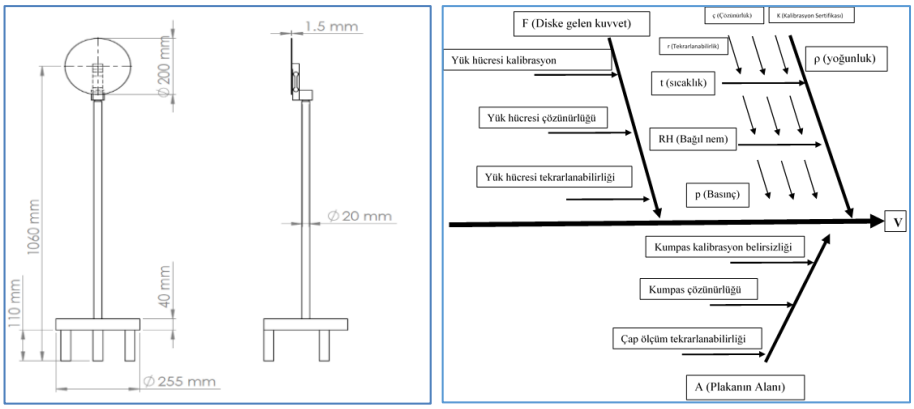
Araştırma makalesi
Başvuru: 12/02/2025
Düzeltme: 25/03/2025
Kabul: 26/03/2025

Anahtar Kelimeler

Ölçüm Belirsizliği
Doğrulsal Olmayan Ölçüm Sistemleri
Ölçüm Belirsizliğinin Hesaplanması Kılavuzu (GUM)
Monte Carlo Simulasyonu
Doğrulama

Grafik Özet (Graphical/Tabular Abstract)

Bu çalışma, doğrusal olmayan bir hava hızı ve akış ölçüm sisteminin ölçüm belirsizliğini hem GUM yöntemi hem de Monte Carlo simülasyonu ile değerlendirmiştir. Sonuçlar, özellikle 10,805 m/s hızda önemli farklılıklar göstermiştir. Bulgular, doğrusal olmayan sistemlerde güvenilir belirsizlik analizinde Monte Carlo doğrulamasının gerekliliğini vurgulamaktadır. / This study evaluates measurement uncertainty of a nonlinear air velocity and flow measurement system using both the GUM method and Monte Carlo simulation. Results show significant discrepancies, especially at 10.805 m/s. Findings highlight the necessity of Monte Carlo validation for reliable uncertainty analysis in nonlinear measurement systems.



Şekil A: *Algılayıcının boyutları ve şematik görünümü, Hava hızının hesaplanmasında balık kılçığı diyagramı* ***Figure A****: Dimensions and schematic view of the sensor, Fishbone Diagram in the Calculation of Air Velocity*

Önemli noktalar (Highlights)

- *Doğrusal olmayan sistemin ölçüm belirsizliği hem GUM hem de Monte Carlo yöntemleri ile değerlendirildi./ Measurement uncertainty of nonlinear system was evaluated using both GUM and Monte Carlo methods.*
- *Özellikle 10,805 m/s hızda GUM ve Monte Carlo sonuçları arasında önemli farklılıklar gözlendi./ Significant discrepancies were observed between GUM and Monte Carlo results, especially at 10.805 m/s velocity.*
- *Doğrusal olmayan ölçüm sistemlerinde GUM yöntemlerinin geçerliliğini sağlamak üzere Monte Carlo simülasyonu gereklidir./ Monte Carlo simulation is necessary to ensure the validity of GUM methods in nonlinear measurement system.*

Amaç (Aim): *Doğrusal olmayan ölçüm sistemlerinin belirsizliğini GUM ve Monte Carlo yöntemleri ile değerlendirmek. / To evaluate measurement uncertainty in nonlinear systems using GUM and Monte Carlo methods.*

Özgünlük (Originality): *Anemometre gibi güçlü doğrusal olmayan sistemlerin incelenmesi/ Study of Highly Nonlinear Systems like Anemometers*

Bulgular (Results): *GUM ve Monte Carlo sonuçları arasında özellikle yüksek hızlarda belirgin farklılıklar vardır. / There are significant differences between GUM and Monte Carlo results, especially at higher velocities.*

Sonuç (Conclusion): *Monte Carlo simülasyonu, doğrusal olmayan ölçüm sistemlerinde GUM yönteminin doğrulanması için gereklidir. / Monte Carlo simulation is essential to validate the GUM method in nonlinear measurement systems.*

*Corresponding author, e-mail: mesahin@gazi.edu.tr
DOI: 10.29109/gujsc.1638740

GU J Sci, Part C, 13(2): 553-566 (2025)

Gazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Dergisi
PART C: TASARIM VE TEKNOLOJİ

Gazi University
Journal of Science
PART C: DESIGN AND TECHNOLOGY

http://dergipark.gov.tr/gujsc

Hava Akış Ölçüm Sistemi Belirsizliğinde GUM ve Monte Carlo Yöntemlerinin Karşılaştırılması

M. Saim SOYSAL[1], *Hacı Mehmet ŞAHİN*[1]*

[1]*Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği, Ankara, Turkey*

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 12/02/2025
Düzeltme: 25/03/2025
Kabul: 26/03/2025

Anahtar Kelimeler

Ölçüm Belirsizliği
Doğrulsal Olmayan Ölçüm Sistemleri
Ölçüm Belirsizliğinin Hesaplanması Kılavuzu (GUM)
Monte Carlo Simulasyonu
Doğrulama

Öz

Ölçüm belirsizliği ve ölçüm hatası, güvenilir ölçüm sonuçları için en önemli parametrelerdir. Özellikle doğrusal olmayan karakteristiklere sahip yeni ölçüm sistemlerinin geleneksel sistemlerle karşılaştırılması için ölçüm belirsizliği önemli hale gelmektedir. Bu çalışmada, doğrusal olmayan karakteristiklere sahip yeni bir hava hızı ve akış ölçüm sisteminin ölçüm belirsizliği hem *Guide to the Expression of the Uncertainty in Measurement* (GUM) hem de Monte Carlo simülasyonu ile hesaplanmıştır. GUM sonuçları Monte Carlo simülasyon sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Standart belirsizlik yaklaşık 1 m/s hız seviyesi ile 20 m/s hız seviyesi arasındaki altı hız seviyesi için hesaplanmıştır. Monte Carlo simülasyonundan elde edilen *d_low*, *d_high* değerlerinin δ değerinin 10,805 m/s hız seviyesinde 100 katından fazla diğer hız seviyelerinde ise 10 katı seviyelerinde olduğu görüldüğünden sonuçlar, GUM'a göre iki anlamlı basamak için GUM yöntemlerini doğrulamanın imkânsız olduğunu göstermiştir. Çalışma ayrıca, doğrusal olmayan özelliklere sahip bu tür ölçüm sistemlerinde, daha güvenilir ve tutarlı sonuçlar için GUM yöntemini geçerli kılmak amacıyla Monte Carlo simülasyonunun göz önünde bulundurulması gerektiğini göstermiştir.

Comparison of GUM and Monte Carlo Methods in Uncertainty Analysis of Airflow Measurement Systems

Article Info

Research article
Received: 12/02/2025
Revision: 25/03/2025
Accepted: 26/03/2025

Keywords

Measurement Uncertainty
Nonlinear Measurement Systems
Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM)
Monte Carlo Simulation
Validation

Abstract

Measurement uncertainty and measurement error are among the most critical parameters for obtaining reliable measurement results. Measurement uncertainty becomes particularly significant when comparing novel measurement systems exhibiting nonlinear characteristics with traditional systems. In this study, the measurement uncertainty of a newly developed air velocity and flow measurement system with nonlinear characteristics was evaluated using both the *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement* (GUM) method and Monte Carlo simulation. The results obtained from the GUM approach were compared with those derived from the Monte Carlo simulation. Standard uncertainties were calculated for six velocity levels ranging from approximately 1 m/s to 20 m/s. It was observed that the interval bounds d_{low} and d_{high} obtained from the Monte Carlo simulations exceeded the corresponding GUM uncertainty value (δ) by more than 100 times at the velocity level of 10.805 m/s, and by about 10 times at other velocity levels. These findings demonstrate that, based on GUM methodology, it is not feasible to validate the results even to two significant digits. The study further highlights that, for measurement systems with nonlinear characteristics, Monte Carlo simulation should be considered essential in order to ensure more reliable and consistent results, and to validate the applicability of the GUM method.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Ölçüm belirsizliği, ölçüm sonuçlarının doğruluğunu ifade etmek ve güvenilirliğini değerlendirmek açısından önemli bir parametredir. Yeni geliştirilen algılayıcıların diğer algılayıcılarla karşılaştırılabilir olup olmadığını belirlemek, bu algılayıcıların hata veya sapma değerlerinin yanı sıra, kullanılan ölçüm sisteminin sonuçları hangi belirsizlikle ürettiğini tespit etmeyi gerektirir. Ölçüm belirsizliğini hesaplanmasında farklı yöntemler kullanılmaktadır. Bu yöntemler arasında, ISO/BIPM/OIML/IUPAC

*Corresponding author, e-mail: mesahin@gazi.edu.tr
DOI: 10.29109/gujsc.1638740

gibi uluslararası kuruluşlar tarafından hazırlanan JCGM 100 "Guide to the Expression of the Uncertainty in Measurement" (GUM) rehberi, kavramsal ve metodolojik açıdan sistematik bir şekilde geliştirilmiş önemli bir doküman olarak öne çıkmaktadır [1]. Bu rehbere, JCGM 100:2008 numarasıyla ya da ISO/IEC Guide 98-3:2008 numarasıyla ulaşılabilmektedir [2]. 2010 yılında küçük bir revizyon geçiren bu doküman, halen ücretsiz erişime açık olup geçerliliğini korumaktadır. GUM rehberi, ölçüm belirsizliğinin sistematik bir şekilde değerlendirilmesi noktasında önemli bir rol oynamış olsa da, doğrusal olmayan ölçümlerde bazı eksiklikler içermektedir.

GUM yaklaşımı, belirsizliklerin yayılım kuralına dayalı olarak hesaplama yapılmasını gerektirir, ancak bu hesaplama belirli kabullere dayanır ve bu kabuller her durumda geçerli olmayabilir. Modelin doğrusal olmayan bir ilişkiyi ifade etmesi durumunda, Taylor serisi genişlemesinin yalnızca birinci dereceden terimlerle kesilmesi, hata yayılmasını düzeltememektedir. Genişletilmiş belirsizlik hesaplamaları için normalite varsayımının düzeltilmesi mümkün olmayabilir. Welch-Satterthwaite formülüyle etkin serbestlik derecelerinin hesaplanması ise hâlâ çözülmemiş bir problemdir. Ayrıca, girdilerin biri veya daha fazlası diğerlerinden çok daha büyük olduğunda veya girdilerin dağılımları simetrik olmadığında GUM yaklaşımı geçerli olmayabilir [3].

Bu kısıtlamaları aşmak için yeni yöntemler geliştirilmiş olup, bunların başında JCGM 101:2008 dokümanında belirtilen ve Monte Carlo benzetimine dayanan yöntem gelmektedir [4]. Yukarıda belirtilen kısıtlamaların mevcut olduğu durumlarda, Monte Carlo benzetimi kullanılarak ve JCGM 101:2008 dokümanında tanımlanan yöntemle yapılan hesaplamalar, daha doğru sonuçlar elde edilmesini sağlamaktadır.

Monte Carlo metodu, dört farklı senaryo çerçevesinde tanımlanmış olup, özellikle GUM'un çözmekte zorlandığı durumlar için tercih edilmesi önerilmiştir [3]. EURACHEM Rehberlerinde yer alan iki örnek ve kütle kalibrasyonundaki doğrusal olmayan karakterdeki ölçümler için Monte Carlo simülasyonu uygulanmıştır [5]. Ayrıca, yakıt hücrelerinin verimliliklerine dair ölçüm belirsizliği hesaplamaları da Monte Carlo yöntemiyle gerçekleştirilmiştir [6]. Başka bir çalışmada, bir platin direnç termometresinin kalibrasyonundaki ölçüm belirsizliği değerlendirilmiş ve GUM ve Monte Carlo benzetiminin sınırlamalarını aşmak için bir genetik algoritma önerilmiştir [7]. Koordinat ölçümü belirsizliğinin değerlendirilmesi için Monte Carlo yöntemi uygulanmış ve tasarlanmıştır [8].

Her iki metodun karşılaştırılması birçok çalışmada ele alınmıştır. Bu karşılaştırmalar sonucunda, Monte Carlo yönteminin, özellikle doğrusal olmayan modellerde daha üstün sonuçlar sunduğu tespit edilmiştir [5]. Su içinde kadmiyum ölçümü için grafit fırınlı atomik absorpsiyon spektrometrisi kullanılarak ölçüm belirsizliğini değerlendirmek için iki yöntem karşılaştırılmış ve bu iki yöntem arasındaki temel farkın kalibrasyon denkleminden kaynaklandığı bulunmuştur. [9]. Diğer bir çalışmada ise, elektromanyetik uyumluluk testlerinde metotların anlamlı seviyede farklılaşmadığı ortaya konulmuştur [10]. Bir diğer araştırmada, yeni geliştirilen terleme ölçüm sisteminin ölçüm belirsizliği değerlendirilmiş ve aralarındaki farkların 2 ondalık basamağa metotlar arasında önemsiz olduğu belirlenmiştir [11]. Başka bir çalışmada Brewer MKIII spektroradyometresi ile Spektral ultraviyole (UV) ışınımı ölçümlerinin belirsizlik değerlendirmesi UV tarama verilerine göre GUM, UT ve Monte Carlo Simülasyonu ile elde edilen birleşik standart belirsizlikler arasındaki spektral oranların değerlendirilmesi, üç metodoloji arasındaki uyumun tatmin edici olduğunu göstermiştir. [12] Bir tank proverinin hacminin gravimetrik yöntem kullanılarak yapılan kalibrasyonunun doğrusal olmayan matematiksel bir modeli geliştirilmiştir. Ölçüm belirsizliği GUM ve Monte Carlo simülasyonu kullanılarak değerlendirilmiştir. Genel olarak, GUM yönteminin belirsizliğin baskın kaynağının dikdörtgen dağılımlı olması, belirsizlik bütçesinde büyük bir belirsizlik bileşeninin bulunması ve ölçülen modelin doğrusal olmaması ve ölçülen olasılık dağılımının normal olmaması sebeplerinden bir veya daha fazla koşul nedeniyle Monte Carlo simülasyonu tarafından doğrulanamadığı tespit edilmiştir. [13] Rüzgâr hızı ölçümünün belirsizlik değerlendirmesine üç yaygın olarak kullanılan belirsizlik değerlendirme yöntemini (geleneksel GUM yöntemi, korelasyonlu GUM yöntemi ve MCM yöntemi) uygulamış ve farklı yöntemlerin performansını analiz edilmiştir. Monte Carlo simülasyonu yönteminin, doğruluk ve kullanılabilirlik açısından yüksek gereksinimler olduğunda öncelikli olarak tercih edilmesi gerektiği belirtilmiştir. [14] Tartma yöntemi kullanarak kantitatif proverin kalibrasyonunun ölçüm belirsizliği değerlendirmesi, GUM ve Monte Carlo yöntemleri kullanılarak geliştirilmiştir. Çalışmada, GUM yaklaşımının, kompakt prover kalibrasyonunun ölçüm belirsizliğinin hesaplanmasında Monte Carlo yöntemiyle doğrulandığını göstermektedir. [15]

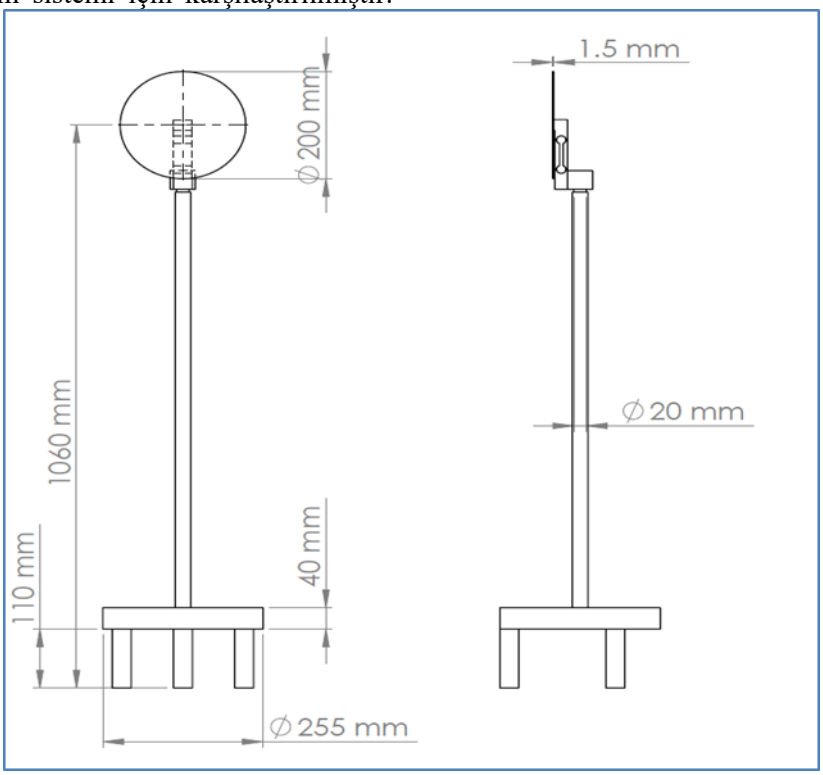
Özetle, doğrusal olmayan model fonksiyonlarına sahip ölçüm sistemleri için GUM yöntemi ile Monte Carlo yöntemini karşılaştırmanın nedeni, belirsizlik yayılımını ele alma konusundaki farklı yaklaşımlarında yatmaktadır. GUM yöntemi doğrusal yaklaşımlara dayanır, bu da güçlü doğrusal olmayan durumlarla uğraşırken hatalara yol açabilir ve karmaşık sistemler için daha az doğru olmasını sağlar. Buna karşılık, Monte Carlo yöntemi doğrusallaştırmaya ihtiyaç duymadan doğrusal olmayan sistemleri doğrudan simüle edebilir ve sistemin tüm karmaşıklığını hesaba katarak daha kesin belirsizlik tahminleri sunar. GUM yöntemi hesaplama açısından daha basittir ve hafif doğrusal olmayan sistemler için iyi sonuç verirken, Monte Carlo yöntemi yüksek doğrusal olmayan sistemler için daha doğru ve ayrıntılı bir belirsizlik analizi sağlar ancak hesaplama çabasının artırır. Bu yöntemlerin karşılaştırılması, doğrusal olmama derecesine, belirsizlik karmaşıklığına ve mevcut hesaplama kaynaklarına dayalı olarak en uygun yaklaşımın belirlenmesine yardımcı olur.

Bu çalışmada, diğer çalışmalardan da görüleceği üzere önemli farklılıklara sahip olması ihtimali bulunması nedeniyle GUM ve Monte Carlo simülasyon sonuçları, akredite bir rüzgâr tünelinden elde edilen ölçüm değerleriyle doğrulanan bir hava hızı ve akış ölçüm sistemi için karşılaştırılmıştır. Her bir faktör için belirsizlik kaynakları her iki yöntemle de tahmin edilmiştir. Monte Carlo metodu ve GUM sonuçları karşılaştırılmış ve GUM sonuçlarının Monte Carlo metodu ile geçerli kılma çalışması yapılmıştır. Bu çalışma, doğrusal olmayan sistemler için GUM ve Monte Carlo simülasyon yöntemlerinin sonuçlarının karşılaştırılabilirliğini ortaya koymuş ve araştırmacılara yol göstermiştir. Bu çalışmada belirsizlik modellerinin tekrarlanabilirlik parametreleri rüzgâr tüneli ölçümlerinden elde edilmiştir.

2. MATERYAL VE METOD (MATERIALS AND METHODS)

2.1. Deneysel Ekipman (Experimental Equipment)

Hava hızı ve akış ölçüm sistemi yük hücresi, veri toplama kartı ve dengeleyici blok ve konumlandırma çubuğu gibi yardımcı ekipmanlardan oluşmuştur. Veri toplama için Arduino UNO R3 modülü kullanılmıştır. Bu çalışmada ölçüm belirsizliği hesaplamasında rüzgâr tüneli data logger verileri dikkate alınmıştır. Algılayıcı ve ölçüm bölgesine genel bakış Şekil 1'de gösterilmiştir. Şekil 1'de gösterildiği gibi, yük hücresi dairesel diske monte edilmiştir. Yük hücresi dairesel diske uygulanan kuvveti ölçmektedir.



Şekil 1. Algılayıcının boyutları ve şematik görünümü (Dimensions and schematic view of the sensor)

2.2. Ölçüm Belirsizliği Modelleri (Measurement Uncertainty Models)

Algılayıcı için kritik husus, dairesel disklerin belirli Reynolds sayısı aralığı için sürükleme katsayısının sabit olmasıdır. Model fonksiyon Eş. 1'de ifade edilmiştir.

$$V = 1{,}022 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot F}{\rho \cdot C_D \cdot A}} - 0{,}0946 \ \left(\frac{m}{s}\right) \quad (1)$$

Bu ölçüm sistemi için yukarıda belirtildiği gibi temel varsayım sürükleme katsayısının (CD) sabitliğidir. Algılayıcının tasarlanan çalışma aralığı için dairesel diskin sürükleme katsayısının sabitliği hesaplamalı yöntemler ile doğrulanmış ve literatürle uyumlu olan 1.2 olarak elde edilmiştir [12]. Diske etki eden dik kuvvet yük hücresi ile ölçülmüştür. Havanın yoğunluğu (ρ) Eş. 2'ye göre ölçülebilir, ancak rüzgâr tüneli tesisinde çevresel durum izleme cihazının verileri kullanılmıştır. En doğru hava yoğunluğu denklemi CIPM (1981/91) denklemidir [17,18]. Ancak bu çalışma için çok ayrıntılıdır, Eş. 2'de verilen yaklaşık formülü kullanmak daha uygundur. [19].

$$\rho_a = \frac{0{,}34848 \cdot p - 0{,}009 \cdot (hr) \cdot \exp(0{,}061 \cdot t)}{273{,}15 + t} \quad (2)$$

ρ_a= hava yoğunlupu, *p*: basınç (mbar / hPa), *hr*: Bağıl nem, *t*: sıcaklık (°C.)

Diğer tüm hesaplamalarda hassasiyeti kaybetmemek için tam değerler yuvarlama yapılmadan kullanılmıştır. Matematiksel işlemlerde anlamlı sayılar kuralı uygulanmıştır.

2.3. GUM Ölçüm Belirsizliği (GUM Measurement Uncertainty)

GUM yöntemi temel olarak belirsizlik bileşenlerini, değerlendirme yöntemlerine göre A ve B tipi olmak üzere iki kategoride sınıflandırır. A tipi belirsizlik, ölçülen büyüklüğün değerinin istatistiksel analizi ile elde edilir ve ayrıca gözlenen bir frekans dağılımından türetilen bir olasılık yoğunluk fonksiyonundan elde edilir. B tipi belirsizlik, A tipi belirsizlik dışındaki diğer bilgilerle değerlendirilir ve varsayılan bir olasılık yoğunluk fonksiyonundan elde edilir. Birleşik belirsizliği Eş. 3'e göre hesaplanır.

$$u_c^2(V) = \sum_{i=1}^{N} \left(\frac{\partial V}{\partial x_i}\right)^2 \cdot u^2(x_i) \quad (3)$$

$\frac{\partial V}{\partial x_i}$ hassasiyet katsayısı (c_i) ve $u_c^2(V)$ ise birleşik ölçüm belirsizliğidir.

Sistemin model fonksiyonu olan Eş. 1'e Eş. 3'ü tam olarak uygulayabilmek ve tüm ölçüm belirsizliği bileşenlerini detaylı bir şekilde gözlemleyebilmek amacıyla, bu çalışmada kullanılan sistemin balık kılçığı diyagramı Şekil 2'de sunulmuştur.

Yukarıda belirtildiği gibi, bu algılayıcı için temel husus CD'nin sabitliğidir, dairesel disklerin sürükleme katsayısının girdap akımları başladığında ve Reynolds sayısı 1 000'den yüksek olduğunda, Reynolds sayısından bağımsız olduğu ve sabit olduğu gözlemlenmiştir, bu da CD'nin değişmediği ve CD'yi bir belirsizlik bileşeni olarak dikkate almaya gerek olmadığı anlamına gelir [16].

Bu çalışmada, hız seviyelerine karşılık gelen tüm Reynolds Sayıları 1 000'den yüksek olduğu için CD bir belirsizlik kaynağı olarak dahil edilmemiştir (Min Re=11 813 > 1 000). Tekrarlanabilirlik testleri Türk Akreditasyon Kurumu tarafından akredite edilen Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü Rüzgar Tüneli Kalibrasyon Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Tüm testler 23 ± 10 C° , 920 hPa ± 5 hPa ve %50 ± 30 bağıl nem aralığında gerçekleştirilmiştir. Hava yoğunluğunun 900 hPa < p < 1100 hPa, 10 °C < t < 30 °C ve RH < %80 aralığındaki belirsizliği bağıldır ve $2 \cdot 10^{-4} \cdot \rho$'dir [19]. Hava yoğunluğu ölçüm belirsizliği bileşeni buna göre hesaplanmıştır.

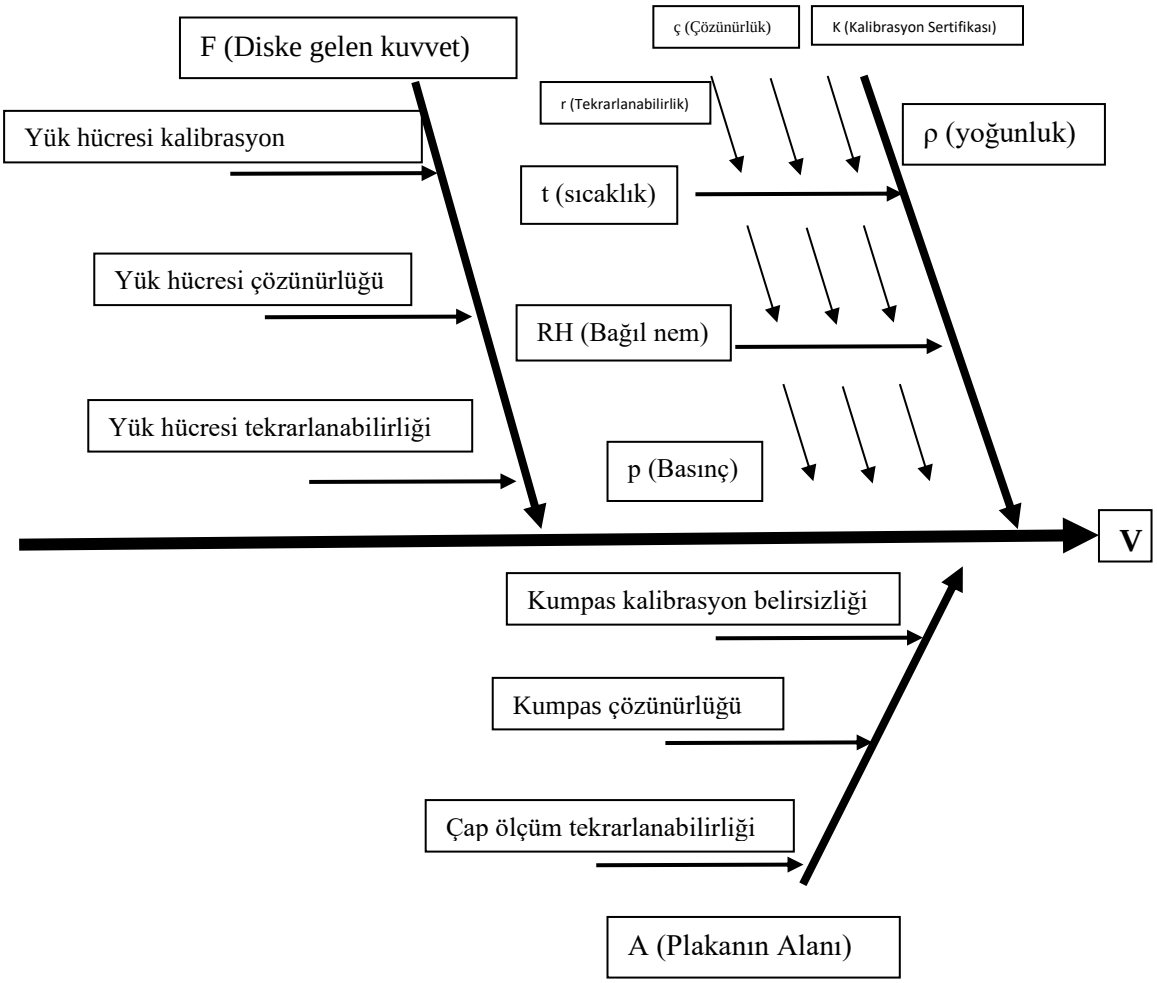
$$u_c^2(V) = \left(\frac{\partial V}{\partial \rho}\right)^2 \cdot u^2(\rho) + \left(\frac{\partial V}{\partial F}\right)^2 \cdot u^2(F) + \left(\frac{\partial V}{\partial A}\right)^2 \cdot u^2(A) \quad (4)$$

2.3.1 Hava yoğunluğu belirsizlik bileşeni (Uncertainty contribution from air density)

Çalışmanın yapıldığı laboratuvarın çevre şartlarında hava yoğunluğunun belirsizliği bağıldır ve $2 \cdot 10^{-4} \cdot \rho$'dir [19]. Bu çalışma çerçevesinde gerçekleştirilen ölçümlerde, çevresel koşulların bu aralıkların içinde kalması sebebiyle hava yoğunluğunun belirsizliği, bağıl olarak $2 \cdot 10^{-4} \cdot \rho$ şeklinde kabul edilmiştir.

Hava yoğunluğunun belirsizlik bileşenine ait hassasiyet katsayısı, Eş. 5 ile hesaplanmıştır.

$$\frac{\partial V}{\partial \rho} = -0{,}511 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot F}{\rho^3 \cdot C_D \cdot A}} \quad (5)$$



Şekil 2. Hava hızının hesaplanmasında balık kılçığı diyagramı (Fishbone Diagram in the Calculation of Air Velocity)

2.3.2 Kuvvet belirsizlik bileşeni (Uncertainty contribution from force)

Ölçüm sisteminde kuvvet yük hücresi ile ölçülmekte ve model fonksiyona göre hız değeri hesaplanmaktadır. Kuvvet ölçümünden gelen ölçüm belirsizliği bileşeni sistemin ölçüm belirsizliği bütçesinde önemli bir girdidir. Yük hücresinin belirsizlik bileşenleri, kalibrasyon sertifikasından (s), tekrarlanabilirlikten (r) ve çözünürlükten (ç) oluşmaktadır. Bileşenler doğrusal ilişkili oldukları için hassasiyet katsayılarının 1 olduğu dikkate alındığında, bu üç bileşen için Eş. 6 elde edilmiştir.

$$u^2(F) = u^2(r) + u^2(ç) + u^2(s) \quad (6)$$

Tekrarlanabilirlik ölçüm belirsizliği

Tekrarlanabilirlikten kaynaklanan belirsizlik katkısının hesaplanabilmesi için, belirlenen her hızda yük hücresiyle 59 kuvvet ölçümü yapılmıştır. Bu ölçümlerden kaynaklanan belirsizlik değeri, Eş. 7 ile hesaplanmıştır [1]. Tekrarlanabilirlik kaynaklı belirsizlik katkısının karesi, ortalamanın varyansı ile hesaplanmaktadır. Tekrarlanabilirlik kaynaklı belirsizlik bileşeni normal dağılım olarak kabul edilmiştir. Serbestlik derecesi ise 58 olarak belirlenmiştir.

$$u^2(r) = s^2(\bar{F}) = s^2(F_k)/59 \quad (7)$$

$\bar{F}$: 59 okumanın ortalama değeri

Kalibrasyon sertifikası ölçüm belirsizliği

Kullanılan yük hücresi 1. Sınıf Zemic L6D-C3-0.4B marka ve modeldedir. Kalibrasyon sertifikasında ölçüm belirsizliği değeri tam çalışma aralığında %0,16 olarak belirtilmiştir. Belirsizlik değeri Eş. 8 ile hesaplanmıştır. Belirsizliğin normal dağılımda ve serbestlik derecesinin ise sonsuz olduğu belirlenmiştir.

$$u(c) = \bar{F} \cdot 0{,}0016 \quad (8)$$

Çözünürlük ölçüm belirsizliği

Kuvvet ölçümü, iki ondalık basamağa kadar yapılmıştır. Bu durumda kuvvet ölçümündeki çözünürlük kaynaklı belirsizlik Eş. 9 ile hesaplanır.

Çözünürlük kaynaklı belirsizlik dikdörtgen dağılımlıdır ve serbestlik derecesi ise sonsuzdur.

$$u(re) = 0{,}005/\sqrt{3} \quad (9)$$

Kuvvet ölçümü kaynaklı ölçüm belirsizliği katkısının hassasiyet katsayısı Eş.10 ile hesaplanır.

$$\frac{\partial V}{\partial F} = 0{,}511 \cdot \sqrt{\frac{2}{F \cdot \rho \cdot C_D \cdot A}} \quad (10)$$

2.3.3 Alan belirsizlik bileşeni (Uncertainty Contribution from Area Measurement)

Model fonksiyondaki alan, sadece çap ölçümünden kaynaklanan belirsizliğe sahiptir ve bu ölçüm için de tekrarlanabilirlikten (r), çözünürlükten (ç) ve kalibrasyon sertifikasından (s) gelen belirsizlik katkıları bulunmaktadır. Alandan kaynaklanan belirsizlik, D diskin çap değerini ifade etmek üzere Eş. 11 ile hesaplanmaktadır.

$$u_c^2(A) = \left(\frac{\partial A}{\partial D}\right)^2 \cdot u^2(D) \quad (11)$$

Hassasiyet katsayısı Eş. 12 ile;

$$\frac{\partial A}{\partial D} = \frac{\pi \cdot D}{2} \quad (12)$$

Ölçüm belirsizliği değeri Eş. 13 ile hesaplanır;

$$u^2(D) = u^2(r) + u^2(ç) + u^2(s) \quad (13)$$

Tekrarlanabilirlik ölçüm belirsizliği

Çapın değeri, 15 derece merkezi açı aralıklarıyla ölçülmüş ve ortalaması hesaplamaya dahil edilmiştir. Ölçümlerden gelen belirsizlik katkısı Eş. 14 ile hesaplanmıştır [1]. Tekrarlanabilirlik kaynaklı belirsizlik katkısının karesi, ortalamanın varyansı ile hesaplanmaktadır. Tekrarlanabilirlik kaynaklı belirsizlik bileşeni, normal dağılımdadır ve serbestlik derecesi 11 olarak belirlenmiştir.

$$u^2(r) = s^2(\bar{D}) = s^2(D_k)/12 \quad (14)$$

Kalibrasyon sertifikası ölçüm belirsizliği

Ölçümlerde kullanılan SHOWA marka kumpasın kalibrasyon sertifikasında çalışma aralığının tamamı için belirsiz değeri mutlak 0.03 mm olarak belirtilmiştir. Sertifikadan gelen belirsizliğin dağılımı normal dağılımdır ve serbestlik derecesi sonsuzdur.

$$u(s) = 0{,}03\ mm$$

Çözünürlük ölçüm belirsizliği

Kumpasla yapılan çap ölçümleri 2 ondalık basamaklı olarak elde edilmiştir. Buna göre çözünürlük kaynaklı belirsizlik değeri Eş.15 ile hesaplanır. Çözünürlük kaynaklı belirsizlik dikdörtgen dağılıma sahiptir ve serbestlik derecesi sonsuzdur.

$$u(re) = 0{,}000005/\sqrt{3} \quad (15)$$

Alan kaynaklı belirsizlik bileşeninin hassasiyet katsayısı Eş.16 ile hesaplanmıştır.

$$\frac{\partial V}{\partial A} = -0{,}511 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot F}{\rho \cdot C_D \cdot A^3}} \quad (16)$$

Hava hızının ölçüm belirsizliği yukarıdaki denklem ve değerlendirmelere göre hesaplanmıştır. Hesaplamalar 0,915 m/s, 3,124 m/s, 5,359 m/s, 10,805 m/s, 16,174 m/s ve 20,964 m/s olmak üzere 6 hız seviyesi için yapılmıştır. Tablo 1'de 0,915 m/s için detaylı hesaplamalar, Tablo 2'de ise tüm hız değerleri için birleştirilmiş standart belirsizlik değerleri verilmiştir. Belirsizlik bileşenlerinin farklı serbestlik derecelerine sahip olması nedeniyle, etkin serbestlik derecesi Welch-Satterthwaite denklemi göre Eş. 17 ile hesaplanmıştır [3]. Monte Carlo simülasyon sonuçları, sonuçların dağılımının normal dağılıma uyduğunu göstermektedir.

Hesaplamalara tam değerler üzerinden devam edilmekle birlikte tablolardaki değerler üçüncü ondalık haneye yuvarlanarak verilmiştir.

$$\vartheta_{eff} = \frac{u_V^4}{\Sigma_1^N \frac{u_{x_i}^4}{\vartheta_{x_i}}} \quad (17)$$

Tablo 1. 0,915 m/s hız değerinde birleşik ölçüm belirsizliği kaynakları, bileşenleri ve katkıları (Sources, Components, and Contributions of the Combined Measurement Uncertainty at a Velocity of 0.915 m/s)

Belirsizlik Bileşeni	Hassasiyet Katsayısı $(c_i = \partial V/\partial x_i)$	Standart Belirsizlik $(u(x_i))$	Belirsizlik Katkısı $(u_i(V) = \lvert c_i \rvert u(x_i))$	Dağılım
Kuvvet (N)	25,232	0,003	0,073	Normal
Hava Yoğunluğu (kg/m^3)	0,463	0,0002	0,0001	Dikdörtgen
Alan (m^2)	16,095	0,004	0,067	Normal
$u_c(V)$ Birleşik Ölçüm Belirsizliği (m/s)			0,099	Normal

Tablo 2. Tüm hız değerleri için birleşik standart belirsizlik değerleri (Combined Standard Uncertainty Values for All Velocity Levels)

Hava Hızı (m/s)	$u_c(V)$ Birleşik Ölçüm Belirsizliği (m/s)	Bağıl Belirsizlik %
0,915	0,099	10,88
3,124	0,215	6,89
5,359	0,362	6,77
10,805	0,724	6,7
16,174	1,079	6,68
20,964	1,398	6,67

2.4. Monte Carlo Metoduna Göre Ölçüm Belirsizliği (Measurement Uncertainty Based on the Monte Carlo Method)

Monte Carlo yöntemi ile ölçüm belirsizliği hesaplaması üç ana aşamada gerçekleştirilir [4].

- İlk olarak, formülasyon oluşturulur. Bu aşamada, çıktı değeri hesaplanır (V), girdi değerleri belirlenir (Xi), model fonksiyon oluşturulur (V(F,A,ρ)) ve belirsizlik dağılımları tanımlanır (Normal, dikdörtgen vs.).
- İkinci aşamada, model fonksiyon kullanılarak hız değeri girdiler üzerinden hesaplanır.
- Son olarak, sonuçlar değerlendirilir. Bu aşamada, hız (V) değerlerinin standart sapması ve standart ölçüm belirsizliği belirlenir ve belirli bir olasılıkla hız (V) değerini içeren kapsama aralığı hesaplanır.

Formülasyonun oluşturulması adımındaki girdiler için GUM metodunda elde edilen veriler kullanılmıştır.

Monte Carlo metodunda ilave olarak kaç denemenin gerekli olduğunu belirleyen M faktörünün hesaplanması gerekmektedir. *M*, kapsam aralığına göre Eş. 18'den hesaplanır [4].

$$M = \frac{1}{1-p} \cdot 10^4 \quad (18)$$

Kapsam aralığının *p* % 95 olması durumunda M değeri 200 000 olarak hesaplanır. Bu nedenle deneme sayısı 200.000 denemeden az olmamalıdır. 0,915 m/s hava hızı için belirsizliğin bileşenleri Tablo 3'te verilmiştir. İlk 10 deneme sonuçları 0,915 m/s tahmini hava hızı için Tablo 4'te verilmiştir.

Tablo 3. Monte Carlo metodunda 0.915 m/s için girdiler ve dağılımları (Input Quantities and Their Probability Distributions at 0.915 m/s in the Monte Carlo Method)

Belirsizlik Bileşenleri	Beklenen Değer (X_i)	Standard Belirsizlik Değeri $(u(x_i))$	Dağılım
Kuvvet (N)	0,02	0,003	Normal
Yoğunluk (kg/m^3)	1,09	0,0002	Dikdörtgen
Çap (m)	0,199	0,013	Normal

Kuvvet(F), yoğunluk(ρ) ve çap(D) hesaplamaları için Excel formülleri Eş. 19, Eş. 20 ve Eş. 21'de verilmiştir. Hesaplamalar Microsoft Excel programı ile gerçekleştirilmiştir.

F=NORMINV(RAND(), Beklenen Değer (X_i), Standart Belirsizlik ($u(x_i)$)) (19)

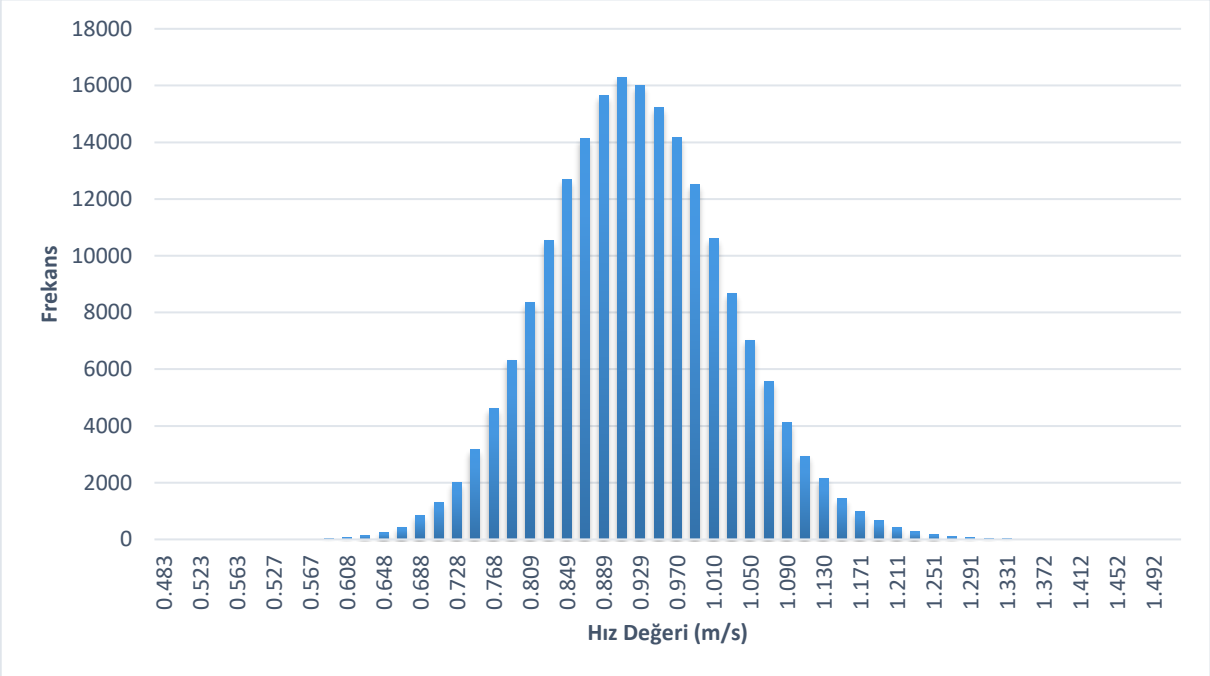
D=NORMINV(RAND(), Beklenen Değer (X_i), Standart Belirsizlik ($u(x_i)$)) (20)

ρ =(Beklenen Değer (X_i) - Standart Belirsizlik ($u(x_i)$) + $u(x_i)$*RAND()) (21)

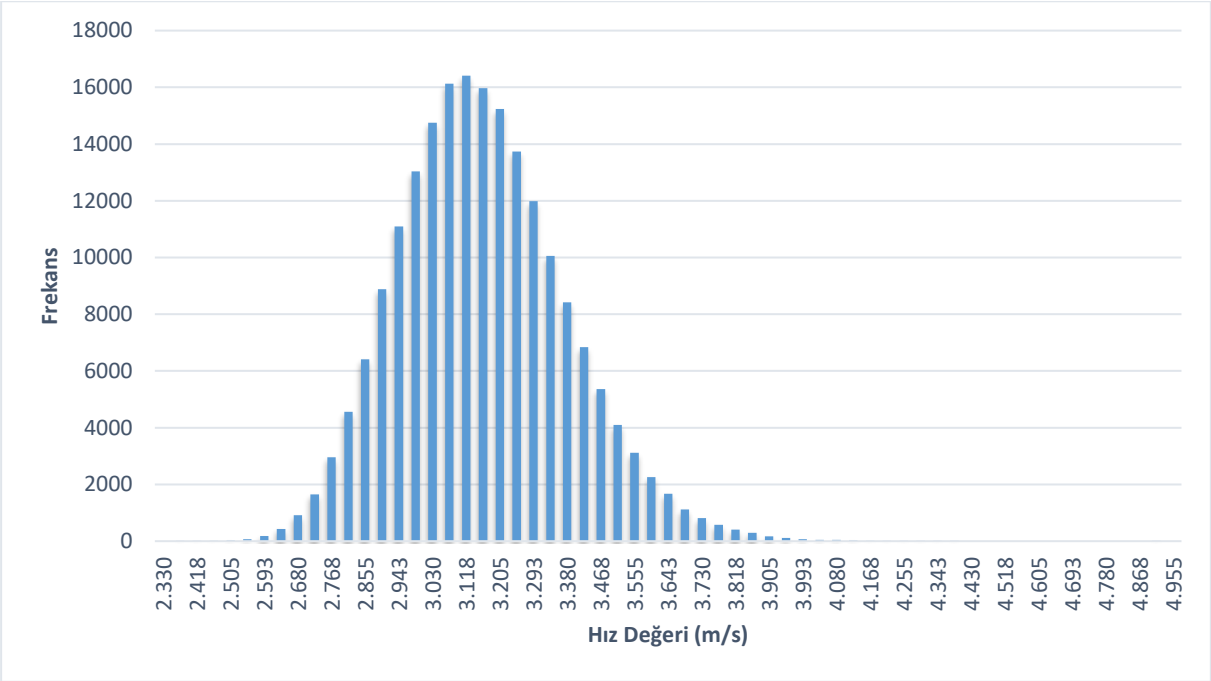
Benzetimde 200 000 deneme neticesinde standart sapma 0,101 m/s olarak elde edilmiştir. Diğer taraftan GUM metodu ile elde edilen ölçüm belirsizliği değerinin 0,099 m/s olduğu hesaba katıldığında iki metodun sonuçlarının 2 ondalık haneye yuvarlanması durumda aynı sonuç elde edilmektedir. Monte Carlo metoduna göre hesaplama yapılan hız değerleri için dağılımlar Şekil 3, Şekil 4, Şekil 5, Şekil 6, Şekil 7 ve Şekil 8'de verilmiştir. Hız dağılım profiline bakıldığında, Welch-Satterthwaite yaklaşımıyla elde edilen serbestlik derecesi sonucunda yapılan normal dağılım varsayımının doğruluğu onaylanmıştır.

Tablo 4. 0,915 m/s hız değeri içi Monte Carlo metoduna göre ilk 10 denemenin sonuçları (Monte Carlo Output Values from the First 10 Trials at a Velocity of 0.915 m/s)

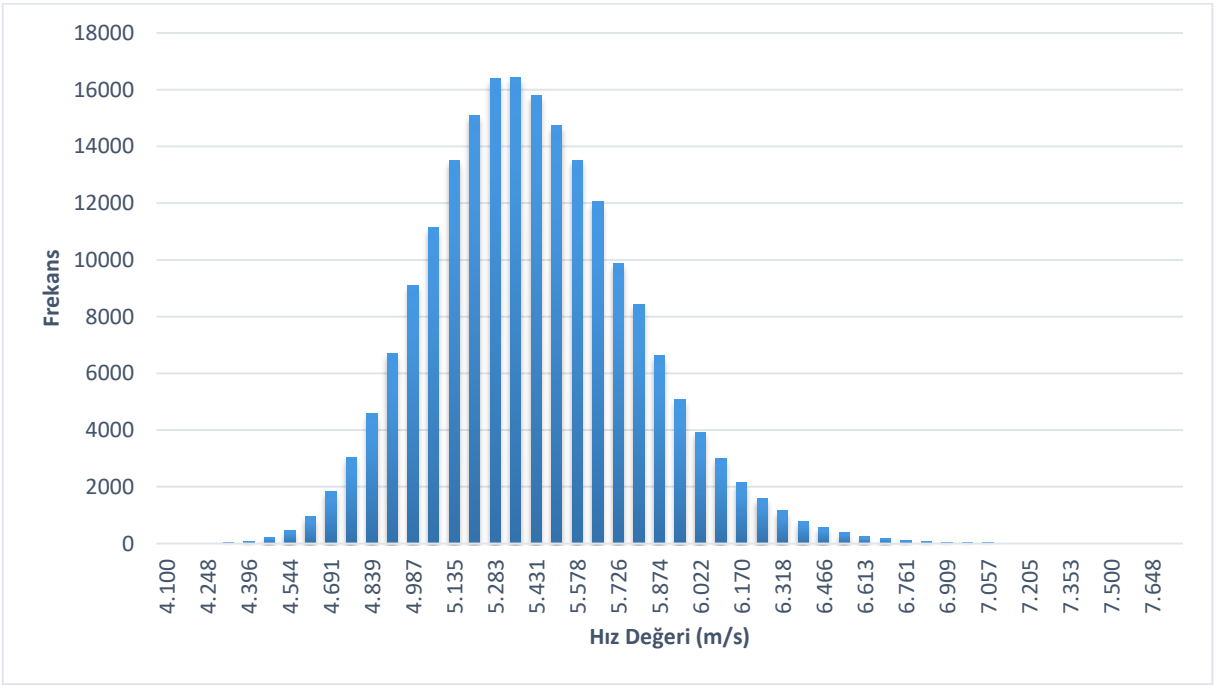
Denemeler	Kuvvet (N)	Yoğunluk (kg/m^3)	Çap (m)	Alan (m^2)	Hız (m/s)
1	0,020	1,090	0,205	0,033	0,898
2	0,021	1,089	0,206	0,033	0,915
3	0,017	1,089	0,192	0,029	0,883
4	0,014	1,089	0,207	0,034	0,730
5	0,020	1,089	0,184	0,027	1,014
6	0,023	1,090	0,206	0,033	0,955
7	0,019	1,089	0,189	0,028	0,968
8	0,020	1,089	0,183	0,026	1,008
9	0,020	1,089	0,194	0,029	0,956
10	0,025	1,090	0,197	0,031	1,064



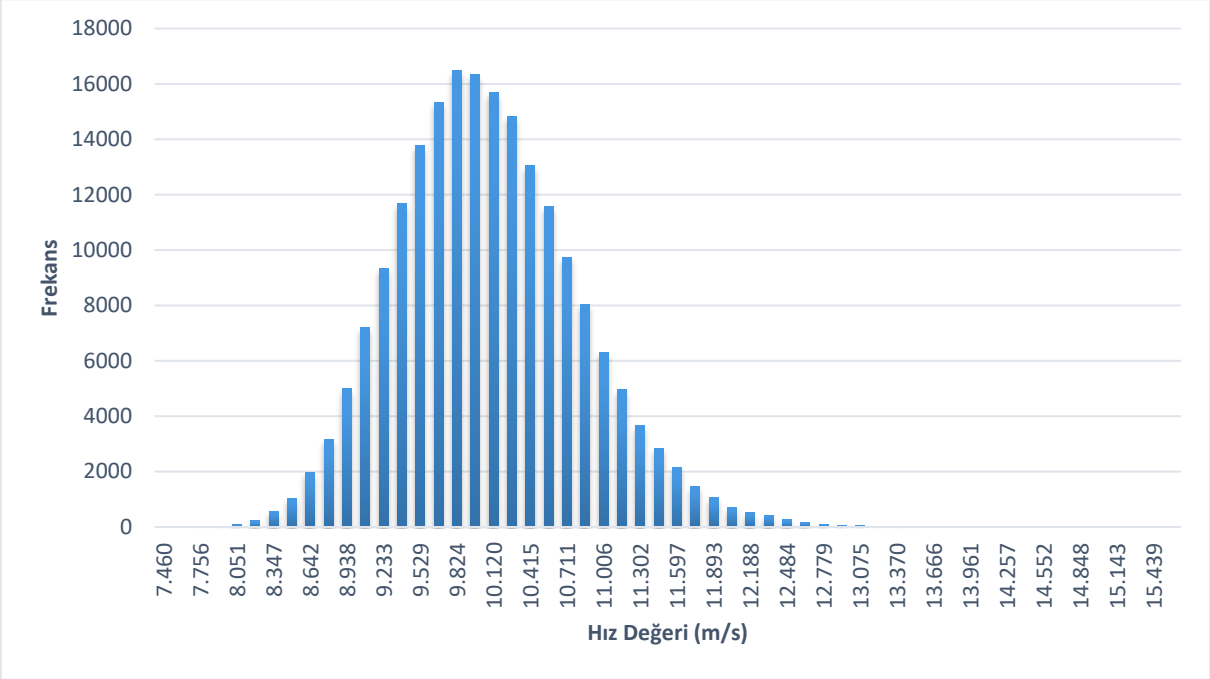
Şekil 3. 0,915 m/s için Monte Carlo metodu hız dağılım grafiği (Probability Distribution of Velocity at 0.915 m/s Based on Monte Carlo Analysis)



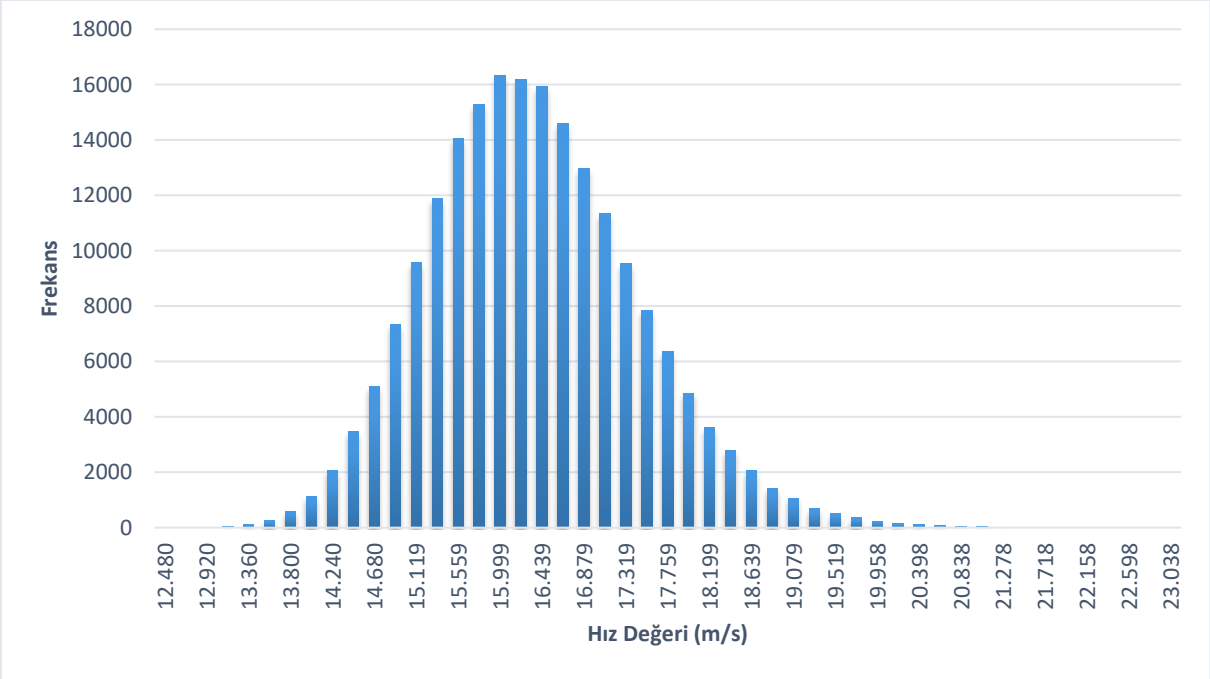
Şekil 4. 3,124 m/s için Monte Carlo metodu hız dağılım grafiği (Probability Distribution of Velocity at 3.124 m/s Based on Monte Carlo Analysis)



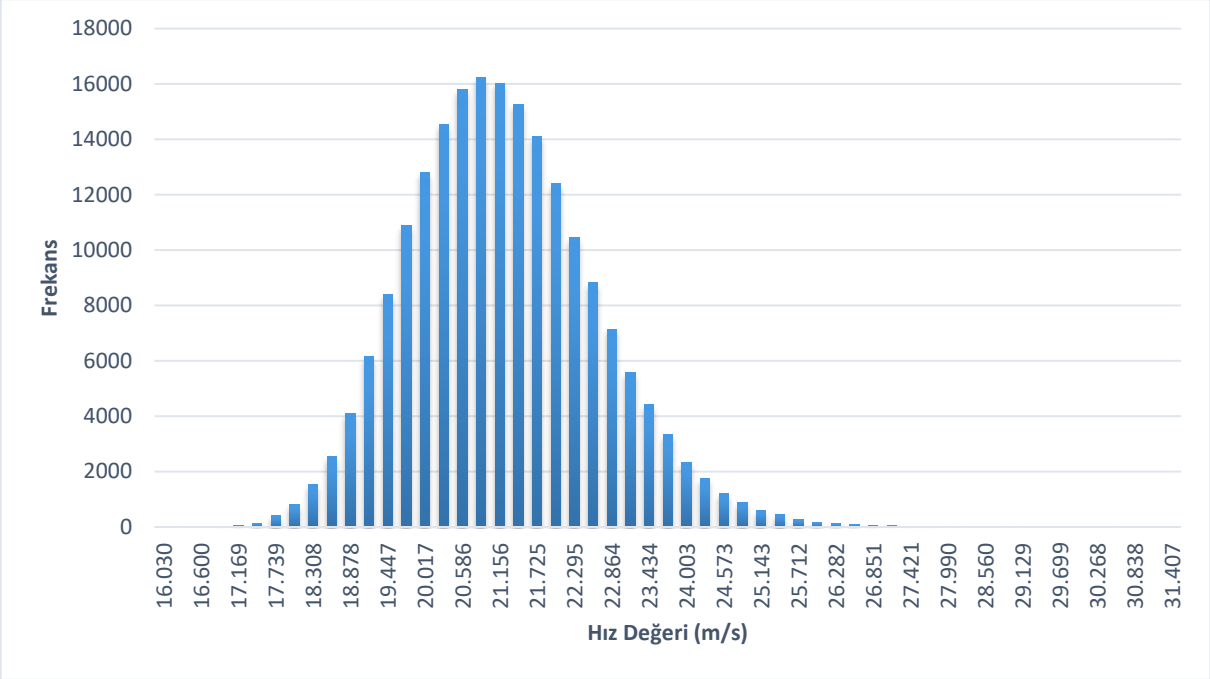
Şekil 5. 5,359 m/s için Monte Carlo metodu hız dağılım grafiği (Probability Distribution of Velocity at 5,359 m/s Based on Monte Carlo Analysis)



Şekil 6. 10,805 için Monte Carlo metodu hız dağılım grafiği (Probability Distribution of Velocity at 10.805 m/s Based on Monte Carlo Analysis)



Şekil 7. 16,174 m/s için Monte Carlo metodu hız dağılım grafiği (Probability Distribution of Velocity at 16.174 m/s Based on Monte Carlo Analysis)



Şekil 8. 20,964 m/s için Monte Carlo metodu hız dağılım grafiği (Probability Distribution of Velocity at 20.964 m/s Based on Monte Carlo Analysis)

Tablo 5'te, GUM ve Monte Carlo yöntemleri için tüm hız kademelerindeki ölçüm belirsizliği değerleri, ortalama hız ve t95(veff) değerleri dört ondalık basamağa yuvarlanarak verilmiştir. Farklı hesaplama prosedürlerini vurgulamak için GUM yöntemiyle elde edilen hız beklenen hız, Monte Carlo yöntemiyle elde edilen hız ise ortalama hız olarak ifade edilmiştir.

Tablo 5. GUM ve Monte Carlo benzetimi sonuçları (Evaluation of Measurement Uncertainty Using GUM and Monte Carlo Simulation)

GUM			Monte Carlo	
Beklenen Hız (m/s)	Standart Belirsizlik (m/s)	$t_{95}(v_{eff})$	Ortalama Hız (m/s)	Standart Belirsizlik (m/s)
0,915	0,099	1,96	0,916	0,101
3,124	0,215	1,96	3,138	0,219
5,359	0,362	1,96	5,384	0,369
10,805	0,724	1,96	10,003	0,739
16,174	1,079	1,96	16,246	1,099
20,964	1,398	1,96	21,063	1,424

2.5. Monte Carlo Metodu ile GUM Metodunun Geçerli Kılınması (Validation of the GUM Method through Monte Carlo Simulation)

GUM belirsizlik yaklaşımı birçok durumda işe yarayabilir. Ancak, yukarıda belirtildiği gibi, özellikle doğrusal olmayan özelliklere sahip birçok uygulama için ortak olan bazı sınırlamalar vardır. Bu uygulamalar için GUM yöntemi test edilmelidir. Test etmenin bir yolu Monte Carlo benzetimi ve GUM sonuçlarını karşılaştırmaktır. GUM sonuçlarının Monte Carlo benzetim sonuçları ile doğrulanması, benzer durumlar için GUM yönteminin kullanılmasını mümkün kılabilir. Doğrulama prosedürü aşağıdaki gibidir:

1- Sayısal tolerans değeri δ Eş. 22'den hesaplanır.

2- d_{low} ve d_{high} değerleri Eş.23 ve Eş.4.24'e göre elde edilir.

3- δ ile d_{low} ve d_{high} değerleri kıyaslanır. δ değerinin d_{low} ve d_{high} değerlerinden büyük olması durumunda GUM belirsizliği geçerli kılınmış olur.

$$\delta = \frac{1}{2} \cdot 10^{l} \quad (22)$$

Eş. 22'deki l değeri, GUM metoduna göre hesaplanan standart belirsizlik değerinin $c \cdot 10^{l}$ şeklinde ifade edilmesinden elde edilir. [4]. c değeri ise talep edilen anlamlı rakam sayısına göre ortaya çıkar. GUM metodu, Eş. 23 ve Eş.24'ün ile δ değerinin karşılaştırılması sonucu geçerlilik açısından test edilir [4]. δ değerinin d_{low} ve d_{high} değerlerden büyük olması durumunda GUM belirsizliği geçerli kabul edilir.

$$d_{low} = |y - U_p - y_{low}| \quad (23)$$

$$d_{high} = |y + U_p - y_{high}| \quad (24)$$

y_{low} ve y_{high} değerleri *p* % 95 için sırasıyla *M·(1-p)/2 ve M·(1+p)/2* formüllerinden elde edilen 5000 ve 195 000 sıralarındaki verilerden elde edilir [4]. U_p, GUM metodu kullanılarak hesaplanan genişletilmiş ölçüm belirsizliği değeri, *y* ise beklenen ölçüm sonucudur.

Tüm hız değerleri GUM metodunun geçerli kılınması yapılmıştır. 0,915 m/s için GUM metodu geçerlilik testi detayları ile verilmiştir.

Buna göre Up=0,194 m/s olarak elde edilmiştir. Standard belirsizlik 0,099 m/s olup 2 anlamlı rakam için 99·10-3 m/s olarak yazılır ve buna göre δ değeri 5·10-4 m/s olarak elde edilir.

$$d_{low} = |0{,}915 - 0{,}194 - 0{,}727| = 6 \cdot 10^{-3}\text{m/s} > 5 \cdot 10^{-4}\ \text{m/s} \quad (25)$$

$$d_{high} = |0{,}915 + 0{,}194 - 1{,}122| = 1{,}3 \cdot \frac{10^{-2}\text{m}}{\text{s}} > 5 \cdot 10^{-4}\frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (26)$$

3. BULGULAR (RESULTS)

Bu çalışmada, doğrusal olmayan karakteristiğe sahip akış ölçüm sisteminin ölçüm belirsizliği GUM ve Monte Carlo yöntemlerine göre hesaplanmıştır. Nihai aşamada bu karakteristiğe sahip ölçüm sistemlerinde veya doğrusal olmayan model fonksiyona sahip sistemlerin ölçüm belirsizliklerinin hesaplanmasında geleneksel GUM metoduna güvenilirlik Monte Carlo Benzetimi modeli ile test edilmiştir. Sonuçların gösterdiği üzere, GUM yöntemi Monte Carlo ile doğrulanamamıştır. Tahmin edilen tüm hava hızı seviyeleri için hesaplanan parametreler Tablo 6'da verilmiştir.

Tablo 6. GUM metodunun Monte Carlo metoduna göre geçerli kılma sonuçları (m/s) (Validation Results of the GUM Method Against the Monte Carlo Method at Various Velocity Levels (m/s))

Beklenen Hava Hızı (m/s)	U_p	y_{low}	y_{high}	d_{low}	d_{high}	δ	Sonuç
0,915	0,194	0,728	1,123	$6 \cdot 10^{-3}$	$1{,}3 \cdot 10^{-2}$	$5 \cdot 10^{-4}$	Geçersiz
3,124	0,421	2,752	3,608	$4{,}9 \cdot 10^{-2}$	$6{,}2 \cdot 10^{-2}$	$5 \cdot 10^{-3}$	Geçersiz
5,359	0,710	4,730	6,179	$8{,}2 \cdot 10^{-2}$	0,11	$5 \cdot 10^{-3}$	Geçersiz
10,805	1,418	8,698	11,589	0,69	0,63	$5 \cdot 10^{-3}$	Geçersiz
16,174	2,117	14,300	18,606	0,24	0,32	$5 \cdot 10^{-2}$	Geçersiz
20,964	2,739	18,548	24,109	0,32	0,41	$5 \cdot 10^{-2}$	Geçersiz

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada, doğrusal olmayan karakteristiğe sahip akış ölçüm sisteminin ölçüm belirsizliği GUM ve Monte Carlo yöntemlerine göre hesaplanmıştır. Tüm hava hızı değerleri için Monte Carlo benzetim yöntemi ile hesaplanan ölçüm belirsizliği GUM yöntemi ile hesaplanan ölçüm belirsizliğinden daha yüksektir. Monte Carlo simülasyonundan elde edilen d_{low}, d_{high} değerlerinin δ değerinin 10,805 m/s hız seviyesinde 100 katından fazla diğer hız seviyelerinde ise 10 katı seviyelerinde olduğu görülmüştür. Bu sonuçlara göre GUM yöntemi sonuçları Monte Carlo benzetim sonuçları ile doğrulanamamıştır. Bu karakterdeki ölçümler için GUM yönteminin kullanılmasının ölçüm belirsizliğinin yanlış tahmin edilmesine ve daha düşük ölçüm belirsizliği değerlerine yol açabileceği anlamına gelir.

Bu çalışma, doğrusal olmayan özelliklere sahip ölçüm sistemleri için belirsizlik hesaplamaları söz konusu olduğunda GUM modelinin tek başına yeterli olmayabileceğini göstermesi açısından önemlidir. Termistörler, anemometreler, EMC, fotodiyotlar ve fotodetektörler gibi çok sayıda doğrusal olmayan model fonksiyona sahip ölçüm sistemleri bulunmaktadır. Monte Carlo simülasyonu

bu tür doğrusal olmayan ölçümler için bir miktar programlama uzmanlığı gerektirse de GUM yönteminin tercih edildiği durumlarda doğrulama veya onaylama için kullanılmalıdır.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü Rüzgar Tüneli Kalibrasyon Laboratuvarına laboratuvar altyapılarını kullanıma sundukları için teşekkür ederiz.

We would like to thank the Directorate General for Meteorological Service for providing access to the laboratory infrastructure of the Wind Tunnel Calibration Laboratory

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.

AUTHORS' CONTRIBUTIONS (YAZARLARIN KATKILARI)

***M. Saim SOYSAL*:** Test düzeneğinin hazırlanması ve ölçümlerin alınması ile modellerin belirlenmesi

Preparation of the test setup, data acquisition, and model identification

H. Mehmet ŞAHİN: İstatistiki modellemenin detaylandırılması ve sonuçların yorumlanması

Elaboration of statistical modeling and interpretation of results

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

There is no conflict of interest in this study.

REFERENCES (KAYNAKLAR)

[1] Joint Committe for Guides in Metrology, (2008), JCGM 100:2008 Guide to the Expression of the Uncertainty in Measurement, Joint Committe for Guides in Metrology, Sevres: 3,6,10,19

[2] International Standards Organization/ International Electrotechnic Committe, (2008), Uncertainty of measurement -- Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM:1995), ISO/IEC, Geneva

[3] P.R.G. Couto, J.C. Damasceno, S.P. de Oliveira, (2013), Chapter 2: Monte Carlo simulations applied to uncertainty in measurement, Theory and Applications of Monte Carlo Simulations, InTech Publisher, 2013, Rijeka: 27-52

[4] Joint Committe for Guides in Metrology, (2008), Evaluation of measurement data — Supplement 1 to the "Guide to the expression of uncertainty in measurement, Joint Committe for Guides in Metrology, Sevres:5,7,28,30,31,34

[5] M.A. Herrador, A.G. González, Evaluation of measurement uncertainty in analytical assays by means of Monte-Carlo simulation, Talanta 64 (2004) 415–422.

[6] S.P. Oliveira, A.C. Rocha, J.T. Filho, P.R.G. Couto, Uncertainty of measurement by Monte-Carlo simulation and metrological reliability in the evaluation of electric variables of PEMFC and SOFC fuel cells, Measurement 42 (2009) 1497–1501.

[7] K. Shahanaghi, P. Nakhjiri, A new optimized uncertainty evaluation applied to the Monte-Carlo simulation in platinum resistance thermometer calibration, Measurement 43 (2010) 901–911.

[8] J. Sładek, A. Gaska, Evaluation of coordinate measurement uncertainty with use of virtual machine model based on Monte Carlo method, Measurement 45 (2012) 1564–1575.

[9] D. Theodorou, L. Meligotsidou, Sotirios Karavoltsos, A. Burnetas, M. Dassenakis, M. Scoullos, Comparison of ISO–GUM and Monte Carlo methods for the evaluation of measurement uncertainty: application to direct cadmium measurement in water by GFAAS, Talanta 83 (2011) 1568–1574.

[10] M. Azpurua, C. Tremola, E. Paez, Comparison of the GUM and MONTE CARLO methods for the uncertainty estimation in electromagnetic compatibility testing, Prog. Electrom. Res. B 34 (2011) 125–144.

[11] Chen A., Chen C., Comparison of GUM and Monte Carlo methods for evaluating measurement uncertainty of perspiration measurement systems, Measurement 87 (2016) 27-37

[12] González, C.; Vilaplana, J.M.; Parra-Rojas, F.C.; Serrano, A. Validation of the GUM uncertainty framework and the Unscented transformation for Brewer UV irradiance measurements using the Monte Carlo method. Measurement 2025, 239, 115466.

[13] Castro, H.F.F., Mathematical modeling applied to the uncertainty analysis of a tank prover calibration: Understanding the influence of calibration conditions on the GUM validation using the Monte Carlo method, Flow

Measurement and Instrumentation, Volume 96, 2024,102547.

[14] Wei M. Chong W., Cao J., Zhou T., Zheng D., Uncertainty evaluation for wind speed measurement part (1): "GUM method and Monte Carlo method", Flow Measurement and Instrumentation, Volume 97,2024,102607.

[15] Castro H.F.F., Validation of the GUM using the Monte Carlo method when applied in the calculation of the measurement uncertainty of a compact prover calibration, Flow Measurement and Instrumentation, Volume 77, 2021, 101877

[16] Hoerner. S. F., (1958) Fluid Dynamic Drag.", ABD: Author, 3-14,3-15

[17] Davis, R.S., "Equation for the determination of the density of moist air" (1981/91), Metrologia 29, 67 (1992)

[18] Giacomo, P., "Equation for the determination of the density of moist air" (1981), Metrologia 18, 33 (1982)

[19] International Organizatıon Of Legal Metrology, (2004), OIML R111-1 Weights of classes E1, E2, F1, F2, M1, M1–2, M2, M2–3 and M3 Part 1: Metrological and technical requirements, International Organizatıon Of Legal Metrology, Paris:76.

Gazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Dergisi
PART C: TASARIM VE TEKNOLOJİ

Gazi University
Journal of Science
PART C: DESIGN AND TECHNOLOGY

GU J Sci, Part C, 13(2): 567-578 (2025)

Tailoring the Optical and Electrical Properties of ZnO Films: Co-Doping with F and In

Ibrahim GUNES[1,2*]

[1]*Çanakkale Onsekiz Mart University, Canakkale Faculty of Applied Sciences, Department of Energy Management, Çanakkale, Turkey*

[2]*Çanakkale Onsekiz Mart University, Biga Vocational School, Department of Electricity and Energy, Çanakkale, Turkey*

Article Info

Research article
Received: 18/01/2025
Revision: 04/03/2025
Accepted: 05/03/2025

Keywords

Ultrasonic Spray Pyrolysis
TCO Materials
F:In Co-doped ZnO
Optical Properties
Electrical Properties

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 18/01/2025
Düzeltme: 04/03/2025
Kabul: 05/03/2025

Anahtar Kelimeler

Ultrasonik Sprey Piroliz
TCO Malzemeler
F:In Eş-katkılı ZnO
Optik Özellikler
Elektriksel Özellikler

Graphical/Tabular Abstract (Grafik Özet)

In this study, undoped ZnO (ZO), In-doped ZnO (IZO), and F:In co-doped ZnO (FIZO) films were synthesized via ultrasonic spray pyrolysis (USP). The F:In co-doping strategy significantly improved structural, optical, and electrical properties, enhancing their potential for opto-electronic applications. / Bu çalışmada katkısız ZnO (ZO), In katkılı ZnO (IZO) ve F:In eş-katkılı ZnO (FIZO) filmleri ultrasonik sprey pirolizi (USP) yöntemiyle sentezlendi. F:In eş-katkılama stratejisi, yapısal, optik ve elektriksel özellikleri önemli ölçüde iyileştirerek opto-elektronik uygulamalar için potansiyelini artırdı.

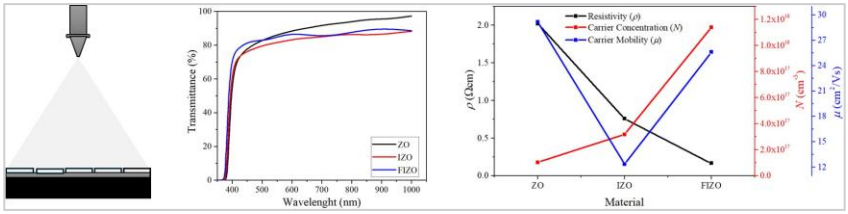


***Figure A**: Schematic of the film deposition process (left), transmittance spectra (middle), and change of electrical parameters (right) / **Şekil A:** Film biriktirme sürecinin şeması (sol), geçirgenlik spektrumları (orta) ve elektriksel parametrelerin değişimi (sağ)*

Highlights (Önemli noktalar)

- *F:In co-doping strategy significantly enhances the opto-electronic properties of ZnO films. / F:In eş-katkılama stratejisi, ZnO filmlerinin opto-elektronik özelliklerini önemli ölçüde geliştirir.*
- *FIZO films exhibit improved carrier concentration and lower electrical resistivity. / FIZO filmleri, daha yüksek taşıyıcı konsantrasyonu ve daha düşük elektriksel özdirenç sergiler.*
- *Optical transmittance (~83%) and wider band gap (3.32 eV) make FIZO films suitable for opto-electronic applications. / Optik geçirgenlik (~%83) ve geniş bant aralığı (3.32 eV), FIZO filmlerini opto-elektronik uygulamalar için uygun hale getirir.*

***Aim (Amaç):** To investigate the impact of F:In co-doping on the structural, optical, and electrical properties of ZnO films and enhance their applicability in opto-electronic devices. / ZnO filmlerinde F:In eş-katkılamanın yapısal, optik ve elektriksel özellikler üzerindeki etkisini inceleyerek opto-elektronik cihazlardaki uygulanabilirliğini artırmak.*

***Originality (Özgünlük):** This study provides a comprehensive analysis of the effects of F:In co-doping in ZnO films synthesized via USP, a rarely explored method, and demonstrates significant improvements in opto-electronic performance. / Bu çalışma, literatürde az çalışılan USP yöntemiyle sentezlenen ZnO filmlerinde F:In eş katkılama etkilerini kapsamlı şekilde inceleyerek opto-elektronik performanstaki önemli gelişmeleri ortaya koymaktadır.*

***Results (Bulgular):** F:In co-doping altered the ZnO crystal structure, leading to enhanced electrical conductivity and optical transparency. The carrier concentration in FIZO films increased 11-fold, resistivity decreased to 1.65×10^{-1} Ωcm, and optical transmittance reached ~83%. / F:In eş-katkılama, ZnO kristal yapısını değiştirerek elektriksel iletkenlik ve optik geçirgenliği artırmıştır. FIZO filmlerinde taşıyıcı konsantrasyonu 11 kat artmış, özdirenç 1.65×10^{-1} Ωcm'ye düşmüş ve optik geçirgenlik ~%83'e ulaşmıştır.*

***Conclusion (Sonuç):** The findings confirm that F:In co-doping effectively improves the structural and opto-electronic properties of ZnO films. With high transparency, enhanced conductivity, and an optimized figure of merit, FIZO films present strong potential for photovoltaic, display, and LED technologies. / Bulgular, F:In eş-katkılamanın ZnO filmlerinin yapısal ve opto-elektronik özelliklerini etkin bir şekilde iyileştirdiğini doğrulamaktadır. Yüksek geçirgenlik, artırılmış iletkenlik ve optimize edilmiş performans faktörü ile FIZO filmleri, fotovoltaik, görüntüleme ve LED teknolojileri için güçlü bir potansiyel sunmaktadır.*

*Corresponding author, e-mail: ibrahimgunes@comu.edu.tr
DOI: 10.29109/gujsc.1622733

GU J Sci, Part C, 13(2): 567-578 (2025)

Gazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Dergisi
PART C: TASARIM VE TEKNOLOJİ

Gazi University
Journal of Science
PART C: DESIGN AND TECHNOLOGY

http://dergipark.gov.tr/gujsc

Tailoring the Optical and Electrical Properties of ZnO Films: Co-Doping with F and In

Ibrahim GUNES[1,2*]

[1]*Çanakkale Onsekiz Mart University, Canakkale Faculty of Applied Sciences, Department of Energy Management, Çanakkale, Turkey*

[2]*Çanakkale Onsekiz Mart University, Biga Vocational School, Department of Electricity and Energy, Çanakkale, Turkey*

Article Info

Research article
Received: 18/01/2025
Revision: 04/03/2025
Accepted: 05/03/2025

Keywords

Ultrasonic Spray Pyrolysis
TCO Materials
F:In Co-doped ZnO
Optical Properties
Electrical Properties

Abstract

In this study, undoped ZnO, 3% In doped ZnO and 5% F: 3% In co-doped ZnO films were successfully synthesized via ultrasonic spray pyrolysis. The study objective is to investigate the changes in physical properties –especially opto-electrical– of ZnO films with F:In co-doping strategy and thus contribute to developing high-performance materials for opto-electronic devices. Structural analysis showed that obvious changes occurred in the ZnO crystal structure with doping and the dopant atoms were successfully integrated into the ZnO lattice. Morphological studies showed that 5% F: 3% In co-doped ZnO films exhibit a homogeneous, nanostructured, and compact surface, with surface roughness being lower than undoped ZnO films. Moreover, SEM images identified granular nanostructures in 3% In doped and 5% F: 3% In co-doped ZnO films, which were attributed to the stabilization of grain boundaries by dopant atoms, promoting a uniform structure. Optical analysis revealed that the 5% F: 3% In co-doped ZnO film exhibited a transmittance of 83% in the visible region and a wider optical band gap of 3.32 eV compared to other films. Electrical characterization demonstrated that the carrier concentration of ZnO films was 1.03×10^{17} cm^{-3}, increasing markedly to 1.14×10^{18} cm^{-3} in 5% F: 3% In co-doped ZnO film. Additionally, the resistivity of the 5% F: 3% In co-doped ZnO film was detected at the lowest level of 1.65×10^{-1} Ωcm. This data reveals the potential of 5% F: 3% In co-doped ZnO films for advanced opto-electronic applications, including photovoltaic cells, display technologies, and LEDs. Co-doping ZnO films with fluorine and indium emerge as a promising strategy to enhance electrical and optical properties.

ZnO Filmlerin Optik ve Elektriksel Özelliklerinin Düzenlenmesi: F ve In ile Eş-Katkılama

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 18/01/2025
Düzeltme: 04/03/2025
Kabul: 05/03/2025

Anahtar Kelimeler

Ultrasonik Sprey Piroliz
TCO Malzemeler
F:In Eş-katkılı ZnO
Optik Özellikler
Elektriksel Özellikler

Öz

Bu çalışmada, katkısız ZnO, %3 In katkılı ZnO ve %5 F: %3 In eş-katkılı ZnO filmleri ultrasonik sprey pirolizi ile başarıyla sentezlendi. Çalışmanın amacı, F:In eş-katkılama stratejisi ile ZnO filmlerinin fiziksel özelliklerindeki (özellikle opto-elektriksel) değişimleri incelemek ve böylece opto-elektronik cihazlar için yüksek performanslı malzemeler geliştirmeye katkıda bulunmaktır. Yapısal analiz, katkılama ile ZnO kristal yapısında belirgin değişimler meydana geldiğini ve katkı atomlarının ZnO örgüsüne başarıyla entegre olduğunu göstermiştir. Morfolojik çalışmalar, %5 F: %3 In eş-katkılı ZnO filmlerinin homojen, nanoyapılı ve kompakt bir yüzey sergilediğini, yüzey pürüzlülüğünün katkısız ZnO filmlerinden daha düşük olduğunu göstermiştir. Dahası, SEM görüntüleri, katkı atomları tarafından tane sınırlarının stabilizasyonuna atfedilen ve düzgün bir yapıyı destekleyen %3 In katkılı ve %5 F: %3 In eş katkılı ZnO filmlerinde granüler nanoyapıları tanımladı. Optik analiz, %5 F: %3 In eş-katkılı ZnO filminin görünür bölgede %83'lük bir geçirgenlik ve diğer filmlere kıyasla 3.32 eV'lik daha geniş bir optik bant aralığı sergilediğini ortaya koydu. Elektriksel karakterizasyon, ZnO filmlerinin taşıyıcı konsantrasyonunun 1.03×10^{17} cm^{-3} olduğunu, %5 F: %3 In eş-katkılı ZnO filminde 1.14×10^{18} cm^{-3}'e belirgin bir şekilde arttığını gösterdi. Ek olarak, %5 F: %3 In eş katkılı ZnO filminin özdirenci en düşük seviyede, 1.65×10^{-1} Ωcm'de tespit edildi. Bu veriler, fotovoltaik hücreler, ekran teknolojileri ve LED'ler dahil olmak üzere gelişmiş opto-elektronik uygulamalar için %5 F: %3 In eş-katkılı ZnO filmlerinin potansiyelini ortaya koymaktadır. ZnO filmlerinin flor ve indiyumla eş-katkılanması, elektriksel ve optik özellikleri geliştirmek için umut verici bir strateji olarak ortaya çıkmaktadır.

*Corresponding author, e-mail: ibrahimgunes@comu.edu.tr
DOI: 10.29109/gujsc.1622733

1. INTRODUCTION (GİRİŞ)

Transparent conductive oxides (TCOs) play a critical role in numerous optoelectronic applications, such as photovoltaic devices, high-resolution displays, and LED technologies. Among TCO materials, indium tin oxide (ITO) is the most widely used, thanks to its exceptional combination of high optical transmittance (~90%) and extremely low electrical resistivity (~10^{-4} Ωcm) [1]. Despite these outstanding properties, the limited availability, high cost, and environmental issues associated with indium have driven the search for alternative materials to replace ITO. In this context, zinc oxide (ZnO) has emerged as a promising candidate due to its affordability, environmental friendliness, and comparable opto-electronic performance to other alternatives.

ZnO, with its wide bandgap (~3.3 eV), is an n-type semiconductor known for its excellent optical transparency in the visible spectrum [2]. However, the electrical conductivity of undoped ZnO is inferior to that of ITO, primarily because its carrier concentration ranges from 10^{17} to 10^{19} cm^{-3}, whereas ITO typically achieves ~10^{21} cm^{-3} [3]. This limitation reduces its practicality in TCO applications. To overcome this limitation, doping ZnO with group III elements such as aluminum (Al), gallium (Ga) or indium (In) has been widely investigated [4,5]. These dopants replace Zn^{2+} ions in the lattice, introducing extra electrons and increasing the carrier concentration [6]. Notably, In^{3+} ions (ionic radius: 0.80 Å) are closer in size to Zn^{2+} ions (ionic radius: 0.74 Å) than Al^{3+} (0.53 Å) or Ga^{3+} (0.61 Å) ions, minimizing lattice distortion and potentially enhancing carrier mobility [7]. However, excessive doping levels can lead to lattice strain and ionized impurity scattering, which limit electron mobility. Moreover, an overabundance of free carriers may result in increased absorption, thereby compromising optical transmittance [8]. Therefore, increasing the carrier concentration as well as mobility is important to improve the electrical properties of TCOs while maintaining their optical performance [2]. Recent research has revealed that co-doping ZnO with multiple elements –both cationic (e.g., Al, Ga, In) and anionic (e.g., fluorine (F), chlorine (Cl))– can significantly improve its opto-electronic properties [6,9–11]. Fluorine doping, in particular, offers unique advantages. In this context, the F doping enables the F^- ion to substitute in the ZnO lattice with minimal lattice distortion due to its ionic radius (1.31 Å) being quite similar to that of O^{2-} ion (1.35 Å) [7]. Furthermore, F doping can effectively passivate oxygen vacancies, reduce defect scattering, and enhance electron mobility while maintaining high optical transparency [12].

In previous studies, doped/co-doped ZnO films have been synthesized using vacuum-requiring techniques such as DC/RF magnetron sputtering [9,10] and pulsed laser deposition [5] as well as non-vacuum-requiring techniques such as sol-gel [13] and spray pyrolysis [14–16]. For example, Nguyen et al. utilized DC magnetron sputtering to fabricate F:In co-doped ZnO (FIZO) films, reporting substantial improvements in both electrical and optical properties [8]. Their findings demonstrated that F doping enhanced crystallinity, reduced lattice defects (e.g., V_{Zn}, O_{Zn}, V_O^{++}), and increased carrier concentration by 17-fold, along with a two-fold increase in mobility. In the same study, it was determined that FIZO films reached the lowest resistivity value of 5.24×10^{-4} Ωcm with an optical transmittance of 82%, highlighting their potential for TCO applications [8]. In another investigation, the sol-gel method was employed to synthesize ZnO thin films co-doped with fluorine and indium [13]. Analysis of XRD patterns showed a strong preference for the (002) crystal plane, while SEM imaging displayed nanofiber structures around 500 nm in size. Increasing the doping levels of F and In narrowed the optical band gap from 3.35 eV to 3.24 eV and reduced visible-light transparency from 75% to 60.8% [13]. In another study by Hadri et al., undoped ZnO, In doped ZnO (IZO) and F:In co-doped ZnO (FIZO) thin films were synthesized by chemical spray pyrolysis technique at 350 °C and the effect of F doping on some physical properties was investigated [14]. Their findings revealed that the (002) peak was dominant in XRD patterns, and the (101) peak intensity increased with higher F concentrations. The co-doped films exhibited 80% optical transparency within the 400–800 nm wavelength range, alongside a resistivity of 6.3×10^{-3} Ωcm, and their electrical properties improved significantly following annealing. These results underscore the potential of FIZO films for advanced opto-electronic applications, particularly in solar cells and display technologies [14]. Therefore, co-doping ZnO with both cationic and anionic dopants offer significant advantages: Group III cations (e.g., In^{3+}) contribute free electrons, while anions such as F^- can passivate defects and reduce scattering centers, thereby enhancing mobility. Additionally, the deposition technique plays a crucial role in minimizing production costs and improving the scalability of TCO technologies. From this perspective, the spray pyrolysis technique is particularly appealing as a thin-film deposition method due to its non-vacuum nature, low cost, capability for large-area coating, and ease of control

over experimental parameters. These advantages make spray pyrolysis a widely preferred technique for preparing co-doped zinc oxide films. However, despite extensive research into various doping combinations, studies on the effects of F:In co-doping on the physical properties, particularly opto-electrical behaviors, remain limited. Moreover, to the best of our knowledge, only a few studies on this topic utilizing spray pyrolysis have been reported in the literature [13,14,17].

In this research, ZnO films, including undoped, 3% In-doped, and 5% F:3% In co-doped samples, were synthesized via the ultrasonic spray pyrolysis (USP) technique. The study focuses on analyzing the physical properties of these films in detail through a co-doping approach. Specifically, this study aims to optimize the carrier concentration and mobility without compromising the optical transmittance. As a result, the obtained data provide an experimental basis for the development of F:In co-doped ZnO films based opto-electronic devices.

2. MATERIALS AND METHODS (MATERYAL VE METOD)

2.1. Deposition of Films (Filmlerin Biriktirilmesi)

In this research, zinc oxide films with undoped, indium-doped and fluorine-indium co-doped were synthesized via USP. Firstly, the microscope glass substrates used for film deposition were cleaned. The process was carried out by ultrasonicating with detergent solution, deionized (DI) water, acetone and methanol for 10 min each, followed by rinsing in DI water after each step. After the cleaning process, the substrates were carefully dried in an oven, and the film deposition process was subsequently conducted in two distinct stages. In the first stage, in order to investigate the effect of indium doping on the physical properties of zinc oxide films, undoped and 3% indium doped films were prepared. Spraying solutions were prepared by dissolving 0.1 M indium (III) chloride ($InCl_3$; 98%, Sigma-Aldrich) as the indium source and 0.1 M zinc acetate dihydrate ($Zn(CH_3CO_2)_2{\cdot}2H_2O$; ≥99.5%, Merck) as the zinc source in DI water. The substrate temperature was determined as 400°C and the prepared spraying solutions were sprayed onto glass substrates at a flow rate of 5 ml/min for 25 minutes to obtain films. The spraying solution was converted into droplets in the range of 10-60 μm by means of an ultrasonic atomizer. During the second stage, co-doping with fluorine and indium was implemented to further augment the properties of ZnO films. Based on a comprehensive review of literature and prior experimental results, the doping levels were set at 3% for indium and 5% for fluorine. To prepare a new spray solution, zinc acetate dihydrate, indium chloride, and ammonium fluoride (NH_4F; ≥98%, Merck) were dissolved in DI water at 0.1 M. The deposition process was carried out under consistent conditions, maintaining the same substrate temperature and flow rate as in the initial stage. The deposited films were left to cool naturally and were made ready for the characterization process. The schematic diagram of the USP thin film deposition technique used in this study was presented in detail in our previous study [18]. For clarity throughout this study, the films were designated as follows: undoped ZnO was labeled as ZO, 3% indium-doped ZnO as IZO, and 5% fluorine-indium co-doped ZnO as FIZO.

2.2. Characterization of Films (Filmlerin Karakterizasyonu)

The structural, surface and opto-electrical properties of the synthesized films were investigated by using various characterization techniques. Structural analyses were performed by using a PANalytical Empyrean XRD with CuK_α radiation (λ = 0.15405 nm) and XRD spectra taken in the 2θ range of 20°–80°. For the investigation of surface morphology and roughness, a Park Systems XE 100 AFM operating in non-contact mode was used. The average surface roughness (R_a) was calculated by XEI software over the scans of 5×5 μm² area. For morphological analysis, surface and cross-sectional images were obtained by a HITACHI SU5000 FE-SEM; at the same time, EDS spectra were taken to evaluate the elemental composition. Furthermore, the cross-sectional images provided the determination of the film thicknesses. Optical analyses were determined with Rigol Ultra-3660 spectrophotometer capable of measuring in the wavelength range of 300–1000 nm, while electrical analyses were evaluated by Hall effect measurements using Nanomagnetics ezHEMS system.

3. RESULTS (BULGULAR)

The structural features of the ZO, IZO, and FIZO films were evaluated based on their XRD patterns, as illustrated in Figure 1. A series of diffraction peaks were detected, primarily within the 2θ range of 20° to 80°, with notable positions near 32.2°, 34.8°, and 36.6°, among others. When compared with the standard data provided by ICDD File No: 36-1451, these peaks were identified as belonging to characteristic crystal planes of hexagonal ZnO, including (100), (002), and (101). Additionally, all peaks in the XRD patterns belong to the ZnO phase,

with no diffraction peaks corresponding to any secondary phases that might result from the dopant atoms. Therefore, In and F dopant atoms may have occupied the zinc or oxygen positions in the zinc oxide crystal structure or be trapped in amorphous regions at grain boundaries [19]. Previous studies have reported that F dopant atoms tend to localize at grain boundaries and surfaces with a high density of dangling bonds, where they can passivate these bonds [20]. As expected, the doped films displayed diffraction features corresponding to the ZnO crystal planes (100), (002), and (101). Slight shifts in the 2θ positions of these peaks were identified, attributed to the effects of doping. As listed in Table 1, the 2θ angles for these planes shifted to lower values in In-doped IZO films, while in F:In co-doped FIZO films, the angles shifted back to higher values. According to Bragg's law ($d = \lambda/2\sin\theta$), this indicates that the interplanar distance (d) initially increases with In doping in IZO films and then decreases again with F:In co-doping in FIZO films. Therefore, the shift of 2θ to lower angles in the IZO film is due to the larger ionic radius of In^{3+} (0.80 Å) than the ionic radius of Zn^{2+} (0.74 Å), supporting the successful incorporation of In ions into the Zn position [7]. On the other hand, the shift of 2θ to low angles in the FIZO film is due to the fact that the ionic radius of F^- ion (1.31 Å) is slightly smaller than the ionic radius of O^{2-} ion (1.35 Å), indicating that F ions successfully injected into the O positions [7]. These observations are consistent with a recent study by Nguyen et al., which reported similar changes in structural parameters upon doping [8].

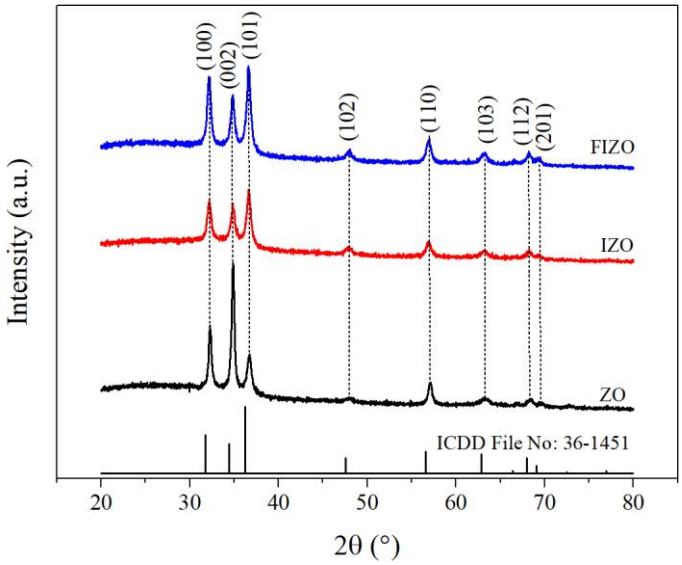


Figure 1. XRD patterns of the deposited ZO, IZO and FIZO films (Biriktirilen ZO, IZO ve FIZO filmlerine ait XRD desenleri)

Table 1 presents the structural parameters obtained from the XRD patterns. For the calculations of the texture coefficients (TC), crystallite size (D), micro-strain (ϵ), lattice constants in hexagonal crystal structure (a and c) and unit cell volume (V) of all deposited films, the well-known equations: $TC = (I/I_0)/[1/N(\sum I/I_0)]$, $D = K\lambda/\beta cos\theta$, $\varepsilon = \beta cot\theta/4$, $1/d^2 = 4/3\,[(h^2 + hk + k^2)/a^2] + (l^2/c^2)$, and $V = \sqrt{3}/2(a^2c)$ were used, respectively [21,22]. From the terms in these equations: I represent the intensity of the specific diffraction peak, while I_0 denotes the reference intensity obtained from the ICDD database. The total count of diffraction peaks is indicated by N. The shape factor, symbolized as K, is assigned a value of 0.94. The X-ray wavelength is expressed by λ, and full width at half maxima is referred to as β (measured in radians). Additionally, the Bragg angle is denoted by θ (in radians), and the crystallographic directions are represented by the Miller indices h, k, l.

As seen in Table 1, the ZO film exhibits the highest TC value (1.99) for the (002) plane, indicating that the crystals tend to grow along the c-axis perpendicular to the substrate surface preferential orientation. In contrast, IZO and FIZO films display lower TC values (1.04/1.22 and 1.16/1.10 for the (100)/(002) orientations, respectively), suggesting dominant growth along these planes and higher micro-strain, indicative of deformation in the crystal structure. Particularly in the IZO film, the (100) plane exhibits a broader β value (0.5402°), smaller crystallite size (16.0 nm), and higher micro-strain (8.17×10^{-3}). A study by Tubtimtae and Lee attributed the adverse effects on crystallinity in ZnO

films with high In doping concentrations (≥2%) to increased stress caused by the ionic radius mismatch between Zn^{2+} and In^{3+} [23]. In the FIZO film, while F doping positively influences the crystallinity of the IZO film, the crystallite sizes (ranging between 17.5–19.0 nm) are smaller, and microstrain values (6.04×10^{-3} to 7.43×10^{-3}) are relatively higher compared to the ZO film, indicating a lower crystallinity level. These results suggest that F doping partially stabilizes the lattice structure of the IZO film, leading to improved crystallinity. On the other hand, previous studies reported that Al doping in ZnO films significantly alters crystallite sizes due to the ionic radius difference between Al and Zn, whereas F doping causes less pronounced changes in crystallite size due to the similarity between the ionic radii of F^- and O^{2-} [6]. In conclusion, the XRD results indicate that F and In dopant atoms not only successfully integrate into the ZnO lattice but also alter lattice parameters and crystal structure characteristics. Furthermore, it can be inferred that F doping in the F:In co-doped film partially enhances the crystalline order and reduces crystal defects compared to the In-doped film. These results reveal that F:In co-doping is a potential tool to improve the structural properties of ZnO-based films.

Table 1. Key parameters obtained from the structural analysis of the deposited ZO, IZO, and FIZO films
(Biriktirilen ZO, IZO ve FIZO filmlerinin yapısal analizinden elde edilen temel parametreler)

Material	2θ (°)	d (Å)	hkl	β (°)	TC	D (nm)	ε×10^{-3}	a (Å)	c (Å)	c/a	V (Å^3)
ZO	32.27	2.7714	(100)	0.4027	0.77	21.4	6.07	3.212	5.143	1.601	45.98
	34.85	2.5719	(002)	0.4012	1.99	21.6	5.57				
	36.69	2.4473	(101)	0.4790	0.24	18.2	6.30				
IZO	32.17	2.7796	(100)	0.5402	1.04	16.0	8.17	3.219	5.146	1.598	46.19
	34.83	2.5734	(002)	0.5151	1.22	16.9	7.16				
	36.62	2.4513	(101)	0.4714	0.74	18.5	6.21				
FIZO	32.27	2.7714	(100)	0.4929	1.16	17.5	7.43	3.213	5.144	1.600	46.00
	34.85	2.5719	(002)	0.4699	1.10	18.5	6.53				
	36.68	2.4478	(101)	0.4590	0.74	19.0	6.04				

Surface morphology alterations in ZO, IZO, and FIZO films were analyzed using AFM images, as shown in Figure 2. From the AFM images, it can be observed that all films exhibit nearly homogeneous surfaces. Additionally, the bright and dark regions observed across the surfaces correspond to peaks and valleys, respectively, indicating the presence of randomly distributed particles of varying sizes on the surface. During the spraying process using an ultrasonic nozzle, droplet sizes ranging between 10–60 µm contribute to such irregularities on the film surfaces. As indicated in Table 2, the average surface roughness (R_a) of ZO, IZO, and FIZO films was measured to be 13.5 nm, 8.6 nm, and 10.9 nm, respectively. The roughness values indicate that the ZO film has a rougher surface than the other films, while indium doping significantly reduces surface roughness and results in a more uniform structure. However, in the F:In co-doped film, surface roughness increased again. The variations in surface roughness can be correlated with differences in crystallite sizes (ZO= ~22 nm, IZO= ~17 nm, FIZO= ~19 nm). Generally, films with rougher surfaces, such as ZO, tend to have larger crystallites due to reduced grain boundary density, which allows grains to expand more easily. In contrast, the smoother morphology observed in IZO films suggests that grain growth is more constrained, likely due to the lattice strain induced by indium, which restricts atomic mobility. In F:In co-doped films, the slight increase in roughness compared to IZO indicates partial strain relaxation facilitated by fluorine incorporation, leading to a moderate increase in crystallite size.

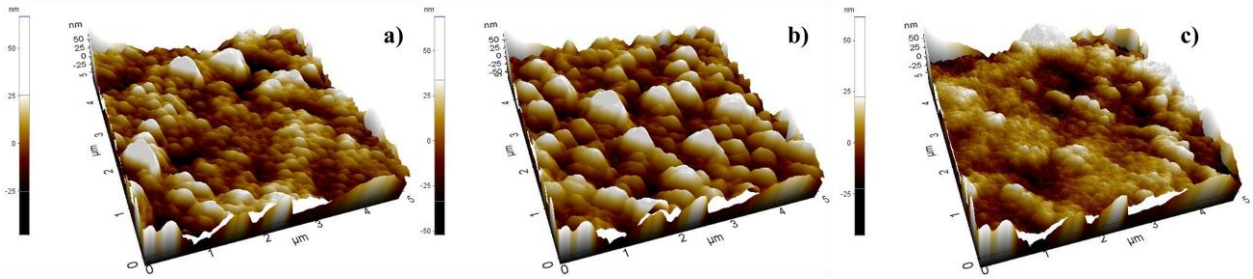


Figure 2. 3D-AFM images of the deposited films: **(a)** ZO, **(b)** IZO, and **(c)** FIZO (Biriktirilen filmlere ait 3D-AFM görüntüleri: **(a)** ZO, **(b)** IZO ve **(c)** FIZO)

Figure 3 shows SEM images taken at 100kX magnification, providing additional insights into the surface textures of the deposited films alongside the AFM results. These SEM images confirm that the films exhibit a nanoparticle-like, homogeneous, and compact structure without any visible voids or cracks across the surface. In ZO films, a surface morphology consisting of randomly oriented grains as well as regular and distinctly plate-like structures is observed. In IZO and FIZO films, it is observed that both In doping and F:In co-doping clearly change the surface morphology and show a transition from plate-like morphology to granular nanostructures. Comparable results for indium doped zinc oxide films fabricated by spray pyrolysis have been highlighted in previous research by Bharath et al. [24]. Additionally, film thicknesses were calculated by averaging five different regions of the cross-sectional images given in Figure 3 using the ImageJ program. The inset cross-sectional SEM images further illustrate the dense and continuous structure of the films, with no visible gaps or irregularities at the substrate-film interface. These images also confirm that the films maintain uniform thickness across different regions, supporting the accuracy of the thickness measurements. The results indicate that the average thicknesses of the ZO, IZO, and FIZO films were 1.08 µm, 1.21 µm, and 1.28 µm, respectively. The findings indicate that the inclusion of dopant atoms increases the film growth rate, resulting in thicker films.

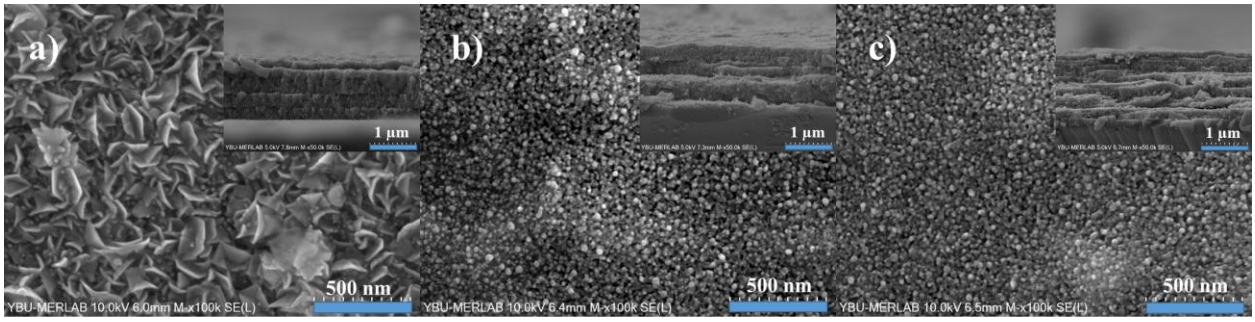


Figure 3. SEM surface images at 100kX magnification and cross-sectional SEM images at 50kX magnification (inset) of the deposited films: **(a)** ZO, **(b)** IZO, and **(c)** FIZO (Biriktirilen filmlere ait 100kX büyütmeli SEM yüzey görüntüleri ve 50kX büyütmeli kesitsel SEM görüntüleri (içine yerleştirilen): **(a)** ZO, **(b)** IZO ve **(c)** FIZO)

Figure 4 presents the EDS spectra obtained to perform elemental analysis of the deposited films. As anticipated, strong signals corresponding to zinc and oxygen elements were detected in all the films. In the ZO film, the atomic percentages of zinc and oxygen were measured at 52.2% and 47.8%, respectively. In the IZO film, the atomic percentage of In was determined to be 1.9%. For the F:In co-doped FIZO films, the dopants were successfully detected, with atomic percentages of In and F measured at 1.0% and 0.6%, respectively. Moreover, the ratios of zinc and oxygen elements in all films were found to closely align with the stoichiometric composition. Despite the low concentrations of the dopant elements, their successful incorporation into the films was confirmed. The low incorporation of In and F into ZnO films is primarily due to the inherent limitations of the spray pyrolysis process. The volatility of precursor compounds, incomplete thermal decomposition, and diffusion rate differences can reduce dopant retention in the film. Fluorine, being highly volatile, may partially evaporate before integrating into the ZnO lattice, while indium incorporation is constrained by its solubility limit in ZnO. Despite these factors, the successful detection of dopants confirms their presence in the film structure.

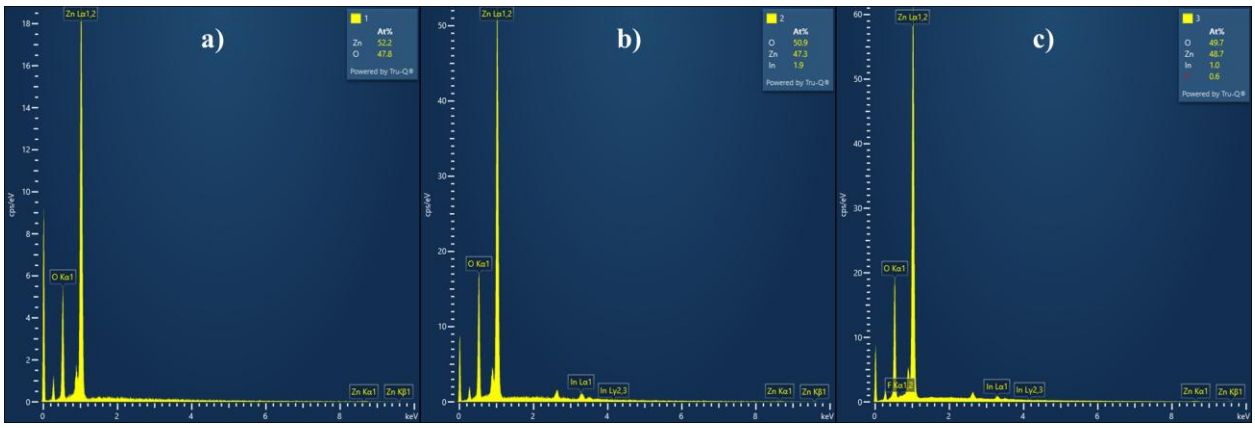


Figure 4. EDS spectra of the deposited films: **(a)** ZO, **(b)** IZO, and **(c)** FIZO (Biriktirilen filmlere ait EDS spektrumları: **(a)** ZO, **(b)** IZO ve **(c)** FIZO)

In Figure 5, optical transmittance spectra of the deposited ZO, IZO, and FIZO films are given, demonstrating that each film maintains a transmittance of at least 80% across the visible spectrum. According to Table 2, the undoped ZO film exhibited an average transmittance of around 84% within the visible wavelength range. However, this value decreased to ~80% with In doping (IZO) and then increased to ~83% with F:In co-doping (FIZO). This variation in transmittance may be attributed to light scattering at grain boundaries, which can occur because of doping. Studies conducted previously have noted comparable trends in similar contexts [14,24].

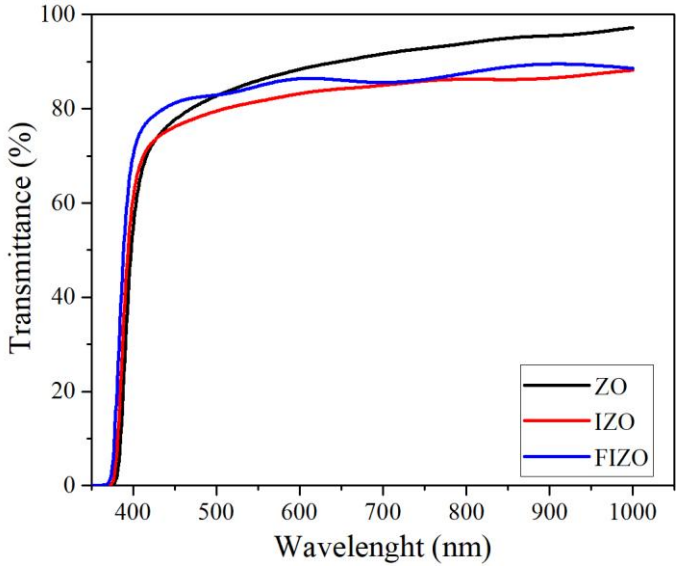


Figure 5. Transmittance spectra belonging to the deposited ZO, IZO, and FIZO films (Biriktirilen ZO, IZO ve FIZO filmlerine ait geçirgenlik spektrumları)

The optical band gap values of the deposited films were determined using the well-known Tauc method. This method, depicted in the $(\alpha h\nu)^2$ versus $h\nu$ graphs in Figure 6(a–c), relies on the relationship given by $(\alpha h\nu)^2 = K(h\nu - E_g)$. In this equation, α denotes the absorption coefficient, $h\nu$ is the photon energy, K is a proportionality constant, and E_g is the optical band gap. Table 2 summarizes the optical band gap values obtained through this method, showing 3.23 eV, 3.28 eV, and 3.32 eV for ZO, IZO, and FIZO films, respectively. The observed band gap widening in the IZO film is likely a consequence of the increased carrier concentration, which induces the Burstein-Moss effect—a phenomenon that will be further examined in the electrical analysis section. The band gap widening is more pronounced in the FIZO films, which is due to the additional free electrons introduced by F doping, further enhancing this effect. Moreover, the results align with data from prior studies, which have also observed an increase in the optical band gap when ZnO films are doped with In or co-doped with F:In [15,25,26]. Such band gap expansion is typically linked to the Burstein-Moss effect, as noted in earlier works [15,19,25]. In addition, localized states may occur within the band gap due to crystal defects or doping atoms, and this may lead to sagging at the band edges. The Urbach energy (E_U

), which reflects the extent of band tailing at the band edges, was calculated from the slope of the lnα versus $h\nu$ plot shown in Figure 6(d–f). This calculation utilizes the well-known relationship $\alpha_0 exp(h\nu/E_U)$, where α_0 is a constant. Urbach energy values were calculated as 75 meV, 82 meV and 79 meV for ZO, IZO and FIZO films, respectively (Table 2). In this context, it has been observed that neither In doping nor F:In co-doping leads to substantial changes in the electronic band irregularities of ZnO films. The slight increase in Urbach energy, on the other hand, can likely be attributed to the dopant-induced defect density, which contributes to structural disorder and enhanced carrier interactions. This observation is corroborated by the micro-strain values obtained from XRD analysis The findings suggest that the optical properties of ZnO films are more effectively enhanced through the F:In co-doping process when compared to solely indium doping.

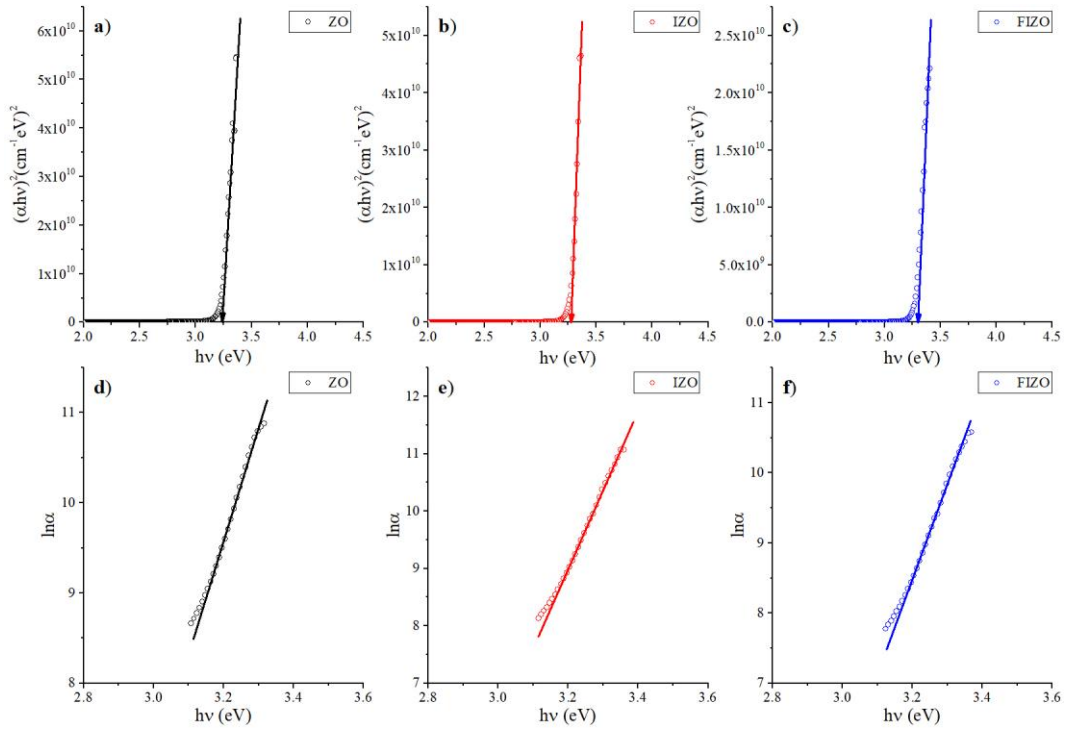


Fig. 6. (a-c) Tauc plots and **(d-f)** Urbach plots of the deposited ZO, IZO and FIZO films (Biriktirilen ZO, IZO ve FIZO filmlerine ait **(a-c)** Tauc grafikleri ve **(d-f)** Urbach grafikleri)

Electrical analyses of the deposited ZO, IZO and FIZO films were performed by taking Hall effect measurements. Table 2 shows electrical resistivity (ρ), sheet resistance (R_S), carrier concentration (N) and carrier mobility (μ) are summarized. In addition, Figure 7 shows the trends observed in these parameters for all deposited films. Hall effect analysis confirmed that all films exhibited *n*-type electrical conductivity. The *n*-type conductivity of undoped ZnO is well-documented in the literature and is attributed to donor defects such as oxygen vacancies (V_O) and zinc interstitials (Zn_i).

Table 2. Key parameters obtained from the optical and electrical analysis of the deposited ZO, IZO, and FIZO films **(**Biriktirilen ZO, IZO ve FIZO filmlerinin optik ve elektrik analizlerinden elde edilen temel parametreler)

Material	T (%)	E_g (eV)	E_U (meV)	ρ (Ωcm)	N (cm^{-3})	μ (cm^2/Vs)	R_S (Ω/sq)	FoM (Ω^{-1})
ZnO	84	3.23	75	2.02×10^{0}	1.03×10^{17}	29.18	1.87×10^{4}	9.35×10^{-6}
IZO	80	3.28	82	7.57×10^{-1}	3.17×10^{17}	12.35	6.26×10^{3}	1.72×10^{-5}
FIZO	83	3.32	79	1.65×10^{-1}	1.14×10^{18}	25.62	1.29×10^{3}	1.20×10^{-4}

As shown in Figure 7 and Table 2, the ZO film exhibits a resistivity of 2.02 Ωcm, a relatively low carrier concentration (1.03×10^{17} cm^{-3}), and a mobility of 29.18 $cm^2/V\cdot s$. The ZO films highest crystallite size (21.6 nm) and lowest micro-strain value (6.07×10^{-3}) observed in the XRD analysis indicate fewer electron scattering centers, supporting its higher mobility. However, the low carrier concentration limits its conductivity. In contrast, the IZO film shows a significant decrease in resistivity (0.757 Ωcm) due to an increase in carrier concentration to 3.17×10^{17} cm^{-3}. This

increase in carrier concentration is attributed to the substitution of Zn^{2+} ions with In^{3+} ions in the ZnO lattice, resulting in additional free electrons being introduced into the conduction band [15,27]. However, the mobility of the IZO film (12.35 cm^2/Vs) is lower compared to the ZO film. This reduction in mobility can be explained by the high micro-strain (8.17×10^{-3}) and smaller crystallite size (16.0 nm) observed in the IZO film, which increase electron scattering, as noted in Table 1. Furthermore, ionized impurity scattering, a phenomenon commonly observed in doped films due to high carrier densities, also contributes to the reduced mobility. In the literature, Kathwate et al. reported that at 4% In doping, the solubility limit of In in ZnO is reached, leading to the formation of scattering centers and an increase in resistivity [15]. However, in this study, a 3% In doping concentration resulted in a significant increase in carrier density and a decrease in resistivity. This implies that In ions are homogeneously distributed within the ZnO structure, enhancing conductivity rather than forming segregations at grain boundaries. Thus, the effects of micro-strain and carrier scattering appear to depend on the doping level and the distribution of ions within the ZnO structure. The FIZO film proves the best electrical performance, with the lowest resistivity (1.65×10^{-1} Ωcm) and the highest carrier concentration (1.14×10^{18} cm^{-3}). This improvement can be attributed to the substitution of Zn^{2+} ions by In^{3+} and O^{2-} ions by F^- in the ZnO lattice, creating additional donor defects [8,14,28]. Previous studies have reported that fluorine forms chemical bonds with Zn interstitials, reducing intrinsic defects and increasing carrier concentration [14,28]. Moreover, the mobility of the FIZO film (25.62 cm^2/Vs) is higher than that of the IZO film, which has a lower carrier density. This improvement is supported by fluorine's ability to passivate dangling bonds at grain boundaries, reduce electron scattering, and stabilize the crystal lattice by lowering micro-strain (7.43×10^{-3}) [14,28]. Additionally, fluorine's ability to slightly increase the crystallite size (17.5 nm) and promote a more homogeneous structure further enhances its positive impact on mobility.

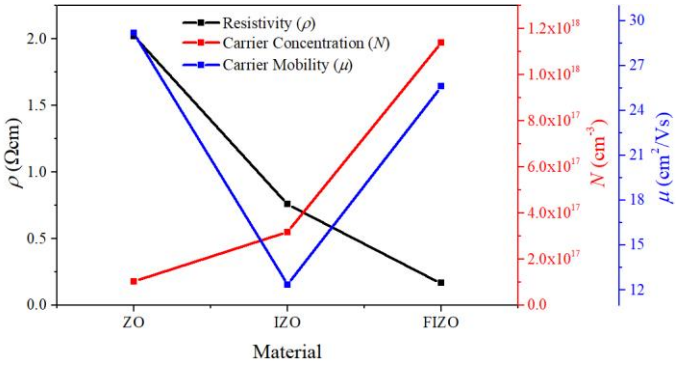


Figure 7. Variation graphs of electrical resistivity, carrier concentration and carrier mobility of the deposited ZO, IZO and FIZO films (Biriktirilen ZO, IZO ve FIZO filmlerine ait elektriksel özdirenç, taşıyıcı konsantrasyonu ve taşıyıcı mobilitesi değişim grafikleri)

The figure of merit (FoM; ϕ) value used in the evaluation of the usability of the material as TCO and suggested by Haacke [29] was calculated in accordance with the equation $\phi = T^{10}/R_S$. Here, T is the average transmittance in the range of 400-700 nm and R_S represents the sheet resistance. The sheet resistance values were determined as 1.87×10^4 Ω/sq in the ZO film, 6.26×10^3 Ω/sq in the IZO film and 1.29×10^3 Ω/sq in the FIZO film. In this context, according to Table 2, FIZO films show the highest FoM value at 1.20×10^{-4} Ω^{-1}, with IZO and ZO films following at 1.72×10^{-5} Ω^{-1} and 9.35×10^{-6} Ω^{-1}, respectively. While the IZO films demonstrated improved performance compared to ZnO in terms of FoM, the FIZO film produced the best result, making it the most suitable for opto-electronic applications. These results indicate that F:In co-doping significantly improves the electrical performance of ZnO films. The FIZO films exhibit the highest carrier density, lowest resistivity, lowest sheet resistance, and highest FoM value, effectively combining superior opto-electrical properties. The findings emphasize the potential of FIZO films in opto-electronic technologies, with specific applications in energy harvesting and display systems.

4. CONCLUSIONS (SONUÇLAR)

In this study, the effect of F:In co-doping strategy on the physical properties of ZnO films was investigated comprehensively. The results reveal that the co-doping approach has significant changes on both structural and opto-electronic properties. Structural analyses revealed that F:In co-doping stabilizes the ZnO crystal structure and reduces

crystal defects compared to In doping alone. Morphological analyses showed that FIZO films exhibit granular nanostructures and decreased surface roughness compared to undoped ZO films. In electrical analyses, it was found that the carrier concentration in FIZO films increased approximately 11-fold and reached 1.14×10^{18} cm^{-3}, and the electrical resistivity decreased to the lowest level of 1.65×10^{-1} Ωcm. This improvement is attributed to F doping, which passivates oxygen vacancies and enhances carrier mobility, thereby reducing electron scattering in the ZnO structure. Optical analyses wrote down that FIZO films optimize opto-electronic performance by achieving high transparency (~83%) and relatively low sheet resistance (1.29×10^{3} Ω/sq). The calculated figure of merit (FoM) value of 1.20×10^{-4} Ω^{-1} confirms that FIZO films deliver the best performance for opto-electronic devices. In conclusion, this study provides a significant scientific foundation for the potential use of FIZO films in technologies such as photovoltaic devices, high-resolution displays, and LEDs. The findings highlight the promise of F:In co-doped ZnO films deposited via the USP technique—a rarely studied approach in the literature—for low-cost, high-performance transparent conductive electrodes and other opto-electronic applications.

ACKNOWLEDGMENTS (TEŞEKKÜR)

I would like to thank Assoc. Prof. Dr. Emrah SARICA, faculty member of the Electrical and Electronics Engineering Department of Başkent University, for providing laboratory facilities and support in conducting the Hall effect measurements.

Hall etkisi ölçümlerinin gerçekleştirilmesinde sağladığı laboratuvar imkânları ve desteği için, Başkent Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü öğretim üyesi Doç. Dr. Emrah Sarıca'ya, teşekkürlerimi sunarım.

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)

***Ibrahim GUNES*:** He conducted the experiments, analyzed the results and performed the writing process.

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

CONFLICT OF INTEREST (ÇIKAR ÇATIŞMASI)

There is no conflict of interest in this study.

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

REFERENCES (KAYNAKLAR)

[1] A.H. Ali, Z. Hassan, A. Shuhaimi, Enhancement of optical transmittance and electrical resistivity of post-annealed ITO thin films RF sputtered on Si, Appl. Surf. Sci. 443 (2018) 544–547.

[2] H. Liu, H. Li, J. Tao, J. Liu, J. Yang, J. Li, J. Song, J. Ren, M. Wang, S. Yang, X. Song, Y. Wang, Single Crystalline Transparent Conducting F, Al, and Ga Co-Doped ZnO Thin Films with High Photoelectrical Performance, ACS Appl. Mater. Interfaces. 15 (2023) 22195–22203.

[3] Ü. Özgür, Y.I. Alivov, C. Liu, A. Teke, M.A. Reshchikov, S. Doğan, V. Avrutin, S.J. Cho, H. Morkoç, A comprehensive review of ZnO materials and devices, J. Appl. Phys. 98 (2005) 1–103.

[4] H. Benali, B. Hartiti, F. Lmai, A. Batan, S. Fadili, P. Thevenin, Synthesis and characterization of Al-doped ZnO thin-films for photovoltaic applications, Mater. Today Proc. (2024).

[5] R.S. Ajimsha, A.K. Das, P. Misra, M.P. Joshi, L.M. Kukreja, R. Kumar, T.K. Sharma, S.M. Oak, Observation of low resistivity and high mobility in Ga doped ZnO thin films grown by buffer assisted pulsed laser deposition, J. Alloys Compd. 638 (2015) 55–58.

[6] K.M. Kang, Y. Wang, M. Kim, C. Lee, H.H. Park, Al/F codoping effect on the structural, electrical, and optical properties of ZnO films grown via atomic layer deposition, Appl. Surf. Sci. 535 (2021) 147734.

[7] B.Y.R.D. Shannon, M. H, N.H. Baur, O.H. Gibbs, M. Eu, V. Cu, Revised Effective Ionic Radii and Systematic Studies of Interatomie

Distances in Halides and Chaleogenides, Acta Cryst. A32 (1976) 751–767.

[8] T.H. Nguyen, A.T.T. Pham, T.N. Le Pham, T.M. Le, T.T. Duong, D. Van Hoang, K.D. Nguyen, T.D.T. Ung, T.B. Phan, V.C. Tran, Co-doping effects of fluorine and indium on ZnO transparent electrode films, Ceram. Int. 50 (2024) 16698–16703.

[9] G. Zheng, J. Song, J. Zhang, J. Li, B. Han, X. Meng, F. Yang, Y. Zhao, Y. Wang, Investigation of physical properties of F-and-Ga co-doped ZnO thin films grown by RF magnetron sputtering for perovskite solar cells applications, Mater. Sci. Semicond. Process. 112 (2020) 105016.

[10] F.H. Hsu, N.F. Wang, Y.Z. Tsai, M.C. Chuang, Y.S. Cheng, M.P. Houng, Study of working pressure on the optoelectrical properties of Al-Y codoped ZnO thin-film deposited using DC magnetron sputtering for solar cell applications, Appl. Surf. Sci. 280 (2013) 104–108.

[11] G. V. Colibaba, D. Rusnac, V. Fedorov, P. Petrenko, E. V. Monaico, Low-temperature sintering of highly conductive ZnO:Ga:Cl ceramics by means of chemical vapor transport, J. Eur. Ceram. Soc. 41 (2021) 443–450.

[12] Y.J. Choi, K.M. Kang, H.H. Park, Anion-controlled passivation effect of the atomic layer deposited ZnO films by F substitution to O-related defects on the electronic band structure for transparent contact layer of solar cell applications, Sol. Energy Mater. Sol. Cells. 132 (2015) 403–409.

[13] E.F. Keskenler, G. Turgut, S. Doğan, Investigation of structural and optical properties of ZnO films co-doped with fluorine and indium, Superlattices Microstruct. 52 (2012) 107–115.

[14] A. Hadri, M. Taibi, M. Loghmarti, C. Nassiri, T. Slimani Tlemcąni, A. Mzerd, Development of transparent conductive indium and fluorine co-doped ZnO thin films: Effect of F concentration and post-annealing temperature, Thin Solid Films. 601 (2016) 7–12.

[15] L.H. Kathwate, V.D. Mote, Optical and Electrical Properties of In-doped ZnO Films via the Spray Pyrolysis Technique for Optoelectronics Device Applications, J. Electron. Mater. 51 (2022) 6894–6902.

[16] I. Gunes, E. Sarica, V. Bilgin, Enhancing Physical Properties: Chromium-Doped Zinc Oxide Thin Films Deposited by Ultrasonic Spray Pyrolysis, Tekirdag Namik Kemal Univ. Inst. Nat. Appl. Sci. 2 (2023) 62–70.

[17] O.G. Morales-Saavedra, L. Castañeda, J.G. Bañuelos, R. Ortega-Martínez, Morphological, optical, and nonlinear optical properties of fluorine-indium-doped zinc oxide thin films, Laser Phys. 18 (2008) 283–291.

[18] I. Gunes, Enhancing π-SnS thin films and fabrication of p-SnS/n-Si heterostructures through flow rate control in ultrasonic spray pyrolysis for improved photovoltaic performance, Appl. Phys. A. 130 (2024) 574.

[19] F. Yang, J. Song, X. Chen, X. Lu, J. Li, Q. Xue, B. Han, X. Meng, J. Li, Y. Wang, Ultrasonic spray pyrolysis-induced growth of highly transparent and conductive F, Cl, Al, and Ga co-doped ZnO films, Sol. Energy. 228 (2021) 168–174.

[20] T.H. Huang, P.K. Yang, D.H. Lien, C.F. Kang, M.L. Tsai, Y.L. Chueh, J.H. He, Resistive memory for harsh electronics: Immunity to surface effect and high corrosion resistance via surface modification, Sci. Rep. 4 (2014) 1–5.

[21] S.S. Shinde, P.S. Shinde, S.M. Pawar, A. V. Moholkar, C.H. Bhosale, K.Y. Rajpure, Physical properties of transparent and conducting sprayed fluorine doped zinc oxide thin films, Solid State Sci. 10 (2008) 1209–1214.

[22] B.D. Cullity, Elements of X-Ray Diffraction, Addison-Wesley Publishing Company, Inc., 1956.

[23] A. Tubtimtae, M.W. Lee, ZnO nanorods on undoped and indium-doped ZnO thin films as a TCO layer on nonconductive glass for dye-sensitized solar cells, Superlattices Microstruct. 52 (2012) 987–996.

[24] S.P. Bharath, K. V. Bangera, G.K. Shivakumar, Enhanced gas sensing properties of indium doped ZnO thin films, Superlattices Microstruct. 124 (2018) 72–78.

[25] P. Dhamodharan, J. Chen, C. Manoharan, Fabrication of In doped ZnO thin films by spray pyrolysis as photoanode in DSSCs, Surfaces and Interfaces. 23 (2021) 100965.

[26] T. V. Vimalkumar, N. Poornima, K.B. Jinesh, C.S. Kartha, K.P. Vijayakumar, On single doping and co-doping of spray pyrolysed ZnO films: Structural, electrical and optical characterisation, Appl. Surf. Sci. 257 (2011) 8334–8340.

[27] P. Nuthongkum, P. Yansakorn, K. Chongsri, R. Noonuruk, P. Junlabhut, Improvement of structural, optical and electrical properties of indium-doped ZnO nanoparticles synthesized by Co-precipitation method, J. Mater. Sci. Mater. Electron. 34 (2023) 1–10.

[28] A.T.T. Pham, N.M. Ngo, O.K.T. Le, D. Van Hoang, T.H. Nguyen, T.B. Phan, V.C. Tran, High-mobility sputtered F-doped ZnO films as good-performance transparent-electrode layers, J. Sci. Adv. Mater. Devices. 6 (2021) 446–452.

[29] G. Haacke, New figure of merit for transparent conductors *, J. Appl. Phys. 47 (1976) 4086–4089.

Gazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Dergisi
PART C: TASARIM VE TEKNOLOJİ

Gazi University
Journal of Science
PART C: DESIGN AND TECHNOLOGY

GU J Sci, Part C, 13(2): 579-591 (2025)

Innovative Automated Manual Transmission (AMT) System for Bicycles: Design, Implementation and Control

Ahmet KAĞIZMAN[1*] Fehmi Can AY[2] Bengisu KILINÇ[2] Talha Enes ERCAN[2] Volkan SEZER[3]

[1*]*Kırklareli University, Faculty of Technology, Department of Mechatronic Engineering, Kırklareli, Turkey*

[2]*Istanbul Technical University, Department of Mechatronic Engineering, Istanbul, Turkey*

[3]*Istanbul Technical University, Department of Control and Automation Engineering, Smart and Autonomous System Laboratory (SASlab), Istanbul, Turkey*

Article Info

Research article
Received: 18/01/2025
Revision: 15/03/2025
Accepted: 22/03/2025

Keywords

Automated Manual Transmission (AMT)
Manual Transmission System
Intelligent Shifting
Multiple Driving Modes
Bicycle

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 18/01/2025
Düzeltme: 15/03/2025
Kabul: 22/03/2025

Anahtar Kelimeler

Otomatikleştirilmiş Manuel Şanzıman (AMT)
Manuel Şanzıman Sistemi
Akıllı Vites Değiştirme
Çoklu Sürüş Modu
Bisiklet

Graphical/Tabular Abstract (Grafik Özet)

In this study, an AMT system that automates manual gear shifting on bicycles has been developed, high accuracy performance has been achieved by determining and implementing gear changes with sensor data, and the system's user-friendly and low-cost design has been successfully tested. / Bu çalışmada bisikletlerde manuel vites değişimini otomatik hale getiren bir AMT sistemi geliştirilmiş, vites değişimlerinin sensör verileriyle belirlenip uygulanmasıyla yüksek doğruluk performansı elde edilmiş, sistemin kullanıcı dostu ve düşük maliyetli tasarımı başarıyla test edilmiştir.

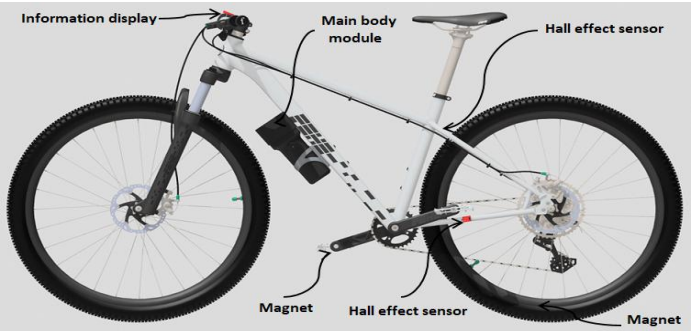


***Figure A**: Proposed AMT system /**Şekil A:** Önerilen AMT Sistemi*

Highlights (Önemli noktalar)

- *Implementation of Automated Manual Transmission (AMT) systems to bicycles / Otomatikleştirilmiş Manuel Şanzıman (AMT) sisteminin bisikletlerde uygulanabilirliği*
- *Automating manual gear shifts with an intelligence-based system / Zekâ tabanlı sistemle manuel vites değişimlerinin otomatikleştirilmesi*
- *High-accuracy gear shifts using sensor data / Sensör verileri ile yüksek doğrulukta vites geçişlerinin gerçekleştirilmesi*

***Aim (Amaç):** This study aims to develop an innovative Automated Manual Transmission (AMT) system that automates manual gear shifting on bicycles. / Bu çalışma, bisikletlerde manuel vites değişimini otomatik hale getiren yenilikçi bir Otomatikleştirilmiş Manuel Şanzıman (AMT) sistemi geliştirmeyi amaçlamaktadır.*

***Originality (Özgünlük):** This study presents a unique algorithm for achieving seamless and efficient gear shifts, a mechatronic system design adaptable to different types of bicycles, and multiple driving modes (eco, normal, sport) to optimize driving performance and comfort. / Bu çalışma, kesintisiz ve verimli vites geçişleri elde etmek için benzersiz bir algoritma, farklı bisiklet türlerine uyarlanabilen bir mekatronik sistem tasarımı ve sürüş performansını ve konforunu optimize etmek için çoklu sürüş modları (eko, normal, spor) sunmaktadır.*

***Results (Bulgular):** The findings confirmed the reliability of the developed AMT system, demonstrating its ability to process sensor data, execute gear shifts accurately under various driving conditions, and deliver real-time information to the user. / Bulgular, geliştirilen AMT sisteminin güvenilirliğini doğrulamış, sensör verilerini işleme, çeşitli sürüş koşullarında vites değiştirme işlemlerini doğru bir şekilde gerçekleştirme ve kullanıcıya gerçek zamanlı bilgi sunma yeteneğini göstermiştir.*

***Conclusion (Sonuç):** This study successfully developed and validated an intelligent AMT system for bicycles, proving its reliability and accuracy in automating manual gear shifts through sensor-driven data and extensive testing. / Bu çalışma, sensör odaklı veriler ve kapsamlı testler yoluyla manuel vites değiştirmeyi otomatikleştirmedeki güvenilirliğini ve doğruluğunu kanıtlayarak bisikletler için akıllı bir AMT sistemini başarıyla geliştirmiş ve doğrulamıştır.*

*Corresponding author, e-mail: kagizman@itu.edu.tr
DOI: 10.29109/gujsc.1622406

GU J Sci, Part C, 13(2): 579-591 (2025)

Gazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Dergisi
PART C: TASARIM VE TEKNOLOJİ

Gazi University
Journal of Science
PART C: DESIGN AND TECHNOLOGY

http://dergipark.gov.tr/gujsc

Innovative Automated Manual Transmission (AMT) System for Bicycles: Design, Implementation and Control

Ahmet KAĞIZMAN[1*] Fehmi Can AY[2] Bengisu KILINÇ[2] Talha Enes ERCAN[2] Volkan SEZER[3]

[1]*Kırklareli University, Faculty of Technology, Department of Mechatronic Engineering, Kırklareli, Turkey*

[2]*Istanbul Technical University, Department of Mechatronic Engineering, Istanbul, Turkey*

[2]*Istanbul Technical University, Department of Control and Automation Engineering, Smart and Autonomous System Laboratory (SASlab), Istanbul, Turkey*

Article Info

Research article
Received: 18/01/2025
Revision: 15/03/2025
Accepted: 22/03/2025

Keywords

Automated Manual Transmission (AMT)
Manual Transmission System
Intelligent Shifting
Multiple Driving Modes
Bicycle

Abstract

In recent years, the bicycle industry has experienced remarkable advancements through the incorporation of innovative technologies and transformative design principles. In this context, the Automated Manual Transmission (AMT) system, widely adopted in the automotive sector, represents a critical technological milestone. These systems have offered many advantages, such as increased fuel efficiency, reduced operating costs, and increased user comfort in motor vehicles by automating traditional manual transmissions through advanced electronic components and actuators, and have thus gained wide acceptance in the sector. Despite this proven success in the automotive industry, the applicability of a similar system in bicycles remains an under-researched area, which constitutes a significant gap in the development of technological innovations in the bicycle industry. This study presents the development of an innovative gear-shifting system that automates the traditional manual gear-shifting process on bicycles with an intelligence-based system. The system, which autonomously determines optimal gear shifts by processing data obtained from sensors and implements these decisions with an integrated actuator mechanism, enables manual transmission bicycles to be practically converted to automatic transmission. Notable for its compact design, low cost, and user-friendly assembly, this system also optimizes performance and comfort by offering multiple riding modes that dynamically adapt to user preferences or changing riding conditions. The developed system has been integrated into a manual transmission bicycle and thoroughly tested, with its ability to perform automatic gear shifts with high accuracy scientifically proven.

Manuel Bisikletler için Yenilikçi Otomatikleştirilmiş Manuel Şanzıman (AMT) Sistemi: Tasarım, Uygulama ve Kontrol

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 18/01/2025
Düzeltme: 15/03/2025
Kabul: 22/03/2025

Anahtar Kelimeler

Otomatikleştirilmiş Manuel Şanzıman (AMT)
Manuel Şanzıman Sistemi
Akıllı Vites Değiştirme
Çoklu Sürüş Modu
Bisiklet

Öz

Son yıllarda bisiklet endüstrisi, yenilikçi teknolojilerin ve dönüştürücü tasarım ilkelerinin bir araya getirilmesiyle kayda değer ilerlemeler kaydetmiştir. Bu bağlamda, otomotiv sektöründe yaygın olarak kullanılan Otomatikleştirilmiş Manuel Şanzıman (AMT) sistemi, önemli bir teknolojik dönüm noktasını temsil etmektedir. Bu sistemler, gelişmiş elektronik bileşenler ve eyleyiciler aracılığıyla geleneksel manuel şanzımanların otomatikleştirilmesiyle motorlu taşıtlarda yakıt verimliliğinin artması, işletme maliyetlerinin azalması, kullanıcı konforunun artması gibi pek çok avantaj sunmuş ve sektörde geniş kabul görmüştür. Otomotiv sektöründeki bu kanıtlanmış başarıya rağmen, benzer bir sistemin bisikletlerde uygulanabilirliği yeterince incelenmemiş bir alan olarak kalmakta ve bu durum, bisiklet endüstrisinde teknolojik yeniliklerin geliştirilmesi açısından önemli bir eksiklik oluşturmaktadır. Bu çalışma, bisikletlerde geleneksel yöntemlerle manuel şekilde gerçekleştirilen vites değiştirme sürecini, zekâ tabanlı bir sistemle otomatikleştiren yenilikçi bir vites değiştirme sisteminin geliştirilmesini sunmaktadır. Sensörlerden elde edilen verileri işleyerek optimal vites geçişlerini otonom bir şekilde belirleyen ve bu kararları entegre bir eyleyici mekanizmasıyla uygulayan sistem, manuel şanzımanlı bisikletlerin pratik bir şekilde otomatik vitese dönüştürülmesini sağlamaktadır. Kompakt tasarımı, düşük maliyeti ve kullanıcı dostu montajıyla dikkat çeken bu sistem, aynı zamanda kullanıcı tercihlerine veya değişen sürüş koşullarına dinamik olarak uyum sağlayan birden fazla sürüş modu sunarak performansı ve konforu da optimize etmektedir. Geliştirilen sistem, manuel şanzımanlı bir bisiklete entegre edilmiş ve kapsamlı bir şekilde test edilmiş olup, otomatik vites geçişlerini yüksek doğrulukla gerçekleştirebildiği bilimsel olarak kanıtlanmıştır.

*Corresponding author, e-mail: kagizman@itu.edu.tr
DOI: 10.29109/gujsc.1622406

1. INTRODUCTION (GİRİŞ)

Bicycles offer profound advantages, including enhancing cardiovascular and musculoskeletal health, reducing environmental impact through sustainable transportation, and serving as an economically viable alternative to motorized vehicles [1-3]. Furthermore, bicycles offer a cost-effective mode of transportation compared to motorized vehicles, requiring less maintenance and no fuel costs, which makes them an attractive option for individuals seeking affordable mobility solutions. Their versatility allows them to be used for various purposes, ranging from urban commuting to recreational activities, making them a cornerstone in addressing environmental challenges and promoting public health initiatives [4]. However, despite these numerous benefits, traditional bicycles with manual gear-shifting mechanisms present significant challenges. Drivers are often required to adjust gears frequently to adapt to varying terrains, which can disrupt the riding experience. These frequent gear shifts demand not only physical effort but also a high level of mental focus, which can lead to diminished performance and increased fatigue, particularly during long rides or intense cycling sessions. Moreover, such frequent shifting can be impractical in fast-paced urban environments or during recreational activities, where ease of use and seamless transitions are paramount for maintaining optimal cycling efficiency and driver comfort. While ensuring optimal gear efficiency and comfort is essential, it is equally important to define these concepts accurately. The human body expends energy during any physical activity, triggering various physiological response mechanisms. Studies have shown that an increase in heart rate induces physiological effects such as perspiration, alterations in blood flow velocity, and temperature fluctuations, which may be perceived as discomforting factors [5]. These effects can be considered as elements that can negatively affect comfort during riding. In this context, a comfortable cycling experience is inherently linked to minimizing physical exertion and mitigating these physiological responses. The most effective way to achieve this goal is to optimize gear change processes in a way that requires the user to spend the minimum effort. To address these limitations, integrating Automated Manual Transmission (AMT) systems into bicycles presents a promising solution that can significantly enhance the cycling experience [6-11].

AMT systems, which seamlessly integrate the precision of manual transmissions with the convenience of automatic systems, achieve gear shifts through advanced electronic controllers and actuator mechanisms [12-14]. When these systems are implemented on bicycles, they eliminate frequent manual adjustments, enhancing convenience, efficiency, and comfort. They ensure smooth gear transitions and reduce driver fatigue by utilizing real-time data from sensors capable of measuring parameters such as terrain slope, wheel speed, and pedal cadence [15-17]. In addition to environmental parameters such as terrain slope, wheel speed, and pedal cadence, recent studies have explored integrating user-specific physiological data into the gear-shifting process. These systems are designed to adapt not only to external conditions but also to the driver's physiological state, such as heart rate, body temperature, and even metabolic rate. By incorporating sensors that track these variables, the system can respond to the driver's fatigue level, improving overall performance and ensuring a more personalized cycling experience. For example, some studies have proposed gear-shifting systems that adapt based on heart rate variations, adjusting the gear ratio to optimize the driver's effort during increased physical exertion [18,19]. This not only improves the ride's efficiency but also ensures that the driver's body is not overly strained, thus enhancing comfort and performance throughout the cycling session.

In this study, a sensor-based intelligent automatic gear shifting system that minimizes the physical and cognitive load of gear shifting in manual gear bicycles and also aims to increase riding performance has been developed and tested on a manual bicycle. The system determines the most appropriate gear-shifting decisions autonomously by processing real-time data from sensors that measure parameters such as wheel speed, pedal cadence, and terrain slope. In addition, multiple riding modes (eco mode, normal mode, and sport mode) are defined, providing an experience suitable for user preference or automatically perceived riding conditions. This feature provides a significant advantage in terms of both saving energy and increasing user comfort. In addition, the fact that the system is low-cost and can be easily installed on any manual-gear bicycle makes it possible for it to appeal to a wide range of users.

The contributions of this paper are summarized as follows:

- This study presents a simple but effective algorithm for achieving seamless and efficient gear shifts and a unique mechatronic system design that will enable this algorithm.

- It includes adaptive riding modes (Standard, Eco, Sport) for personalized and environment-specific gear shifting.

- It delivers a lightweight, cost-effective, and modular system that can be easily integrated into existing bicycles, ensuring accessibility and ease of use for a wide audience.

The structure of this paper is organized as follows: Section 2 details the mechanical and electronic design of the system. Section 3 covers the mathematical model, control mechanisms, and algorithms implemented. The experimental tests and their outcomes are discussed in Section 4. Finally, Section 5 presents the conclusions drawn from the study and outlines potential directions for future research.

2. MECHANICAL AND ELECTRONIC DESIGN (MEKANİK VE ELEKTRONİK TASARIM)

In this section, to carry out the system's mechanical design correctly and efficiently, the electronic components to be used were first defined, and a bicycle model suitable for integrating these components was designed. The visual representation of this bicycle, modeled using SolidWorks software, is presented in Figure 1.



Figure 1. Bicycle design (Bisiklet tasarımı)

The developed system consists of three basic modules that work in an integrated manner. The first module consists of the main body module, which contains the actuators, control unit, and electronic components, and is designed to be compatible with the water bottle positioning area of all bicycle models. The second module includes an information display positioned on the handlebar and provides the user with instant data tracking. The third module consists of Hall effect sensors (KY-003) positioned to measure the rotation speed of the pedals and wheels. This modular structure is designed to increase the flexibility of the system and its compatibility with different types of bicycles.

The main body module, designed to be integrated into all types of bicycles, contains two actuators (HS-755MG) to perform gear-shifting operations. On the actuator, there are gear adjustment levers and two shift cables fixed to them. These levers allow the gear to be increased or decreased by manipulating the shift cables. There is also an IMU sensor (MPU6050) in the main body module to ensure that the system can effectively perform automatic gear shifting in various road scenarios by receiving instantaneous acceleration and slope data. The main body module of the developed system is shown in Figure 2.



Figure 2. Main body module (Ana gövde modülü)

The information display integrated on the handlebar conveys critical riding parameters such as the bicycle's gear status, speed, and inclination to the user during the ride. Instant acceleration and slope data are obtained from the MPU6050 sensor module, while gear information is obtained through Hall effect sensors, and this data is visually presented to the driver via the Organic Light-Emitting Diode (OLED) display. The OLED display is controlled via the Arduino Nano microcontroller with a ready-made OLED library using the I²C protocol and functions as a human-machine interface (HMI) that provides feedback to the driver. This structure aims to optimize the interaction between the driver and the system while enhancing the overall riding experience. The designed information display is shown in Figure 3.

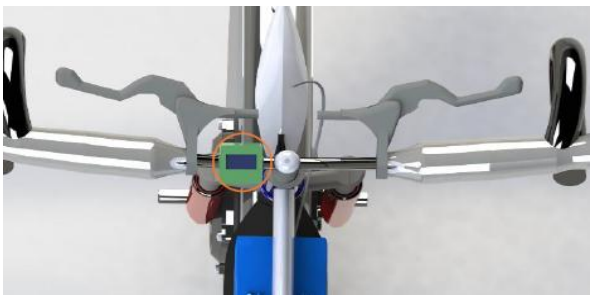


Figure 3. Information display (Bilgi ekranı)

To measure the revolutions per minute (RPM) values of the back and front derailleur, two magnets, one fixed to the rim of the back wheel and the other to the crank arm of the bicycle, and two Hall effect sensors fixed parallel to the body of the bicycle are used. The magnets enable the measurement of revolutions by triggering the sensors at each revolution. Since different riding scenarios (like riding downhill without pedaling) needed to be evaluated, both pedal and wheel revolutions were measured. In this direction, the sensors and magnets are positioned to collect data bi-directionally. The positions of the magnets and sensors on the bicycle are shown in Figure 4.

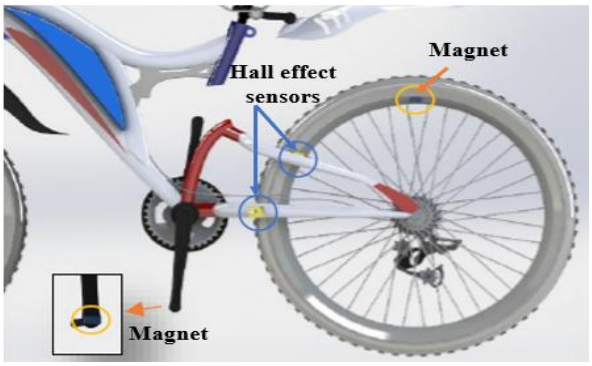


Figure 4. Positions of the magnets and Hall effect sensors (Mıknatıs ve Hall etkisi sensörlerinin konumları)

The final positions of the AMT system, consisting of the main body module, information display, Hall effect sensors, and magnets on a bicycle, are shown in Figure 5 [20].

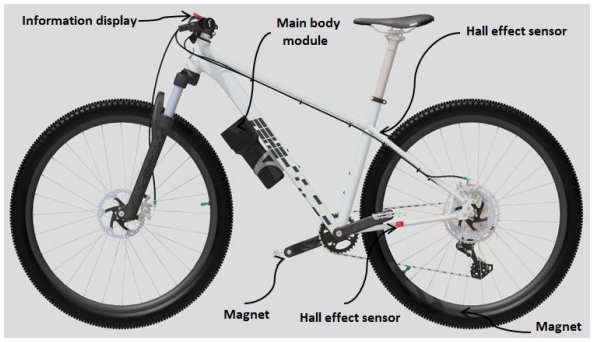


Figure 5. General components of the system (Sistemin genel bileşenleri)

The developed device was fabricated using 3D printing technology with various thermoplastic materials. This technology enables the rapid and cost-effective production of parts with complex geometries. Furthermore, it allows for easier design modification implementation than traditional manufacturing methods. The main body module, information display, and sensor apparatus of the AMT system were manufactured using Tough PLA material. The material used in producing the gear adjustment levers on the actuator is important in providing an efficient system for power transfer. Therefore, in producing these parts, the PC/ABS FR material, which offers high strength and wear resistance, has been preferred [21]. In post-production, any observed defects in the components were rectified to ensure proper system functionality.

The electronic design of the system developed in this study has been carried out in detail to ensure the harmonious operation of integrated components and to optimize system performance. A special circuit board has been designed and manufactured on the EAGLE platform for the integration of electronic components. The power supply of the system is provided by an 11.1 V lithium polymer battery located in the main body module. A voltage measuring device and a buzzer have been integrated into the system to prevent damage to the lithium polymer battery due to over-discharging and to extend its service life. These components provide an audible warning to the user when the battery falls below the critical threshold value, ensuring that the battery is charged on time. In addition, a voltage regulator is used in the system to reduce the voltage provided by the power supply to the levels required by the actuators and other electronic components. The control unit of the system is built on the Arduino Nano microcontroller. Arduino Nano was preferred because it is suitable for 5V operating voltage and supports analog data reading and I²C communication. Furthermore, the fact that it has a compact size that will fit into the limited space of the bicycle and that it offers a sufficient number of pins for the study are the reasons for this choice. This microcontroller processes the input data, executes the gear-shifting algorithm, and provides overall system control. The information display used for user feedback communicates with Arduino Nano via I²C protocol and acts as a human-machine interface (HMI). The OLED screen visually presents the necessary information to help the user understand the status of the system and make informed decisions while riding.

The sensor infrastructure of the system is designed to collect data suited to various riding scenarios and to develop decision-making mechanisms that ensure

safe riding. The MPU6050 sensor card, which is a six-axis inertial measurement unit (IMU), communicates with the microcontroller via the I²C protocol and measures slope, yaw, and roll movement values. This data is used to increase riding safety by restricting gear changes, especially in risky situations such as cornering. The cadence values (revolutions per minute) of both the pedals and the wheels are measured using two Hall effect sensors and two magnets. These sensors read one value from the integrated magnets every time they rotate. These measurements are critical for evaluating riding performance and supporting the system's algorithm. The flow chart of the electronic components of the system is shown in Figure 6.

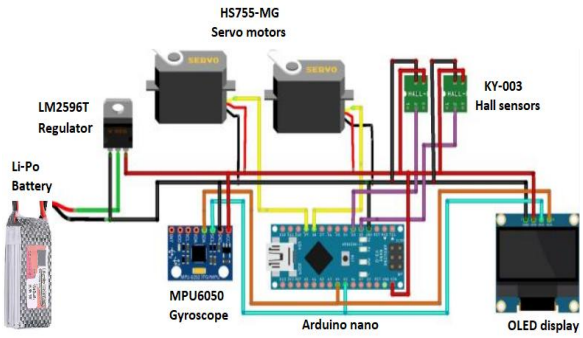


Figure 6. Flow chart of the electronic components
(Elektronik bileşenlerin akış şeması)

3. MATHEMATICAL MODEL, CONTROL STRATEGY, AND ALGORITHMIC DESIGN
(MATEMATİKSEL MODEL, KONTROL STRATEJİSİ VE ALGORITMA TASARIMI)

3.1 Mathematical Model and Control Strategy
(Matematiksel Model ve Kontrol Stratejisi)

The operational algorithm of the system is based on a closed-loop feedback mechanism, with the gear-shifting process being controlled and regulated by this mechanism (Figure 9). The system determines the appropriate gear by analyzing data collected from sensors, including the wheel's revolutions (n), the pedal's cadence (p), and the bicycle's slope angle value ($\%\delta$). Under normal conditions (on a flat route), a typical pedaling cadence required to propel the bicycle is around 80 revolutions per minute. In first gear, a single pedal revolution generally results in the wheel completing approximately 0.5 to 0.7 revolutions. These values are subject to change based on the specific gear ratios and wheel dimensions of the bicycle.

The relationship between the wheel's revolutions (n), the pedal's cadence (p), and the gear configuration is defined by Equation 1, where α and β denote the front and back gear ratios, respectively. This equation establishes a specific range for n based on the input parameters. If the computed value of n falls below the lower threshold of the range, a gear downshift is initiated to optimize performance. Conversely, if the calculated value surpasses the upper threshold, a gear upshift is executed to maintain the desired operational efficiency.

$$n = \mathrm{p}\,\alpha\,\beta \tag{1}$$

The ratio (r) utilized to determine the required range of wheel revolutions is calculated using Equation 2. This ratio serves as a critical parameter for converting pedal cadence into wheel revolutions. Furthermore, the r ratio, as defined in Equation 2, varies across different gear transitions, thereby facilitating the optimization of gear-shifting operations.

$$r = \frac{\alpha}{\beta} \tag{2}$$

The maximum and minimum revolution values of the wheel, based on the pedal cadence and the current gear ratios, are calculated using Equations 3 and 4, respectively. In these equations, r_{new} represents the gear ratio after a gear shift, while $r_{current}$ denotes the gear ratio before the shift. These values facilitate the determination of the required wheel revolutions for transitioning to a higher or lower gear and enable the calculation of speed ranges corresponding to different gear levels.

$$n_{max} = [pr_{current}] + \left[p\frac{(r_{new} - r_{current})}{2}\right] \tag{3}$$

$$n_{min} = [pr_{current}] - \left[p\frac{(r_{new} - r_{current})}{2}\right] \tag{4}$$

On sloped routes, there are significant changes in the pedal cadence (80 revolutions per minute) and the number of revolutions the wheel should have in the relevant gear, which are determined as standard for slopeless routes. These changes are meticulously analyzed by the system to mitigate speed fluctuations caused by slopes and to optimize riding performance. The system precisely detects the slope range of the route through the acceleration sensor with slope detection capability. Based on the slope data obtained by this sensor, an effect coefficient is calculated to compensate for the difference between the speed that should be achieved on sloped ground and the ideal speed on flat ground. In the formula shown in Equation 5, the coefficient k represents the correction ratio required to compensate for the slope effect of the system, while δ represents the percentage slope of the route [22]. This approach

allows the ideal speed and gear control to be dynamically realized to optimize both performance and safety while riding.

$$k = \frac{1}{e^{(-0.04*\delta)}} \quad (5)$$

The effect coefficients corresponding to slope ranges between 0% and 45% are detailed in Table 1. These coefficients are applied by multiplying them with the pedal cadence to dynamically adjust the required range of wheel revolutions for gear shifting, particularly during uphill or downhill riding scenarios [23]. The determination of these coefficients is influenced by external factors such as the rider's selected riding mode, targeted calorie expenditure, and desired riding performance. When the rider opts for the standard riding mode, the system employs the coefficients presented in Table 1 as the effect multiplier [22]. This approach ensures that gear shifts are carried out in full harmony with the dynamic requirements of the road and the rider's preferences, increasing riding performance and making energy use more efficient.

Table 1. Slope ranges and effect coefficients for the standart mode (Standart mode için eğim aralıkları ve etki katsayıları)

Slope Range	Effect Coefficient
%0 - % 5	1.00
%5 - %10	1.22
%10 - %15	1.49
%15 - %20	1.82
%20 - %25	2.23
%25 - %30	2.72
%30 - %35	3.32
%35 - %40	4.05
%40 - %45	4.95

In the case where the driver opts for the eco mode, the effect coefficients used in the standard riding mode are reduced by 10%, providing smoother acceleration and easier gear shifts. This riding mode is designed specifically for users who aim to minimize physical effort levels and, therefore, drive at lower heart rates. When evaluated from an energy efficiency perspective, the Eco mode regulates the operating characteristics of the powertrain by limiting unnecessary torque fluctuations and aggressive gear changes and provides a more balanced drive torque. This optimization allows the bicycle to exhibit more stable and gradual acceleration by avoiding sudden power demands, both reducing energy consumption and minimizing the physical load on the driver. The effect coefficients for the eco mode are presented in Table 2.

Table 2. Slope ranges and effect coefficients for the eco mode (Eko modu için eğim aralıkları ve etki katsayıları)

Slope Range	Effect Coefficient
%0 - % 5	1.00 x 0.90 ≅ 0.90
%5 - %10	1.22 x 0.90 ≅ 1.10
%10 - %15	1.49 x 0.90 ≅ 1.34
%15 - %20	1.82 x 0.90 ≅ 1.64
%20 - %25	2.23 x 0.90 ≅ 2.01
%25 - %30	2.72 x 0.90 ≅ 2.45
%30 - %35	3.32 x 0.90 ≅ 2.99
%35 - %40	4.05 x 0.90 ≅ 3.65
%40 - %45	4.95 x 0.90 ≅ 4.46

On the other hand, in riding scenarios where high performance is prioritized, the sport mode is activated to increase the bicycle's dynamic responsiveness. Unlike Eco mode, this mode increases the effect coefficients by 15%, creating a riding characteristic that offers a more aggressive acceleration profile and instant torque response. This mode, which responds more sensitively and quickly to driver inputs, is optimized especially for users who demand high pedal forces and sporty acceleration. Thus, the riding experience becomes more dynamic and performance-oriented, and the powertrain works more efficiently, improving the response time of the vehicle. The effect coefficients determined for this mode are presented in detail in Table 3.

Table 3. Slope ranges and effect coefficients for the sport mode (Spor modu için eğim aralıkları ve etki katsayıları)

Slope Range	Effect Coefficient
%0 - % 5	1.00 x 1.15 ≅ 1.15
%5 - %10	1.22 x 1.15 ≅ 1.40
%10 - %15	1.49 x 1.15 ≅ 1.71
%15 - %20	1.82 x 1.15 ≅ 2.10
%20 - %25	2.23 x 1.15 ≅ 2.56
%25 - %30	2.72 x 1.15 ≅ 3.13
%30 - %35	3.32 x 1.15 ≅ 3.82
%35 - %40	4.05 x 1.15 ≅ 4.66
%40 - %45	4.95 x 1.15 ≅ 5.69

The differentiation in the effect coefficients across various riding modes is rooted in fundamental physiological and biomechanical

principles governing human energy expenditure. Scientific studies have established that the metabolic cost of physical activity is directly correlated with heart rate and exertion levels [24]. This relationship underscores the rationale behind the parameter adjustments in different riding modes. In Eco Mode, the primary objective is to optimize efficiency by minimizing physical exertion, thereby reducing metabolic demand and promoting a smoother, less strenuous ride. The 10% reduction in effect coefficients is calibrated to achieve this balance, ensuring that acceleration and gear shifts occur with minimal physiological impact while maintaining sufficient power transfer. Conversely, Sport Mode is engineered to enhance performance by increasing the system's responsiveness to the driver's input. The 15% increase in effect coefficients is strategically determined to amplify acceleration dynamics and torque responsiveness, reflecting the heightened physical engagement required for high-performance cycling. These calibrated adjustments in gear shift thresholds align the system's behavior with the intended physiological and mechanical demands of each mode, thereby optimizing both driver experience and energy utilization.

3.2 Algorithmic Design (Algoritma Tasarımı)

The developed AMT algorithm prioritizes user safety by subjecting instantaneous acceleration, slope, and speed data to a multi-layered validation process. The pedal and wheel speed data, measured using Hall effect sensors, are compared with instantaneous acceleration values obtained from the MPU6050 sensor to confirm that the bicycle's motion results from wheel rotation. This approach prevents gear transitions from causing damage to the drivetrain and motor system in scenarios where the bicycle is being carried or the wheels are not in motion. In addition, the bicycle's yaw and roll movements are monitored using the MPU6050 sensor, and driver safety is enhanced by limiting gear shifts in high-risk situations, such as bends. To identify a situation classified as a risk, it is first necessary to define the movements [25]. As illustrated in Figure 7 (a), roll motion typically refers to the slope movement of the bicycle that occurs due to angular momentum during cornering. In contrast, yaw motion, depicted in Figure 7(b), is characterized by the lateral rotation of the bicycle that occurs during turns. Both movements introduce distinct risks, each requiring careful consideration in gear shifting. The first risk arises from bicycles relying on pedal motion for movement, and gear shifting is impossible without pedaling. During the roll motion, the bicycle is tilted, making pedal movement impossible. In such a scenario, gear shifting should be avoided.

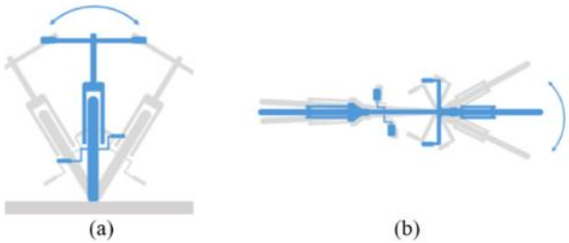


Figure 7. Roll (a) and yaw (b) movement (Yuvarlanma ve sapma hareketi)

The second risk is related to the effects of yaw motion. Some studies have demonstrated that at high speeds, bicycles experience significant aerodynamic forces during yaw motion, which directly impact the bicycle's stability (Figure 8) [26]. In such instances, shifting gears to a lower setting can serve as an effective strategy to counteract instability and enhance control. However, upshifting should be actively avoided, as it may exacerbate the aerodynamic forces, further destabilizing the bicycle and posing potential health risks to the driver.



Figure 8. Yaw movement effect (Sapma hareketi etkisi)

Another critical factor to be considered during gear shifting is the rotation of the pedal while the gear change occurs. The interaction between the pedal and the wheel is controlled by a two-stage control mechanism. This mechanism constantly monitors the speed of the wheel and the movement of the pedal, ensuring that both components work in harmony. Under specific conditions, such as when descending a slope, the wheel may rotate at a speed greater than normal. In this case, if the wheel's rotational speed surpasses a predefined threshold, the pedal's movement is monitored. If the pedal is rotating, the gear is either increased or decreased; otherwise, no gear shift occurs. This method enhances the safety and efficiency of the system

during riding, providing the driver with a smoother and more controllable experience. Figure 9 illustrates the flowchart that outlines the automatic gear-shifting algorithm implemented in the developed AMT system. Initially, the algorithm gathers data on wheel speed, pedal cadence, and slope values to enhance the bicycle's overall performance. The slope value is assessed by comparing it against predefined slope intervals, determining which interval the current slope falls into. Based on this comparison, an effect coefficient is obtained. This coefficient helps establish new boundaries for the speed range, setting lower and upper limits for the optimal speed values. Subsequently, it is checked whether the calculated values, based on wheel speed and pedal cadence, fall within the defined range. If the pedal remains stationary despite the values being within or below the acceptable range, no intervention is made. On the other hand, if the pedal cadence value is higher than it should be, the gear is increased; If the pedal is rotating, the gear is lowered. This algorithm operates in a continuous loop, autonomously carrying out gear shifts to ensure optimal performance. Through this method, the system significantly improves both the bicycle's riding efficiency and the user's comfort by selecting the most suitable gear based on varying slope and speed conditions.

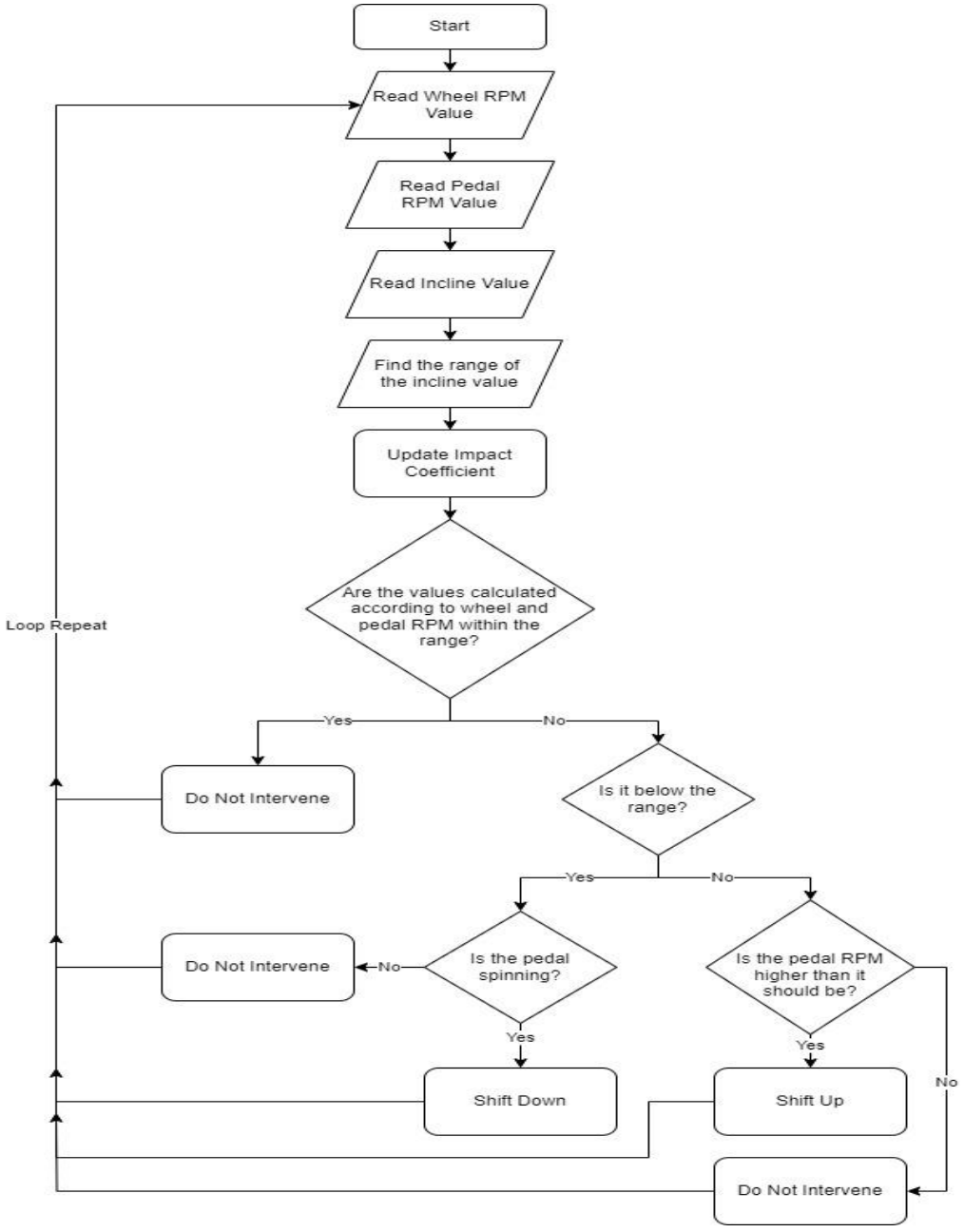


Figure 9. The algorithm flow chart of the AMT system (AMT sisteminin algoritma akış şeması)

4. TESTS AND RESULTS (TESTLER VE SONUÇLAR)

Within the scope of this study, a suitable bicycle selection was made to ensure the applicability and accuracy of the tests. In this direction, a Salcano brand NG700 model bicycle with a total of 21 gears, three front and seven back gears, was preferred. After the mechanical and electronic components were integrated into the selected bicycle, comprehensive tests were conducted to evaluate the system's performance and functionality. The tests in question were divided into three main categories: motor performance evaluation, examination of the accuracy of the Hall effect sensor, and testing of the implemented algorithm. Each category aims to increase the overall reliability and efficiency by analyzing certain aspects of the system.

4.1 Motor Performance Test (Motor Performans Testleri)

The motor performance test involves a series of evaluations to analyze the developed AMT system's efficiency and reliability under varying operational conditions. Initially, a dedicated test platform was constructed to assess motor performance directly on the bicycle, as illustrated in Figure 10.

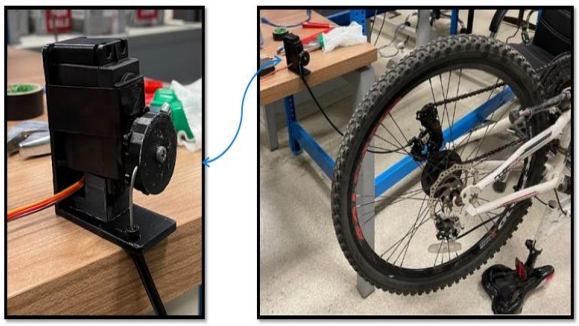


Figure 10. Motor test platform (Motor test platformu)

This platform enabled the evaluation of whether the engine power and energy output were sufficient to facilitate smooth and effective gear shifting. During the tests, several issues were identified, including corroded and stiff mechanical components of the selected bicycle that hindered smooth operation, insufficient current supplied to the motor, and inadequate motor torque. To overcome these challenges, firstly, all mechanical components were inspected, and rusty areas were cleaned with specialized solvents. Then, the required current value for the system was determined, and the power supply that would provide this value was used. Finally, the original motor was replaced with a higher-torque model to ensure sufficient force for effective gear shifts. Through these modifications, the developed AMT system has successfully performed optimal gear-shifting before being mounted on the bicycle.

4.2 Hall Effect Sensor Test (Hall Etkisi Sensörü Testi)

A special test mechanism was designed to determine the bicycle cadence and test the accuracy of the Hall effect sensor. One of the key components of this mechanism, the magnet mounted on the pedal crank, passes in front of the Hall effect sensor with each pedal rotation, triggering a change in the magnetic field. The sensor detects this change and generates an electrical signal. These signals are then counted by the Arduino Nano microcontroller, and the RPM value is calculated. During the tests, pedaling was performed at different speeds to evaluate the accuracy of the sensor, and it was observed whether the sensor made accurate measurements at various speed ranges. In addition, the data obtained from the sensor was compared with the manually determined cadence values , and their accuracy was examined. The obtained results were compared with the Hall effect, confirming that the sensor can measure cycling cadence accurately and reliably. Figure 11 illustrates the test platform used to measure the speed value using the Hall effect sensor.



Figure 11. Hall effect sensor test platform (Hall etkisi sensörü test platformu)

4.3 Algorithm Test (Algoritma Testi)

To evaluate the performance of the control algorithm of the developed AMT system, data was collected from all sensors integrated into the system. These data were displayed on the information display to verify the real-time information delivery to the user. The ability of the Arduino to process data from the sensors and

execute the gear-shifting algorithm was tested. In the tests, how quickly and accurately the algorithm responded to various riding conditions, the accuracy of the data provided by the MPU6050 and Hall effect sensors, and how well the measured values of these sensors matched the algorithm's predictions were analyzed in detail. The test results successfully verified not only the algorithm's performance but also the entire system's integrated working capacity. Algorithm tests performed on the bicycle are shown in Figure 12.



Figure 12. Algorithm tests (Algoritma testleri)

The test results for determining the front and back gear levels based on pedal and wheel cadence values for sport mode, standard mode, and eco mode are presented in Tables 4, 5, and 6. These data allow for evaluating the system's performance under various riding conditions and analyzing the algorithm's accuracy. The comparative analysis of these modes reveals significant differences in the system's response characteristics. In sport mode, where the effect coefficients are increased by 15%, the wheel cadence exhibits the highest values for a given pedal cadence, indicating a more aggressive acceleration profile and a faster torque response. In contrast, the standard mode provides a balanced response, ensuring a smooth yet responsive riding experience. On the other hand, with its 10% reduction in effect coefficients, the eco mode results in the lowest wheel cadence values for the same pedal input, demonstrating a controlled and energy-efficient performance. These variations validate that the system adapts to different riding demands, optimizing powertrain behavior. Figure 13 illustrates the wheel speeds achieved in response to the same pedal input for all three riding modes, and how the system dynamically adjusts gear selection to ensure power transmission. The upper graph compares the relationship between pedal and wheel cadence, showing that higher wheel speeds are achieved in sport mode. The lower graph shows how the system optimizes the back gear position in response to changing wheel speeds, revealing how the shift strategy is shaped depending on the riding mode.

Table 4. The front and back gear levels based on pedal and wheel cadence values for the sport mode (Spor modu için pedal ve tekerlek kadans değerlerine dayalı ön ve arka vites seviyeleri)

Pedal Cadence	Wheel Cadence	Front Gear	Back Gear
70	56	1	1
110	88	1	1
80	88	1	2
110	125	1	2
78	125	1	3
90	144	1	3

Table 5. The front and back gear levels based on pedal and wheel cadence values for the standard mode (Standart mod için pedal ve tekerlek kadans değerlerine dayalı ön ve arka vites seviyeleri)

Pedal Cadence	Wheel Cadence	Front Gear	Back Gear
70	49	1	1
110	77	1	1
80	77	1	2
110	109	1	2
78	109	1	3
90	125	1	3

Table 6. The front and back gear levels based on pedal and wheel cadence values for the eco mode (Eko modu için pedal ve tekerlek kadans değerlerine dayalı ön ve arka vites seviyeleri)

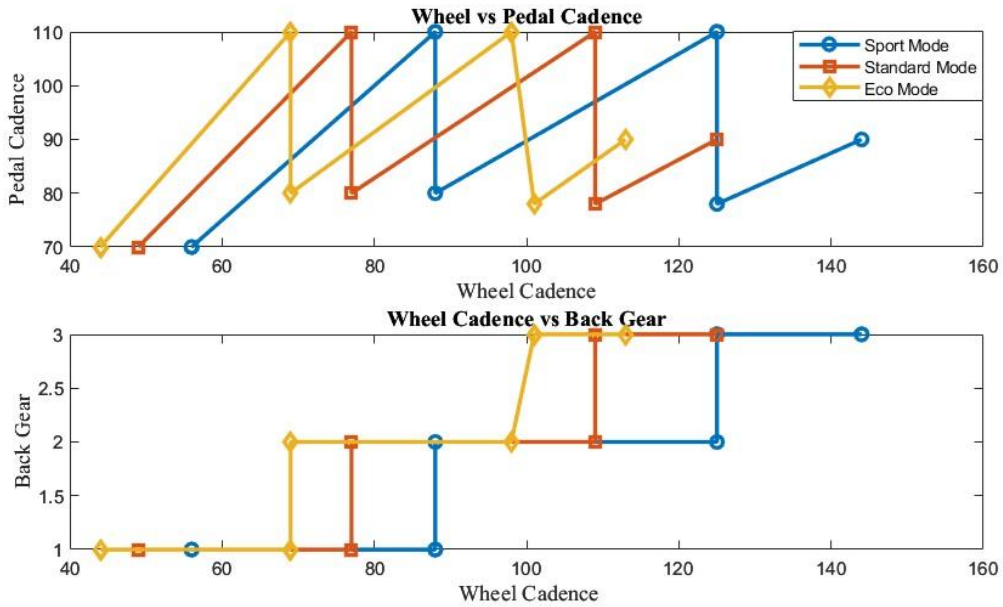


Figure 13. Comparison of wheel-pedal cadence and wheel-back gear across all riding modes (Tüm sürüş modlarında teker-pedal kadansı ve teker-arka dişli karşılaştırması)

Two key performance metrics, Power Transmission Efficiency (PTE) and Stability Index (SI), based on the average wheel-pedal cadence ratio (AWPCR), are presented in Table 7 to strengthen the effectiveness of the system. The PTE metric evaluates how efficiently pedal input is converted into wheel movement, while the Stability Index measures the consistency of gear shifts, analyzing whether sudden changes in speed or torque negatively impact riding comfort and system integrity. According to the table, sport mode demonstrates the highest PTE, while eco mode focuses on energy efficiency, resulting in lower power transmission efficiency. The SI reveals that sport mode provides a more balanced response, whereas eco mode maintains a more controlled performance with a lower SI. As a result, the test results obtained for these three distinct riding modes confirmed that the determined effect coefficients provide the desired contribution to riding dynamics. Thus, the reliability and accuracy of the developed AMT system have been comprehensively proven from both theoretical and practical perspectives.

Table 7. Performance metrics for sport, standard and eco mode (Spor, standart ve eko modları için performans metrikleri)

Mode	AWPCR	PTE (%)	SI
Sport	1.173	116.36	1.916
Standard	1.023	101.49	1.656
Eco	0.921	91.82	1.526

5. CONCLUSIONS (SONUÇLAR)

In this study, an innovative gear-shifting system developed to automate the manual gear-shifting mechanism in bicycles is thoroughly analyzed and presented. The automated gear-shifting process was implemented based on sensor data such as instantaneous slope, acceleration, pedal speed, and wheel speed. The system was designed to offer three different riding modes (Standard, Eco, and Sport) to adapt effectively to user preferences and riding conditions. It was programmed to halt gear transitions when the bicycle was stationary or being transported, thereby preventing potential damage to the drivetrain and motor. Additionally, the bicycle's roll and yaw movement were monitored, and gear transitions were restricted in high-risk situations, such as cornering, thereby contributing to improved driver safety. The reliability and accuracy of the system were evaluated through motor performance tests, Hall effect sensor tests, and algorithm tests. These tests demonstrated that the developed system operates effectively under various conditions, including slope, roll, and yaw

Pedal Cadence	Wheel Cadence	Front Gear	Back Gear
70	44	1	1
110	69	1	1
80	69	1	2
110	98	1	2
78	101	1	3
90	113	1	3

movement, and its accuracy was validated through theoretical analysis and practical experimentation.

Future work will focus on further optimizing the sensors and algorithms within the system to enhance its adaptability to individual driver preferences and diverse cycling environments, ensuring more precise and efficient gear shifts.

ACKNOWLEDGMENTS (TEŞEKKÜR)

We sincerely thank Assoc. Prof. Dr. Ali Fuat Ergenç and Res. Assist. Bora Ayvaz for their invaluable guidance and for granting access to the extensive resources of the Rockwell Automation Power and Motion Control Laboratory, which played a crucial role in the successful completion of this research / Değerli rehberlikleri ve bu araştırmanın başarılı bir şekilde tamamlanmasında önemli rol oynayan Rockwell Automation Güç ve Hareket Kontrol Laboratuvarı'nın kapsamlı kaynaklarına erişim sağladıkları için Doç. Dr. Ali Fuat Ergenç ve Arş. Gör. Bora Ayvaz'a içtenlikle teşekkür ederiz.

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

AUTHORS' CONTRIBUTIONS (YAZARLARIN KATKILARI)

***Ahmet KAĞIZMAN*:** He conducted the literature review, managed the manufacturing and test process, and wrote the article.

Literatür taraması yapmış, üretim ve test sürecini yönetmiş ve makaleyi yazmıştır.

***Fehmi Can AY*:** He conducted the literature review, performed the mechanical design, and checked the manuscript writing.

Literatür taraması yapmış, yazılımı gerçekleştirmiş ve makale yazımını kontrol etmiştir.

***Bengisu KILINÇ*:** She conducted the literature review, performed the electronic design, and checked the manuscript writing.

Literatür taraması yapmış, elektronik tasarımı gerçekleştirmiş ve makale yazımını kontrol etmiştir.

***Talha Enes ERCAN*:** He conducted the literature review, performed the mechanical design, and checked the manuscript writing.

Literatür taraması yapmış, mekanik tasarımı gerçekleştirmiş ve makale yazımını kontrol etmiştir.

***Volkan SEZER*:** He supervised the study and edited the draft.

Çalışmayı yönetmiş ve makaleyi düzenlemiştir.

CONFLICT OF INTEREST (ÇIKAR ÇATIŞMASI)

There is no conflict of interest in this study.

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

REFERENCES (KAYNAKLAR)

[1] Hamilton TL, Wichman CJ. Bicycle infrastructure and traffic congestion: Evidence from DC's Capital Bikeshare. Journal of Environmental Economics and Management. 2018; 87: 72-93.

[2] Kelly P, Kahlmeier S, Götschi T, Orsini N, Richards J, Roberts N, Scarborough P, Foster C. Systematic review and meta-analysis of reduction in all-cause mortality from walking and cycling and shape of dose response relationship. International journal of behavioral nutrition and physical activity. 2014; 11: 1-15.

[3] Oja P, Titze S, Bauman A, De Geus B, Krenn P, Reger-Nash B, Kohlberger T. Health benefits of cycling: a systematic review. Scandinavian journal of medicine & science in sports. 2011; 21 (4): 496-509.

[4] Piatkowski D, Bopp M. Increasing Bicycling for Transportation: a systematic review of the literature. Journal of Urban Planning and Development. 2021; 147 (2): 04021019.

[5] Wyss CR, Brengelmann GL, Johnson JM, Rowell LB, Niederberger M. Control of skin blood flow, sweating, and heart rate: role of skin vs. core temperature. *Journal of applied physiology*. 1974; *36* (6): 726-733.

[6] Hung NB, Sung J, Lim O. A simulation and experimental study of the operating performance of an electric bicycle integrated with a semi-automatic transmission. Applied Energy. 2018; 221: 319-333.

[7] Chien HC, Tseng CH. An automatic transmission for bicycles: a simulation. International journal of industrial ergonomics. 2004; 33 (2): 123-132.

[8] Chen ML, Chen KJ. Design of Active Disturbance Rejection Control Architecture for Bicycle Automatic Transmission. In 2019 IEEE Eurasia Conference on Biomedical Engineering, Healthcare and Sustainability (ECBIOS). 2019; 174-176.

[9] Hsieh LC, Chen TH. The kinematic Design of Automatic Gear Transmissions for Bicycles. Engineering Letters. 2008; 16 (3).

[10] Atencio LGM, Cena JSE, Opalla IU, Angelia RE. Arduino-based electronic bicycle transmission switching system. In International Conference on Mechanical Engineering Research. 2021; 275-286.

[11] Tandon P, Awasthi A, Mishra BK, Rathore P, Shukla RK. Design and simulation of an intelligent bicycle transmission system. IEEE/ASME transactions on mechatronics. 2010; 16 (3): 509-517.

[12] Sun G, Gao B, Jin J, Sanada K. Modelling, analysis and simulation of a novel automated manual transmission with gearshift assistant mechanism. International Journal of Automotive Technology. 2019; 20: 885-895.

[13] Gao B, Lei Y, Ge A, Chen H, Sanada K. Observer-based clutch disengagement control during gear shift process of automated manual transmission. Vehicle System Dynamics. 2011; 49 (5): 685-701.

[14] Taguchi Y, Soga Y, Mineno A, Kuzuya H, Horiuchi I, Ueda Y, Miyazaki T. Development of an automated manual transmission system based on robust design. SAE Technical Paper. 2003.

[15] Wu ZY, Lin HY. IntelliBike: An intelligent bicycle with automatic shifting based on sensing and riding analysis. In 2020 IEEE/SICE Internationa Symposium on System Integration (SII). 2020; 731-736.

[16] Uyar O, Çunkaş M, Karaca H. Enhanced intelligent control with adaptive system for electrically assisted bicycle. Engineering Science and Technology, an International Journal. 2022; 30: 101047.

[17] Rallo G, Formentin S, Corno M, Savaresi SM. Real-time pedaling rate estimation via wheel speed filterinmg. IFAC PapersOnline. 2017; 50 (1): 6010-6015.

[18] Lin HY, Wu ZY. Development of Automatic Gear Shifting for Bicycle Riding Based on Physiological Information and Environment Sensing. IEEE Sensors Journal. 2021; 21 (21): 24591-24600.

[19] Lin SK, Yang SW, Cheng CC. Design of an automatic shift control system with self-learning ability for a bicycle. Journal of the Chinese Institute of Engineers. 2015; 38 (5): 594-602.

[20] Ay FC, Kılınç B, Ercan TE, Kağızman A, Sezer V. Design. Implementation, and Control of a Novel Automated Manual Transmission (AMT) System for Manual Transmission Bicycles. In 2024 Innovations in Intelligent Systems and Applications Conference (ASYU). 1-6.

[21] Kağızman A, Sezer V. Design and fabrication of a new chest compression device with a specialized piston and bayonet lock mechanism. Engineering Science and Technology, an International Journal. 2024; 55: 101724.

[22] Félix R. 'Speed-Slope Factor'. Accessed: Jun. 09, 2024. [Online]. Available: https://web.tecnico.ulisboa.pt/~rosamfelix/gis/declives/SpeedSlopeFactor.html

[23] Bevis B. 'The Search For the Ideal Cycling Cadence'. Triathlete. Accessed: Jun. 09, 2024. [Online]. Available: https://www.triathlete.com/training/what-is-the-ideal-bike-cadence-for-you/

[24] Keytel LR, Goedecke JH, Noakes TD, Hiiloskorpi H, Laukkanen R, van der Merwe L, Lambert EV. Prediction of energy expenditure from heart rate monitoring during submaximal exercise. *Journal of sports sciences*. 2005; *23* (3): 289-297.

[25] Joo S, Oh C. A novel method to monitor bicycling environments. *Transportation research part A: policy and practice*. 2013; *54*: 1-13.

[26] SimScale. 'Bike Aerodynamics Simulation — Reducing Cyclist Drag by 30%'. Accessed; Mar. 03, 2025. [Online]. Available:https://medium.com/@SimScale/bike-aerodynamics-simulation-reducing-cyclist-drag-by-30-2d9b0b1191a

Gazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Dergisi
PART C: TASARIM VE TEKNOLOJİ

Gazi University
Journal of Science
PART C: DESIGN AND TECHNOLOGY

GU J Sci, Part C, 13(2): 592-608 (2025)

Teşhir Tipi Soğutucular İçin Yenilikçi Kapı Tasarımı ve Performansa Etkisinin Deneysel Araştırılması

Fatma Nur ERDOĞMUŞ[1]*, Sedanur BİLGİN[1], Sümeyra İBİŞ[1], Leyziva AYDEMİRLİ[2]

[1] *Nurdil Teknik Soğutma A.Ş.*

[2] *Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği*

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 14/02/2025
Düzeltme: 14/04/2025
Kabul: 22/04/2025

Anahtar Kelimeler

Enerji Verimliliği
Endüstriyel Soğutma
CO_2 Soğutucu
Akışkan
Teşhir Tipi Soğutucu

Article Info

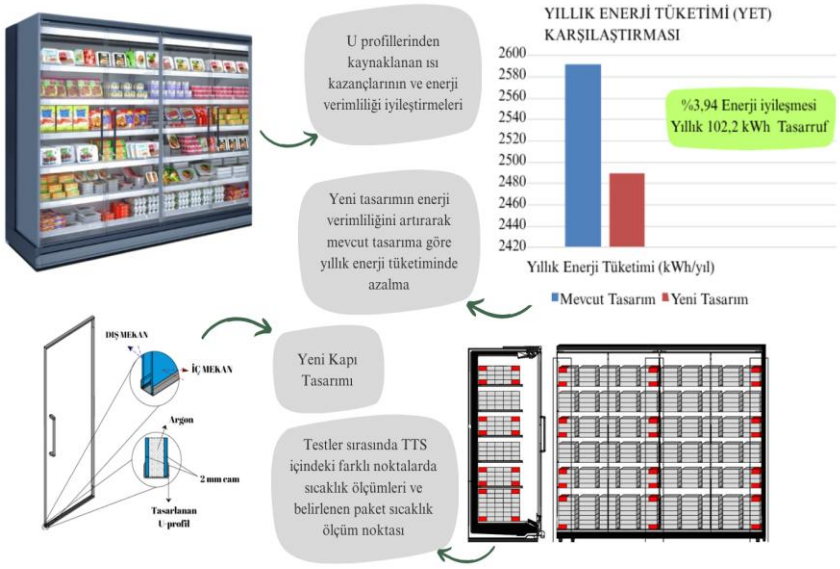
Research article
Received: 14/02/2025
Revision: 17/04/2025
Accepted: 22/04/2025

Keywords

Energy Efficiency
Industrial
Refrigeration
CO_2 Refrigerant
Refrigerated Display Cabinet

Grafik Özet (Graphical/Tabular Abstract)

Bu çalışma, teşhir tipi soğutucularda (TTS) enerji verimliliğini artırmak amacıyla geliştirilen plastik U-profil ve argon gazı içeren kapı tasarımını ve performansını değerlendirmektedir. / This study evaluates the performance of a newly developed door design for refrigerated display cabinets (RDCs), incorporating a plastic U-profile and argon gas to improve energy efficiency.



Şekil A: *Grafik özet /* ***Figure A:*** *Graphical abstract*

Önemli noktalar (Highlights)

- *TTS kapılarında plastik U-profil ve argon gazı içeren yeni bir tasarım geliştirildi. / A new door design using a plastic U-profile and argon gas was developed for RDCs*
- *Yeni tasarım, TS EN ISO 23953-2:2024 standardına göre test edildi. / The design was tested according to the TS EN ISO 23953-2:2024 standard.*
- *Enerji tüketimi %3,94 oranında azaltıldı, üretim süresi %65,66 kısaltıldı ve malzeme maliyeti %1,3 oranında düşürüldü. / Energy consumption was reduced by 3,94%, production time was shortened by 65,66%, and material cost was decreased by 1,3%.*

Amaç (Aim): *TTS kapılarındaki ısı kazançlarını azaltarak enerji verimliliğini artırmak amacıyla yeni bir kapı tasarımı geliştirilmiştir. / A new door design was developed to reduce heat gains in RDC doors and improve energy efficiency*

Özgünlük (Originality): *Plastik U-profil ve argon gazının birlikte kullanıldığı bütünleşik kapı tasarımı, bu çalışmada deneysel olarak test edilmiştir. / This study presents the first experimental evaluation of an integrated door design using both plastic U-profiles and argon gas.*

Bulgular (Results): *Yeni tasarım, %30,26 daha iyi ısı yalıtımı sağladı. Enerji tüketimi azaldı, iç ortam sıcaklık dağılımı iyileşti, üretim süresi kısaldı. Aynı zamanda ürünlerin daha kararlı koşullarda muhafaza edildiği belirlendi. /The new design achieved 30,26% better thermal insulation. Energy consumption decreased, temperature distribution improved, and production time was shortened. Products were also stored under more stable temperature conditions.*

Sonuç (Conclusion): *Tasarım, enerji ve maliyet verimliliği sunarak çevre dostu ve rekabetçi bir çözüm sağlamaktadır. / The design offers an environmentally friendly and cost-effective solution by improving energy and operational efficiency.*

*Corresponding author, e-mail: fatmanurerdogmus@nurdil.com.tr
DOI: 10.29109/gujsc.1639966

GU J Sci, Part C, 13(2): 592-608 (2025)

Gazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Dergisi
PART C: TASARIM VE TEKNOLOJİ

Gazi University
Journal of Science
PART C: DESIGN AND TECHNOLOGY

http://dergipark.gov.tr/gujsc

Teşhir Tipi Soğutucular İçin Yenilikçi Kapı Tasarımı ve Performansa Etkisinin Deneysel Araştırılması

Fatma Nur ERDOĞMUŞ[1*], Sedanur BİLGİN[1], Sümeyra İBİŞ[1], Leyziva AYDEMİRLİ[2]

[1] *Nurdil Teknik Soğutma A.Ş.*

[2] *Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği*

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 14/02/2025
Düzeltme: 14/04/2025
Kabul: 22/04/2025

Anahtar Kelimeler

Enerji Verimliliği
Endüstriyel Soğutma
CO_2 Soğutucu Akışkan
Teşhir Tipi Soğutucu

Öz

Teşhir tipi soğutucular (TTS), gıda sektöründe ürünlerin sergilenmesi ve tazeliğinin korunmasında kritik bir rol oynamaktadır. Ancak, bu sistemlerdeki yüksek enerji tüketimi, sürdürülebilirlik ve verimlilik odaklı çözümlere olan ihtiyacı da beraberinde gelmektedir. Bu çalışmada, TTS kapılarından olan ısı kazançlarını azaltarak yalıtım performansını artırmak ve enerji verimliliğini iyileştirmek amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda çift camlı mevcut sistemde kullanılan hava ve alüminyum U-profil yerine, camlar arasında argon gazı ve plastik U-profil kullanarak yeni bir kapı yapısı tasarlanmıştır. Yeni ve mevcut sistemlerin termal performansları karşılaştırılmış ve prototip, TS EN ISO 23953-2:2024 standardına uygun olarak test edilmiştir. Gerçekleştirilen test sonuçları, yeni kapı tasarımının iç ve dış yüzeyler arasında daha dengeli bir sıcaklık dağılımı sağladığını ve bu sayede ısı transferini azaltarak termal yalıtım performansını artırdığını ortaya koymuştur. Enerji tüketimi açısından değerlendirildiğinde, yeni tasarımın mevcut sisteme kıyasla %3,94 daha az enerji harcadığı, Enerji Verimlilik Endeksi (EVE) değerinde %3,90'lık bir iyileşme sağladığı belirlenmiştir. Aynı zamanda her iki sistem de "B" enerji sınıfında yer almaktadır. Ayrıca, yeni tasarımın malzeme maliyeti %1,3 azalırken, üretim süresi %65,66 kısalmıştır.

Sonuç olarak, geliştirilen kapı tasarımı, enerji tüketimini azaltarak ekonomik ve çevresel açıdan önemli bir iyileştirme sağlamaktadır.

Innovative Door Design for Refrigerated Display Cabinet and Experimental Investigation of Its Effect on Performance

Article Info

Research article
Received: 14/02/2025
Revision: 17/04/2025
Accepted: 22/04/2025

Keywords

Energy Efficiency
Industrial Refrigeration
CO_2 Refrigerant
Refrigerated Display Cabinet

Abstract

Refrigerated display cabinet (RDC) play a critical role in the food industry in displaying products and preserving their freshness. However, the high energy consumption in these systems brings with it the need for sustainability and efficiency-oriented solutions. In this study, it was aimed to increase insulation performance and improve energy efficiency by reducing heat gains from RDC doors. For this purpose, a new door structure was designed using argon gas and plastic U-profile between the glasses instead of the air and aluminum U-profile used in the existing double-glazed system. The thermal performances of the new and existing systems were compared and the prototype was tested in accordance with the TS EN ISO 23953-2:2024 standard. The test results showed that the new door design provides a more balanced temperature distribution between the inner and outer surfaces, thus reducing heat transfer and increasing thermal insulation performance. When evaluated in terms of energy consumption, it was determined that the new design consumed 3,94% less energy compared to the existing system and provided a 3,90% improvement in the Energy Efficiency Index (EEI) value. At the same time, both systems are in the "B" energy class. In addition, the material cost of the new design has decreased by 1,3%, while the production time has been shortened by 65,66%.

As a result, the improved door design provides a significant improvement in economic and environmental terms by reducing energy consumption.

*Corresponding author, e-mail: fatmanurerdogmus@nurdil.com.tr
DOI: 10.29109/gujsc.1639966

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Günümüz dünyasında en büyük sorunlardan biri yüksek enerji tüketimi ve buna bağlı karbon salımlarıdır. Son yıllarda sıkça gündeme getirilen bu konular ile iklim değişikliğine karşı mücadele edilmektedir. Paris İklim Anlaşması ve Yeşil Mutabakat Eylem Planı'ndaki hedeflerin gerçekleştirilebilmesi için hemen hemen her sektörde iyileştirme çalışmaları yapılmaktadır. Yapılan bu çalışmalar dünyanın sera gazı dengesini korumak ve yeryüzündeki enerji kaynaklarını verimli kullanmayı amaçlamıştır [1]. Hedeflenen çalışmaların dünya çapında gerçekleştirilmesi için ülkeler arası iklim zirvelerinde alınan kararlar ve bu kararların sürdürülebilirlikleri için birçok çalışma ve faaliyet yürütülmektedir [2]. Her sektörde olduğu gibi soğutma sektöründe de gelişmeler devamlılığını sürdürmektedir. Yürütülen çalışmalarda verimlilik ele alınarak sera gazlarının en aza indirgenmesi hedeflenmektedir. Soğutma sisteminden dolayı oluşan emisyonun büyük bir kısmını gıda sektörü meydana getirmektedir [3].

Temel gıdaların raf ömrünü koruyacak şekilde muhafaza edilmesi gerekmektedir. Bu saklama işlemi TTS'ler aracılığı ile gerçekleşmektedir. TTS'lerin enerji tüketimini; dış ortam faktörleri (sıcaklık ve bağıl nem), izolasyon, ekipman verimliliği, soğutucu akışkan seçimi, kullanım ve işletme koşulları gibi birçok unsur etki etmektedir. Bu çalışmada kapılı TTS'ler için kapı profili ve cam yapısı incelenmiştir.

Cüce vd. (2022), çift cam teknolojisinde kullanılan 3 farklı gaz olan hava, argon ve kripton ile sayısal bir çalışma yapılmışlardır. 20 mm gaz kalınlığına sahip 4 mm çift cam arasına 3 farklı gaz yerleştirilerek U değerini hesaplamışlardır. Pencerenin içindeki gazın türü ısı transferi değerlerini değiştirmiştir. Çift camlar arasında hava yerine kripton kullanılması yalıtımı %45,4 oranında artırdığını gözlemlemişlerdir. İzolasyonuna, üçüncü bir cam katmanının, gaz katmanının içerisine yerleştirmesiyle gaz hareketini kısıtlayarak izolasyonun arttırılabileceğini gözlemlemişlerdir. Üç camlı pencerede meydana gelen ısı kayıplarının hava, argon ve kripton için sırasıyla %12,9, %14,8 ve %45,48 oranında azaltılabileceğini hesaplamışlardır [4]. Cho vd. (2023), yeni binalarda cam panellerin ısı geçirgenliğinde değişimler ve enjekte edilen gazda sızıntı olmasıyla ilgili bazı sorunlar tespit etmişlerdir. Bu çalışmada, argon gazı ile doldurulmuş çift camlı pencerelerin mevcut durumu araştırmışlardır. Yapılan analizlerde argon gazı dolum oranı %95 'ten %0 'a düştüğünde termal performansın %10,9 azaldığını gözlemlemişlerdir. Zamanla argon gazı doluluk oranının düştüğünü belirterek, projenin tamamlanmasından iki yıl sonra doluluk oranının %65 'ten az olması ihtimalinin %92 olduğunu hesaplamışlardır. Bu durumda yalıtım kaybı oranı yaklaşık %4,3 olmuştur [5].

Li vd. (2018), bu çalışmada hava boşluğu kalınlığının çift camın ısı transfer katsayısına etkisi ve argon dolum oranını incelemişlerdir. Karşılaştırma, kaplamalı çift cam (düşük emisyonlu kaplamalı bir cam panel) ile kaplamasız çift cam arasında yapılmıştır. 9 – 18 mm aralığındaki hava boşluğu kalınlığında, hava boşluğu kalınlığı ne kadar yüksek olursa, argon gazı doldurma oranı o kadar yüksek olur, ısı yalıtım performansı o kadar iyi olacağını belirlemişlerdir [6]. Baek ve Kim (2021), binalarda sera gazı kaynağına yönelik çalışmanın bir parçası olarak CO_2 katkılı bir çift cam geliştirmiştir. Simülasyon programı ile tasarlanan binaya sırasıyla CO_2, hava, argon ve kripton gazları içeren çift cam uygulayarak, iç mekân camındaki saatlik yüzey sıcaklıklarını, saatlik enerji kayıplarını ve binadaki toplam enerji tüketimi hesaplamışlardır. Bu verileri karşılaştırdıklarında CO_2 gazlı camların iç yüzey sıcaklıklarının argon gazlı camlarla benzer olduğunu ortaya çıkarmışlardır. Hava, argon, CO_2 ve kriptonun enerji tüketim değerleri sırasıyla 449,5 -445,5-444,8 ve 441,2 kWh şeklinde hesaplanmıştır. Enerji performansı analizinde CO_2 camlı binanın ısıtma enerjisini argon gazına benzer düzeyde tükettiğini göstermişlerdir [7]. Onatayo vd. (2024), bu araştırmada asal gazlarla dolu olan ve olmayan çift camlı pencerelerin U faktörünün hesaplanmasına yönelik veri odaklı bir yaklaşım sunmuşlardır. Çalışmada hava veya belirli bir yüzdede asal gaz (%75 argon, %85 argon ve %95 argon) içeren çift camlı pencerelerle çalışmışlardır. Yapılan analizler emisyonunun pencerelerin termal performansını etkilemedeki önemli rolünün altını çizmişlerdir. Modelin sonuçlarında simüle edilen pencereler karşılaştırıldığında %1,7 ile %4,4'lük bir fark aralığı kaydetmişlerdir. Düşük emisyon değerlerinin camın yalıtım özelliklerini arttırdığını ve dolayısıyla genel U faktörünü azalttığını ortaya koymuşlardır [8].

Cüce (2018), araştırmalarında argon dolgulu çift camlı pencerelerin ısı transfer performans analizini yapmışlardır. Teorik ve sayısal U değerleri sırasıyla 0,80 ve 0,89 olarak bulunmuştur. Hesaplanan değerlerin arasında iyi bir uyum olmasına rağmen, çevresel oda testlerinden elde edilen deneysel U değerlerinin, ısı köprüsü ve kenar etkilerinden dolayı gözle görülür derecede yüksek olduğunu gözlemlemişlerdir. Simüle edilmiş çalışma koşullarında U değerinin pencere örneğinin üst, orta

ve alt konumları için 1,25- 1,18 ve 1,32 W/m^{2}K olduğu görülmektedir. Bu açıdan cam ürünlerinin gerçek U değeri performansında ısı köprüleri ve kenar etkilerinin önemli rol oynadığı sonucuna varılmıştır [9]. Summ vd. (2023), araştırmada argon konsantrasyonun yalıtkan camlı düz plakalı kolektörlerin verimliliği üzerindeki etkisini belirlemişlerdir. Argon gazı konsantrasyonunun artırılması ile kayıpların azaldığını belirtmişlerdir. %90 'dan %50 'ye argon sızıntısı olması durumunda, kolektör performansının ortalama %1,7-4,8 oranında düşüşüne yol açmıştır. Kolektör tasarımcıları argon konsantrasyonunun kolektörün kullanım ömrü içerisinde yarıya düşmemesini sağlaması gerektiğini ve %50 'ye kadar argon sızıntılarının kabul edilebilir olduğu sonucuna varmışlardır [10]. Sadeghi vd. (2019), silindirik bir güneş enerjili su ısıtıcısının bakır bobin soğurucusu ile cam kapağı arasındaki dolgu gazı olarak hava ve argon gazlarının ısıl performansı üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Argon gazının kullanılması, daha az ısıl iletkenliğe sahip olması nedeniyle deneylerin her aşamasında sıcaklık farkının artmasına neden olmuştur. Soğurucu bobin arasındaki boşlukta argon gazının kullanılması, kolektörün enerji verimliliğini yaklaşık %4 'e kadar arttırmıştır. En yüksek enerji verimliliği değerleri %48,17 ve %52,14 ile hava ve argon için sırasıyla 3,5 kg/h optimum kütle akış hızında elde edilmiştir [11].

Lolli vd. (2016), pencereler için yalıtım alternatifi olarak aerojel ve argon gazı kullanılan bir konut binası modellemişlerdir. Yeni alternatife göre enerji kullanımı ve sera gazı emisyonlarını hesaplamışlardır. Camlarda aerojel ve argon gazı kullanımının arttırılmasıyla emisyon tasarrufunun %5 'ten %9 'a çıktığını göstermişlerdir. Aerojel kullanımının alan ısıtma için binaya verilen enerjinin %20 'sine kadar tasarruf sağladığını ve gazın üretiminden kaynaklanan sera gazı emisyonunun şu anda rapor edilen emisyondan 8 kat daha düşük olduğunu belirtmişlerdir. Şeffaf yüzeylerin düşük ısıl direncinin üstesinden gelmek için yapılan bu proje aerojel ve argon gazının etkili bir enerji tasarrufu çözümü olduğunu kanıtlamıştır [12]. Bazgaou vd. (2023), Argon Çift Camın sera içindeki etkisini araştırmak için argon çift camın diğer kaplama malzemelerine kıyasla ısıtma ve soğutma gereksinimlerini azaltmada olumlu bir etkiye sahip olduğunu ortaya koyan bir enerji analizi yapmışlardır. Tarımsal seralarda argon çift cam kullanımı, iklim faktörlerinin homojenizasyonunu ve dağılımını optimize ederek enerji verimliliğini artırma ve ısıtma ve soğutma maliyetlerini azaltma konusunda önemli bir potansiyel sunduğunu gözlemlemişlerdir. Çalışmaları sonucunda, argon çift camın seralar için bir yapı malzemesi olarak yüksek verimliliğini ortaya koymuşlardır ve bunun da sera üretim maliyetlerinde azalma sağlayacağını belirtmişlerdir [13].

Sharmas vd. (2023) R290'ın R22'ye göre daha çevre dostu bir alternatif soğutucu akışkan olduğunu belirten bir çalışma ortaya konulmuştur. Yapılan çalışmada R290 kullanılan bir klimanın performansı hem deneysel hem de analitik olarak incelenmiştir. Sonuç olarak R290 ile çalışan klimaların elektrik tüketimi açısından R22'ye göre %11,4-%12,3 sonuçları arasında daha düşük olduğunu göstermiştir. Ek olarak CO_2 emisyonu açısından %13,1 ila %14,18 arasında bir azalma kaydedilmiştir. Sonuç olarak R290'nın daha çevreci bir akışkan olduğu ortaya konmuştur [14]. Pınar Mert vd. (2022) Al_2O_3-TiO_2-SiO_2 nanopartikülleri ile hazırlanan hibrit nanoakışkanların, 36 litrelik bir taşınabilir termoelektrik buzdolabında soğutucu olarak kullanılması incelenmiştir. Sonuç olarak referans olarak saf su alınmış ve saf su ile karşılaştırmalı olarak %2'lik Al_2O_3-TiO_2-SiO_2 nanoakışkanı kullanılmıştır. Soğutma kabini ve ürün sıcaklıklarında önemli iyileştirmeler sağlandığını gösterilmiştir. Alternatif akışkan kullanımında sıcaklık farkında %30,3'lük bir iyileşme kaydedilmiştir. Yapılan çalışma çıktılarında Peltier etkisi nedeniyle COP değerlerinde hafif düşüşler olduğu kaydedilmiştir [15]. Erdem vd. (2020) yaptıkları çalışmada $Al2O_3$, TiO_2, SiO_2 nanopartikülleri içeren nanoakışkanların TEC'lerin soğutma güç ve performans parametreleri üzerindeki etkileri deneysel olarak incelemişlerdir. Yapılan çalışma sonucunda, %1 Al_2O_3 içeren nanoakışkan su ile kıyaslandığında ve ortam sıcaklığı 30°C olarak alındığında iç sıcaklık farkında %26 oranında bir iyileşme olduğu gözlemlenmiştir. Bunun yanında soğutulmuş su sıcaklıklarında ise %55,2'lik bir iyileşme olduğu belirtilmiştir. Bu çalışmada da benzer çalışmalarda olduğu gibi COP değerlerinde küçük düşüşler meydana gelmiştir. Yeni TEC tasarımının geleneksel tasarıma bakılarak birçok avantaj sağladığı görülmüştür [16].

Ele alınan bu çalışmada:

- Yeni tasarımın termal davranışını inceleyerek mevcut tasarım ile yeni tasarımın karşılaştırılması,
- Yeni tasarımın enerji tüketimine etkisinin belirlenmesi,
- Maliyet ve operasyonel süreçlerdeki etkisinin değerlendirilmesi,
- Soğutucu içindeki sıcaklık dağılımının analiz edilmesi,

- Yeni malzeme ve izolasyon teknolojilerinin soğutma sistemlerine olan katkısının araştırılması,
- Yeni tasarımın üretim süresine etkisinin ve üretim verimliliğine olan katkılarının belirlenmesi

amaçlanmıştır.

Bu çalışma, mevcut literatürdeki çift cam ve yalıtım teknolojilerine yönelik araştırmaları temel almakla birlikte, özgün katkılar sunmaktadır. Literatürde çift cam arası farklı gaz türlerinin termal performansa etkisi detaylıca incelenmiş olsa da TTS kapılarında izolasyon performansını artırmak amacıyla U-profil malzemesi ve iç akışkan yapısı açısından iyileştirme sağlayan bütünleşik bir tasarım önerisi sunan çalışma bulunmamaktadır. Bu çalışmada, mevcut tasarıma kıyasla daha yüksek ısıl dirençli U-profil ve çift cam arasında termal izolasyon sağlayan akışkan kullanılarak yeni bir kapı tasarımı geliştirilmiştir. Ayrıca, geliştirilen tasarımın prototipi üretilerek, uluslararası standartlara uygun olarak test edilmiştir. Yeni kapı tasarımının TTS'nin enerji performansına etkisinin araştırılmış ve karşılaştırılmıştır.

2. TEORİK ANALİZ (THEORETICAL ANALYSIS)

Soğutma işleminin gerçekleştiği esnada TTS'in birçok yerinde ısı kazancı meydana gelmektedir. Isı kazançları farklı kaynaklara dayandırılabilir. Bu kaynaklar sistemin farklı noktalarından kaynaklanan ısı transferi ile ilişkilidir. TTS'lerde ısı kazançlarının olduğu noktalar genellikle dört ana kaynaktan oluşmaktadır: cam kapılar, kabin duvarları, iç bileşenler (soğutulan ürün, aydınlatma, defrost sistemi vs.) ve sızdırmazlık noktalarından istem dışı hava akışıdır. Bu durum, sistemin maruz kaldığı ısı yükünü yükseltir.

Çalışmada, TTS cam kapılarda gerçekleşen ısı transferi aşağıdaki eşitlikler kullanılarak hesaplanmıştır:

Soğutma kapasitesi ($\dot{Q}_e$), ile hesaplanır, soğutma sistemlerinin performansını analiz etmek ve evaporatörde ortamdan çekilen ısıyı hesaplamak için kullanılır [17]:

$$\dot{Q}_e = \dot{m}_{ref}\left(h_{e,o} - h_{e,i}\right) \quad (1)$$

Soğutma performans katsayısı (COP_S), eşitlik ile hesaplanır. Bu denklem, bir soğutma sisteminin ne kadar verimli olduğunu belirlemek için kullanılır. COP, sistemin sağladığı soğutma kapasitesinin, harcanan kompresör gücüne oranıdır [17]:

$$COP_S = \frac{\dot{Q}_e}{\dot{W}_c} \quad (2)$$

Yalıtım malzemesinin termal direnci (R), eşitlik ile hesaplanır. Bu denklem, bir yalıtım malzemesinin termal performansını belirlemek için kullanılır. Termal direnç (R), malzemenin ısı geçişine ne kadar direnç gösterdiğini ifade eder ve kalınlık (L) ile doğru, ısı iletkenlik katsayısı (k) ve yüzey alanı (A) ile ters orantılıdır. Daha yüksek R değeri, daha iyi yalıtım anlamına gelir ve enerji tasarrufu sağlamak için kritik bir parametredir [18]:

$$R=\frac{L}{kA} \quad (3)$$

Isı taşınım katsayısının hesaplanması için aşağıdaki boyutsuz sayılardan yararlanılır [18]:

$$Re = \frac{\rho v L}{\mu} \quad (4)$$

$$Pr = \frac{\mu c_p}{k} \quad (5)$$

$$Nu=0{,}664\ Re^{0,5} Pr^{\frac{1}{3}} \quad (6)$$

Isı taşınım katsayısı (h), bir yüzey ile akışkan arasındaki ısı taşınımı miktarını belirlemek için kullanılır, eşitlik ile hesaplanır [19]:

$$h = \frac{Nu\ k}{L} \quad (7)$$

Toplam ısı transfer katsayısı (U), iki cam arasındaki toplam ısı direncini hesaplamak için kullanılır eşitlik ile hesaplanır [20]:

$$U=\frac{1}{\left(\frac{1}{h_i}+\frac{2L_{gl}}{k_{gl}}+\frac{L_{ga}}{k_{ga}}+\frac{1}{h_o}\right)} \quad (8)$$

Kapı üzerinden geçen toplam ısı transfer miktarını belirlemek için kullanılır. Toplam ısı transferi aşağıdaki eşitlik ile hesaplanır [18]:

$$\dot{Q} = U.A.(T_o\text{-}T_i) \quad (9)$$

Camdaki ısı akısı Eşitlik 10 ile hesaplanır [18]:

$$\dot{q} = U.\Delta T \quad (10)$$

Her test için kaydedilen günlük doğrudan elektrik enerji tüketimi (DET), tüketilen tüm elektrik enerjisinin toplamı olacaktır. DET, aşağıda gösterilen eşitlik ile hesaplanır [21]:

$$E_{DET,24h} = E_{FET,24h} + E_{LET,24h} + E_{DT,24h} \quad (11)$$

Motor grubunun dış ünitede bulunan bir kabinin günlük soğutma elektrik enerjisi tüketimi (SET), $E_{SET,24h}$ aşağıda gösterilen eşitlik ile hesaplanır [21]:

$$E_{SET,24h} = \left(24 - t_{deft}\right) \times \Phi_{24-deft} \times \frac{(T_c - T_{mrun})}{(0.34 \times T_{mrun})} = Q_{tot} \times \frac{(T_c - T_{mrun})}{(0.34 \times T_{mrun})} \quad (12)$$

Toplam günlük enerji tüketimi (TET) aşağıda gösterilen eşitlik ile hesaplanır [21]:

$$E_{TET,24h} = E_{DET,24h} + E_{SET,24h} \quad (13)$$

YET yıllık enerji tüketimi, SYET standart yıllık enerji tüketimi ve EVE ise enerji verimliliği endeksi olarak tanımlanır ve 14,15 ve 16'daki eşitlikler sırasıyla aşağıda verilmiştir [22]:

$$YET = 365 \times E_{TET,24h} \quad (14)$$

$$SYET = (M + N \times Y) \times 365 \times C \times P \quad (15)$$

$$EVE = YET/SYET \quad (16)$$

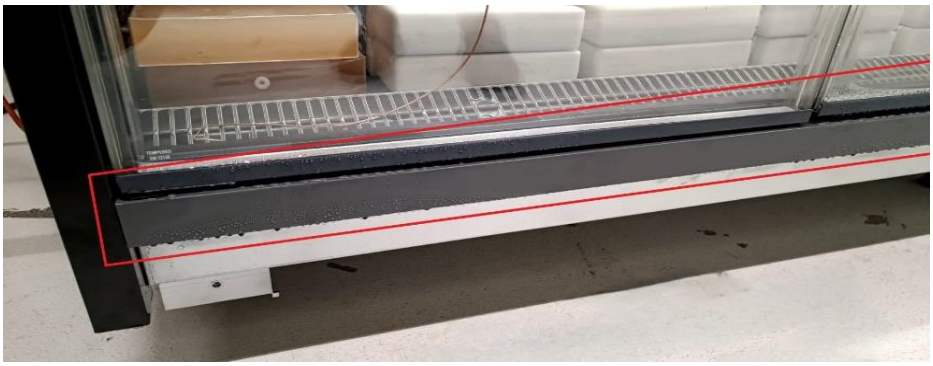
Belirsizlik analizi**,** yapılan bir ölçümün ne kadar güvenilir ve doğru olduğunu belirlemek için yapılan analizdir. Ölçüm sonucunun gerçek değere ne kadar yakın olabileceğini gösterir. Belirsizlik analizi aşağıda verilen eşitlik ile yapılır [23].

$$W_R = [(\frac{\partial R}{\partial X1} wn)^2 + (\frac{\partial R}{\partial X2} w2)^2 + .. + (\frac{\partial R}{\partial Xn} wn)^2]^{1/2} \quad (17)$$

3. MATERYAL VE METOD (MATERIALS AND METHODS)

TTS, mekanik buhar sıkıştırmalı soğutma çevrimi prensibine göre çalışmaktadır ve çevre dostu özellikleriyle öne çıkan R744 (CO_2) soğutucu akışkanını kullanmaktadır. R744'ün tercih edilmesinin temel nedenleri arasında, çevresel etkiler açısından sağladığı üstünlükler ve soğutma performansı yer almaktadır. Özellikle, 31,06 °C gibi düşük bir kritik sıcaklığa sahip olması, Ozon Tüketim Potansiyeli (OTP) değerinin "0" ve Küresel Isınma Potansiyeli (KIP) değerinin "1" olması ile çevreye minimum etki bırakmasıdır [24]. Ozon tabakasına zarar vermemesi ve küresel ısınma üzerindeki etkisinin düşük seviyelerde olması, bu akışkanın çevre dostu bir seçenek olarak tercih edilirliğini artırmaktadır.

Mevcut TTS'in kapı yapısı alüminyum U-profilden oluşmaktadır. Profil üzerinde çift cam ve camlar arasında hava mevcuttur. Ancak bu yapıda ısı kazanç oranı yüksek olup, iç ve dış ortam sıcaklık farkından dolayı hava çiy noktası sıcaklığının altına düşerek profil yüzeyinde yoğuşma gerçekleşmektedir. Soğutucu dış yüzeyinde yoğuşma gerçekleşmesi hem malzeme ömrü hem de estetik görünüm açısından sorun teşkil etmektedir. Yoğuşmaya ait görsel Şekil 1'de verilmiştir.

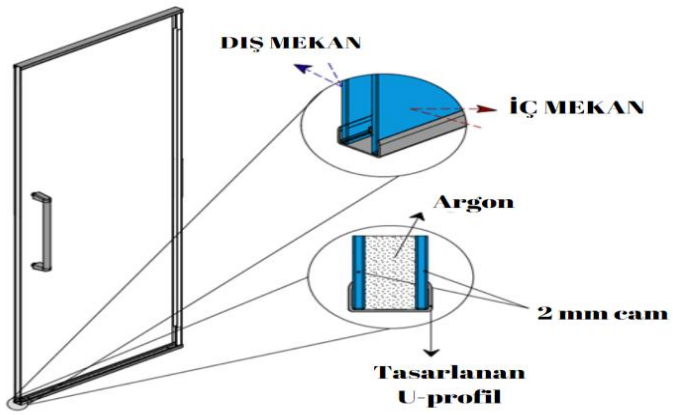


Şekil 1. Profil yüzeyinde oluşan yoğuşmaya ait görsel (Visual of the condensation formed on the profile surface)

Bahsedilen profillerde metal-metal eşleşmesine bağlı olarak ısı köprüleri oluşmaktadır. Çalışmanın amaçlarından biri ısı köprülerini en aza indirmektir. Bu yüzden profilde ısı iletkenlik değeri düşük, ancak alüminyum profilin fiziksel özeliklerini de karşılayabilen plastik bir materyal seçilmiştir.

Yeni tasarımın diğer bölümünde ise çift cam arasında bulunan havanın, daha yüksek ısıl dirence sahip farklı bir akışkanla değiştirilmesi gerekmektedir. Bu konuda yeni teknolojiler araştırılmış ve endüstride sık kullanılan akışkanlar belirlenmiştir. Bu akışkanlar; karbondioksit (CO_2), Argon (Ar) ve Kripton'dur (Kr). Söz konusu gazlar ile teorik ısı transfer hesaplamaları gerçekleştirilmiştir. Yapılan hesaplamalara ait detaylı bilgi, bulgu ve sonuç bölümlerinde bulunmaktadır. Isıl direnç hesapları mevcut sistem (hava) ile kıyaslandığında en yüksek ısıl dirence sahip akışkan Kr'dur. Ancak Kr, diğer akışkanlara göre daha pahalı ve temin edilmesi daha zor olduğu için, ısıl direnci en yüksek ikinci akışkan olan Ar tercih edilmiştir.

Mevcut tasarımda alüminyum profil ve hava kullanılırken yeni kapı tasarımında bunların yerine plastik U-profil ve argon gazı kullanılmıştır. Değişen bu parçalar dışında kalan tüm bileşenler mevcut ve yeni tasarımda aynı kalmıştır. Yeni kapı tasarım yapısının görseli Şekil 2'de verilmiştir. Yapılan bu tasarımda çift cam katmanları arasında yapısal bir bağlantı sağlanmıştır. Mevcut tasarımda arası 2 mm olan çift camın alt ve üst kısımlarında alüminyum kullanılan U-profil yerine yeni tasarımda plastik kullanılan U-profil ile değiştirilmesi sonucunda ısıl direnci daha yükseltilmiş ve ısıl kazancı azaltılarak verimliliğe katkı sağlayan yeni kapı tasarımı ortaya konmuştur.



Şekil 2. Yeni kapı tasarımı yapısı (New door design structure)

Soğutucu kabinlerin kapılarında kullanılan U-profillerde malzeme seçimi, sistemin enerji verimliliğini etkilemektedir. Tablo 1'de U-profilin üretiminde mevcutta kullanılan alüminyum malzemenin özellikleri ve yeni tasarımda kullanılan plastik malzemenin özellikleri verilmiştir [25-26]. Plastiğin (PVC) yoğunluğu alüminyumun yoğunluğuna göre oldukça düşüktür. Bu durumda plastiğin alüminyuma göre daha hafif olduğunu gösterir ve yeni tasarım mevcut tasarıma göre daha hafif olduğu söylenebilir. Sertlik açısından ise mevcut tasarımda kullanılan alüminyum yeni tasarımda kullanılan plastiğe bakarak daha dayanıklı ve deformasyon direncinin daha fazla olduğu söylenebilmektedir. Bu durum çekme dayanımı için de benzerlik göstermektedir. Kopma uzamasında ise tam tersi bir durum söz konusudur. Yani alüminyuma kıyasla plastik malzemenin kopma uzaması daha fazladır ve bu durum da kırılmadan önce daha fazla uzayabildiği bilinmektedir. Mevcut sistemde ısıl köprünün daha yüksek olmasının nedeni, alüminyumun ısıl iletkenlik katsayısının plastikten daha yüksek olmasıdır. Yeni tasarımda daha esnek, hafif ve ısıl direnci yüksek plastik kullanılarak termal yalıtkanlık sağlanmıştır.

Tablo 1. Tasarımda kullanılan malzemelere ait özellikler (Characteristics of the materials used in the design)

Özellikler	Alüminyum	Plastik (PVC)
Yoğunluk	2,70 g/cm^3	1,45 g/cm^3
Sertlik	75-80 SH.D	65 SH.D
Çekme Dayanımı	250 MPa	35,90 MPa
Kopma Uzaması	%17	%110
Isı İletim Katsayısı (k)	200-209 W/m.K	0,15 W/m.K

Çift cam arasındaki boşlukta bulunan gazın özellikleri de ısı transferini etkilemektedir. Kullanılan gazlara ait özellikler Tablo 2'de verilmiştir [27]. Mevcut sistemde hava kullanılırken yeni sistemde bu kısımda argon gazı kullanılmıştır. Argon gazı hava ile kıyaslandığında daha yüksek ısıl dirence sahip olması sebebiyle kapılardaki ısı

kazançlarını azaltmış ve mevcut sisteme kıyasla enerji kaybı azalmıştır.

Düşük özgül ısı kapasitesi ile argonun ısı birikmesini azaltabileceğini ve bu durumda da enerji tasarrufuna katkı sağlayabileceğini göstermiştir. Argonun termal özelliklerine bakıldığında ise havanın termal özelliklerine kıyasla daha düşük viskozite ve yoğunluğa sahip olduğu görülmektedir.

Tablo 2. Hava ve argonun özellikleri (300K) (Characteristics of air and argon (300K))

Özellikler	Hava	Argon
Dinamik Viskozite	$1{,}85 \times 10^{-5}$ kg/ms	$2{,}27 \times 10^{-5}$ kg/ms
Yoğunluk	1,177 kg/m^3	1,623 kg/m^3
Özgül Isı Kapasitesi (c_p)	1005 J/kg.K	521,64 J/kg.K
Isı İletim Katsayısı (k)	0,0261 W/m.K	0,0177 W/m.K

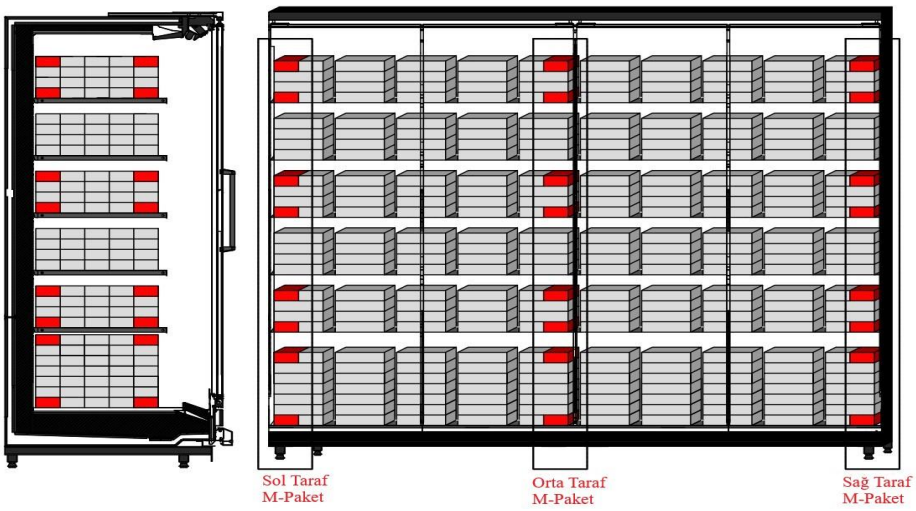
Mevcut kapı tasarımı yeni kapı tasarımı ile değiştirilerek TTS'ye entegre edilmiştir. Mevcut ve yeni tasarım üretilerek, deneysel olarak test edilmiştir.

Test odası iklim sınıfı-3 koşullarına sahiptir. Bu koşullar ise 25°C ± 1°C sıcaklık ve %60 ± %3 bağıl nemde, 0,1-0,2 m/s hava hızı olarak standartta belirtilmiştir [21]. TTS test odasına yerleştirilmeden önce bağıl nem ve hava hızı bakımından klimatik oda şartlandırılarak, iklim sınıfı-3 kriterlerine uyumlu hale getirilmiştir. Şekil 3'te test odasında kullanılan test ekipmanları ve TTS ayrıntılı şekilde verilmiştir. Bu çalışmada kullanılan "M1" sıcaklık sınıfında bulunan TTS'in, 5 raflı bir soğutucu için paket sıcaklık ölçüm noktaları işaretlenerek 48 noktadan ölçüm sonuçları alınmış, önden ve yandan görünüşleri Şekil 4'te gösterilmiştir. M-Paket ölçüm noktaları paketlerin tam merkezinde olup ısıl çiftler sayesinde sıcaklık verisi alınmaktadır. Gıdaların muhafazası için gereken paket sıcaklık aralığı M1 sınıfı için -1°C/5 °C aralığında olması gerektiği standartta belirtilmiştir [21]. Bu test odası şartları ve M-Paket sıcaklıkları bir paket program aracılığı ile takip edilip, kaydedilmektedir.

Deney sisteminde paket sıcaklıklarını etkileyecek ortam sıcaklığı, nem, hava akışı gibi çevresel faktörlerin kontrolü sağlanarak etkileri hesaba katılmıştır. Bu ekipmanların her biri test verilerini toplama, değerlendirme ve analizi sonucunda kritik öneme sahiptir.



Şekil 3. Test odasındaki TTS ve test ekipmanları (TTS and test equipment in the test room)



Şekil 4. TTS için paket sıcaklık ölçüm noktaları (Package temperature measuring points for TTS)

Test sırasında ölçüm yapan cihazlar, Tablo 3'te ayrıntılı bir şekilde sunulmuştur. Ölçüm cihazları, TTS'nin sıcaklık sınıfına uygunluğunu doğrulamak ve sistemin genel performansını değerlendirmek amacıyla kullanılmıştır. Ölçüm süreci, sistemde kullanılan R744'ün termodinamik özelliklerini ve çevresel avantajlarını daha iyi anlamak adına titizlikle gerçekleştirilmiştir. Çalışma, aynı zamanda teşhir tipi soğutucuların çevresel etkilerini azaltma ve performanslarını artırma yönünde önemli bir adım olarak değerlendirilmektedir.

Tablo 3. Soğutma sisteminde kullanılan ölçüm ekipmanlarının özellikleri (Characteristics of the measuring equipment used in the cooling system)

Ekipman	Ölçüm Aralığı	Hassasiyet
Isıl çift	-40/+150 ºC	± %0,3
Sıcaklık ve bağıl nem ölçer	0/+50 ºC 0–100 %RH	± 0,03 ± %1,5
Anemometre	0-2 m/s	± 0,01
Dijital güç ölçer	95-240 V AC 0.001-74 A	± 0.1%V ± 0.2%A

Tablo 3'te ayrıntılı olarak sunulan ölçüm cihazları, test sürecinde güvenilir veriler elde edilmesini sağlamak amacıyla yüksek hassasiyete sahip olarak seçilmiştir. Bu cihazlar, test edilen soğutucu sistemin sıcaklık sınıfına uygunluğunu doğrulamak ve performans analizlerini hassas bir şekilde gerçekleştirmek için kritik öneme sahiptir. Ölçümlerin doğruluğu, test sonuçlarının güvenilirliğini ve sistemin tasarım kriterlerine uygunluğunu değerlendirmek açısından büyük önem taşımaktadır. Bu nedenle, kullanılan cihazların hassasiyet seviyeleri ve kalibrasyon durumları test sürecinin başarısını doğrudan etkilemektedir.

4. DENEYLERİN YAPILIŞI (PERFORMING OF EXPERIMENTS)

Mevcut ve yeni tasarım TTS'ler, kapı tasarımları dışında tüm yapısal özellikleri, bileşenleri ve çalışma prensipleri açısından birebir aynıdır. Ayrıca, her iki sistem de aynı ortam koşullarında test edilerek karşılaştırmalı bir değerlendirme yapılmıştır.

Böylece, elde edilen performans farklarının yalnızca kapı tasarımındaki değişiklikten kaynaklandığı doğrulanmıştır.

TS EN ISO 23953-2:2024 standardına uygun olarak test odasında dikey teşhir tipi soğutucu test edilmek üzere [21];

- Testlerin yapılacağı odanın koşulları, kullanılan standartlara uygun olarak belirlenerek Sınıf-3 şartlarında koşullandırılmıştır.
- Test koşulları, 25 °C ± 1 °C sıcaklık, 0,1-0,2 m/s hava akış hızı ve %60 ± %3 bağıl nemi içermektedir.
- Deneye başlamadan önce TTS içerisine konulan gıda maddeleri yerine standarda uygun olarak 100 x 100 x 50 mm boyutlarında M-paketler kullanılarak sıcaklık ölçümleri alınmak üzere M-paket merkezlerine ısıl çiftler yerleştirilmiştir.
- Sol, orta ve sağ taraf olmak üzere 48 adet M-paket sıcaklık ölçüm noktası ve 12 adet kabinin belirli bölgelerinden ölçümler alınmıştır.
- Test süresi boyunca, cam kapılara 24 saatlik süre içinde 12 saat boyunca döngüsel olarak açma-kapama testleri uygulanmıştır. Kapı açma-kapama periyodu standart gereği testin ilk 12 saatinde yapılmıştır.
- Testler sırasında ölçümler her 20 saniyede bir kaydedilmiştir.
- 24 saatlik enerji tüketimi, enerji analizörü kullanılarak ölçülmüştür.
- Test odasında bulunan; sıcaklık, basınç, akış hızı ve enerji tüketimi ölçüm cihazları, doğru ölçümler yapılabilmesi için belirli periyotlarda kalibre edilmektedir.
- Mevcut ve yeni tasarım TTS'lerin kapıları haricinde tüm özellikleri ve ortam şartları aynıdır.

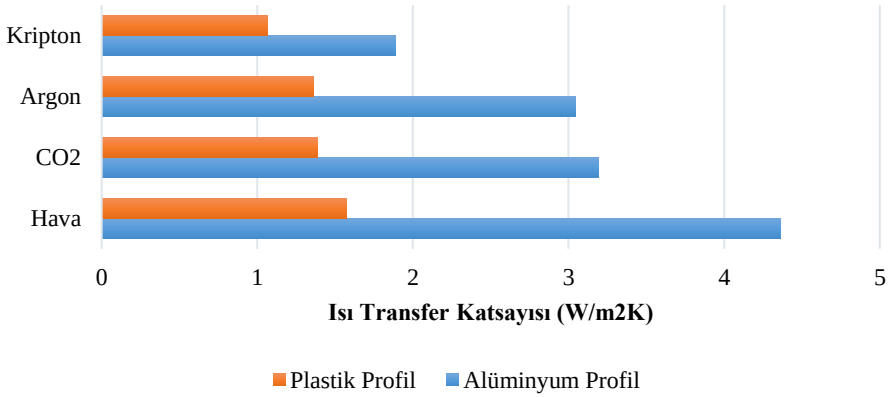
5. BULGULAR (RESULTS)

Bu çalışmada geliştirilen yeni kapı tasarımının termal performansı, prototip üretimi ve test süreçleri ile detaylı olarak incelenmiştir. Mevcut tasarıma kıyasla daha yüksek ısıl dirence sahip plastik U-profil ve çift cam arasındaki gelişmiş izolasyon sağlayan argon akışkanın, sistemin genel enerji verimliliğine etkileri değerlendirilmiştir.

Şekil 5'te verilen grafikte farklı gaz ile doldurulmuş kapıların (Kripton, Argon, CO_2 ve hava) plastik profil ve alüminyum U-profil kullanılması durumundaki ısı iletkenlik değeri (W/m^2K) karşılaştırılmıştır.

Alüminyum profiller, plastik profillere kıyasla her durumda daha yüksek ısı transfer katsayısına sahiptir. Bu, alüminyumun plastikten daha yüksek ısıl iletkenliğe sahip olduğunu gösterir ve bu nedenle daha fazla ısı transferine neden olur. Argon, CO_2 ve havaya kıyasla daha düşük ısı iletkenlik değeri sahiptir. En düşük ısı transfer katsayısı Kriptonda olmasına rağmen maliyetinin yüksek ve temin edilmesinin zor olması nedeniyle tercih edilmemiştir.

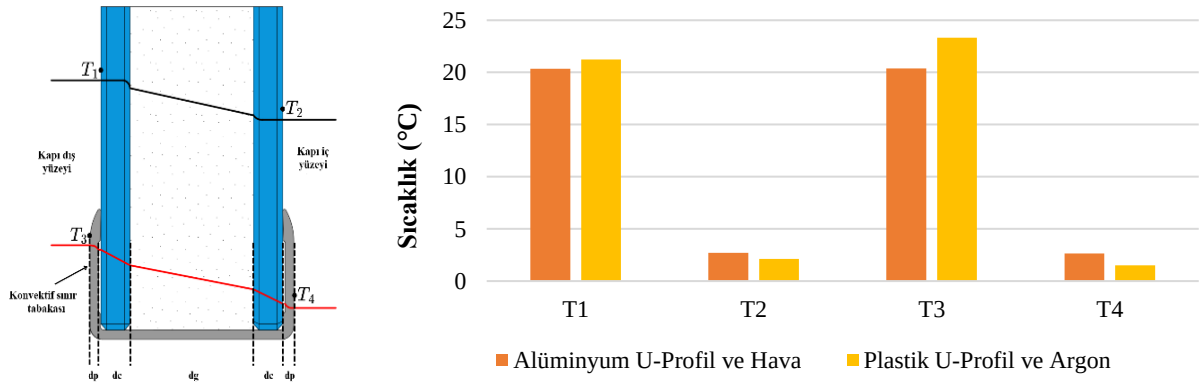
Şekil 5, yeni bir kapı tasarımında hangi gazın ve profil malzemesinin tercih edilmesi gerektiğine dair karar verme sürecinde önemli veriler sunmaktadır. Özellikle yüksek yalıtım gerektiren uygulamalarda Argon ve plastik U-profil kombinasyonu en iyi seçenek olarak görünmektedir. Yapılan analizler, bu kombinasyonun hem enerji verimliliğini artırdığını hem de ısı kayıplarını önemli ölçüde azalttığını göstermektedir. Yeni sistemin ısı transfer katsayısında %30,26'lık bir iyileşme söz konusudur. Bu gelişme, kapının termal performansını artırarak ısı yalıtımını iyileştirmekte ve uzun vadede enerji maliyetlerini düşürmektedir.



Şekil 5. Plastik ve alüminyum U-profil kullanılan kapıların akışkan değişimine göre ısı iletkenlik değeri karşılaştırma grafiği (Comparison graph of thermal conductivity value of plastic and aluminum U-profile doors according to fluid change)

Yapılan çalışma sonucunda Şekil 6'da belirtilen T_1, T_2, T_3 ve T_4 noktalarından yapılan ölçümlerin sonuçları grafik şeklinde verilmiştir. Mevcut durumdaki kapı yapısı kullanılan soğutucunun 25°C sıcaklıktaki ortamda bulunan camın dış yüzey sıcaklığı 20,36°C (T_1), yeni tasarım kapı yapısında ise T_1 sıcaklığı 21,23°C olarak ölçülmüştür. Camın iç yüzey sıcaklığı (T_2) ise sırasıyla 2,7 ve 2,14°C, U-profil dış yüzey sıcaklığı (T_3) 20,37 ve 23,32°C, U-profil iç yüzey sıcaklıkları (T_4) ise 2,65 ve 1,51°C olarak ölçülmüştür.

Yeni tasarımda dış yüzey ortam sıcaklığına, iç yüzey ise soğutucu sıcaklığına daha fazla yaklaşmıştır. Bu durum, ısı transferinin ve dolayısıyla ısı kazançlarının azaltıldığını göstermektedir. Plastik U-profil ve Argon kullanımı, alüminyum U-profil ve hava kullanımına kıyasla daha iyi bir termal izolasyon sağlamaktadır. Daha düşük iç yüzey sıcaklığı, soğutucu sistemin daha az enerji harcayarak iç ortam sıcaklığının muhafaza edilmesine yardımcı olmaktadır. Aynı zamanda, TTS'ler için kritik bir faktör olan toplam teşhir alanı (TTA) 4,3 m^2 değerinde korunmuş olup, yeni tasarımda herhangi bir daralma veya kayıp yaşanmamıştır. Bu sayede, ürünlerin sergilenme kapasitesi mevcut sistemle aynı seviyede tutulmuştur. Böylece, tasarım değişikliği TTA'yı etkilemeden sistemin genel performansını ve verimliliğini artırmıştır.



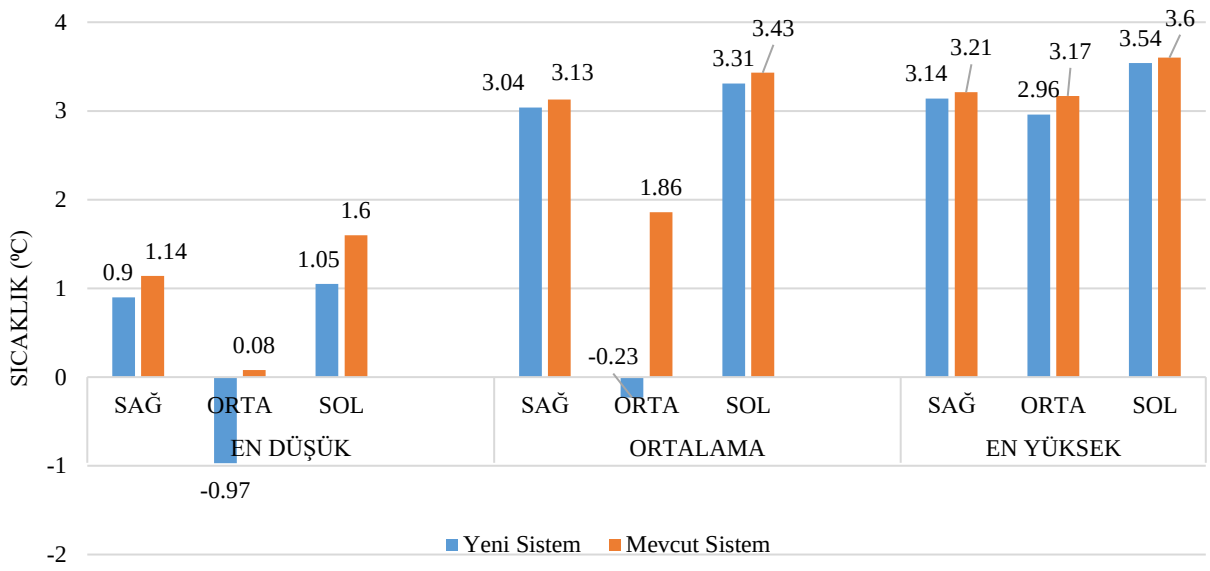
Şekil 6. Mevcut ve yeni tasarım kapı yapılarında belirlenen noktalardaki sıcaklık ölçümleri karşılaştırma grafiği (Comparison graph of temperature measurements at specified points in existing and new door designs)

Teşhir tipi soğutucular, içinde bulundurdukları paketlerin sıcaklık sınıflarına göre kategorize edilerek, ürünlerin teşhiri ve depolanması için belirli sıcaklık aralıklarına uygun şekilde tasarlanmaktadır. Ürünlerin güvenli bir şekilde saklanabilmesi için özel sıcaklık sınıfları gerekmektedir. Sıcaklık sınıfları, ürünlerin saklama koşullarının uygunluğuna göre belirlenmektedir.

Şekil 7'de mevcut ve yeni tasarıma göre soğutucunun sağ, orta ve sol bölgesinde bulunan paketler işaretlenerek en düşük, ortalama ve en yüksek sıcaklıkların grafiği verilmiştir. Mevcut ve yeni tasarım olarak karşılaştırma yapıldığında yeni tasarımda soğutucunun her bölmesindeki paket sıcaklığının daha düşük olduğu ve orta bölgedeki sıcaklık dalgalanmalarını daha iyi yönettiği görünmektedir.

Aynı zamanda paket sıcaklıkları arasındaki fark da azalmıştır. Buna bağlı olarak paketlerin daha homojen sıcaklık dağılımına sahip olduğu görülmektedir. Böylece ürünlerin daha iyi korunmasına olanak sağlanmaktadır. Sağ ve sol bölgelerdeki sıcaklık farkları azalırken, genel soğutma performansı artmıştır. Bu durum, soğutucunun daha dengeli bir hava akışı sağladığını ve ürünlerin daha iyi korunmasını desteklediğini göstermektedir. Ayrıca, sıcaklık homojenliğinin sağlanması, ürünlerin kalite kaybını önleyerek raf ömrünü uzatmaya yardımcı olmaktadır. Bu durum, özellikle hassas sıcaklık gereksinimi olan ürünler için önemli bir avantaj sağlamaktadır.

Yapılan çıkarıma ek olarak orta bölümdeki hava akımının sağ ve sol bölümlere bakıldığında daha başarılı olduğunu söylemek mümkündür.



Şekil 7. Mevcut ve yeni tasarım için sol, orta ve sağ bölgelerdeki saatlik maksimum, minimum ve ortalama paket sıcaklıkları (Hourly maximum, minimum, and average package temperatures in the left, center, and right regions for the existing and new designs)

Mevcut ve Yeni tasarım kapı kullanılan TTS'lerin enerji tüketimi hesaplamaları gerçekleştirilmiş ve Tablo 4'te listelenmiştir.

Tablo 4. Mevcut ve yeni tasarım kullanılan TTS'lerin Enerji Tüketimi Tablosu (Energy Consumption Table of existing and new design used TTSs)

	DET (kWh/24h)	**SET (kWh/24h)**	**TET (kWh/24h)**	**YET (kWh/yıl)**	**SYET (kWh/yıl)**	**TTA (m^2)**	**EVE**	**Enerji Etiket Sınıfı**
Mevcut Tasarım	1,938	5,16	7,10	2592	20245	4,3	12,8	B
Yeni Tasarım	1,925	4,90	6,8	2489	20245	4,3	12,3	B

Eşitlik 11 kullanılarak DET değeri hesaplanmıştır. Yapılan analizler sonucunda, mevcut tasarıma sahip TTS'nin, DET değeri 1,938 kWh/24h, yeni tasarıma sahip TTS'in ise 1,925 kWh/24h olarak belirlenmiştir [21]. Bu veriler, yeni tasarımın günlük enerji tüketimi açısından mevcut tasarıma kıyasla daha verimli olduğunu göstermektedir.

Buna ek olarak, SET değerleri de Eşitlik 12 kullanılarak hesaplanmıştır [21]. Mevcut sistemde SET değeri 5,16 kWh/24h olarak belirlenirken, yeni sistemde bu değer 4,9 kWh/24h olarak bulunmuştur.

TET değerleri ise Eşitlik 13 temel alınarak, DET ve SET değerlerinin toplamı ile hesaplanmıştır [21]. Bu hesaplamalar sonucunda, mevcut tasarımın TET değeri 7,10 kWh/24h, yeni tasarımın ise 6,8 kWh/24h olduğu belirlenmiştir. Yeni tasarımın TET değerinde sağlanan düşüş, sistemin toplam enerji tüketiminde önemli bir azalma sağladığını ortaya koymaktadır.

YET, Eşitlik 14 kullanılarak hesaplanmıştır. YET değeri, TET değerinin 365 gün ile çarpılmasıyla elde edilmektedir [22]. Bu hesaplama sonucunda, mevcut tasarıma sahip TTS'in yıllık enerji tüketimi 2592 kWh/yıl, yeni tasarıma sahip TTS'in ise 2489 kWh/yıl olarak belirlenmiştir. Bu veriler, yeni tasarımın yıllık bazda enerji tüketimini azaltarak işletme maliyetlerine olumlu yönde katkı sağladığını göstermektedir.

Standart Yıllık Enerji Tüketimi (SYET), Eşitlik 15 kullanılarak hesaplanmıştır. Bu hesaplamada M, N, Y, C ve P katsayıları dikkate alınmaktadır. Y katsayısı TTA üzerinden hesaplamalara dahil edilirken, diğer katsayılar Kaynak 22 içerisinde yer alan yönetmelik doğrultusunda belirlenmiştir. TTS'lerin kapı tasarımları haricindeki tüm diğer özellikleri aynı olduğu için M, N, C ve P katsayıları her iki sistem için de aynı değerlerde alınmıştır [22].

Bu katsayıların belirlenmesi sürecinde:

- M ve N katsayıları, soğutucunun kategorisine göre seçilmiş olup, çalışmada kullanılan teşhir tipi soğutucu "Dikey ve kombine süpermarket soğutma kabinleri" kategorisine girdiği için M = 9,1 ve N = 9,1 olarak alınmıştır.
- C katsayısı, TTS'in paket sıcaklık koşullarına göre belirlenmiş olup, dikey ve M1 (-1/+5°C) sıcaklık sınıfına sahip olduğu için C = 1,15 olarak alınmıştır.
- P katsayısı, TTS'in motor ünitesinin harici veya dahili olmasına bağlı olarak seçilmektedir. Çalışmada değerlendirilen sistem harici motor ünitesine (remote/dıştan motorlu) sahip olduğu için P= 1 olarak hesaplamalara dahil edilmiştir [18].

Bu parametrelerin ışığında yapılan hesaplamalar sonucunda, SYET değeri her iki TTS sistemi için de 20.245 kWh/yıl olarak belirlenmiştir.

EVE ise Eşitlik 16 kullanılarak hesaplanmıştır. YET ile SYET oranlandığında, mevcut tasarım için EVE değeri 12,8, yeni tasarım için ise 12,3 olarak belirlenmiştir. Bu EVE değerleri, teşhir tipi soğutucular için geçerli olan enerji etiketi sınıflandırmasına göre değerlendirildiğinde, her iki sistemin de B enerji sınıfına girdiği belirlenmiştir [22].

Çalışmada belirsizlik analizi gerçekleştirilmiş olup, sonuçlar Tablo 5'te sunulmuştur. Analiz kapsamında, M paket sıcaklık ölçümünde kullanılan ısıl çiftler, test odası sıcaklık ve bağıl nem ölçümlerinde kullanılan termohigrometre, test odası hava hızı ölçümlerinde kullanılan anemometre ve enerji tüketimi ölçümünde kullanılan dijital güç ölçer değerlendirilmiştir. Ölçümlerde kullanılan her bir ekipman için belirsizlik hesaplamaları yapılarak sonuçlar detaylandırılmıştır. Yapılan hesaplamalar sonucunda elde edilen belirsizlik değerlerinin kabul edilebilir seviyelerde olduğu görülmüştür.

Tablo 5. Soğutma sisteminde kullanılan ölçüm ekipmanlarının belirsizlik analizi (Uncertainty analysis of the measurement equipment used in the cooling system)

Ekipman	Birim	Belirsizlik analizi
Isıl çift	± %	0,320
Sıcaklık ölçer (Termohigrometre)	± °C	0,116
Bağıl nem ölçer (Termohigrometre)	± %	1,522
Anemometre	± m/s	0,052
Dijital güç ölçer	± %	0,387

5.1 Enerji Performans Analizi (Energy Performance Analysis)

Enerji performans analizi sonucunda, yeni tasarımın mevcut tasarım yerine uygulanması durumunda enerji verimliliğine olan etkileri detaylı bir şekilde incelenmiştir. Ayrıca, soğutucunun mevcut ve yeni tasarımı arasındaki elektrik tüketim maliyetleri değerlendirilerek, işletme giderleri üzerindeki etkileri analiz edilmiştir. Yıllık tüketilen elektrik gücünü karşılamak için doğalgazın kullanımı durumunda, tüketilecek miktarı hesaplamak için eşitlik 18 kullanılmıştır [28]. Buna ek olarak elektrik enerjisi birim fiyatı 4,37 ₺/kWh olarak kabul edilmiştir.

$$AC_1 = WxNxET \quad (18)$$

Enerji maliyeti açısından değerlendirildiğinde, mevcut sistemde yıllık enerji gideri 11.324,85 ₺ olarak hesaplanırken, yeni sistemin devreye alınmasıyla bu maliyetin 10.878,24 ₺ seviyesine düştüğü görülmektedir. Bu durum, enerji tüketiminde sağlanan iyileşmeler sayesinde yıllık maliyetlerde %3,94 oranında bir azalma sağlandığını göstermektedir. Sonuç olarak, yeni sistem hem ekonomik hem de çevresel açıdan daha

avantajlı bir çözüm sunmakta olup, uzun vadede işletme maliyetlerini düşürme potansiyeline sahiptir.

Mevcut ve yeni sistem için maliyet analizi yapılmıştır. Her iki sistemde de kullanılan cam ve conta bileşenlerinin maliyetlerinde herhangi bir değişiklik olmamış, bu parçalar sabit maliyet unsurları olarak değerlendirilmiştir. Ancak yeni tasarımda alüminyum U-profil yerine plastik U-profil kullanılması ve izolasyon gazı olarak havadan daha yüksek ısıl dirence sahip Argon gazının tercih edilmesi, sistemin genel maliyet yapısında farklılık yaratmıştır. Yapılan analizler sonucunda, U-profil değişikliği ve izolasyon gazı seçiminden kaynaklanan maliyet farkları hesaplanmış ve yeni tasarımın malzeme maliyetinin mevcut sisteme kıyasla %1,3 oranında azaldığı belirlenmiştir. Tablo 5'te, mevcut ve yeni sistemlere ait enerji tüketimi ve yıllık maliyet değerleri detaylı olarak sunulmuştur. Yapılan analizler sonucunda, yeni sistemin uygulanmasıyla yıllık enerji tüketiminde 102,2 kWh'lik bir elektrik tasarrufu sağlandığı belirlenmiştir. EVE değeri 12,8'den 12,3'e düşürülmüş ve TTS'lerin enerji etiketi sınıfı "B" olarak belirlenmiştir. Bu enerji tasarrufu, sadece işletme maliyetlerini düşürmekle kalmayıp, aynı zamanda çevresel sürdürülebilirliğe de katkıda bulunarak elektrik tüketimine bağlı karbon salımını da azaltmaktadır

Tablo 6. Enerji tüketimi, elektrik maliyeti ve üretim süresi (Energy consumption, electricity cost and production time)

	Yıllık Enerji Tüketimi (YET) (kWh/yıl)	Yıllık Elektrik Maaliyeti (₺)	Üretim Süresi (s)
Mevcut Tasarım	2591,5	11.324,85	996
Yeni Tasarım	2489,3	10.878,24	342
İyileşme (%)	3,94	3,94	65,66

Enerji ve maliyet analizine ek olarak, U-profilin üretim süreleri de değerlendirilmiştir. Tablo 5'te göründüğü üzere mevcut tasarımda kullanılan alüminyum U-profilin üretim süresi 16 dakika 36 saniye iken, yeni tasarımda plastik U-profilin üretim süresi 5 dakika 42 saniyeye düşmüştür. Bu durum, üretim süresinde önemli bir iyileşme sağlamakta ve yeni tasarımın sadece enerji ve maliyet açısından değil, aynı zamanda üretim süresi açısından da daha verimli olduğunu göstermektedir. Daha kısa üretim süresi, toplam üretim kapasitesini artırarak süreçlerin hızlanmasına ve operasyonel verimliliğin yükselmesine katkı sağlamaktadır.

Bahar ve ark. (2021) tarafından yapılan çalışmada, propan soğutucu akışkanı kullanılan endüstriyel tip derin dondurucuda mevcut rezistanlı kapı (Tip1) ile yeni tasarım olan buğu önleyici film kaplamalı kapı (Tip2) kullanılan sistemler karşılaştırılmıştır. Tip2'nin günlük enerji tüketimi 48,34 kWh, Tip1'in ise 39,33 kWh olarak hesaplanmış ve enerji etiket sınıfı E'den D'ye düşürülmüştür [29]. Benzer şekilde, bu çalışmada da TTS'ler için geliştirilen yeni kapı tasarımının, termal performansı iyileştirdiği ve enerji tüketimini düşürdüğü ortaya konmuştur. Her iki çalışma da kapı tasarımındaki yeniliklerin, çevreci soğutucu akışkanlı sistemlerde sürdürülebilirliği artırarak enerji verimliliğine katkı sağladığını göstermektedir.

Yapılan kapsamlı literatür taramalarında, TTS'ler için yeni kapı tasarımına yönelik çalışmaların kısıtlı olduğu görülmüştür. Mevcut araştırmalar genellikle farklı kapı malzemeleri, çift cam sistemleri veya anti-fog kaplama gibi uygulamaların enerji tüketimi ve termal performans üzerindeki etkilerine odaklanmaktadır. Ancak, bu çalışmada önerilen kapı tasarımı ile hem ısı kazançlarının azaltılması hem de üretim maliyetlerinin optimize edilmesi hedeflenmiş, böylece enerji verimliliği ve operasyonel süreçler açısından önemli bir yaklaşım sunulmuştur. Bu bağlamda, çalışma literatürdeki mevcut araştırmalara önemli bir katkı sağlamaktadır.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER (CONCLUSIONS AND RECOMMENDATIONS)

Bu çalışmada, mevcut ve yeni kapı tasarımlarına TTS'ler soğutma performansı, ısıl kazanç, enerji verimliliği, maliyet, operasyonel süreçler ve CO_2 salımı açısından karşılaştırılmıştır. Çalışmanın literatür ile karşılaştırılması Tablo 7.'de verilmiştir.

Tablo 7. Literatür tablosu (Table of literature)

Çalışmanın Amacı	Çalışma Metodu	Çalışma Sonuçları
Riffat vd. (2015), ticari vakumlu cam ürünlerini sayısal olarak incelemek ve aerojel destek direklerinin termal performansa etkisini araştırmak.	CFD tabanlı analizler kullanılmış, vakumlu cam için aerojel destek direkleri önerilmiş, destek sütunu sayısının U değerine etkisi incelenmiştir.	Aerojel destek direkleri ile U değeri 0,67 W/m²K'ye düşürülebilirken, mevcut ürün için 1,20 W/m²K olduğu görülmüştür. Destek sütunu sayısı optimize edilirse U değeri 0,40 W/m²K'nin altına düşebilir [30]
Aydın (2006), farklı iklim koşulları için çift camlı pencerelerde optimum hava tabakası kalınlığını belirlemek.	İzotermal yüzeyler kabul edilerek birleşik ısı transferi analizi yapılmış, Türkiye'deki farklı iklim bölgeleri için simülasyonlar gerçekleştirilmiştir.	Optimum hava tabakası kalınlığı Antalya için 18–21 mm, Trabzon ve Ankara için 15–18 mm, Kars için 12–15 mm olarak belirlenmiştir. Enerji kayıplarının optimize edilen hava katmanı ile azaltılabileceği gösterilmiştir [31].
Cüce vd. (2015), konut binalarındaki cam yüzeylerden kaynaklanan ısı kayıplarını azaltmak amacıyla yeni cam teknolojilerini incelemek.	Çift ve üçlü cam sistemleri ile vakumlu ve aerogel camların termal performansları karşılaştırılmıştır.	Vakumlu ve aerogel camların U değeri 0,30 W/m²K olarak bulunmuş, Krypton ve Xenon gazlarının yüksek maliyetli ancak yüksek termal performans sunduğu belirtilmiştir [32].
Cüce vd. (2016), vakum cam teknolojisinin teknik, ekonomik ve çevresel etkilerini değerlendirmek.	Low-E kaplamalar ile vakum cam optimizasyonları üzerine analizler yapılmıştır.	Vakum camın U değeri 0,20 W/m²K'ye kadar düşürülebileceği belirlenmiş [33],
Alvur vd. (2024), pencere sistemlerinde oluşan ısıl köprülerin bina enerji verimliliğine etkisini incelemek ve azaltma stratejilerini belirlemek.	Pencere çerçeveleri ve pencere-duvar birleşim noktalarındaki ısıl köprülerin etkileri ve yalıtım teknolojileri analiz edilmiştir.	Vakum camı, faz değişim malzemeleri ve ince film kaplamalar gibi teknolojilerin ısıl kayıpları azalttığı ve enerji verimliliğini artırdığı görülmüştür [34].
Bu çalışma, teşhir tipi soğutucuların cam kapılarında hava yerine argon kullanımının deneysel analiz edilmesi.	Mevcut çift camlı sistemde kullanılan hava ve alüminyum U-profil yerine argon gazı ve plastik U-profil kullanarak yeni bir TTS kapı tasarımı geliştirilmiş ve bu tasarımın ısı transfer analizleri yapılmıştır.	Enerji tüketimi %3,94 azaltılarak, üretim süresini %65,66 kısaltılmış ve maliyet %1,3 düşürülmüştür.

Tasarlanan sistemin prototipi üretilerek TS EN ISO 23953-2:2024 standardı kapsamında test faaliyetleri gerçekleştirilmiştir. Soğutucunun belirlenen T_1, T_2, T_3 ve T_4 noktalarından sıcaklık ölçümleri alınmış ve elde edilen sonuçlar aşağıda yorumlanmıştır:

- Plastik U-profil ve Argon gazı kullanımı, mevcut alüminyum U-profil ve hava sistemine kıyasla ısı transferini azaltarak iç yüzey sıcaklıklarının soğutucu ortam sıcaklığına daha yakın olmasını sağlamıştır.
- Aynı zamanda soğutucu dış yüzey profilinde gerçekleşen yoğuşmaların da önüne geçilerek malzeme ömrü ve estetik görünüm korunmuştur.
- Yeni tasarımda, dış yüzey sıcaklığının ortam sıcaklığına, iç yüzey sıcaklığının ise soğutucu sıcaklığına daha fazla yaklaşması, sistemin

daha iyi bir termal denge sağladığı sonucuna ulaşılmıştır.
- Bunlara ek olarak, yapılan yeni tasarımdan TTS'in 4,3 m2 olan TTA korunmuş, mevcut sistemdeki ürün sergileme kapasitesi sabit tutulmuştur. Bu durum, perakende satış ortamlarında kullanım açısından herhangi bir dezavantaj oluşturmamıştır.

Mevcut ve yeni tasarım kapı yapısına sahip TTS'in sol, orta ve sağ taraf olmak üzere 48 adet M-paket sıcaklıkları alınmış ve karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonuçları aşağıda verilmiştir:

- Yeni tasarımın teşhir tipi soğutuculardaki sıcaklık dağılımını daha homojen hale getirdiği ve paket sıcaklıkları arasındaki farkı azalttığı belirlenmiştir. Bu durum, ürünlerin saklama koşullarının iyileştirilmesine ve soğutma performansının artırılmasına doğrudan katkı sağlamaktadır.
- Sağ ve sol bölgelerdeki sıcaklık farkı mevcut ve yeni sistem için sırasıyla en düşük 0,46°C, 0,15°C, ortalama 0,30°C, 0,27°C ve en yüksek 0,39°C, 0,40°C olarak ölçülmüştür. Özellikle, sağ ve sol bölgelerdeki sıcaklık farklarının azalması, soğutucunun her bölgesinde daha kararlı bir sıcaklık ortamı oluşmasını sağlamış ve bu sayede ürünlerin raf ömrünü koruyabilecek daha stabil saklama koşulları elde edilmiştir.

Mevcut ve yeni sistemin ekipman maliyeti, enerji, tüketimi ve operasyonel süreçlerdeki performansı değerlendirilmiştir. Bu değerlendirme sonuçlarında;

- Yeni sistemin maliyetinde mevcut sisteme göre %1,3 oranında bir azalma sağlamış ve daha ekonomik bir üretim süreci oluşturmuştur.
- Bununla birlikte, yeni sistemin uygulanmasıyla yıllık enerji tüketiminde %3,94 oranında azalma elde edilmiştir. Ayrıca, EVE değeri 12,8'den 12,3'e düşürülerek TTS'lerin enerji etiketi sınıfı "B" olarak belirlenmiştir. Daha düşük TET ve YET değerleri, enerji maliyetlerini azaltırken, karbon salımının da düşmesine katkı sağlamaktadır.
- Yeni sistemde mevcut sisteme göre enerji maaliyetinde %3,94 oranında bir azalma sağlamış ve işletme giderlerini uzun vadede düşürme potansiyeli sunmuştur.
- Alüminyum U-profil yerine plastik U-profil kullanılması, üretim süresinde %65,66 oranında bir iyileşme elde edilmiştir.
- Üretim süresindeki bu kısalma, toplam üretim kapasitesinin artmasına, süreçlerin hızlanmasına ve operasyonel verimliliğin yükselmesine katkıda bulunmaktadır.

Bu çalışmada, mevcut ve yeni kapı tasarımlarına sahip TTS sistemleri karşılaştırılmış ve yeni tasarımın enerji tüketimini ve maliyetleri düşürdüğü, ısı kayıplarını azaltarak soğutma verimliliğini artırdığı belirlenmiştir. Ayrıca, üretim süresindeki iyileştirmeler operasyonel süreçleri hızlandırmış, enerji verimliliği ve azaltılmış karbon salımı, iklim değişikliği ile mücadelede önemli bir katkı sağlamaktadır. Önerilen sistem, enerji verimliliğini artıran ve karbon salımını azaltan yenilikçi tasarım özellikleriyle eko-tasarım gerekliliklerine uygun olarak geliştirilmiştir. Sonuç olarak, yeni kapı tasarımı, enerji verimliliği ve sistem performansını artıran yenilikçi bir çözüm sunmaktadır.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

Çalışmaya vermiş oldukları desteklerinden dolayı Nurdil Teknik Soğutma A.Ş' ye teşekkür ederiz. / We would like to thank Nurdil Refrigeration Inc. for their support of the study.

ETİK STANDARTLARIN BEYANI
(DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

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

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

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

***Fatma Nur ERDOĞMUŞ*:** Sonuçların analizi ve makalenin yazım işlemlerini gerçekleştirmiştir.

Performed the analysis of the results and the writing of the article.

Sedanur BİLGİN: Deneylerin gerçekleştirilmesi, ısı transferi hesaplamaları ve makalenin yazım işlemlerini gerçekleştirmiştir.

Performed the experiments, heat transfer calculations and writing of the article.

Sümeyra İBİŞ: Teknik çizimlerin oluşturulması, literatür araştırması ve makalenin yazım işlemlerini gerçekleştirmiştir.

Carried out the creation of technical drawings, literature research and writing of the article.

Leyziva AYDEMİRLİ: Literatür araştırması, ısı transfer hesaplarının yapılması ve makalenin yazım işlemlerini gerçekleştirmiştir.

Carried out the literature research, heat transfer calculations and writing of the article.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

There is no conflict of interest in this study.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

[1] Resmi Gazete, 2024. Florlu Sera Gazlarına İlişkin Yönetmelik, Sayı: 32693. 15 Ekim 2024 Salı.

[2] Türkiye Cumhuriyeti Cumhurbaşkanlığı Strateji ve Bütçe Başkanlığı. 12. Kalkınma Planı (2024-2028).

[3] Erten S., Erdoğmuş F.N., Öder M., Ezber A.B., Ataş Ş. Ve Aktaş M. (2024). Soğutma Sistemlerinin ve Çevresel Etkilerinin Uluslararası Standart ve Yönetmelik Kriterleri Doğrultusunda İncelenmesi. Yenilikçi Teknolojiler ve Bilimsel Araştırma Yöntemleri, Ankara/Türkiye.

[4] Cüce, P.M., Cüce, E. & Şen, H. (2022). Numerical investigation of barrier effect with air, argon and krypton gases in double glazing application. 19th International Conference on Sustainable Energy Technologies, İstanbul, Turkey, pp.355-362, 2022.

[5] Cho, K., Cho, D.W., Koo. B., Yun, Y. (2023). Thermal Performance Analysis of Windows, Based on Argon Gas Percentages between Window Glasses. Buildings 2023, 13(12), 2935.

[6] Li, J., Tian, Y., Sun, S. & Li, J., Zhang, L. & Chen, K. (2018). Effect of Argon Filling Ratio on Heat Transfer Coefficient of Double-Glazing. Advanced Functional Materials, 327-336.

[7] Baek, S., Kim, S. (2021). Analysis of the Surface Temperature and Energy Performance for the Double Paned Glazing Filled with Carbon Dioxide as an Insulating Gas. Turkish Journal of Computer and Mathematics Education (TURCOMAT). 12. 617-625.

[8] Onatayo, D., Aggarwal, R, & Srinivasan, R. & Shah, B. (2024). A data-driven approach to thermal transmittance (U-factor) calculation of double-glazed windows with or without inert gases between the panes. Energy and Buildings. 305. 113907.

[9] Cüce, E. (2018). Accurate and reliable U-value assessment of argon-filled double glazed windows: A numerical and experimental investigation. Energy and Buildings, Volume 171, 2018, Pages 100-106, ISSN 0378-7788.

[10] Summ, T., Ehrenwirth, M., Trinkl, C., Zörner, W., Pischow, K., Greenough, R., Oyinlola M., (2023). Effect of argon concentration on thermal efficiency of gas-filled insulating glass flat-plate collectors. Applied Thermal Engineering, Volume 230, Part A, 2023, 120657, ISSN 1359-4311.

[11] Sadeghi, G., Safarzadeh, H., Bahiraei, M., Ameri, M. & Raziani, M. (2019). Comparative study of air and argon gases between cover and absorber coil in a cylindrical solar water heater: An experimental study. Renewable Energy, Volume 135, 2019, Pages 426-436, ISSN 0960-1481.

[12] Lolli, N. & Andresen, I. (2016). Aerogel vs. argon insulation in windows: A greenhouse gas emissions analysis. Building and Environment, Volume 101, 2016, Pages 64-76, ISSN 0360-1323.

[13] Bazgaou, A., Aqili, N., Benahmed, A., Ibaaz, K., Oubenmoh, S., Er-Raki, M., Belhorma, B., Amenzou, N., Saadaoui, A., Hartiti, B., Labrim, H., Marah, H. (2023). Optimizing greenhouse design: Effect of argon double glazing on climatic factors distribution and energy savings. Solar Energy, Volume 265, 2023, 112145, ISSN 0038-092X.

[14] Shaik S.B.,Gorantla K.,Shaik S.,Afsal A., Rajhi A.,Cuce E.,(2023) Experimental and theoretical examination of the energy performance and CO2 emissions of room air conditioners utilizing natural refrigerant R290 as a substitute for R22. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry Volume 148, January 2023.

[15] Mert Cuce P.,Cuce E.,Guclu T.,Shaik S., Alshahrani S., Saleel A.,(2022). Effect of using hybrid nanofluids as a coolant on the thermal performance of portable thermoelectric refrigerators. Sustainable Energy Technologies and Assessments Volume 53, Part C, October 2022, 102685.

[16] Cuce E.,Guclu T., Mert Cuce P.,(2020). Improving thermal performance of thermoelectric coolers (TECs) through a nanofluid driven water to air heat exchanger design: An experimental research. Energy Conversion and Management Volume 214, 15 June 2020, 112893.

[17] Yamankaradeniz, R., Horuz, İ., Kaynaklı, Ö., Coşkun, S. & Yamankaradeniz, N. (2017). Soğutma Tekniği ve Isı Pompası Uygulamaları, Bursa: Dora Yayıncılık.

[18] Çengel Y., A., (2009). Isı ve Kütle Transferi Pratik Bir Yaklaşım, 3.basım, İzmir: Güven Bilimsel Yayınları.

[19] Aydın, O. (2006). Conjugate heat transfer analysis of double pane windows. Building and Environment, Volume 41, Issue 2, 2006, Pages 109-116, ISSN 0360-1323.

[20] Chaomuang, N., Laguerre, O., Flick, D. (2020). A simplified heat transfer model of a closed refrigerated display cabinet. Thermal Science and Engineering Progress, Volume 17, 2020, 100494, ISSN 2451-9049.

[21] TS EN ISO 23953-2:2024 Soğutuculu teşhir dolapları-Bölüm:2 Sınıflandırma, kurallar ve deney şartları (ISO 23953-2:2023)

[22] 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. official journal of the European Union, (2019).

[23] Erten, S., Öder, M., Aktaş, M., Şevik, S., & Şensoy, B. (2024). Design and experimental analysis of condensate pan for plug-in refrigerated display cabinets: Improving drying efficiency. Applied Thermal Engineering, 248, 123198

[24] Jarahnejad, M., "New Low GWP Synthetic Refrigerants", Master of Science Thesis, 2012.

[25] Referans Metal Ltd. AMS 4156 AlMg0.7Si 6063 T6. https://www.referansmetal.com/alasimli-aluminyum/product/260/uzay-havacilik-savunma/boru-profil-ekstruzyon/ams-4156-almg0-7si-6063-t6

[26] Plastimak- Plastik Profil Enjeksiyon San. Tic. A.Ş. (2021, January 5). Pls Hard Pvc – 10 Technical Information. https://www.plastimak.com/

[27] Yakut A.K., Selbaş R. ve Yakut M.Z. (2022). Mühendislikte Isı Transferi, Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Yayın No: 008.

[28] Aktekeli B., Aktaş M., Koşan M., Arslan E. ve Şevik S. (2025). Experimental study of a novel design bi-fluid based photovoltaic thermal (PVT)-assisted heat pump dryer. Renewable Energy Volume 238, January 2025, 12197.

[29] Bahar E.M., Erten, S., ve Aktaş M. (2024). An Experimental Study Towards Decreasing the Energy Efficiency Index Value in Industrial Refrigerators. Gazi University Journal of Science Part C: Desıgn and Technologcy. 9(3): 432-445.

[30] Riffat, S.B., Cüce, E. (2015). Aerogel-Assisted Support Pillars for Thermal Performance Enhancement of Vacuum Glazing: A CFD Research for a Commercial Product. Arabian Journal for Science and Engineering, 40(8). 10.1007/s13369-015-1727-5

[31] Aydın, O. (2006). Conjugate heat transfer analysis of double pane windows. Building and Environment, Volume 41, Issue 2, 2006, Pages 109-116, ISSN 0360-1323.https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.01.011

[32] Cuce, E, Riffat, S. B. (2015). A state-of-the-art review on innovative glazing technologies, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 41, Pages 695-714, ISSN 1364-0321. https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.08.084.

[33] Cuce, E., Cuce, P., M. (2016). Vacuum glazing for highly insulating windows: Recent developments and future prospects. Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 54, Pages 1345-1357, ISSN 1364-0321, https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.134.

[34] Alvur, E., Cuce P. M., Cuce, E., Bouabidi, A., Soudagar, M., E., M. (2024).Thermal Bridging in Windows: A Critical Review on Mitigation Strategies for Enhanced Building Energy Efficiency. Sustainable and Clean Buildings. Volume 1, Issue 1,(1):176-93. https://ojs.wiserpub.com/index.php/scb/article/view/6066.

Gazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Dergisi
PART C: TASARIM VE TEKNOLOJİ

Gazi University
Journal of Science
PART C: DESIGN AND TECHNOLOGY

GU J Sci, Part C, 13(2): 609-626 (2025)

Design and Comprehensive Simulation of 5 MWp and 10 MWp Solar Power Plants in Ma'an: Detailed System Design, Economic Returns, and Environmental Benefits in a Semi-Arid Climate

İbrahim Mahmoud Rizeq ALSAQAR[1] Mehmet ERDEM[2*]

[1] *Department of Mechanical Engineering, Kütahya Dumlupınar University, Kütahya, Turkey*

[2]*Kütahya Vocational School of Technical Sciences, Kütahya Dumlupınar University, Kütahya, Turkey*

Article Info

Research article
Received: 19/02/2025
Revision: 11/03/2025
Accepted: 14/03/2025

Keywords

Renewable energy
Solar energy
Energy sustainability
Economic analysis

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 19/02/2025
Düzeltme: 11/03/2025
Kabul: 14/03/2025

Anahtar Kelimeler

Yenilenebilir enerji
Güneş enerjisi
Enerji sürüdürülebilirliği
Ekonomik analiz

Graphical/Tabular Abstract (Grafik Özet)

This study encompasses the design and simulation of two solar power plants with a capacity of 5 MWp and 10 MWp, respectively, in Ma'an, Jordan. Additionally, the study evaluated the reduction in greenhouse gas emissions and the economic benefits of the solar power plant./Bu çalışma, Ürdün'ün Ma'an kentinde sırasıyla 5 MWp ve 10 MWp kapasiteli iki güneş enerjisi santralinin tasarımını ve simülasyonunu kapsamaktadır. Çalışma aynı zamanda sera gazı emisyonlarındaki azalmayı ve güneş enerjisi santralinin ekonomik faydalarını da değerlendirmektedir.

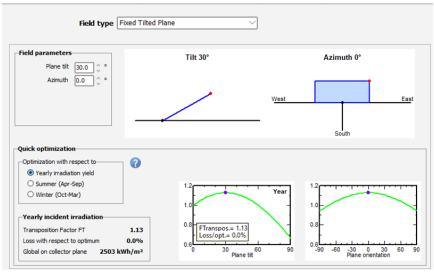


Figure A: *Orientation of solar panels /* ***Şekil A:*** *Güneş panellerinin yönlendirilmesi*

Highlights (Önemli noktalar)

- *Determination of optimum tilt angle for increasing solar energy efficiency and detailed analysis of solar radiation/Güneş enerjisinin verimliliğini artırmak için optimum eğim açısının belirlenmesi ve güneş radyasyonunun detaylı analizi,*
- *Economic returns, investment return periods and financial analysis findings of 5 mwp and 10 mwp capacity solar power plants/5 MWp ve 10 MWp kapasiteli güneş enerji santrallerinin ekonomik getirileri, yatırım geri dönüş süreleri ve finansal analiz bulguları*
- *The role and impact of solar power plants in reducing dependence on fossil fuels and ensuring environmental sustainability/Fosil yakıtlara olan bağımlılığın azaltılmasında ve çevresel sürdürülebilirliğin sağlanmasında güneş enerji santrallerinin rolü ve etkisi,*

Aim (Amaç): *The objective of this study is to design, analyze the economic feasibility and evaluate the environmental sustainability benefits of 5 MWp and 10 MWp solar power plants in Ma'an, Jordan./Bu çalışmanın amacı, Ürdün Ma'an'da 5 MWp ve 10 MWp kapasiteli güneş enerji santrallerinin tasarımını gerçekleştirmek, ekonomik fizibilite analizleri yapmak ve çevresel sürdürülebilirlik faydalarını değerlendirmektir.*

Originality (Özgünlük): *The study presents an original analysis of solar power plant design and simulation in a semi-arid region such as Ma'an in Jordan. Technical details, economic feasibility and environmental benefits are comprehensively covered. / Çalışma, Ürdün'deki Ma'an gibi yarı kurak bir bölgede güneş enerjisi santrali tasarımı ve simülasyonu üzerine özgün bir analiz sunmaktadır. Teknik detaylar, ekonomik fizibilite ve çevresel faydalar kapsamlı bir şekilde ele alınmıştır.*

Results (Bulgular): *Simulation results show that 5 MWp and 10 MWp solar power plants can generate 10,691,025 kWh and 21,460,852 kWh of annual energy, respectively. Both plants have achieved high efficiency and environmental benefits. / Simülasyon sonuçları, 5 MWp ve 10 MWp kapasiteli güneş enerjisi santrallerinin sırasıyla 10,691,025 kWh ve 21,460,852 kWh yıllık enerji üretebileceğini göstermektedir. Her iki tesis de yüksek verimlilik ve çevresel fayda sağlamıştır.*

Conclusion (Sonuç): *This study highlights the importance of renewable energy investments in semi-arid regions by detailing the environmental and economic benefits in the design and simulation of solar power plants in Ma'an. / Bu çalışma, Ma'an'da güneş enerjisi santrallerinin tasarım ve simülasyonunda çevresel ve ekonomik faydaları detaylı olarak ortaya koyarak yarı kurak bölgelerde yenilenebilir enerji yatırımlarının önemini vurgulamaktadır.*

*Corresponding author, e-mail: mehmet.erdem@dpu.edu.tr
DOI: 10.29109/gujsc.1641017

GU J Sci, Part C, 13(2): 609-626 (2025)

Gazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Dergisi
PART C: TASARIM VE TEKNOLOJİ

Gazi University
Journal of Science
PART C: DESIGN AND TECHNOLOGY

http://dergipark.gov.tr/gujsc

Design and Comprehensive Simulation of 5 MWp and 10 MWp Solar Power Plants in Ma'an: Detailed System Design, Economic Returns, and Environmental Benefits in a Semi-Arid Climate

İbrahim Mahmoud Rizeq ALSAQAR[1] Mehmet ERDEM[2*]

[1] *Department of Mechanical Engineering, Kütahya Dumlupınar University, Kütahya, Turkey*

[2]*Kütahya Vocational School of Technical Sciences, Kütahya Dumlupınar University, Kütahya, Turkey*

Article Info

Research article
Received: 19/02/2025
Revision: 11/03/2025
Accepted: 14/03/2025

Keywords

Renewable energy
Solar energy
Energy sustainability
Economic analysis

Abstract

The energy sector in Jordan is facing major challenges due to the increasing demand for electricity and limited oil resources, which calls for the search for sustainable solutions. This study aims to present a comprehensive design of a solar power plant, starting with site selection in Ma'an, Jordan, where a careful analysis of solar radiation and environmental conditions was performed to ensure efficient production. The optimal tilt angle of the solar panels was determined at 30 degrees to maximize the absorption of solar radiation and improve system efficiency. In addition, a scientific methodology was applied to select the appropriate electrical cables, ensuring the minimization of electrical losses and achieving the highest operational efficiency. On the economic level, a comprehensive financial analysis was conducted to assess the investment feasibility of the project, where the results showed that the plant achieves high investment returns and a short payback period, which enhances the feasibility of investing in solar energy projects. Moreover, the amount of GHG emission reduction achieved by the plant was calculated, highlighting its effective role in reducing the carbon footprint and promoting environmental sustainability. This study reflects the importance of investing in solar energy projects, especially in semi-arid regions with high solar radiation, as they provide effective solutions to achieve energy sustainability and reduce dependence on fossil fuels.

Ma'an'da 5 MWp ve 10 MWp Güneş Enerjisi Santrallerinin Tasarımı ve Kapsamlı Simülasyonu: Ayrıntılı Sistem Tasarımı, Ekonomik Getiriler ve Yarı Kurak İklimde Çevresel Faydalar

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 19/02/2025
Düzeltme: 11/03/2025
Kabul: 14/03/2025

Anahtar Kelimeler

Yenilenebilir enerji
Güneş enerjisi
Enerji sürdürülebilirliği
Ekonomik analiz

Öz

Ürdün'deki enerji sektörü, artan elektrik talebi ve sınırlı petrol kaynakları nedeniyle büyük zorluklarla karşı karşıyadır ve bu da sürdürülebilir çözümler aranmasını gerektirmektedir. Bu çalışma, Ürdün'ün Ma'an kentinde yer seçimi ile başlayan ve verimli üretim sağlamak için güneş radyasyonu ve çevresel koşulların dikkatli bir analizinin yapıldığı kapsamlı bir güneş enerjisi santrali tasarımı sunmayı amaçlamaktadır. Güneş panellerinin optimum eğim açısı, güneş radyasyonunun emilimini en üst düzeye çıkarmak ve sistem verimliliğini artırmak için 30 derece olarak belirlenmiştir. Buna ek olarak, uygun elektrik kablolarını seçmek için bilimsel bir metodoloji uygulanarak elektrik kayıplarının en aza indirilmesi ve en yüksek düzeyde operasyonel verimliliğin elde edilmesi sağlanmıştır. Ekonomik düzeyde, projenin yatırım fizibilitesini değerlendirmek için kapsamlı bir finansal analiz yapılmış ve sonuçlar tesisin yüksek yatırım getirisi ve kısa bir geri ödeme süresi elde ettiğini göstererek güneş enerjisi projelerine yatırım yapmanın fizibilitesini artırmıştır. Ayrıca, karbon ayak izinin azaltılması ve çevresel sürdürülebilirliğin teşvik edilmesindeki etkin rolü vurgulanarak, tesis tarafından elde edilen sera gazı emisyonu azaltım miktarı hesaplanmıştır. Bu çalışma, enerji sürdürülebilirliğini sağlamak ve fosil yakıtlara olan bağımlılığı azaltmak için etkili çözümler sağladığından, özellikle yüksek güneşlenme oranına sahip yarı kurak bölgelerde güneş enerjisi projelerine yatırım yapmanın önemini yansıtmaktadır.

*Corresponding author, e-mail: mehmet.erdem@dpu.edu.tr
DOI: 10.29109/gujsc.1641017

1. INTRODUCTION (GİRİŞ)

The combustion of fossil fuels significantly contributes to the accumulation of greenhouse gases in the atmosphere. This phenomenon accelerates anthropogenic climate change, causing adverse effects on terrestrial ecosystems and biodiversity [1]. The persistent increase in global energy demand, averaging an annual growth rate of approximately 1.8% since 2011, further intensifies these environmental challenges. This trend has directly amplified CO_2 emissions, exacerbating the global ecological footprint and intensifying pressure on planetary boundaries [2].

Recent assessments estimate that fossil fuel-related emissions and their associated health risks result in approximately 10.2 million premature deaths annually on a global scale. China accounts for the largest proportion of these fatalities (3.9 million), followed by India (2.5 million), with significant impacts also observed in Eastern Europe, the United States, and Southeast Asia. Nevertheless, mitigation measures, including a transition towards decarbonization and cleaner energy technologies, have reduced this figure to 8.7 million deaths annually, including a notable decrease of 1.5 million in China [3]. Recognizing the urgency of these challenges, the Rio Declaration in 1992 emphasized the necessity of finding alternatives to fossil fuels and reducing global reliance on them [4].

In the face of these challenges, solar energy has emerged as one of the most feasible solutions due to its low costs and limited environmental impact. Solar energy is characterized by its wide availability, with the Earth receiving far more solar energy than the annual global energy demand. Technological advances have reduced the operational costs of solar energy systems, boosting their widespread adoption [5]. Solar energy is one of the most promising renewable energy sources with its unlimited availability. The Earth receives solar energy at an intensity ranging from 0 to 1100 W/m², which is more than 16,000 times the global annual commercial energy demand and 61,000 times the total energy generated globally [6].

Like many countries, Jordan faces significant challenges in ensuring a reliable and sustainable energy supply. The primary factors include limited domestic fossil fuel resources and financial constraints in the energy sector [7]. Rapid urbanization, population growth, and geopolitical instability, including regional conflicts and refugee influxes, have also compounded electricity demand. These dynamics have heightened Jordan's dependence on energy imports, exposing the economy to volatility in global hydrocarbon markets and fiscal imbalances [8]. In response to these challenges, Jordan has prioritized the development of renewable energy sources, with solar energy emerging as a key solution. Solar energy systems not only address the growing electricity demand but also contribute to mitigating the environmental risks associated with fossil fuel use. By 2018, renewable energy accounted for 8% of Jordan's electricity generation, rising to 20% in 2020. This transition reduced reliance on natural gas and coal, which accounted for 33% and 43% of electricity generation in 2020. Jordan aims to increase the share of renewable energy further to 31% by 2030 while reducing the dependence on fossil fuels to 49% collectively [9]. Figure 1 shows the 2018 Electricity Generation Sources in Jordan and the Expected Electricity Sources in Jordan by 2030 [10].

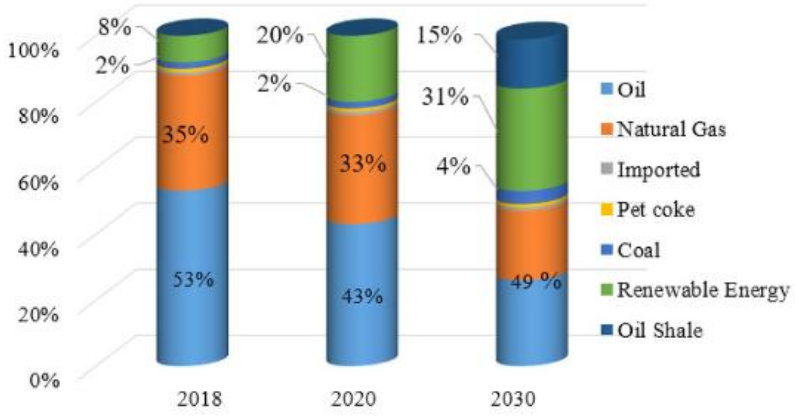


Figure 1. Distribution of current and future resources for electricity generation in Jordan (2018-2030) [10] (Ürdün'de elektrik üretimi için mevcut ve gelecekteki kaynakların dağılımı) (2018-2030)

Jordan is a country in the Middle East, located between 29° and 33° north latitude and 34° and 39° east longitude [11]. The desert constitutes about 72,660 km², equivalent to 80% of Jordan's total area. Desertification is a perennial challenge in the region, contributing to the depletion of natural resources and increasing migration rates. The desert is recognized for its harsh climate and high temperatures, scarce vegetation, and low population density [12].

This study encompasses the design and simulation of two solar power plants with a capacity of 5 MWp and 10 MWp, respectively, in Ma'an, Jordan. The selection of the site was initiated with an analysis of solar radiation and environmental conditions. Ma'an was selected due to its high solar radiation rates and clear skies for approximately 300 days per year [13]. The study's scope encompassed the calculation of the tilt angle and the number of solar panels, the determination of the appropriate cable diameter, and the selection of the most suitable inverter for the project. Additionally, the study evaluated the reduction in greenhouse gas emissions and the economic benefits of the solar power plant. The primary objective of the research is to provide a comprehensive analysis to enhance understanding of solar power plant design.

2. MATERIALS AND METHODS (MATERYAL VE METOD)

This section presents the methods and materials used in this study to achieve an accurate simulation of solar power plants. These methods include site selection, equipment selection, simulation and analysis methods, and calculation of economic return and greenhouse emissions.

2.1. Study Area Description (Çalışma Alanı Tanımı)

The southern regions of Jordan stand out as an ideal location for building solar power plants due to their vast areas, as shown in Figure 2 [14], where Ma'an records the highest values of solar radiation compared to the rest of the Jordanian governorates. The average daily radiation value ranges from 6670 to 6780 W/m^2. Table 1 shows the amount of solar radiation for each month [13].

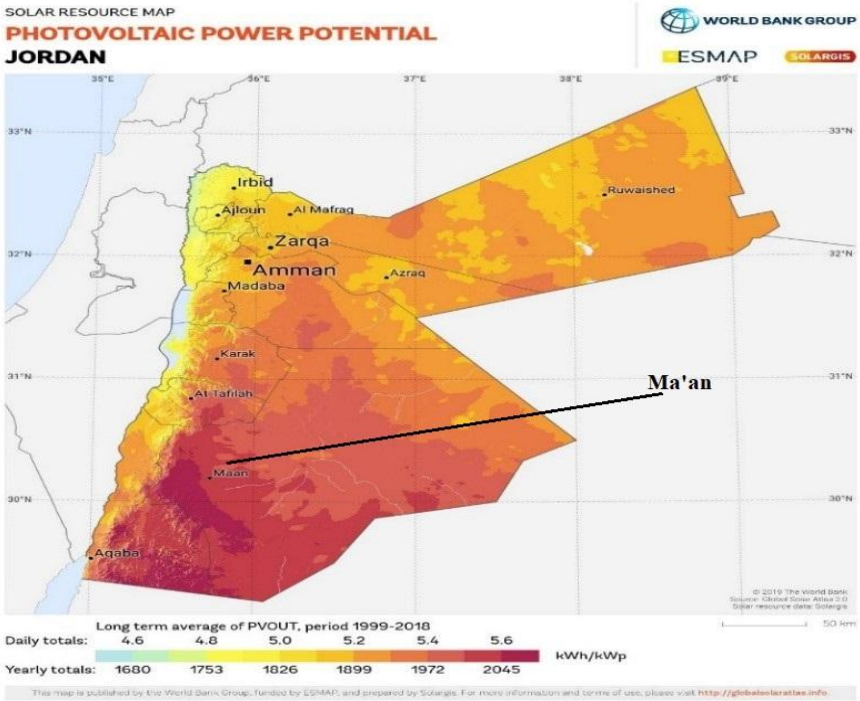


Figure 2. Photovoltaic electricity potential [14] (Fotovoltaik elektrik potansiyeli)

Table 1. Amount of solar radiation per month in Ma'an City (kWh/m²/Day)
(Ma'an Şehrinde aylık güneş radyasyonu miktarı) (kWh/m²/Gün)

Months	Solar Radiation (Ma'an)
January	5400
February	6280

March	7530
April	7150
May	7210
June	7470
July	7410
August	7500
September	7320
October	6930
November	5850

The location where the solar power plants are simulated is shown in Figure 3. This site is located in the city of Ma'an/Jordan at the coordinates of 30°14'49“N latitude and 35°41'37” E longitude.



Figure 3. The area where the solar power plants were simulated (Güneş enerjisi santrallerinin simüle edildiği alan)

2.2. Equipment and Tools Used (Kullanılan Ekipman ve Araçlar)

2.2.1. The inverter (İnvertör)

The inverter is the core component of the system, as it is responsible for converting the energy generated by the solar panels from direct (DC) to (AC). Therefore, choosing the right inverter is critical to ensure optimal system performance. For example, choosing an oversized centralized inverter can increase cabling costs. Longer cables, in turn, contribute to voltage drop, which should not exceed the maximum allowable 3% [15]. In addition, an oversized inverter may increase the self-consumption of energy, thus reducing the overall efficiency of the solar system.

On the other hand, choosing a small-sized inverter may restrict the electrical capacity, a phenomenon referred to as “power chopping.” Power chopping occurs when the generated power exceeds the capacity of the inverter, leading to overheating of the inverter and the possibility of malfunctions or significant power losses [16,17].

This study selected the 111.1 kW inverter after a thorough analysis to ensure optimal system efficiency and minimize power losses. The total power of the inverters was determined to meet the system's requirements, and the voltage and current values were selected to be compatible with the solar panels. The simulation results determined that the 111.1 kW inverters operate with minimum losses in the system and provide high efficiency. Furthermore, the economic viability of the inverters and their alignment with the project's technical specifications were taken into account. Table 2 provides the detailed specifications of the inverter used. The following equation was used to determine the required number of inverters for 5 MWp and 10 MWp solar systems.

$$\text{Number of Inverterts} = \frac{\text{AcPower}}{\text{InverterPower}} \quad (1)$$

Table 2. Inverter datasheet (İnvertör veri sayfası)

Max. Efficiency	98.6%
Input	
Max. Input Voltage	1100 V
Max. Current per MPPT	26 A
Max. Short Circuit Current per MPPT	40 A
Start Voltage	200 V
MPPT Operating Voltage Range	200 V ~ 1000 V
Rated input voltage	650 V (420 V/440 V), 720 V (480 V)
Maximum number of input channels	20
Number of MPP Trackers	10
Output	
Rated Output Power	111,100 W
Max. AC Apparent Power	125,000 VA
Max. AC Active Power (cosφ=1)	111,100 W
Rated Output Voltage	242 V/420 V,254 V/440 V and 277 V/480 V, 3W+PE
Rated AC Grid Frequency	50 Hz/60 Hz
Output Voltage Frequency	152.8 A (420 V), 145.8 A (440 V), 133.7 A (480 V)
Max. Output Current	171.9 A (420 V), 164.1 A (440 V), 150.4 A (480 V)
Adjustable Power Factor Range	0.8 LG ... 0.8 LD
Max. Total Harmonic Distortion	< 3%

2.2.2. The solar panel (Güneş paneli)

Solar panels are the primary components responsible for generating electricity by converting light radiation into electrical energy, a process known as the photovoltaic effect. When selecting solar panels for a particular project, it is recommended that certifications such as IEC be obtained. These certifications are essential because they include evaluative tests for performance, safety, energy efficiency under different environmental conditions, corrosion resistance, the extent of potential induced degradation (PID), and manufacturing quality [18].

When solar panels are connected in series, the system voltage increases, while the current increases when they are connected in parallel [17]. Therefore, it is necessary to determine the optimal number of panels and their proper connection configuration, either in series or parallel, to avoid risks that may lead to system failure or fires due to mismatched system inputs and inverter specifications. Detailed specifications of the solar panels used in this project are given in Table 3.

Table 3. Solar panel datasheet (Güneş paneli veri sayfası)

Module Type	**Tiger Neo N-type 72HL4-(V) 570-590 Watt**
Maximum Power (Pmax)	590 Wp
Maximum Power Voltage (Vmp)	43.71V
Maximum Power Current (Imp)	13.50A
Open-circuit Voltage (Voc)	52.63V
Short-circuit Current (Isc)	14.13A
Module Efficiency STC (%)	22.84%
Operating Temperature (C°)	40 C° ~+85 C°
Maximum system voltage	1000/1500VDC (IEC)
Maximum series fuse rating	25A
Power Tolerance	0~+3%
Temperature coefficients of Pmax	-0.29% / C°

Temperature coefficients of Voc	-0.25% / C°
Temperature coefficients of Isc	0.045% / C°
Nominal operating cell temperature (NOCT)	45-+2 C°

To ensure that the inverter works efficiently, the voltage of the solar panels connected in series must not exceed the maximum allowable inverter voltage, which is 1000V. The inverter also requires a voltage of at least 200V to function properly, according to Table 2 in the inverter datasheet.

Equation (2) is used to calculate the maximum number of solar panels that can be connected in series.

$$V_{(Max)} = V_{oc,stc} \times \left[1 + TempCoff. \times (\Delta T)\right] \quad (2)$$

where, $V_{oc,stc}$ is the open circuit voltage of the solar panel, and *TempCoff* is the temperature coefficient of voltage, representing the rate of change of voltage relative to temperature change (measured in %/°C). The difference between the minimum temperature recorded at the site and the standard test condition temperature (Tstc=25°C) is also considered. These parameters are used to determine the maximum number of panels that can be connected in series.

Equation (3) is used to calculate the minimum number of solar panels to be connected in series.

$$V_{(Min)} = V_{mpp,stc} \times \left[1 + TempCoff. \times (\Delta T)\right] \quad (3)$$

where $V_{mpp,stc}$ is the solar panel's maximum power point voltage.

2.2.3. Sizing DC cable (DC kablosunun boyutlandırılması)

The selection of conductors in solar power systems is a critical factor in ensuring operational efficiency and electrical safety. The performance of conductors depends on multiple parameters, including the type of conductive material, cross-sectional area, insulation properties, and ampacity. An improper selection may lead to voltage drop, overheating, and, in extreme cases, fire hazards [19,20]. Therefore, various considerations must be accounted for, such as the expected current load, voltage rating, environmental conditions, and the installation method whether routed through conduits or exposed to open-air conditions. The following equation is used to calculate the cross-section of a cable.

$$A = 1.25 \times \frac{2 \times L \times I \times \rho}{V_{Drop}} \quad (4)$$

The cable cross-sectional area *(A)* is determined by considering several factors, where *L* is the one-way length of the cable in meters, *I* is the electrical current (typically based on the short-circuit current, Isc, to ensure a sufficient safety factor), and ρ is the electrical resistivity, which is 0.0171 Ω·m for copper and 0.0274 Ω·m for aluminum. Additionally, a maximum acceptable voltage drop (V_{Drop}) of 3% is considered to ensure efficient electrical system performance.

2.3. Simulation Procedure (Simülasyon Prosedürü)

In this study, a comprehensive simulation of two solar power plants (5 MWp and 10 MWp) was performed to evaluate their performance and estimate the amount of energy that can be produced under the climatic conditions in the city of Ma'an at coordinates 30°14'49" North and longitude 35°41'37" East. The simulation aims to provide an overview of the efficiency of the system at a specific location, where solar energy production depends on several factors, such as daily solar radiation, temperature, and the angle of inclination of the solar panels.

This simulation is based on a set of climatic inputs obtained from the Meteonorm 8.1 database (temperature, wind speed, direct and reflected solar radiation), as well as using the solar panel datasheet in Table 3 and the inverter's datasheet in Table 2. The PVsyst software was used to simulate the plant's performance throughout the year, and the program provides an estimate of monthly and annual power outputs based on the solar radiation information obtained from Meteonorm 8.1 and analyzes the losses in the entire system.

2.3.1. The solar panel orientation (Güneş paneli yönlendirmesi)

Tilt angle is one of the most important factors to consider when designing solar energy systems because it affects the amount of solar radiation collected by the panels. The optimal tilt angle is determined by geographic location. Every geographical area has an ideal tilt angle [21,22].

Photovoltaic (PV) modules are oriented to the south using the azimuth angle. An azimuth angle of -90° points east, 0° points south, and +90° points west. For optimal sun exposure, orient the azimuth angle south in the northern hemisphere and north in the southern hemisphere [21]. The azimuth angle is the line of the sky. This angle varies between +23.5 degrees and -23.5 degrees throughout the year and is equal to zero at the equinoxes when day and night are equal. The spring equinox usually occurs around March 20, and the fall equinox usually occurs around September 22 [23]. The sun's declination angle is calculated using the following equation.

$$\delta = 23.45 \times \mathrm{Sin}\left[\frac{360}{365} \times \left(N_{day} - 81\right)\right] \quad (5)$$

where N_{day} represents the Nth day of the year.

Elevation angle in solar panel systems, the elevation angle refers to the tilt or inclination of the panels relative to the horizontal plane. This angle is crucial for optimizing solar energy capture efficiency. Adjusting the elevation angle of the solar panels allows them to receive maximum sunlight throughout the day, thus maximizing energy production [24]. The ideal elevation angle varies depending on factors such as geographical location, time of year, and specific energy needs. Correct elevation angle adjustment can significantly improve the performance and efficiency of solar panel installations. The elevation angle is calculated using the following equation.

angle between the solar panel's horizontal plane and the sun's direction.

Solar Declination angle One of the main factors affecting the Sun's motion is the declination angle, the angle between the Sun's position and the straight

$$\beta = 90^{\circ} - L + \delta \quad (6)$$

where L represents the latitude of the location.

The tilt angle is the angle between the solar panels and the Earth's surface. This angle indicates that the solar panels are oriented towards direct solar radiation. The tilt angle is calculated using the following equation.

$$\alpha = 90^{\circ} - \beta \quad (7)$$

When applying the equations to calculate the tilt angle, the optimal angle was determined for each month, as shown in Table 4. However, since the ground-mounted solar system operates year-round without a tracking mechanism, it is essential to identify the optimal fixed tilt angle that maximizes solar radiation absorption across all seasons. After implementing the calculated tilt angles into the PVsyst simulation software, the optimal tilt angle that delivers the highest energy yield and overall system performance was found to be 30 degrees.

Table 4. Solar declination, elevation angle, and inclination angle values for each month
(Her ay için güneş sapması, yükseklik açısı ve eğim açısı değerleri)

Month	Nth day of the year	Sun Declination Angle (δ)	Elevation Angle (β)	Tilt Angle (α)
January	1	-23.01	36.7428	53.26
February	32	-17.51	42.2428	47.76
Mart	60	-8.29	51.4628	38.53
April	91	4.0	63.7528	26.25
May	121	14.9	74.6528	15.35
June	152	22.03	81.7828	8.22
July	182	23.1	82.8528	7.15
August	213	17.9	77.6528	12.35
September	244	7.72	67.4728	22.53
October	274	-4.21	55.5428	34.46
November	305	-15.36	44.3928	45.61
December	335	-22.1	37.6528	52.35

The optimal tilt angle for solar panels is chosen based on several factors that affect the solar panel's ability to receive solar radiation and convert it into electrical energy. Among these factors, the first is the transmission factor (FT), which measures the amount of solar radiation received on an inclined surface compared to the radiation on a horizontal surface. The higher the FT value, the better the angle is for receiving the largest amount of solar radiation [25]. The highest FT value recorded in the data is 1.13 at an inclination angle of 30°, indicating that this angle allows the solar panels to receive the largest amount of solar radiation, thus obtaining the highest energy conversion efficiency. In addition, when analyzing the losses relative to the ideal, we find that the 30° tilt angle achieves losses of 0.0%, which means it is the optimal angle to minimize energy losses. This enhances the effectiveness of solar panels in generating power with minimal losses. This enhances the effectiveness of solar panels in generating power with minimal losses.

Additionally, the total solar radiation on the solar panel surface peaks at a 30° inclination, amounting to 2503 kWh/m². This indicates that solar panels installed at a 30° tilt angle will collect the most solar energy throughout the year compared to other tilt angles. Figure 4 shows the tilt angle in PVsyst, the azimuth angle, the transposition factor, and the global irradiance at the collector plane (kWh/m^2).

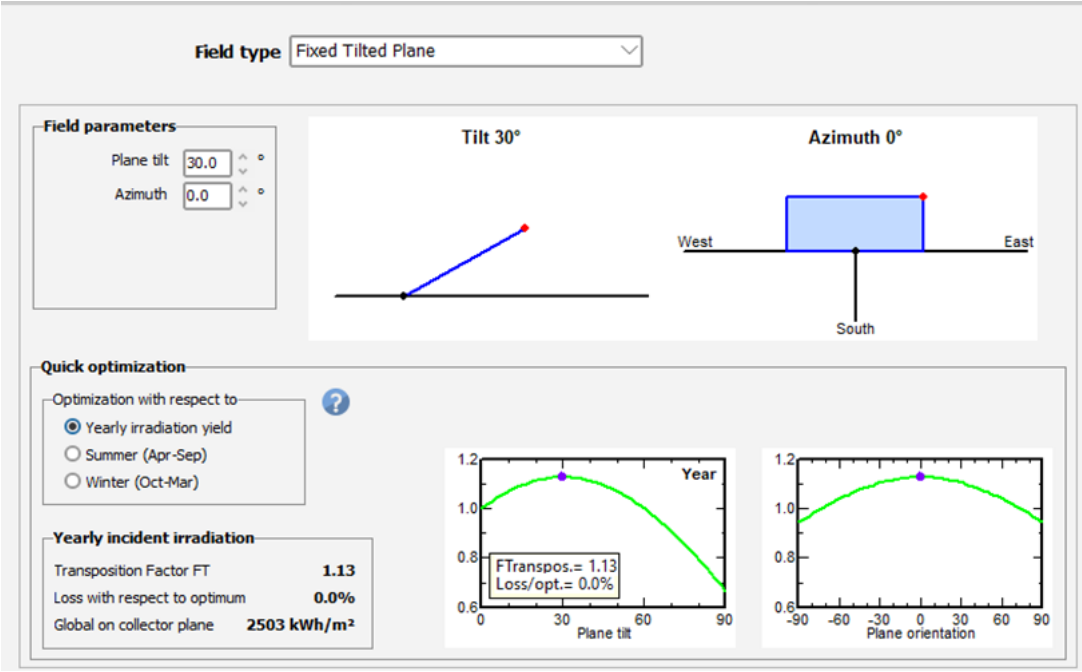


Figure 4. Orientation of solar panels (Güneş panellerinin yönlendirilmesi)

2.3.2. Distance between solar panel rows (Güneş paneli sıraları arasındaki mesafe)

The distance between rows of solar panels is important to avoid shading and optimize energy capture efficiency. The ideal distance is determined based on the angle of inclination of the panels and the number of panels installed on each structure. Recently, photovoltaic (PV) module use has seen a significant increase in installations of various types, both large and small. However, the performance of PV panels is significantly affected by shading effects caused by peripheral factors such as shadows from trees, passing clouds, or neighboring buildings. To achieve optimal performance, avoid shading conditions to the greatest extent possible [26,27].

The shadow length is calculated using the following equation, and Figure 5 shows all the details.

$$H = \mathrm{Sin}(\alpha) \times 7.233 \tag{8}$$

where H is the height of the solar panel, and α is the tilt angle of the panel.

$$D = \frac{H}{\tan(\alpha)} \tag{9}$$

where D is the shadow length, H is the height of the solar panel, and α is the tilt angle of the panel.

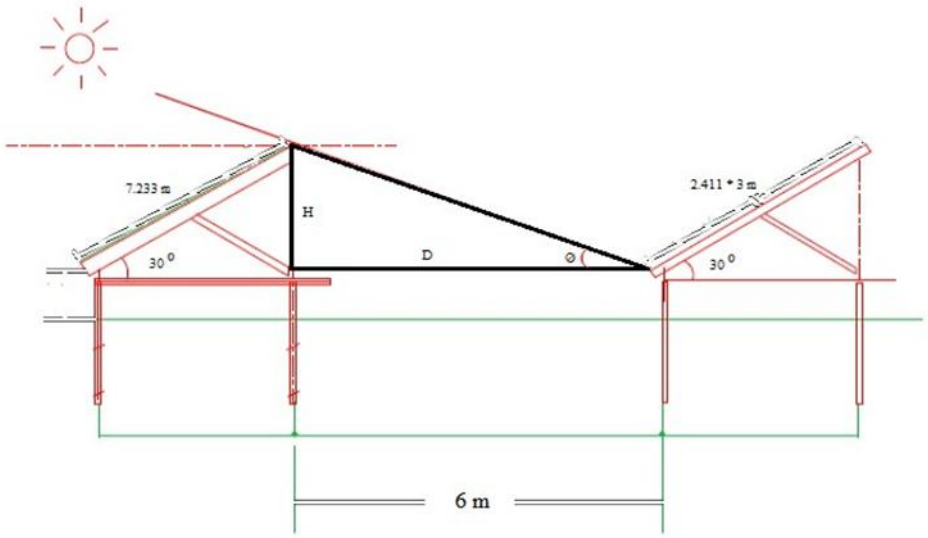


Figure 5. The details of shadow length (Gölge uzunluğunun detayları)

2.3.3. Solar panel system simulation parameters
(Güneş paneli sistemi simülasyon parametreleri)

The necessary solar power system parameters are entered, such as solar panel type, number and type of inverters, panel connection (series and parallel connection), and solar power system capacity. Figure 6 shows a 5 MWp solar power system consisting of about 8475 JinkoSolar solar panels, where 15 modules are connected in series in 565 modules in strings that were used in this system. Connecting the panels in parallel was not used because string inverters were used in the simulation, where the maximum current value of each MPPT is 26 A, while each solar panel produces 13.5 A. If the panels are connected in parallel, the current will exceed the inverter's maximum limit, which could lead to inverter failure or technical malfunctions.

The nominal capacity of the solar power plant is 5000 kWp. To convert power from DC to AC, 45 Huawei inverters with 111.1 kW per inverter were used for a total inverter capacity of 5000 kW. The operating limits of the inverters are from 200 to 1000 volts.

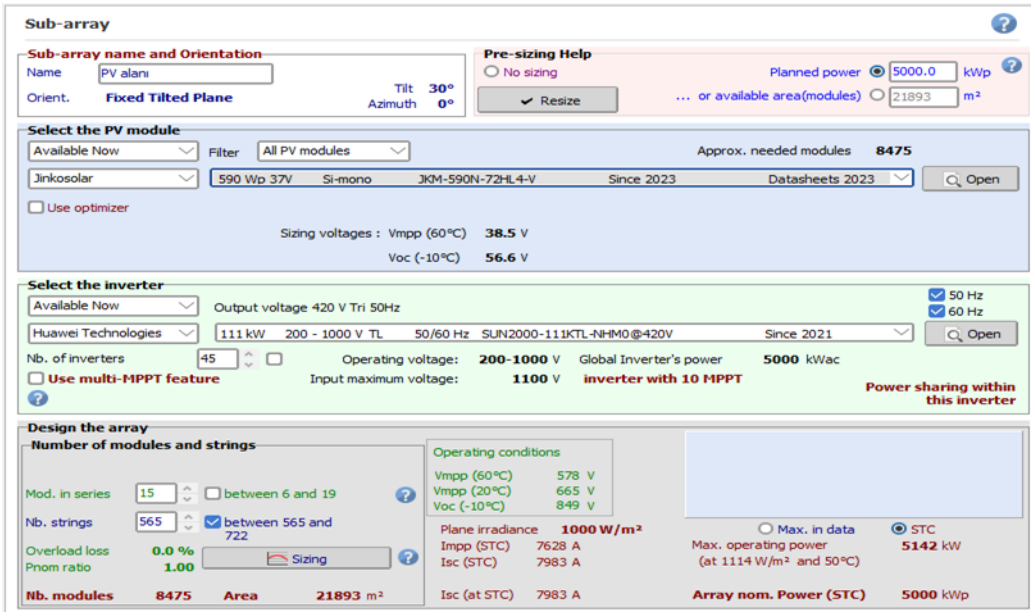


Figure 6. The interface where parameters are entered for a 5 MWp capacity power plant using the PVsyst program (PVsyst programı kullanılarak 5 MWp kapasiteli bir enerji santrali için parametrelerin girildiği arayüz)

Figure 7 shows a 10 MWp solar power system consisting of about 16949 JinkoSolar solar panels, where 17 modules are connected in series in 997 modules in strings that were used in this system. No parallel connections were used in this simulation. The nominal capacity of the solar power plant is 10000 kWp. To convert power from DC to AC, 90 Huawei inverters with 111.1 kW per inverter were used for a total inverter capacity of 10000 kW. The operating limits of the inverters are from 200 to 1000 volts.

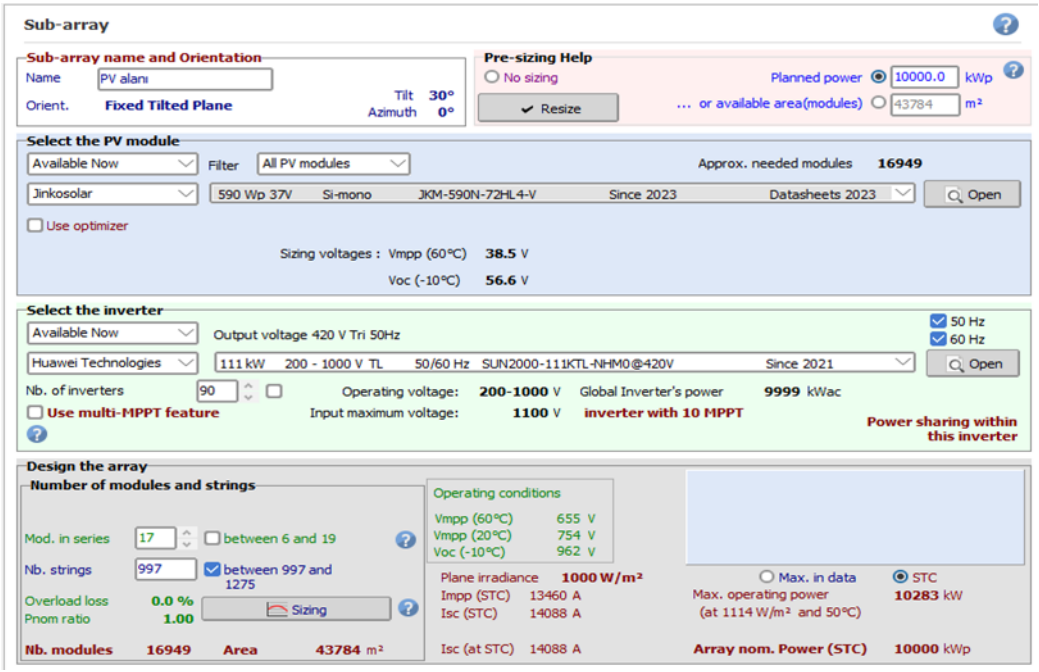


Figure 7. The interface where parameters are entered for a 10 MWp capacity power plant using the PVsyst program (PVsyst programı kullanılarak 10 MWp kapasiteli bir enerji santrali için parametrelerin girildiği arayüz)

2.3.4. Solar power plant construction cost (Güneş enerjisi santrali yapım maliyeti)

The economic feasibility of any solar energy project depends on key factors, the first of which is the cost of establishing solar power plants, as the cost of establishing a solar power plant varies depending on

several factors, including geographical location, the size of the solar plant, the type of solar panels used, installation and infrastructure costs. The financial return of a solar power plant depends on the productivity of the solar power plant versus the initial construction cost. If the cost is high and efficient equipment is not selected, it is likely that the return will not be as good or may take longer to recover the capital.

Therefore, analyzing the construction costs and selecting the right equipment maximizes the financial return and reduces the payback period, boosting investment in solar projects.

In this section, the costs and economic returns of the 5 MWp and 10 MWp solar power plants in Ma'an will be explained, and the payback period will be calculated. Table 5 shows the initial investment costs, operating and maintenance expenses, energy production capacities, and revenues for both plants.

Indirect costs (5-10%) are Permit, Engineering project, Financial modeling, Geodetic services, Site supervision, access to engineering, communication, Site safety, and construction insurance.

Table 5. Installation costs for 5 MWp and 10 MWp solar power plants (5 MWp ve 10 MWp güneş enerjisi santralleri için kurulum maliyetleri)

Direct costs	**5 MWp power plant equipment cost (US $)**	**10 MWp solar power plant equipment cost (US $)**
Pv modules	1,555,045	3,109,908
Inverters	600,000	1,200,000
Metal load-bearing structures	900,000	1,800,000
DC and AC cables	360,000	600,000
Electrical protective equipment	120,000	120,000
Transforming station	1,000,000	2,400,000
High/medium voltage lines	420,000	600,000
Fences, cameras, and security measures	250,000	360,000
Other engineering elements, such as improved lighting and access roads, depending on the investor's requirements	300,000	600,000
Indirect costs	450,000	900,000
Land cost (if applicable)	No	No
Total	5,955,045	11,689,908

2.3.5. The economic analysis of solar power plants (Güneş enerjisi santrallerinin ekonomik analizi)

A feasibility study must be conducted to assess the effectiveness of the solar power plant in terms of production, economic return, and payback period, and the Net Present Value (NPV), Internal Rate of Return (IRR), and Profitability Index (PI) values must be calculated [28].

- NPV: Equation 10 is used to calculate NPV, which refers to assessing the profitability of an investment by calculating the difference between the present value of all cash inflows and outflows over the project's 30-year life. The NPV formula takes into account annual cash flows and the interest rate. If the value is greater than zero, the project is considered profitable. When calculating NPV using Equation 10, the initial investment cost (C_o), the annual revenue generated by the solar plant (C_t), the discount rate or required rate of return (expected profit for the investor) (r), and the life span of the project (T) are used.

$$NPV = -C_\circ + \sum_{t=1}^{T} \frac{C_t}{(1+r)^t} \qquad (10)$$

- IRR: IRR is calculated using equation 11 and refers to the discount rate that makes the NPV equal to zero. The IRR value is used to assess whether an investment is worthwhile or not. The higher the IRR value, the better the financial return. The IRR should be compared to the country's interest rate to determine the feasibility of the investment, as the interest rate in Jordan was 12%.

$$0 = NPV = \sum_{t=1}^{T} \frac{C_t}{(1+IRR)^t} - C_o \qquad (11)$$

- IRR, the profitability index, is calculated using Equation 12 and measures the amount of profit or loss the project realizes compared to the initial investment. The PI value is calculated by dividing the net present value by the initial investment. If the profitability index is greater than 1, the project is considered profitable. The profitability index is used to evaluate projects holistically, where the NPV, P&L, and IRR are used together as a single metric.

$$PI = \frac{NPV}{\text{Initial Investment Cost}} \quad (12)$$

3. SOLAR POWER PLANTS SIMULATION RESULTS (GÜNEŞ ENERJISI SANTRALLERI SIMÜLASYON SONUÇLARI)

In this section, the monthly and annual production of 5 MWp and 10 MWp solar power plants will be presented and analyzed, and the amount of GHG reductions produced by each plant will be evaluated with a detailed analysis of the economic return of each plant. Finally, a comparison will be made between the two plants to determine the best performance based on the criteria studied.

3.1. Simulation Results (Simulasyon Sonuçları)

The ambient temperature varies between 7.35 °C and 13.87 °C in winter and between 17.83 °C and 27.53 °C in summer. The average solar radiation was 110.1 kWh/m² in December and 260.5 kWh/m² in June. The lowest and highest measured temperatures were 7.35 °C in January and 27.56 °C in July, respectively.

Table 6 shows the simulation results of a 5 MWp solar power plant obtained using the PVsyst program. The table includes important parameters such as annual energy production and environmental impacts. Among these data, the highest solar radiation value was measured in June (260.5 kWh/m²), while the lowest value was recorded in December (110.1 kWh/m²). The total annual energy production E-Array value of the solar panel was 10,924,989 kWh. The lowest efficiency rate (82.8%) was recorded in August, while the highest efficiency rate (91.1%) was recorded in January.

Table 6. Simulation results for a 5 MWp solar power plant (5 MWp güneş enerjisi santrali için simülasyon sonuçları)

	GlobHor (kWh/m²)	DiffHor (kWh/m²)	Tamb (°C)	GlobInc (kWh/m²)	GlobEff (kWh/m²)	E-Array (kWh)	E-Grid (kWh)	PR rate
January	114.5	30.26	7.35	174.1	171.7	809426	793177	0.911
February	127.0	34.34	9.58	169.7	167.3	778078	761950	0.898
March	181.5	46.12	14.20	214.2	210.6	959743	939079	0.877
April	211.0	57.56	17.83	219.6	215.3	968489	947484	0.863
May	242.5	56.16	22.58	223.7	218.5	970926	949886	0.849
June	260.5	37.75	25.44	226.5	220.7	967095	945896	0.835
July	255.7	45.22	27.56	228.2	222.2	967965	946755	0.830
August	233.2	49.55	27.55	230.7	225.5	976958	955496	0.828
September	197.2	42.74	24.79	221.8	217.5	948512	927662	0.836
October	162.9	37.97	20.68	211.0	207.7	925736	905754	0.858
November	126.0	28.97	13.87	185.8	183.5	842035	824166	0.887
December	110.1	26.76	8.95	174.8	172.6	810028	793722	0.908
Yearly	2222.3	493.40	18.41	2480.2	2432.9	10,924,989	10,691,025	0.862

Table 7 shows the results of simulating the performance of a 10 MWp solar power plant using the PVsyst program. The simulation shows that the annual power output of the plant is 21,848,173 kWh E-Array, while the amount of electricity supplied to the national grid is 21,460,852 kWh E-Grid.

The plant's efficiency is lowest in August at 83.1% and highest in January at 91.4%. This decrease in efficiency during the summer months is due to higher temperatures, as solar panels operate more efficiently in cold weather conditions during the winter [29].

Table 7. Simulation results for a 10 MWp solar power plant (10 MWp güneş enerjisi santrali için simülasyon sonuçları)

	GlobHor (kWh/m^2)	DiffHor (kWh/m^2)	Tamb (°C)	GlobInc (kWh/m^2)	GlobEff (kWh/m^2)	E-Array (kWh)	E-Grid (kWh)	PR rate
January	114.5	30.26	7.35	174.1	171.7	1618752	1591747	0.914
February	127.0	34.34	9.58	169.7	167.3	1555907	1529657	0.901
March	181.5	46.12	14.20	214.2	210.6	1919180	1885844	0.880
April	211.0	57.56	17.83	219.6	215.3	1936746	1902468	0.867
May	242.5	56.16	22.58	223.7	218.5	1941738	1907228	0.852
June	260.5	37.75	25.44	226.5	220.7	1934077	1898579	0.838
July	255.7	45.22	27.56	228.2	222.2	1935814	1899925	0.833
August	233.2	49.55	27.55	230.7	225.5	1953800	1916908	0.831
September	197.2	42.74	24.79	221.8	217.5	1896883	1861257	0.839
October	162.9	37.97	20.68	211.0	207.7	1851362	1818553	0.862
November	126.0	28.97	13.87	185.8	183.5	1683967	1655415	0.891
December	110.1	26.76	8.95	174.8	172.6	1619947	1593270	0.912
Yearly	2222.3	493.40	18.41	2480.2	2432.9	21,848,173	21,460,852	0.865

3.2. Results of the Amount of GHG Reductions Produced by Each Solar Power Plant (Her Bir Güneş Enerjisi Santrali Tarafından Üretilen Sera Gazı Azaltım Miktarının Sonuçları)

The performance of two solar power plants was evaluated in terms of greenhouse gas (GHG) emission reductions. This section aims to present the overall results of the GHG reductions achieved by both solar power plants. The results show that the 10 MWp solar plant provides greater benefits, reducing CO_2 emissions by 333,418 tCO_2 compared to the 166,112 tCO_2 reduced by the 5 MWp plant.

3.2.1. Emission reduction potential of solar power plants compared to fossil fuels (Fosil yakıtlara kıyasla güneş enerjisi santrallerinin emisyon azaltma potansiyeli)

Today, energy production is of great importance due to its environmental impacts. Solar energy offers an alternative to fossil fuels as a renewable and environmentally friendly energy source. While fossil fuels (coal, natural gas, and oil) contribute to climate change with their high carbon dioxide (CO_2) emissions, solar energy can generate energy with almost zero emissions. In this section, solar energy will be compared with fossil fuels in terms of carbon emissions and its environmental impacts will be examined in detail.

To determine how much a solar power plant saves greenhouse gases compared to fossil fuels, the emission factor of each fuel type needs to be known. The emission factor of petroleum is 541 gCO_2/kWh [30], while the emission factor of natural gas is 473 gCO_2/kWh [31]. The following equation can be used to calculate the emission factor:

$$\text{Total Emission} = \frac{\text{Total energy produced}}{\text{Total } CO_2 \text{ Emissions}} \quad (13)$$

A 5 MWp solar power plant generates 10,691,025 kWh of energy per annum. From coal, the emission coefficient of petroleum (541 gCO_2/kWh) is applied to calculate the resulting CO_2 emissions, which amount to 5,783,844,525 gCO_2. This is equivalent to 5,783.84 tCO_2.Similarly, a 10 MWp solar power plant generates 21,460,876 kWh of energy annually.

From coal, the emission coefficient of oil (541 gCO_2/kWh) is applied to calculate the resulting 11,610,333,961 gCO_2 emissions, which is equivalent to 11,610.33 tCO_2.

A 5 MWp solar power plant generates 10,691,025 kWh of energy annually. When considering emissions from natural gas, multiplying this production amount by 473 gCO_2/kWh -the emission coefficient of oil- results in 5,056,854,825 gCO_2 emissions. This value equates to 5,056.85 tCO_2.

Similarly, a 10 MWp solar power plant generates 21,460,876 kWh of energy annually. Accounting for emissions from natural gas, multiplying this production amount by 473 gCO_2/kWh -the emission coefficient of oil- yields 10,150,994,348 gCO_2 emissions. This value corresponds to 10,150.99 tCO_2.

A 5 MWp solar power plant has the potential to produce 5,783.84 tCO_2 emissions annually if it were to run on oil. The 10 MWp plant's emissions would be 11,610.33 tCO_2 per year. Similarly, if both plants operate on natural gas, the annual emissions of the 5 MWp plant are calculated as 5,056.85 tCO_2 and

the emissions of the 10 MWp plant as 10,150.99 tCO_2. Although natural gas's emission factor is lower than oil, it still causes significant emissions compared to solar energy.

3.3. Feasibility and Financial Return Results
(Fizibilite ve Finansal Getiri Sonuçları)

Revenues from the sale of energy produced by solar power plants are determined based on the unit price of the electricity generated, as shown in Table 8. The purchase price of a solar energy unit in Jordan is about 0.135 JD, approximately 0.19 USD [32]. Determining the price of electricity per kilowatt-hour is important in the financial analysis of solar energy projects, as it greatly helps assess the project's economic benefit. Table 8 presents a comparison between the annual electricity generation, selling price, annual return, and rate of return on investment for two solar projects of 5 and 10 MWp.

Table 8. 5 MWp and 10 MWp power plants' energy sales revenues 5 MWp ve 10 MWp kapsiteli santrallerin enerji satış gelirleri

Parameter	5 MWp plant	10 MWp plant
The initial production cost of the solar plant ($)	5,955,045	11,689,908
Total Production (kWh/year)	10,691,025	21,460,876
Sales Price ($/kWh)	0.19	0.19
Annual Return ($)	2,031,294.75	4,077,566.44
Return Rate (Year/Month)	2/11	2/10
PV system life (Year)	30	30
Solar panel degradation per year (%)	0.40	0.40

The NPV of the 5 MWp solar power plant was $9,885,201, indicating that the return from the project exceeds the initial investment cost and is, therefore, profitable in the long term. The internal rate of return was 33.60%, reflecting the project's annual internal rate of return, while the profitability rate was 2.66.

The NPV of a 10 MWp solar power plant is $20,107,376, with an internal rate of return of 34.37% and a profitability index of 2.7201. These values indicate that the profitability of a larger solar power plant is higher despite the higher initial cost. However, the economic return is better in the long term. Table 9 shows the economic analysis results.

Table 9. Economic analysis results (Ekonomik analiz sonuçları)

Parameter	5 MWp PV plant	10 MWp PV plant
NPV ($)	9,885,201	20,107,376
IRR (%/year)	0.336	0.3437
PI	2.66	2.72
Energy Production Capacity (kW)	10,691,025	21,460,876
greenhouse gases saved (tCO_2)	166,112	333,418
Payback Period (Year/Month)	2 / 11	2 / 10

The following Figures 7 and 8 show the economic return of solar power plants over 30 years. It shows that the first year has the highest yield, while the yield gradually decreases over time due to the degradation in solar panel efficiency by up to 0.40%. Figures 7 and 8 provide an important reference point for investors by providing a holistic view of the total economic return over the lifetime of the plant. Thus, the impact of the loss of solar panel efficiency over time on the long-term economic return can be clearly and accurately analyzed. The following equation can be used to calculate the percentage change in the annual economic return.

$$PC = \frac{AR - PYR}{PYR} \tag{14}$$

where PC is the Percentage Change, AR is Annual Revenue, income, or returns for the current year, and PYR is the income or returns for the previous year.

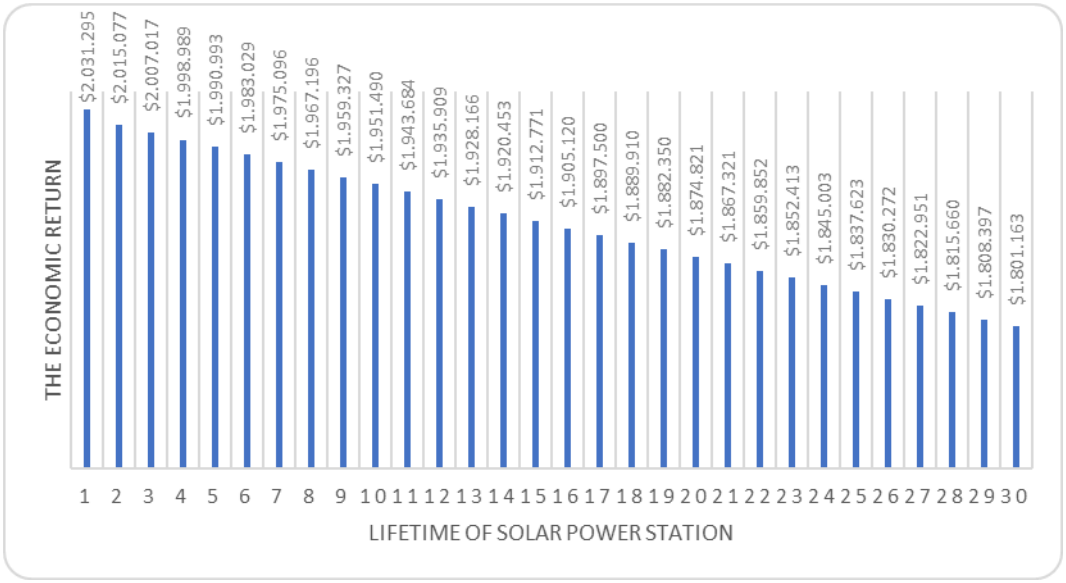


Figure 8. The economic return of a 5 MWp solar power plant in 30 years (5 MWp'lik bir güneş enerjisi santralinin 30 yıl içindeki ekonomik getirisi)

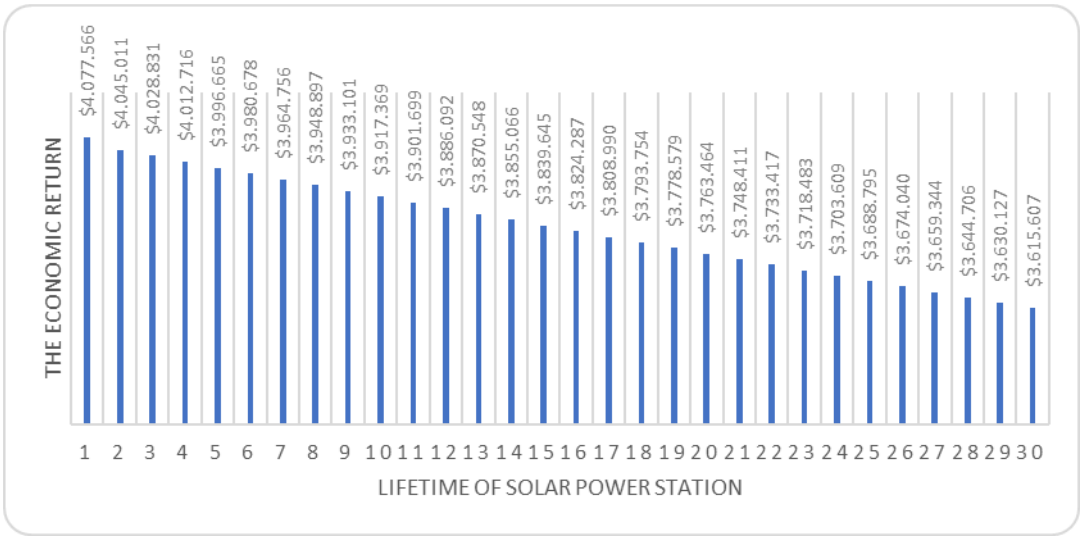


Figure 9. The economic return of a 10 MWp solar power plant in 30 years (5 MWp'lik bir güneş enerjisi santralinin 30 yıl içindeki ekonomik getirisi)

4. CONCLUSIONS (SONUÇLAR)

This study presents a comprehensive evaluation of the design, simulation, and financial feasibility of 5 MWp and 10 MWp solar power plants in Ma'an, Jordan. The analysis showed that the optimal tilt angle for capturing solar energy is 30°, which ensures efficient absorption of solar radiation. Proper cable selection was made to minimize electrical losses. The simulation results proved that the 5 MWp solar plant generates 10,924,989 kWh per year, while the 10 MWp plant produces 21,460,852 kWh per year. Thus, the larger plant provides higher energy production and greater environmental benefits, offsetting 333,418 tCO_2 emissions over its lifetime, compared to 166,112 tCO_2 for the 5 MWp plant. From an economic perspective, the net present value of the 5 MWp system was calculated at $9,885,201, while the 10 MWp plant achieved a higher net present value of $20,107,376, indicating a stronger financial capacity. In addition, the IRR was 33.6% for the 5 MWp plant and 34.37% for the 10 MWp plant, both of which exceed typical investment criteria. Payback periods were also very favorable, at 2 years and 11 months for the 5 MWp system and 2 years and 10 months for the 10 MWp system. The results highlight the economic and environmental advantages of large-scale solar investments in semi-

arid regions. The results confirm that a 10 MWp solar power plant is the best option, offering higher

financial returns and greater potential for CO_2 reduction. Future research should explore the integration of energy storage to further improve performance, improve grid stability, and ensure a more reliable and sustainable energy transition.

ACKNOWLEDGMENTS (TEŞEKKÜR)

This manuscript has been extracted from an MSc dissertation conducted at Kütahya Dumlupınar University. All data, models, and data codes generated or used during the study appear in the published article.

Bu makale Kütahya Dumlupınar Üniversitesi'nde tamamlanan yüksek lisans tezinden üretilmiştir. Çalışma sırasında üretilen veya kullanılan tüm veriler, modeller ve veri kodları yayınlanan makalede yer almaktadır.

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

AUTHORS' CONTRIBUTIONS (YAZARLARIN KATKILARI)

The authors contributed to this article as follows:

Ibrahim Mahmoud Rizeq ALSAQAR:

- Literature review: Conducting literature research to create the academic infrastructure of the study
- Simulation and Modeling: Performing simulations with PVsyst software and detailing the system design
- Article Writing: Writing the study according to the journal format

- Literatür taraması: Çalışmanın akademik altyapısının oluşturulması için literatür araştırmasının yapılması
- Simülasyon ve Modelleme: PVsyst yazılımıyla simülasyonların gerçekleştirilmesi ve sistem tasarımının detaylandırılması
- Makale Yazımı: Dergi formatına göre çalışmanın yazılı hale getirilmesi

Mehmet ERDEM:

- Idea and Design: Development of the idea and overall design of the study.
- Final Approval: Approval of the final version of the manuscript and preparation for publication
- Overall management of the process

- Fikir ve Tasarım: Çalışmanın fikrinin geliştirilmesi ve genel tasarımın oluşturulması.
- Son Onay: Makalenin nihai halinin onaylanması ve yayıma hazırlanması
- Sürecin genel yönetimi

Stages to which both authors contributed jointly:

- Environmental and Economic Impacts: Conducting and interpreting environmental and economic analysis
- Revision: Addressing the comments made by the editor and reviewers and making corrections.

Her iki yazarın ortak katkı sağladığı aşamalar:

- Çevresel ve Ekonomik Etkiler: Çevresel ve ekonomik analizlerin yapılması ve yorumlanması
- Revizyon: Editör ve hakemler tarafından yapılan yorumların ele alınması ve düzeltmelerin yapılması.

CONFLICT OF INTEREST (ÇIKAR ÇATIŞMASI)

There is no conflict of interest in this study.

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

REFERENCES (KAYNAKLAR)

1. Cerovsky, Z. and P. Mindl. *Hybrid electric cars, combustion engine driven cars and their impact on environment*. in *2008 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion*. 2008. IEEE, doi:10.1109/SPEEDHAM.2008.4581321
2. Al-Smairan, M., et al., *Experimental Analysis of Weather Condition Effects on Photovoltaic Systems' Performance: A Jordan Case Study*. Journal of Engineering, 2024. **2024**(1): p. 9321648, doi:10.1155/2024/9321648
3. Vohra, K., et al., *Global mortality from outdoor fine particle pollution generated by fossil fuel combustion: Results from GEOS-Chem*. Environmental research, 2021. **195**: p. 110754, doi:10.1016/j.envres.2021.110754
4. (UNCED), U.N.C.o.E.a.D., *Rio Declaration on Environment and*

Development, in *United Nations Conference on Environment and Development*. 1992: Rio de Janeiro, Brazil.
5. Al-Habaibeh, A., et al., *Solar energy in Jordan: Investigating challenges and opportunities of using domestic solar energy systems.* World Development Sustainability, 2023. **3**: p. 100077, doi:10.1016/j.wds.2023.100077
6. Sarı, V. and F.Y. Özyiğit, *Sivas ilinin farklı ilçelerinde şebeke bağlantılı güneş enerji santrallerinin tasarımı ve analizi.* Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, 2020(20): p. 425-437, doi:10.31590/ejosat.797434
7. Nnabuife, S.G., et al., *Innovative Strategies for Combining Solar and Wind Energy with Green Hydrogen Systems.* Applied Sciences, 2024. **14**(21): p. 9771, doi:10.3390/app14219771
8. Al-Bajjali, S.K. and A.Y. Shamayleh, *Estimating the determinants of electricity consumption in Jordan.* Energy, 2018. **147**: p. 1311-1320, doi:10.1016/j.energy.2018.01.010
9. Al-Najideen, M.I. and S.S. Alrwashdeh, *Design of a solar photovoltaic system to cover the electricity demand for the faculty of Engineering-Mu'tah University in Jordan.* Resource-Efficient Technologies, 2017. **3**(4): p. 440-445, doi:10.1016/j.reffit.2017.04.005
10. Salah, A.A., M.M. Shalby, and F. Basim Ismail, *The status and potential of renewable energy development in Jordan: exploring challenges and opportunities.* Sustainability: Science, Practice and Policy, 2023. **19**(1): p. 2212517, doi:10.1080/15487733.2023.2212517
11. Bataineh, A., A. Alqudah, and A. Athamneh, *Optimal design of hybrid power generation system to ensure reliable power supply to the health center at Umm Jamal, Mafraq, Jordan.* Energy and Environment Research, 2014. **4**(3): p. 9, doi:10.5539/eer.v4n3p9
12. Al-Omari, Z., N. Khlaifat, and M. Haddad, *A feasibility study of combining solar/wind energy to power a water pumping system in Jordan's Desert/Al-Mudawwara village.* Environmental and Sustainability Indicators, 2025. **25**: p. 100555, doi:10.1016/j.indic.2024.100555
13. Alrwashdeh, S.S., F.M. Alsaraireh, and M.A. Saraireh, *Solar radiation map of Jordan governorates.* International Journal of Engineering & Technology, 2018. **7**(3): p. 1664-1667, doi:10.14419/ijet.v7i3.15557
14. *Solargis*. Available from: https://solargis.com/maps-and-gis-data/download/jordan.
15. Narasimhan, A. *Qualitative Assessment of PV System Cable Loss and Practical Cost Optimization*. in *2020 IEEE International Conference on Electronics, Computing and Communication Technologies (CONECCT)*. 2020. IEEE, doi:10.1109/CONECCT50063.2020.9198671
16. Micheli, L., et al., *Quantifying the impact of inverter clipping on photovoltaic performance and soiling losses.* Renewable Energy, 2024. **225**: p. 120317, doi:10.1016/j.renene.2024.120317
17. Al-Enezi, F., J. Sykulski, and M. Rotaru, *Grid-connected photovoltaic module and array sizing based on an iterative approach.* SGCE International Journal of Smart Grid and Clean Energy, 2014. **3**(2): p. 247-254.
18. Arndt, R. and R. Puto, *Basic understanding of IEC standard testing for photovoltaic panels.* TÜV SÜD Prod. Serv, 2010.
19. Gan, C.K., et al. *Role of losses in design of DC cable for solar PV applications*. in *2014 Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC)*. 2014. IEEE, doi:10.1109/AUPEC.2014.6966594
20. Ilıca, A. and M. Serdar, *Electrical sizing of grid-connected photovoltaic systems.* Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 2024. **30**(4): p. 451-462, doi: 10.5505/pajes.2023.24896
21. Božiková, M., et al., *The effect of azimuth and tilt angle changes on the energy balance of photovoltaic system installed in the Southern Slovakia region.* Applied Sciences, 2021. **11**(19): p. 8998, doi:10.3390/app11198998
22. Siraki, A.G. and P. Pillay, *Study of optimum tilt angles for solar panels in different latitudes for urban applications.* Solar energy, 2012. **86**(6): p. 1920-1928, doi:10.1016/j.solener.2012.02.030
23. Shivalingaswamy, T. and B. Kagali, *Determination of the Declination of the Sun on a Given Day.* European Journal of Physics Education, 2012. **3**(1).
24. Masters, G.M., *Renewable and efficient electric power systems*. 2013: John Wiley & Sons.
25. Jaseem, B.M.H. and M.S.S. Al-Kafaji, *Evaluating and Analyzing The Transposition Factor In Al-Musayyib Technical College to Setting The Optimal*

Tilt Angle for Fixed And Seasonal Orientation. Salud, Ciencia y Tecnología-Serie de Conferencias, 2024. **3**: p. 853-853, doi:10.56294/sctconf2024853

26. Sathyanarayana, P., et al., *Effect of shading on the performance of solar PV panel.* Energy and Power, 2015. **5**(1A): p. 1-4, doi:10.5923/c.ep.201501.01
27. Bayyiğit, A.; Çinici, O.K.; Acir, A. Tek YÜzeylİ Ve Çİft YÜzeylİ Fotovoltaİk Panellerİn Performans Analİzİ. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji* **2023**, *11*, 407-420, doi:10.29109/gujsc.1298017.
28. Rodrigues, S., et al., *Economic feasibility analysis of small scale PV systems in different countries.* Solar Energy, 2016. **131**: p. 81-95, doi:10.1016/j.solener.2016.02.019
29. Zaini, N., et al. *The effect of temperature on a mono-crystalline solar PV panel*. in *2015 IEEE Conference on Energy Conversion (CENCON)*. 2015. IEEE, doi:10.1109/CENCON.2015.7409548
30. *Carbon intensity of electricity generation*. Available from: https://ourworldindata.org/grapher/carbon-intensity-electricity?tab=chart&country=~JOR.
31. *IEA*. Available from: https://www.iea.org/countries/jordan/electricity.
32. Alshare, A., et al., *Energy and economic analysis of a 5 MW photovoltaic system in northern Jordan.* Case Studies in Thermal Engineering, 2020. **21**: p. 100722, doi:10.1016/j.csite.2020.100722

Gazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Dergisi
PART C: TASARIM VE TEKNOLOJİ

Gazi University
Journal of Science
PART C: DESIGN AND TECHNOLOGY

GU J Sci, Part C, 13(2): 627-640 (2025)

Multi-Focal Diffractive Lens by Apodized Phase Photon Sieves

Ahmet ÜNAL[1*]

[1]*Middle East Technical University, Department of Electrical and Electronics Engineering, Ankara, Turkey*

Article Info

Research article
Received: 30/09/2024
Revision: 16/03/2025
Accepted: 24/03/2025

Keywords

Diffractive Optical Elements
Phase Fresnel Zone Plates
Multilevel Diffractive Lens
Point Spread Function
EMI Shielding

Makale Bilgisi

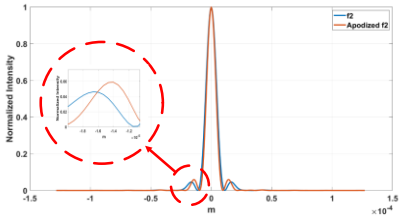
Araştırma makalesi
Başvuru: 30/09/2024
Düzeltme: 16/03/2025
Kabul: 24/03/2025

Anahtar Kelimeler

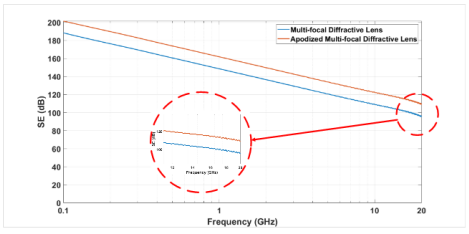
Kırınımlı Optik Eleman
Faz Fresnel Bölge Plakaları
Çok Seviyeli Kırınımlı Lens
Nokta Yayılım Fonksiyonu
EMI Koruma

Graphical/Tabular Abstract (Grafik Özet)

The invention of photon sieves and the integration of apodization into these sieves have introduced significant design flexibility in diffractive optical elements (DOEs), enabling the regulation of secondary maxima in the intensity distribution. Unlike conventional methods, this study applies apodization to phase-type photon sieves using metallic structures, which not only adjusts intensity distributions (Figure A a)) but also enhances electromagnetic interference (EMI) shielding (Figure A b)). / Foton eleklerinin icadı ve bu eleklere apodizasyonun entegre edilmesi, kırınımlı optik elemanlarda (DOE'ler) önemli tasarım esnekliği sunarak şiddet dağılımındaki ikincil maksimumların düzenlenmesini sağlamıştır. Geleneksel yöntemlerin aksine, bu çalışma, yalnızca yoğunluk dağılımlarını ayarlamakla kalmayıp (Şekil A a)) aynı zamanda elektromanyetik girişim (EMI) kalkanlamasını da geliştiren (Şekil A b)) metalik yapılar kullanarak faz tipi foton eleklerine apodizasyonu uygular.



a) *Comparison of intensity distributions*



b) *Comparison of shielding effectiveness*

Figure A: *Comparsion of apodized phase photon sieves with phase photon sieves / **Şekil A:** Apodize faz foton eleklerinin faz foton elekleri ile karşılaştırılması*

Highlights (Önemli noktalar)

- *Validation of the apodized phase photon sieves by comparison with equivalent phase photon sieves. / Eşdeğer faz foton elekleri ile karşılaştırılarak apodize faz foton eleklerinin doğrulanması.*
- *Comparison of EMI shielding with non-metallic structure. / EMI kalkanlamasının metallik olmayan yapı ile karşılaştırılması.*
- *A novel electro optical system design approach incorporating a two-regional diffractive optical element. / İki bölgeli kırınım optik elemanını bünyesinde barındıran yeni bir elektro-optik sistem tasarım yaklaşımı.*

Aim (Amaç): *This study aims to design an apodized phase photon sieve using metallic structures, which not only regulates secondary maxima but also provides shielding effectiveness in a novel electro-optical system. / Bu çalışmada, metalik yapılar kullanılarak, hem ikincil maksimumları düzenleyen hem de yeni bir elektro-optik sistemde kalkanlama etkinliği sağlayan apodize faz foton eleği tasarımı amaçlanmıştır.*

Originality (Özgünlük): *A novel design methodology for an electro-optical system is introduced, utilizing apodized phase photon sieves with metallic structure for the first time.. / İlk kez metalik yapıya sahip apodize faz foton eleklerini kullanan bir elektro-optik sistem için yeni bir tasarım metodolojisi tanıtılmaktadır.*

Results (Bulgular): *Electromagnetic simulations have demonstrated that apodized phase photon sieves with a metallic structure exhibit improved shielding effectiveness.. / Elektromanyetik simülasyonlar, metalik yapıya sahip apodize faz foton eleklerinin gelişmiş kalkanlama etkinliği sergilediğini göstermiştir.*

Conclusion (Sonuç): *An innovative design approach incorporating apodized phase photon sieves with metallic structure is proposed. The effectiveness of this design was validated through comparative analyses in both optical and electromagnetic bands../ Metalik yapıya sahip apodize faz foton eleklerini içeren yenilikçi bir tasarım yaklaşımı önerilmiştir. Bu tasarımın etkinliği, hem optik hem de elektromanyetik bantlarda karşılaştırmalı analizler yoluyla doğrulanmıştır.*

*Corresponding author, e-mail: ahmetunal.phd@gmail.com
DOI: 10.29109/gujsc.1557933

GU J Sci, Part C, 13(2): 627-640 (2025)

Gazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Dergisi
PART C: TASARIM VE TEKNOLOJİ

Gazi University
Journal of Science
PART C: DESIGN AND TECHNOLOGY

http://dergipark.gov.tr/gujsc

Multi-Focal Diffractive Lens by Apodized Phase Photon Sieves

Ahmet ÜNAL[1*]

[1]*Middle East Technical University, Department of Electrical and Electronics Engineering, Ankara, Turkey*

Article Info

Research article
Received: 30/09/2024
Revision: 16/03/2025
Accepted: 24/03/2025

Keywords

Diffractive Optical Elements
Phase Fresnel Zone Plates
Multilevel Diffractive Lens
Point Spread Function
EMI Shielding

Abstract

As a result of the invention of photon sieves and the implementation of apodization to these sieves, significant design freedom has been achieved in diffractive optical elements (DOEs). Thanks to this freedom, secondary maxima in the intensity distribution can be reduced relative to the same photon sieves without apodization.

In this study, unlike traditional methods, applying apodization to phase types of photon sieves using metallic structures is discussed. Thus, not only intensity distributions are adjusted, but also electromagnetic interference (EMI) shielding is achieved. For this purpose, an Apodized Multi-focal Diffractive Lens (AMDL), which can be defined as a hybrid lens, was designed within the scope of this study, and its results were compared with its alternative, Multi-focal Diffractive Lens (MDL). During the design stage, simulations were carried out on two different bands. While the simulations in the optical band were performed using optical wave propagation, the simulations in the RF band were carried out using CST software, and the results were shared. As can be seen from the results, the secondary maxima in the intensity distribution was reduced due to the apodization, and EMI protection was also achieved.

This study will contribute to the development of lenses designed for two different purposes called hybrid lens in this research.

Apodize Faz Foton Elekleri ile Çok Odaklı Kırınımlı Mercek

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 30/09/2024
Düzeltme: 16/03/2025
Kabul: 24/03/2025

Anahtar Kelimeler

Kırınımlı Optik Eleman
Faz Fresnel Bölge Plakaları
Çok Seviyeli Kırınımlı Lens
Nokta Yayılım Fonksiyonu
EMI Koruma

Öz

Foton eleklerinin icadı ve bu eleklere apodizasyonun uygulanması sonucunda kırınımlı optik elemanlarda (DOE) önemli tasarım özgürlüğü elde edilmiştir. Bu özgürlük sayesinde şiddet dağılımındaki ikincil maksimumlar, apodizasyonsuz aynı foton eleklerine göre azaltılabilmektedir.

Bu çalışmada, geleneksel yöntemlerden farklı olarak, metalik yapılar kullanılarak foton eleklerinin faz tiplerine apodizasyonun uygulanması ele alınmıştır. Böylece, sadece şiddet dağılımları ayarlanmakla kalınmamış, aynı zamanda elektromanyetik girişim (EMI) koruması da sağlanmıştır. Bu amaçla, bu çalışma kapsamında hibrit lens olarak tanımlanabilecek Apodize Çok Odaklı Kırınımlı Lens (AMDL) tasarlanmış ve sonuçları alternatifi Çok Odaklı Kırınımlı Lens (MDL) ile karşılaştırılmıştır. Tasarım aşamasında iki farklı bantta simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Optik banttaki simülasyonlar optik dalga yayılımı kullanılarak gerçekleştirilirken, RF bandındaki simülasyonlar CST yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiş ve sonuçlar paylaşılmıştır. Sonuçlardan da görüleceği üzere, apodizasyon nedeniyle şiddet dağılımındaki ikincil maksimumlar azalmış ve EMI koruması da sağlanmıştır.

Bu çalışma, bu araştırmada hibrit lens olarak adlandırılan iki farklı amaç için tasarlanmış lenslerin geliştirilmesine katkıda bulunacaktır.

1. INTRODUCTION (GİRİŞ)

Due to the high Radio Frequency (RF) transmittance of lens materials in electro-optical systems, EMI shielding is necessary. This shielding is typically provided by metallic structures known as Frequency Selective Surfaces (FSS) in infrared bands or a thin sheet film such as Indium Thin Oxide (ITO) in the visible band. These structures are commonly utilized in electro-optical systems, particularly in the defense industry [1, 2].

With advancements in imaging systems, Diffractive Optical Elements (DOEs) are increasingly replacing conventional refractive optics. When properly designed, DOEs can effectively mitigate optical

*Corresponding author, e-mail: ahmetunal.phd@gmail. com
DOI: 10.29109/gujsc.1557933

aberrations with just one optical element [3-10]. This reduction in the number of optical components not only decreases the weight of the camera but also simplifies optical alignment issues in optical systems. In military and aerial applications [5, 11 - 22], DOEs offer additional advantages by reducing volume and weight, thereby adding flexibility to the design of optical systems. This reduction in volume and weight is particularly beneficial for aerial applications such as cruise missiles and Unmanned Aerial Vehicles (UAVs).

Electro-optical systems employed in military applications require EMI shielding in accordance with the MIL-STD 461 standard (10 kHz - 18 GHz range [23]). Typically, metal coatings formed on flat surfaces of optical components, known as FSSs, are utilized [1, 23-28]. Given that military operations may occur in all-day situations, infrared systems are preferred due to their capability to operate independently of day and night conditions. Additionally, the passive nature of the infrared band and its independence from active sources during operations contribute to their widespread usage. For these reasons, FSS structures are prioritized in infrared systems [23, 24, 28].

As an alternative to periodic unit cell-based FSS structures, a metallic structure with appropriate size and apertures can achieve similar effects in reducing RF transmission. Within the scope of this study, a metallic structure, unlike FSS but providing EMI shielding akin to FSS, is proposed. Besides its application for EMI shielding, the proposed metallic structure is also utilized as an apodization component of phase photon sieves.

2. THEORETICAL BACKGROUND (TEORİK ALTYAPI)

Fresnel Zone Plates (FZPs) comprise concentric rings that alternate between optically opaque and transparent zones. When appropriately designed, each ring contributes to achieving the desired focus [29], making FZP structures function as refractive lenses. Depending on the contribution of the concentric rings to the focus, FZPs can be categorized as Phase FZP (PFZP) and Amplitude FZP (AFZP) [29-33]. PFZP, also known as Multilevel Diffractive Lens [7-10, 34-36], is often preferred in various applications due to its superior diffraction efficiency compared to amplitude types. As a result, they can serve as alternatives to traditional refractive lenses. Amplitude types are less commonly used in applications due to their lower diffraction efficiencies in optical bands. Possible basic types and their calculated diffraction efficiencies of the FZPs are outlined in Table 1.

Table 1. Analytically calculated first-order diffraction efficiencies. (Analitik olarak hesaplanan birinci derece kırınım verimlilikleri)

FZP types	Efficiency (%)
Kinoform (Phase) [37, 38]	100.0
32-Level (Phase) [7, 8, 34, 35, 39]	99.7
16-Level (Phase) [7, 8, 34, 35, 39]	98.7
8-Level (Phase) [7, 8, 34, 35, 39]	95.0
4-Level (Phase) [7, 8, 34, 35, 39]	81.1
2-Level (Phase) [20, 39]	40.5
Sinusoidal (Phase) [39]	33.9
2-Level (Amplitude) [30, 40]	10.1
Sinusoidal (Amplitude) [31-33]	6.25

The study opted for a 4-level PFZP due to its higher diffraction efficiencies compared to amplitude types, despite the availability of higher levels like 8, 16, or 32, or even Kinoform. The decision was influenced by the need to balance computational time and validate the concept of the AMDL with EMI shielding.

The objective of this research is to devise a hybrid lens that mimics the RF behavior of periodic meshed FSS, which minimizes secondary maxima in optical band intensity distribution. To achieve this goal, the study proposes an apodized multi-focal diffractive lens as an alternative to the multi-focal diffractive lens [41].

2.1. Optical Model Of Multilevel Diffractive Lens (Çok Seviyeli Kırınımlı Lensin Optik Modeli)

In scalar diffraction theory, Fresnel and Fraunhofer approximations are well-defined theories that can be applied to many optical systems. Thus, both near and far-field wave distribution can be analyzed analytically or numerically by these approximations. The Huygens Fresnel integral in terms of Fourier Transform under Fresnel approximation is given as follows [42, 43]

$$r(x,y)=\frac{e^{ikd}}{i\lambda d}e^{i\pi\frac{x^2+y^2}{\lambda d}}\Im\left\{u(x',y')e^{i\frac{\pi}{\lambda d}\left((x')^2+(y')^2\right)}\right\}\left(\frac{x}{\lambda d},\frac{y}{\lambda d}\right) \quad (1)$$

The Huygens Fresnel integral in terms of Fourier Transform under Fraunhofer approximation is given as follows [42, 43]

$$r(x,y)=\frac{e^{ikd}}{i\lambda d}e^{i\pi\frac{x^2+y^2}{\lambda d}}\Im\{u(x',y')\}\left(\frac{x}{\lambda d},\frac{y}{\lambda d}\right) \quad (2)$$

where $\Im\{\ \}$ is 2D Fourier Transform, $u(x',y')$ is amplitude distribution in the source plane, $r(x,y)$ is the amplitude distribution in the image plane, d is the distance between the source and image plane, and λ is the wavelength. The geometry of optical wave propagation is given in Figure 1. The Huygens-Fresnel integrals are valid under Fresnel and Fraunhofer approximations. The valid range is defined by the Fresnel number (N_F), and it is given as [44]

$$N_F=\frac{a^2}{\lambda d} \quad (3)$$

where a is the radius of a circular lens aperture. Fresnel number less than 1 indicates that the approximation is suitable, but the Fresnel approximation can still provide good results for Fresnel numbers up to 20 or 30 [44]. When the Fresnel number is much smaller than 1, the Fraunhofer approximation is valid.

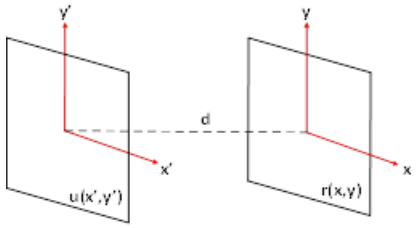


Figure 1. Optical propagation geometry. (Optik yayılma geometrisi.)

In the case of the unit plane wave illumination, the amplitude distribution of the source plane will be the aperture function of the lens just after passing the DOE. Thus, this integral can be written in terms of the Fourier Transform and aperture function of the DOE. This approach makes it possible to apply one-step propagation [45] to the optical propagation geometry. The amplitude distribution in the image plane for Fresnel and Fraunhofer approximations are

$$r(x,y)=\frac{1}{i\lambda d}e^{i\pi\frac{x^2+y^2}{\lambda d}}\Im\left\{A(x',y')_{DOE}e^{i\frac{\pi}{\lambda d}\left((x')^2+(y')^2\right)}\right\}\left(\frac{x}{\lambda d},\frac{y}{\lambda d}\right) \quad (4)$$

$$r(x,y)=\frac{1}{i\lambda d}e^{i\pi\frac{x^2+y^2}{\lambda d}}\Im\{A(x',y')_{DOE}\}\left(\frac{x}{\lambda d},\frac{y}{\lambda d}\right) \quad (5)$$

The exponential phase term is neglected for simplicity. The following equation defines the offered general aperture function of a 4-level DOE.

$$A(x,y)_{DOE}=\sum_{l=1}^{n*L}\exp\left(-i2\pi\frac{l-1/2}{L}\right).\left\{circ\left(\frac{x}{r_l},\frac{y}{r_l}\right)-circ\left(\frac{x}{r_{l-1}},\frac{y}{r_{l-1}}\right)\right\} \quad (6)$$

where n is the number of phase Fresnel zones, L is the number of the subzone, and r_l is the radius of lth subzone. The circular function is

$$circ(x,y)=\begin{cases}1, & if\ \sqrt{x^2+y^2}\le 1\\ 0, & otherwise\end{cases}$$

A schematic representation of the 4-Level PFZP is given in Figure 2.

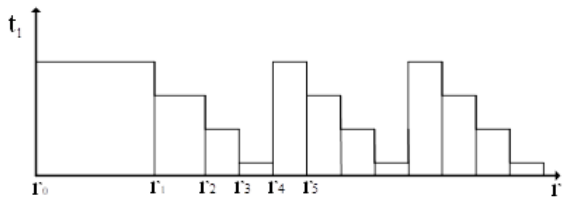


Figure 2. DOE model for 4-Level PFZP. (4-Level PFZP için DOE modeli.)

$$t_l=\frac{(l-1/2)}{L}\frac{\lambda}{(n-1)} \quad (7)$$

where t_l is the thickness of lth subzone, λ is the wavelength, n is the refractive index of the lens material, and 1 is the refractive index of the atmosphere [7, 8, 34, 35]. Theoretically, the

thickness values for each sublevel will change the phase of the plane wave. Therefore, the phases resulting from the thickness are expressed as an exponential product at the beginning of the aperture function. Each subzone can be determined by using the following equation.

$$r_l = \sqrt{\frac{2l\lambda f}{L}} \tag{8}$$

where f is the focal length of the DOE. While simulating the optical propagation, the distance between the source and image plane was taken as the focal length ($d = f$).

Taking into account the Nyquist Sampling criteria [45] in the spatial and spatial frequency domains, to accurately sample the amplitude distribution, 2D grids are defined. The sampling interval of the spatial domain is $\Delta x'$, and the sampling interval in the spatial frequency domain is Δx. The relation between sampling intervals is determined by the Nyquist Sampling criteria and it is given as [45]

$$\Delta x \le \frac{1}{2\Delta x'} \tag{9}$$

The amplitude distribution can be written in terms of sampling intervals in spatial and spatial frequency domains. The intensity distribution is the absolute square of the amplitude distribution. The sampled versions are

$$I(m,n) = \left| \begin{array}{l} \frac{1}{i\lambda d} e^{i\pi\lambda d\left(m^2\Delta x^2 + n^2\Delta x^2\right)}. \\ \Im\left\{ A(m\Delta x', n\Delta x')_{DOE}\, e^{i\frac{\pi}{\lambda d}\left(m^2(\Delta x')^2 + n^2(\Delta x')^2\right)} \right\} \end{array} \right|^2 \tag{10}$$

$$I(m,n) = \left| \frac{1}{i\lambda d} e^{i\pi\lambda d\left(m^2\Delta x^2 + n^2\Delta x^2\right)} \Im\left\{ A(m\Delta x', n\Delta x')_{DOE} \right\} \right|^2 \tag{11}$$

2.2. Optical Model of Multi-Focal Diffractive Lens (MDL)

(Çok Odaklı Kırınımlı Lensin (MDL) Optik Modeli)

MDL consists of two regions. The first region, the central part of the lens, is the first focal length, and the second region, the outer part of the lens, is the second focal length. In each region (central and outer), parameters required to determine the aperture functions are calculated separately according to focal length, wavelength, and the number of phase Fresnel zones. Therefore, the total aperture function is the sum of the aperture functions. The aperture function of the first region ($A_{f1}(x,y)$) is

$$\begin{array}{l} A_{f1}(x,y) = \sum_{l=1}^{n*L} \exp\left(-i2\pi \frac{l-1/2}{L} \right). \\ \left\{ circ\left(\frac{x}{r_l}, \frac{y}{r_l} \right) - circ\left(\frac{x}{r_{l-1}}, \frac{y}{r_{l-1}} \right) \right\} \end{array} \tag{12}$$

The aperture function of the second region ($A_{f2}(x,y)$) is

$$\begin{array}{l} A_{f2}(x,y) = \left[1 - circ\left(\frac{x}{r_{out}}, \frac{y}{r_{out}} \right) \right].* \\ \left[\begin{array}{l} \sum_{l=1}^{n*L} \exp\left(-i2\pi \frac{l-1/2}{L} \right). \\ \left\{ circ\left(\frac{x}{r_l}, \frac{y}{r_l} \right) - circ\left(\frac{x}{r_{l-1}}, \frac{y}{r_{l-1}} \right) \right\} \end{array} \right] \end{array} \tag{13}$$

The final Aperture function will be the combination of aperture functions, and it can be defined as

$$A_{MDL}(x,y) = A_{f_1} + A_{f_2} \tag{14}$$

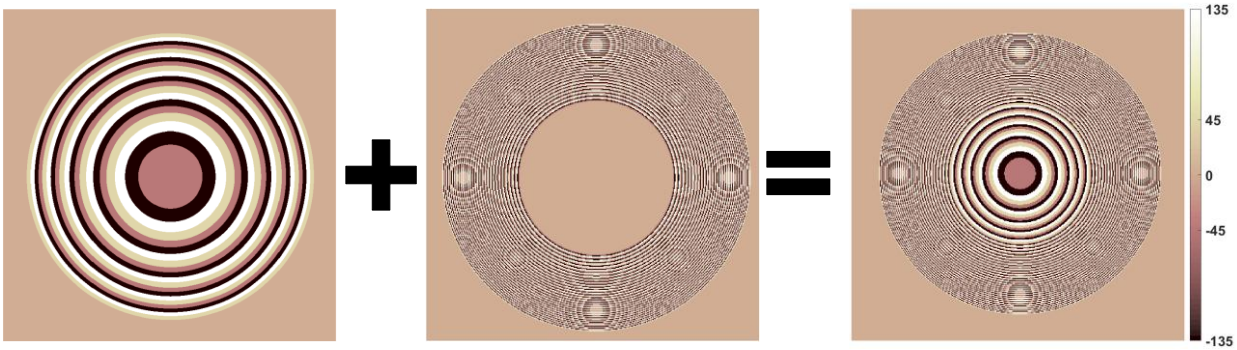


Figure 3. Aperture functions of MDL in terms of complex angles. The unit of the graphs is in degrees.
(Karmaşık açılar cinsinden MDL'nin açıklık fonksiyonları. Grafiklerin birimi derecedir.)

2.3. Optical Model Of Multi-Focal Diffractive Lens (MDL)

(Çok Odaklı Kırınımlı Lensin (MDL) optik modeli)

The aperture function of the first region ($A_{f1}(x,y)$) is the same as with the MDL. However, the outer region has to be different in order to decrease the secondary maxima, and apodization has to be applied. The apodization can also be applied to not only amplitude types of photon sieves but also the phase photon sieves. In the literature, there are many apodized types such as Bartlett, Blackman, Connes, Gaussian, etc. [46]. Since this study is based on the application of apodization to phase photon sieves using metallic structures, any type of apodization is sufficient. For this reason, Gaussian apodization was chosen. The aperture function of the outer region is

$$A_{Af\,2}(x,y)=\sum_{l=21}^{n*L}\left(\sum_{n=1}^{N_l}\exp\left(-i2\pi\frac{l-1/2}{L}\right).\ circ\left(\frac{x-c}{d_l},\frac{y-y_n}{d_l}\right)\right) \quad (15)$$

The Gaussian apodization function [46, 47] is

$$N_l=\left\lfloor\frac{\pi r_l}{2d_l}.exp\left(-2\frac{r_l^{\,2}}{r_{out,f\,2}^{\,2}}\right)\right\rfloor \quad (16)$$

N_l is the number of phase sieves in each subzone level, $r_{out,f\,2}$ is the outermost sublevel radius of the second region, d_l is the radius of the sieves in l^{th} subzone, and x_n , y_n values are the central location of the sieves. The first term in equation (16) gives the total number of sieves after it is multiplied by the Gaussian apodization function [47]. Here, $\lfloor . \rfloor$ operator represents the lower ceiling operation. In this way, the number of sieves in each region is determined, and they are distributed symmetrically. After each aperture function of the first and second focal length is calculated separately, the total aperture function will be the sum of the individual aperture functions.

$$A_{AMDL}(x,y)=A_{f_1}+A_{Af_2} \quad (17)$$

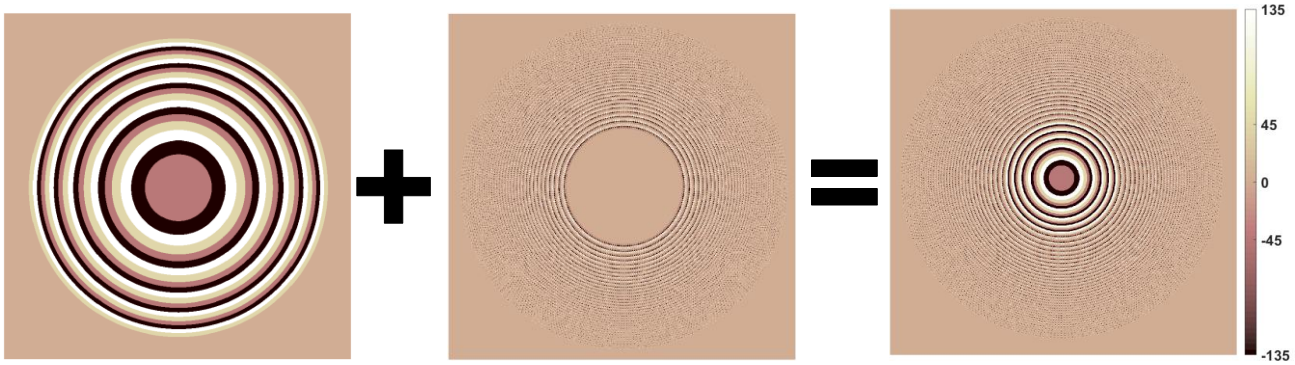
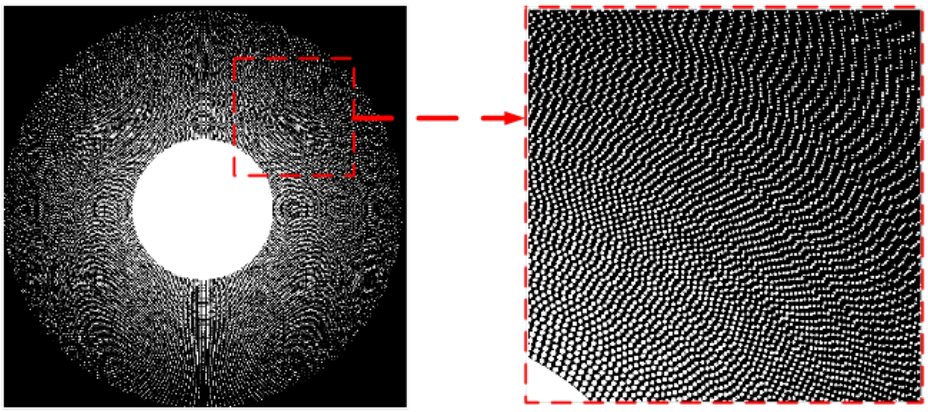
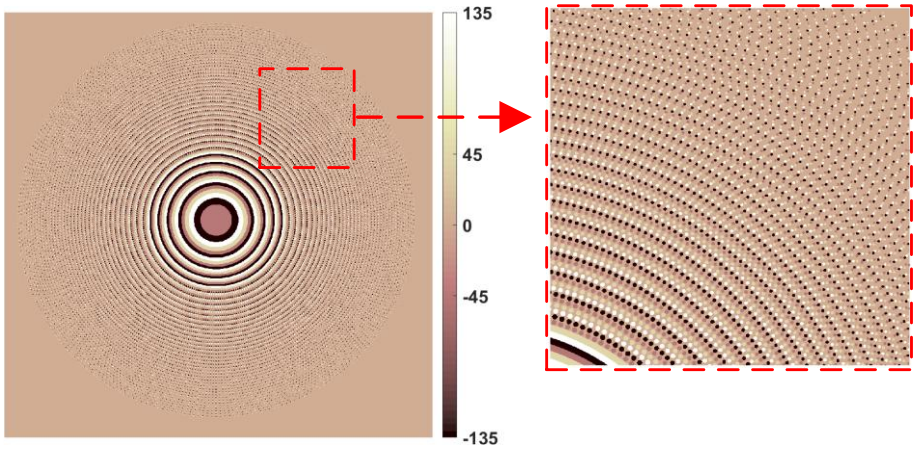


Figure 4. Aperture function of AMDL in terms of complex angles. (Kompleks açılar cinsinden AMDL'nin açıklık fonksiyonu.)



a) Aperture function of the AMDL in terms of magnitude. (AMDL'nin açıklık fonksiyonu büyüklük cinsinden)



b) The aperture function of the AMDL in terms of imaginary angles (the unit of the graphs is in degrees) (AMDL'nin sanal açılar cinsinden açıklık fonksiyonu (Grafiklerin birimi derecedir))

Figure 5. Aperture function of the AMDL. (AMDL'nin açıklık fonksiyonu.)

2.4. Electromagnetic Model Of Diffractive Lenses

(Kırınımlı Lenslerin Elektromagnetik Modeli)

Shielding effectiveness is a measure of an enclosure how the incident wave is transmitted, and it is defined as the ratio of the incident wave (E_i) to the transmitted wave (E_t). Shielding effectiveness (SE_{linear}) is given with the following equation [1, 2]

$$SE_{linear} = \frac{E_i}{E_t} \tag{18}$$

Shielding effectiveness in dB unit is [1, 2]

$$SE_{dB} = 20 log_{10}(SE_{linear}) \tag{19}$$

Under the unit plane wave illumination, the SE can be defined as follows.

$$SE_{dB} = 20 log_{10}\left(\frac{1}{E_t}\right) = -E_{t,dB} \tag{20}$$

CST model for electromagnetic simulations of metallic enclosures is given in Figure 6 with two perfect conductor (PEC) structures, and boundary conditions were chosen as perfectly matched layers (PML) [2]. A uniform plane wave at normal incidence excites the structures. The contribution of the lens material to the shielding effectiveness has

been neglected in the models. So the simulations were performed separately for each structure without the diffractive lens. The Electric Field data is generated at the far-field (3 m) and, SE is calculated using the SE_{dB} equation (20).

The first model given in Figure 6 is the model of the circular aperture with the same diameter as the diffractive lens. The second model is proposed for metallic structured AMDL.

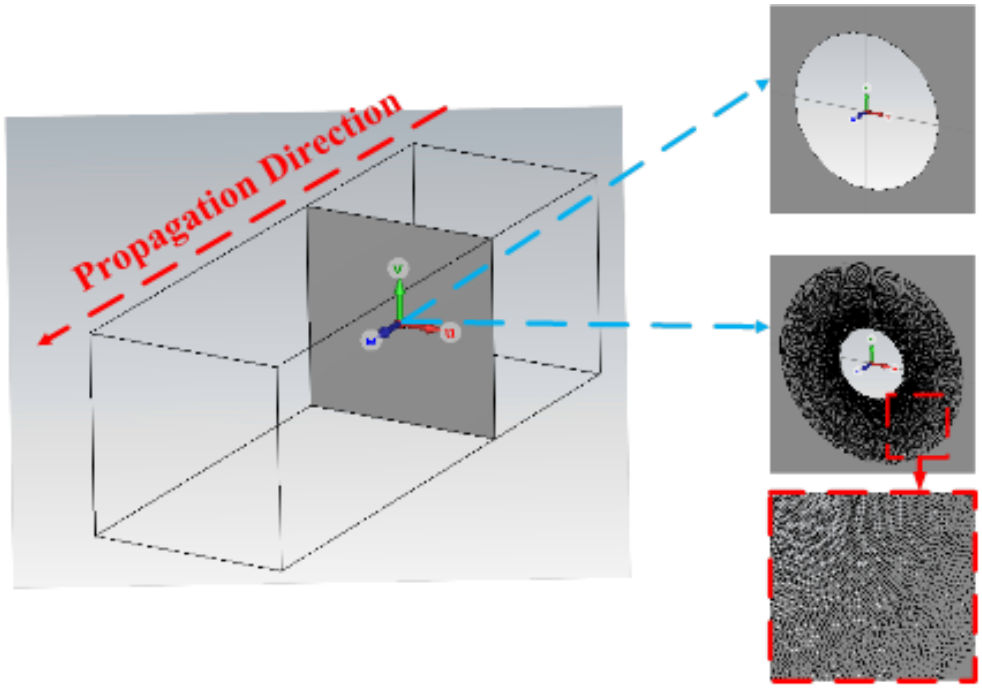


Figure 6. An overview of the CST model of the AMDL and MDL (AMDL ve MDL'nin CST modeline genel bakış)

3.SIMULATIONS AND RESULTS (SİMÜLASYONLAR ve BULGULAR)

The simulations were carried out in two different bands in the electromagnetic spectrum. First, due to the restriction coming from the MIL-STD 461 standard, the behavior of hybrid structures when exposed to RF was simulated between 100 MHz and 18 GHz using CST electromagnetic simulation software.

Second, since the military applications are considered, simulations were performed in the infrared band at 1064 nm wavelength. The first focal length is simulated in the visible band at 638 nm. The simulations can also be performed at different wavelengths or bands. However, only 1064 nm and 638 nm were preferred in this study for simplicity.

3.1. Electromagnetic Simulations (Elektromagnetik Simülasyonlar)

As a result of the CST simulations, AMDL has an advantage in protecting the electro-optical system. The difference between the MDL and AMDL is 13.7 dB. The shielding performance of the AMDL is better than the MDL.

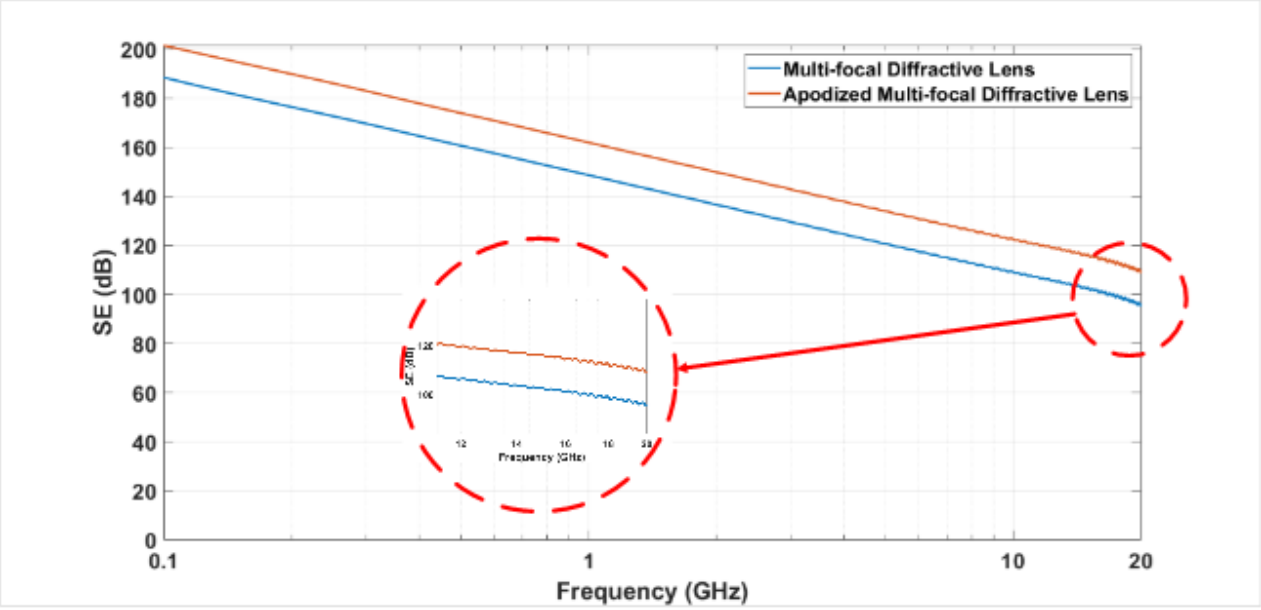


Figure 7. SE calculation results for the structures (Yapılar için SE hesaplama sonuçları)

3.2. Optical Simulations (Optik Simülasyonlar)

After determining the sampling parameters of the proposed aperture functions and Huygens-Fresnel Integrals, optical wave propagated [45] for the two apertures as shown in Fig 8. using equations (10) and (11). The results are presented in Figure 9 a) and b). Optical parameters of the MDL and AMDL are given in Table 2 and Table 3. The simulations are completed at the level of seconds after the aperture functions were defined.

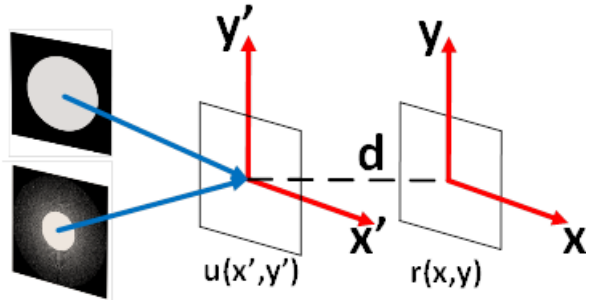


Figure 8. Optical propagation geometry for the aperture functions (A_{AMDL} , A_{MDL}) (Açıklık fonksiyonları için optik yayılma geometrisi (A_{AMDL} , A_{MDL}))

For the validity of the Fraunhofer approximation to be acceptable, the quadratic phase term should be small enough in the Huygens Fresnel integrals. Otherwise, the Fresnel approximation is logical. To be sure about the validity of the Fraunhofer approximation, the following calculation can be done. After that, for phase photon sieves, the Fraunhofer approximation was used in optical propagation.

$$d >> \frac{\pi d_1^{\,2}}{\lambda} \Rightarrow \begin{cases} f_2 >> \dfrac{\pi d_{21}^{\,2}}{\lambda_2} \Rightarrow 24 >> 0.14 \quad for\ d_{21} = 5.422\mu m \\ f_2 >> \dfrac{\pi d_{120}^{\,2}}{\lambda_2} \Rightarrow 24 >> 0.02 \quad for\ d_{120} = 2.022\mu m \end{cases}$$

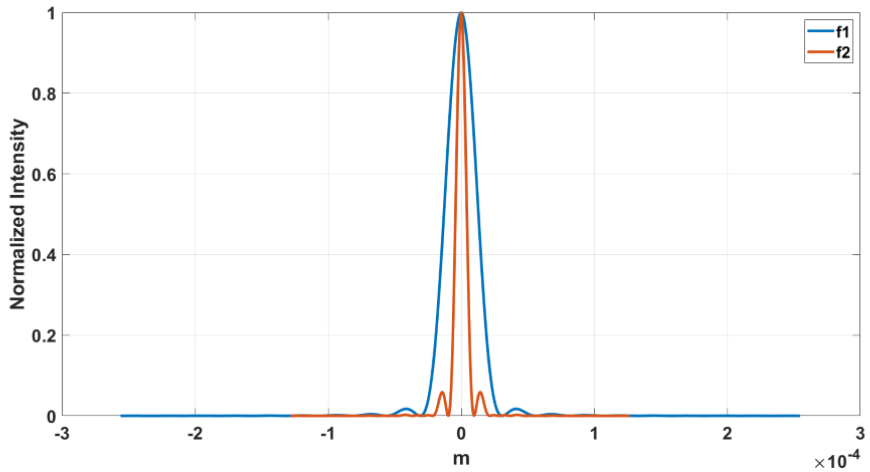
Table 2. Optical parameters of MDL (MDL'nin optik parametreleri)

	Parameters	Value
Central Region	Focal length (f_1)	24 mm
	Diameter	1 mm
	Wavelength (λ_1)	1.064 nm
	Number of Phase Fresnel Zones	5
	Fresnel Number (N_F)	10
Outer Region	Focal Length (f_2)	40 mm
	Diameter	~ 3 mm
	Wavelength (λ_2)	638 nm
	Number of Phase Fresnel Zones	5 - 40
	Fresnel Number (N_F)	80

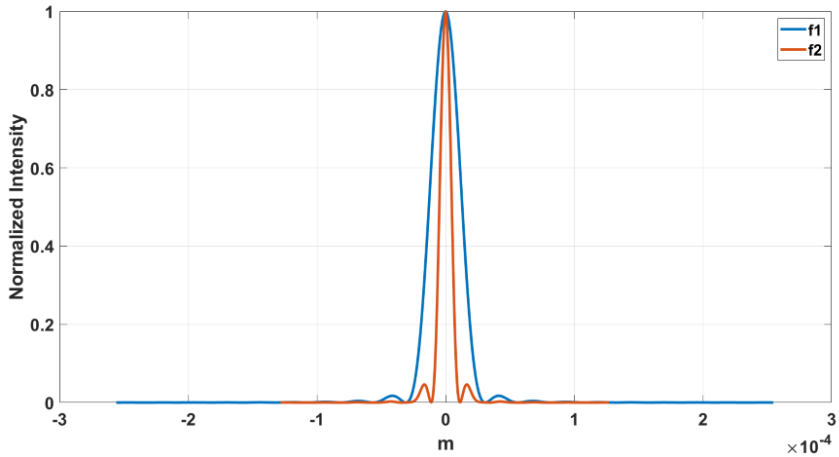
Table 3. Optical parameters of AMDL (AMDL'nin optik parametreleri)

	Parameters	Value
Central Region	Focal length (f_1)	24 mm
	Diameter	1 mm
	Wavelength (λ_1)	1.064 nm
	Number of Phase Fresnel Zones	5
	Fresnel Number (N_F)	10
Outer Region	Focal Length (f_2)	40 mm
	Diameter	~ 3 mm
	Wavelength (λ_2)	638 nm
	Number of Phase Fresnel Zones	5 - 40
	Fresnel Number (N_F)	80

The simulation results show that the proposed hybrid structure minimizes the secondary maxima in the intensity distribution of the second focal length. Normalized intensity values of the MDL are shown in Figure 9 a) and normalized intensity values of AMDL are shown in Figure 9 a). For better observation, the difference is shown in Figure 10.



a) Cross section of normalized intensity distributions of the MDL (MDL'nin normalleştirilmiş şiddet dağılımlarının kesiti.)



b) Cross section of normalized intensity distributions of the AMDL (AMDL'nin normalleştirilmiş şiddet dağılımlarının kesiti.)

Figure 9. Simulation results of MDL and AMDL. (MDL ve AMDL'nin simülasyon sonuçları)

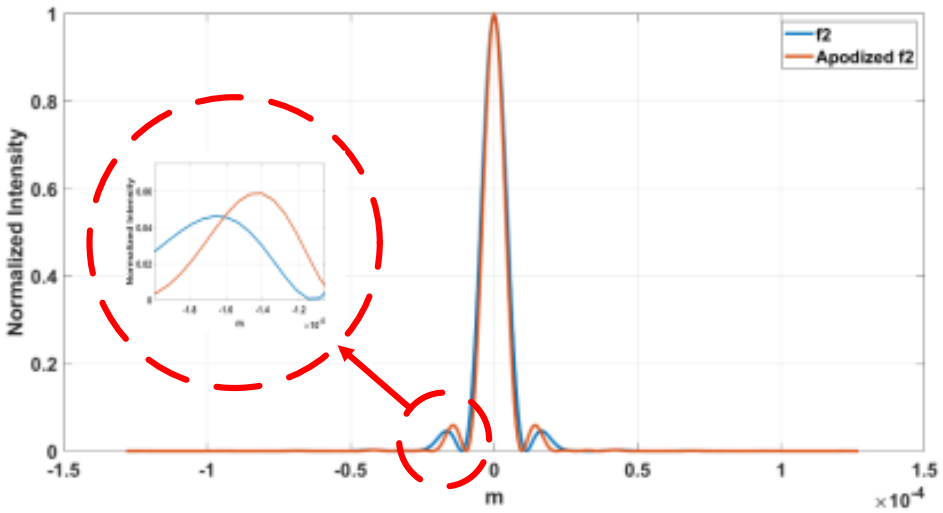


Figure 10. Comparison of AMDL and MDL. (MDL ve AMDL'nin karşılaştırılması)

A single-lens system with two focal lengths enables the effective integration of two electro-optical systems operating in different spectral bands through a common aperture optical design approach. Fig. 11 illustrates the system's operational potential. The first focal length is designed for a wavelength commonly used in laser spot tracker systems. However, if the application requires a laser rangefinder, the design wavelength can be adjusted to 1550 nm instead of 1064 nm.

The second focal length, designed for 638 nm, refers to the visible spectrum. The design for the visible band was carried out for only one wavelength. In this study, the visible band design is optimized for a single wavelength, but a complete design must account for all wavelengths within the visible range (400–700 nm), requiring further optimization.

The approach proposed in this study facilitates the development of an electro-optic system that integrates both a laser system and a visible sensor within a common aperture optical design. While this study primarily focuses on the visible band and laser wavelengths to validate the design, the same methodology can be extended to laser wavelengths and the infrared spectrum, including long-wave infrared (LWIR) and mid-wave infrared (MWIR) [1, 14, 15, 17, 18, 39, 48-51].

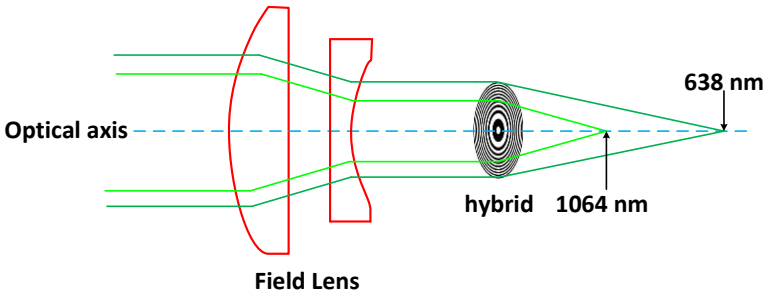


Figure 11. Illustration of an electro-optic system using the two-foci diffractive lens system (İki odaklı kırınımlı mercek sistemi kullanan bir elektro-optik sistemin gösterimi)

Apodization involves adjusting the pinhole density on each ring of the photon sieve to create a smooth transmission window, thereby enhancing the suppression of secondary maxima in a diffraction pattern. Gaussian apodization was selected as the preferred method; however, other techniques such as Bartlett, Blackman, Connes, Cosine, Hamming, Hanning, etc., are also available. For a diffractive

lens designed to operate at two focal lengths and two wavelengths, each apodization method can be analyzed individually, and if necessary, an additional window function can be incorporated. Evaluating and selecting the apodization technique that yields the best results across all wavelengths not for a single wavelength in the spectrum would further enhance optical performance [52, 53]. Because of this reason, the optimum apodization technique was not determined during the simulation of the hybrid structure. It must be determined for all wavelengths within the imager's spectral sensitivity.

4. CONCLUSION (SONUÇ)

This research found that the proposed AMDL minimizes the secondary maxima in the intensity distribution of the second focal length. The hybrid AMDL is offered as an alternative way to the MDL lens, and also, the apodization has been added to the lens with the help of a metallic structure. Thus, the hybrid structure is proposed for military applications where the use of FSS is necessary, and better in optical and RF bands. From this point of view, secondary maxima in the intensity values of the AMDL were eliminated in the optical band. An alternative way of protecting the optical system from EMI was accomplished. In this way, the hybrid structure, which provides benefits in both RF and optical bands, was proposed.

This research will contribute to the development of hybrid structures in optical and RF bands of the electromagnetic spectrum. This study can also be extended for any diffractive achromat instead of a single wavelength diffractive lens with a similar approach stated in this research.

DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS (ETİK STANDARTLARIN BEYANI)

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

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

AUTHORS' CONTRIBUTIONS (YAZARLARIN KATKILARI)

***Ahmet ÜNAL*:** He conducted the simulations, analyzed the results and performed the writing process.

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

CONFLICT OF INTEREST (ÇIKAR ÇATIŞMASI)

There is no conflict of interest in this study.

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

REFERENCES (KAYNAKLAR)

[1] A. Ünal, (2023), "Frequency selective diffractive optical element (FSDOE)", Proc. SPIE 12518, Window and Dome Technologies and Materials XVII, 125180C; https://doi.org/10.1117/12.2657048

[2] N. B. Mentesana, (2011), "Characterization of shielding effectiveness for metallic enclosures" Masters Theses. 4964. https://scholarsmine.mst.edu/masters_theses/4964

[3] T. Grulois, G. Druart, N. Guérineau, A. Crastes, H. Sauer, and P. Chavel, (2014), "Extra-thin infrared camera for low-cost surveillance applications" Opt. Lett. 39, 3169-3172 http://dx.doi.org/10.1364/OL.39.003169

[4] S. Banerji, M. Meem, A. Majumder, F. G. Vasquez, B. S.-Rodriguez, and R. Menon, (2019), "Ultra-thin near infrared camera enabled by a flat multi-level diffractive lens" Opt. Lett. 44, 5450-5452

[5] W. Zhang, B. Zuo, S. Chen, H. Xiao, and Z. Fan, (2013), "Design of fixed correctors used in conformal optical system based on diffractive optical elements" Appl. Opt. 52, 461-466

[6] H.-J. Niu, J. Zhang, A-q. Yan, H.-b. Leng, J.-q. Fei, D.-s. Wu, J.-z. Cao, (2015), "Optical system design for wide-angle airborne mapping camera with diffractive optical element," Proc. SPIE 9449, The International Conference on Photonics and Optical Engineering (icPOE 2014), 94492N doi: 10.1117/12.2085042

[7] Y. Peng, Q. Fu, H. Amata, S. Su, F. Heide, and W. Heidrich, (2015), "Computational imaging using lightweight diffractive-refractive optics" Opt. Express 23, 31393-31407

[8] Y. Peng, (2018), "Computational Imaging with Diffractive Optics", A Thesis Submitted In Partial Fulfillment Of The Requirements For the Degree Of Doctor Of Philosophy, The University of British Columbia April DOI : 10.14288/1.0365608

[9] Y. Peng, Q. Fu, F. Heide, W. Heidrich, (2016), "The Diffractive Achromat: Full Spectrum Computational Imaging with

Diffractive Optics" ACM Trans. Graph. 35, 4, Article 31 (July 2016), https://doi.org/10.1145/2897824.2925941

[10] P. Wang, N. Mohammad, & R. Menon, (2016), "Chromatic-aberration-corrected diffractive lenses for ultra-broadband focusing." Sci Rep 6, 21545 https://doi.org/10.1038/srep21545

[11] J. P. Mills, (2001), "Conformal optics: theory and practice" Proc. SPIE 4442, Novel Optical Systems Design and Optimization IV, doi:10.1117/12.449962

[12] R. R. Shannon, (1999), "Overview of conformal optics," Proc. SPIE 3705, Window and Dome Technologies and Materials VI, doi: 10.1117/12.354622

[13] M. Hinnrichs, B. Hinnrichs, E. McCutchen, (2017), "Infrared hyperspectral imaging miniaturized for UAV applications," Proc. SPIE 10177, Infrared Technology and Applications XLIII, 101770H doi: 10.1117/12.2262125

[14] A. Ünal, (2023), "Semi-active laser seeker design with combined diffractive optical element (CDOE)". J Opt 52, 956–968 https://doi.org/10.1007/s12596-022-00954-5

[15] A. Ünal, (2023), "Laser seeker design with multi-focal diffractive lens", Eng. Res. Express 5 045014, DOI 10.1088/2631-8695/ad0024

[16] T Ren, T Jiao, X. Ling, L. Hu, S. Zhu, (2020), "Design and analysis of distributed semi-active laser detection system," Proc. SPIE 11455, Sixth Symposium on Novel Optoelectronic Detection Technology and Applications, 114554O doi: 10.1117/12.2564981

[17] A. Ünal, (2024), "Dual mode, imaging infrared and semi-active laser, seeker design with squinted combined diffractive optical element". J Opt https://doi.org/10.1007/s12596-024-01657-9

[18] A. Ünal, (2024). Electro-optical system, imaging infrared and laser range finder, design with dual squinted combined lens for aerial targets. Journal of Optics (India), https://doi.org/10.1007/s12596-024-02057-9

[19] K. Qian, T. Li, J. Li, (2018), "Design of a semi-active laser/active radar/ infrared common aperture compound optical system," Proc. SPIE 10832, Fifth Conference on Frontiers in Optical Imaging Technology and Applications, 108321H doi: 10.1117/12.2511609

[20] Q. Huang, B. Lang, L. Xue, (2019), "Design of strapdown laser guided seeker," Proc. SPIE 11023, Fifth Symposium on Novel Optoelectronic Detection Technology and Application, 1102350 doi: 10.1117/12.2520601

[21] J. Barth, A. Fendt, R. Florian, W. Kieslich, (2007), "Dual-mode seeker with imaging sensor and semi-active laser detector," Proc. SPIE 6542, Infrared Technology and Applications XXXIII, 65423B doi: 10.1117/12.719571

[22] X. Zhang, Z. Yang, T. Sun, H. Yang, K. Han, B. Hu, (2017), "Optical system design with common aperture for mid-infrared and laser composite guidance," Proc. SPIE 10256, Second International Conference on Photonics and Optical Engineering, 102560S doi: 10.1117/12.2256433

[23] K. T. Jacoby, M. W. Pieratt, J. I. Halman, K. A. Ramsey, (2009), "Predicted and measured EMI shielding effectiveness of a metallic mesh coating on a sapphire window over a broad frequency range" Proc. SPIE 7302, window and Dome Technologies and Materials XI, 73020X doi: 10.1117/12.818200

[24] M. Yu, N. Xu, H. Liu, and J. Gao, (2014), "Infrared transparent frequency selective surface based on metallic meshes" AIP Advances 4, 027112 https://doi.org/10.1063/1.4866292

[25] Z. Lu, J. Tan, J. Qi, Z. Fan, L. Zhang, (2011), "Modeling Fraunhofer diffractive characteristics for modulation transfer function analysis of tilted ring metallic mesh", Optics Communications 284 3855–3861, doi:10.1016/j.optcom.2011.04.040

[26] A. A. Dewani, S. G. O'Keefe, D. V. Thiel, and A. Galehdar, (2015), "Optically transparent frequency selective surfaces on flexible thin plastic substrates", AIP Advances 5, 027107 https://doi.org/10.1063/1.4907929

[27] Z. Lu, Y. Liu, H. Wang, Y. Zhang, and J. Tan, (2016), "Optically transparent frequency selective surface based on nested ring metallic mesh", Vol. 24, No. 23 OPTICS EXPRESS 26109

[28] Y.-J. Sun, H. Chang, S.-h. Wu, Y.-B. Leng & L. Wang, (2015) "Study on Electromagnetic Shielding of Infrared /Visible Optical Window", Modern Applied Science; Vol. 9, No. 13;, doi:10.5539/mas.v9n13p231

[29] A. Ünal, (2025), Numerical Fresnel models of Fresnel zone plates for plane wave at angle of incidence, Sci Rep 15, 9246 https://doi.org/10.1038/s41598-025-92965-y

[30] D. Atwood, (2000) Soft X-Rays and Extreme Ultraviolet, Cambridge University Press,

[31] H. Jeong, H. Shin, S. Zhang, X. Li and S. Cho (2019), "Application of Fresnel Zone Plate Focused Beam to Optimized Sensor Design for Pulse-Echo Harmonic Generation Measurements", Sensors 19, 1373; doi:10.3390/s19061373

[32] M. M. Greve, A. M. Vial, J. J. Stamnes, and B. Holst, (2013), "The Beynon Gabor zone plate: a new tool for de Broglie matter waves and hard X-rays? An off axis and focus intensity investigation," Opt. Express 21, 28483-28495

[33] H. Zhang, J. C. Li, D. W. Doerr, and D. R. Alexander, (2006), "Diffraction characteristics of a Fresnel zone plate illuminated by 10 fs laser pulses," Appl. Opt. 45, 8541-8546

[34] Y. Zhang, J. Chen, X. Yea, (2007), "Multilevel phase Fresnel zone plate lens as a near-field optical element", Elsevier, Optics Communications 269 271–273, DOI:10.1016/j.optcom.2006.08.006

[35] Y.-JuZhang, C.-W. Zheng, H.-C. Xiao, (2005), "Improving the resolution of a solid immersion lens optical system using a multiphase Fresnel zone plate", Elsevier Optics & Laser Technology 37 444–448, https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2004.07.011

[36] Z. Zhang, C. Guo, R. Wang, H. Hu, X. Zhou, T. Liu, D. Xue, X. Zhang, F. Zhang, and X. Zhang, (2017), "Hybrid-level Fresnel zone plate for diffraction efficiency enhancement," Opt. Express 25, 33676-33687, https://doi.org/10.1364/OE.25.033676

[37] L. N. Hazra, Y. Han, C.A. Delisle, Kinoform lenses: (1995), "Sweatt model and phase function", Optics Communications, Volume 117, Issues 1–2, Pages 31-36, https://doi.org/10.1016/0030-4018(95)00071-F

[38] L. Hazra and C. A. Delisle, (1997), "Higher order kinoform lenses: diffraction efficiency and aberrational properties," Optical Engineering 36(5), https://doi.org/10.1117/1.601375

[39] A. Ünal, (2024), "Analytical and numerical fresnel models of phase diffractive optical elements for imaging applications.", Opt Quant Electron 56, 960 https://doi.org/10.1007/s11082-024-06906-6

[40] M M. Howells, C. Jacobsen, T. Warwick, A. V. Bos, (2007) Principles and applications of zone plate x-ray microscopes, Springer Science+Business Media, LLC https://doi.org/10.1007/978-0-387-49762-4_13,

[41] W. A. Britton, Y. Chen, F. Sgrignuoli, L. D. Negro, (2021), "Compact Dual-Band Multi-Focal Diffractive Lenses", https://doi.org/10.1002/lpor.202000207

[42] J. W. Goodman, (1996), Introduction to Fourier Optics, Second Edition, McGraw-Hill Series

[43] R. E. Blahut, (2004), Theory of Remote Image Formation, Cambridge University Press

[44] T. W. N. Dickinson, (2016), "Simulation, Design, and Test of Square, Apodized Photon Sieves for High-Contrast, Exoplanet Imaging" Theses and Dissertations. https://scholar.afit.edu/etd/336

[45] J. D. Schmidt, (2010), "Numerical Simulation of Optical Wave Propagation With examples in MATLAB", SPIE Press

[46] G. Cheng, T. Xing, Z. Liao, Y. Yang, J. Ma, (2008), "Resolution enhancement of photon sieve based on apodization" Proc. SPIE 6832, Holography and Diffractive Optics III, 683229 doi: 10.1117/12.756787

[47] T. Liu, L. Wang, J. Zhang, Q. Fu, And X. Zhang (2018), "Numerical simulation and design of an apodized diffractive optical element composed of open-ring zones and pinholes", Vol. 57, No. 1 / Applied Optics, https://doi.org/10.1364/AO.57.000025

[48] A. Ünal, (2014), "Imaging infrared seeker design," M.S. Master of Science, Middle East Technical University, https://hdl.handle.net/11511/23647

[49] G. G. Artan and H. Sari, (2017) "Design of a cost-effective laser spot tracker", Proc. SPIE 10191, Laser Radar Technology and Applications XXII, 1019107 https://doi.org/10.1117/12.2262343

[50] D.-L. Kim, H.-B. Kong, and S.-T. Lee, (2021) "Effects of solar noise on the detection range performance of a laser spot tracker," Optical Engineering 60(3),

037102.
https://doi.org/10.1117/1.OE.60.3.037102
[51] Ünal, A. (2025). Common Aperture DSLR Camera Design Approach with Diffractive Lens. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım Ve Teknoloji1-1.
https://doi.org/10.29109/gujsc.1564503
[52] Hsiu-Hsin Chung, “Fabrication and Testing Of Dual-Wavelength Photon Sieves”, University Of Florida, University Of Florida, Doctorate Thesis, 2005
[53] Dickinson, Thomas W.N., "Simulation, Design, and Test of Square, Apodized Photon Sieves for High-Contrast, Exoplanet Imaging" (2016).Theses and Dissertations. 336.
https://scholar.afit.edu/etd/33

Gazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Dergisi
PART C: TASARIM VE TEKNOLOJİ

Gazi University
Journal of Science
PART C: DESIGN AND TECHNOLOGY

GU J Sci, Part C, 13(2): 641-652 (2025)

Aerodynamic analysis of wind turbine blades: A numerical study

İlker YILMAZ[1*] Ayşegül AVCI[1] Ekin AKÖZ ARSLANKAYA[1]

[1]Department *of Energy Systems Engineering, Faculty of Technology, Gazi University, Ankara 06560, Türkiye*

Article Info

Research article
Received: 10/04/2025
Revision: 12/05/2025
Accepted: 13/05/2025

Keywords

Wind turbine
Blade profile
Aerodynamics
Angle of attack
Performance

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 10/04/2025
Düzeltme: 12/05/2025
Kabul: 13/05/2025

Anahtar Kelimeler

Rüzgar Türbini
Kanat profili
Aerodinamik
Hucüm açısı
Performansu

Graphical/Tabular Abstract (Grafik Özet)

In this study, the aerodynamic performances of different wind turbine blades including FX 63-137, NACA 6415, NACA 63-415 have been numerically investigated. XFLR5 has been employed to analyze the wind turbine blade at Reynolds numbers ranging from 1.5x10^5 to 1x10^6 and low angles of attack. / Bu çalışmada, FX 63-137, NACA 6415, NACA 63-415 dahil olmak üzere farklı rüzgar türbini kanatlarının aerodinamik performansları sayısal olarak incelenmiştir. XFLR5, 1.5x105 ila 1x106 arasında değişen Reynolds sayılarında ve düşük hücum açılarında rüzgar türbini kanadını analiz etmek için kullanılmıştır.

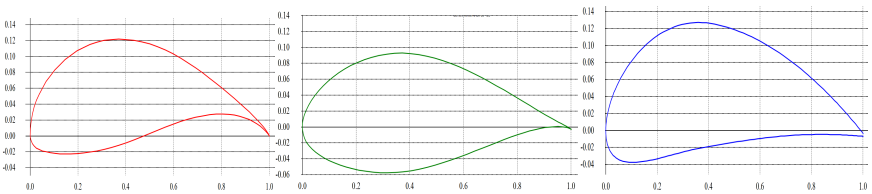


***Figure A**: Geometric views of the airfoils used in the study: a- FX 63-137, b- NACA 63-415, c- NACA 6415 / **Şekil A:** Çalışmada kullanılan kanat profillerinin geometrik görünümleri, a- FX 63-137 b- NACA 63-415, c- NACA 6415*

Highlights (Önemli noktalar)

- *The aerodynamic performance of wind turbine blades including FX 63-137, NACA 63-415, and NACA 6415 was carried out by using XFRL5 software at different Reynolds numbers and low angles of attacks. / FX 63-137, NACA 63-415 ve NACA 6415 içeren rüzgar türbini kanatlarının aerodinamik performansı, farklı Reynolds sayılarında ve düşük hücum açılarında XFRL5 yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.*
- *Aerodynamic performances of three different airfoils were compared with each other. / Üç farklı kanat profillinin aerodinamik performansları birbirleriyle karşılaştırıldı.*
- *The wing airfoil with the best aerodynamic performance was determined. / En iyi aerodinamik performansa sahip kanat profili belirlendi.*

***Aim (Amaç):** In this study, the best aerodynamic performance of three different wind airfoils was determined and compared with the studies in the literature. / Bu çalışmada, üç farklı rüzgar kanat profilinden en iyi aerodinamik performans gösteren profil belirlenmiş ve literatürdeki çalışmalarla karşılaştırılmıştır.*

***Originality (Özgünlük):** The originality of the study is that the airfoils used in wind power plants are analyzed in numerical analysis and real wind data for a specific region is used. / Çalışmanın özgünlüğü, sayısal analizlerde rüzgar santrallerinde kullanılan kanat profillerinin incelenmesi ve belirli bir bölgeye ait gerçek rüzgar verisinin kullanılmasıdır.*

***Results (Bulgular):** The best aerodynamic performance (the higher C_L/C_D ratio) was 109.14 with FX 63-137 blade profile at angle of attack 3 degree and 1x10^6 Re number. The maximum C_L/C_D ratio with the NACA 63-415 blade profile was 104.28 at 4 degree angle of attack, while that for the NACA6415 blade profile was is 102.11 at the 6 degree angle of attack and 1x10^6 Re number. / En iyi aerodinamik performans (daha yüksek CL/CD oranı) 3 derece hücum açısında ve 1x106 Re sayısında FX 63-137 kanat profili ile 109.14 olarak elde edilmiştir. NACA 63-415 kanat profili ile maksimum CL/CD oranı 4 derece hücum açısında 104.28 iken, NACA6415 kanat profili için bu oran 6 derece hücum açısında ve 1x106 Re sayısında 102.11'dir.*

***Conclusion (Sonuç):** The aerodynamic efficiency of wind turbine blades is largely influenced by the shape of the blades. XFRL5 has been shown to be a fast and reliable tool for determining the aerodynamic performance of wind turbine airfoils. / Rüzgar türbini kanatlarının aerodinamik verimliliği büyük ölçüde kanatların şeklinden etkilendiği belirlenmiştir. XFRL5 yazılımının rüzgar türbin kanat profillerinin aerodinamik performansını belirlemek için hızlı ve güvenilir bir araç olduğu görülmüştür.*

*Corresponding author, e-mail: ilkeryilmaz@gazi.edu.tr
DOI: 10.29109/gujsc.1672741

GU J Sci, Part C, 13(2): 641-652 (2025)

Gazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Dergisi
PART C: TASARIM VE TEKNOLOJİ

Gazi University
Journal of Science
PART C: DESIGN AND TECHNOLOGY

http://dergipark.gov.tr/gujsc

Aerodynamic analysis of wind turbine blades: A numerical study

İlker YILMAZ[1*] Ayşegül AVCI[1] Ekin AKÖZ ARSLANKAYA[1]

[1]Department *of Energy Systems Engineering, Faculty of Technology, Gazi University, Ankara 06560, Türkiye*

Article Info

Research article
Received: 10/04/2025
Revision: 12/05/2025
Accepted: 13/05/2025

Keywords

Wind turbine
Blade profile
Aerodynamics
Angle of attack
Performance

Abstract

In this study, the aerodynamic performances of different wind turbine blades including FX 63-137, NACA 6415, NACA 63-415 have been numerically investigated. XFLR5 has been employed to analyze the wind turbine blade at Reynolds numbers (Re) ranging from $1.5x10^5$ to $1x10^6$ and low angles of attack ($0^0 \leq \alpha \leq 20^0$). The lift ($C_L$), drag($C_D$), and pitch moment ($C_M$) coefficients, and C_L/C_D ratio of the wind turbine blades have been evaluated. Numerical lift coefficients obtained using XFLR5 and lift coefficients from the literature have beeen compared and it has been found that they have been compatible with each other. According to numerical analyzes, the highest C_L/C_D ratio, as called aerodynamic efficiency, was obtained as 109.14 with FX63-137 blade at Reynolds number (Re) of $1x10^6$, the lowest C_L/C_D ratio was obtained as 2.63 with NACA 63-415 blade. Also, the maximum C_L/C_D ratio with the NACA 63-415 blade profile was 104.28, while that for the NACA6415 blade profile was 102.11 at Re of $1x10^6$. The analysis results show that C_L/C_D ratio increases with the increase in the angle of attack up to the stall angle, and then begins to decrease in all studied blades.

Rüzgar Türbini Kanatlarının Aerodinamik Analizi: Sayısal Bir Çalışma

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 10/04/2025
Düzeltme: 12/05/2025
Kabul: 13/05/2025

Anahtar Kelimeler

Rüzgar Türbini
Kanat profili
Aerodinamik
Hucüm açısı
Performansu

Öz

Bu çalışmada, FX 63-137, NACA 6415, NACA 63-415 olmak üzere farklı rüzgar türbini kanatlarının aerodinamik performansı incelenmiştir. XFLR5, $1.5x10^5$ ile $1x10^6$ aralığındaki Re değerlerindeda ve düşük hücum açılarında ($0^0 \leq \alpha \leq 20^0$) rüzgâr türbini kanatlarının analizini yapmak için kullanılmıştır. Rüzgâr türbini kanatlarının taşıma kuvveti (C_L), sürükleme kuvveti (C_D) ve eğim momenti (C_M) katsayıları ve C_L/C_D oranı değerlendirilmiştir. XFLR5 kullanılarak elde edilen C_L ile literatürden elde edilen C_L değerleri karşılaştırılmış ve birbirleriyle uyumlu oldukları bulunmuştur. Sayısal analizlere göre, aerodinamik verimlilik olarak adlandırılan en yüksek C_L/C_D oranı, $1x10^6$ Re değeri için FX63-137 kanadında 109.14 olarak elde edilirken, en düşük kaldırma katsayısı-sürükleme katsayısı oranı 2.63 olarak NACA 63-415 kanadında elde edilmiştir. Ayrıca, NACA 63-415 kanat profili için maksimum C_L/C_D oranı 104.28 iken, NACA6415 kanat profili için bu oran 102.11 olmuştur. Analiz sonuçları, C_L/C_D oranının hücum açısının artmasıyla durma açısına kadar arttığını ve daha sonra incelenen tüm kanatlarda azalmaya başladığını göstermektedir.

1. INTRODUCTION (GİRİŞ)

Energy plays an important role in the economic, technological, and social development of modern societies. Especially electrical energy is indispensable in many areas, from healthcare to communication infrastructures, industry to transportation, as one of the basic elements of our daily life. The absence of electrical energy creates a situation that can profoundly affect not only individuals' daily lives but also global economic activities. Renewable energy sources offer an environmentally friendly alternative with almost zero carbon footprint compared to fossil fuels. Thanks to its geographical location and natural resources, Turkey has significant reserves in terms of renewable energy potential. As of March 2025, Turkey's total installed capacity has reached 118.185 MW, with wind energy contributing 13.236 MW of this capacity[1]. In line with the goals of reducing global warming, wind energy has been proposed as one of the main energy sources in international initiatives such as the Paris Climate Agreement prepared by the United Nations and the European Green Deal by the European Commission[2]. According to the sources, the forecasts of Türkiye's electrical energy production for the 2025-2035 period are given in Table 1[3]. When the table is examined, it is clearly seen that

*Corresponding author, e-mail: ilkeryilmaz@gazi.edu.tr
DOI: 10.29109/gujsc.1672741

10.10% of electricity production is obtained from wind energy for 2025 year and it is the fourth highest source. A wind turbine is a device that converts the kinetic energy in the wind into electrical energy[4]. The kinetic energy of the wind causes the rotor to spin when it strikes the blades of the turbine, thereby generating mechanical energy. To benefit most efficiently from the wind potential of the selected geography in wind turbines, the aerodynamic design of the blades is one of the most critical factors. Also, the wind turbine blade's angle of attack is one of the most important design parameters for industrial wind turbines. Blade efficiency is directly related to the blade profile used. The aerodynamic performance of blade profiles is evaluated based on C_L, C_D, and C_L/C_D ratio. Additionally, as of the end of March 2025, the number of electricity generation plants in Turkiye has reached 35,160 (including unlicenced plants). The distribution of power plants by resources is as follows: 768 hydraulic, 72 coal, 376 wind, 66 geothermal, 333 natural gas, 33,086 solar and 459 other power plants.

When the relevant literature is examined, it is seen that much numerical and experimental research was conducted to determine the aerodynamic performance of airfoils. These are briefly given below. Guleren and Demir[5] carried out numerical analysis on six blade profiles with different geometries at high Reynolds numbers and low angles of attack ($0° \leq \alpha \leq 20°$). Among the examined blade profiles, considering the CL–α and CL/CD–α variation, it was found that the CLARK-Y blade profile had the best performance. Evran and Yildir[6] evaluated the lift and drag coefficient performance of NACA 0009 and NACA 4415 profiles under constant wind speed and various angles of attack using Ansys. As a result of this study, the NACA 4415 blade profile exhibited maximum lift and minimum drag coefficients compared to the NACA 0009 blade profile. It was observed that the increase in the angle of attack raised the lift and drag coefficients for both blade profiles. İnan and Kaplan[7] investigated the effect of lower surface geometry of the NACA 63-415 blade profile on the aerodynamic performance using Ansys. In the study, new blade profiles were obtained by reducing the dimensions of the lower surface by 10%, 20%, and 30%. Akın et al.[8] numerically examined the effect of the spar structure on aerodynamic performance in the NACA 2412 of wind turbine blad. The blade profiles were modeled using the Rhinoceros, and flow analysis was conducted with Ansys. They concluded the spar structure did not have a positive effect on aerodynamic performance at high angles of attack. Düz and Yıldız[9] have numerically investigated the performance of five wind blades at different angles of attack and different wind speeds. Guzelbey et al. [10] analyzed the aerodynamic performance of sailplanes with the help of XFLR5 under the same validated conditions for nine different airfoils. They found that the airfoils were equally to be the most efficient airfoils. Şahin and Acır [18] conducted numerical and experimental studies on NACA 0015 airfoil. They reported that the maximum efficiency was obtained at 80° angle of attack. They also observed that the numerical and experimental results are compatible with each other. Selig and Granahan [19] investigated the performance of different wind turbine airfoils including E387, S822, SD2030, FX63-137, S834 and SH3055 in a wind tunnel. Alaskari et al. [20] studied on the SG6043 airfoil used in wind turbines. They concluded that the maximum aerodynamic performance was observed at 2 degree angle of attack. Koç et al.[21] investigated the lift coefficient and lift-drag ratio of the SG6043 airfoil by using QBlade and Ansys at different angles of attack. They determined that the maximum C_L/C_D ratio was 1.22 and the angle of attack with maximum performance was 4.50 degree for the SG6043 airfoil. Parezanovic et al.[22] calculated the transport and drag coefficients using CFD and Xfoil to optimize three different wind turbine blades. They compared their numerical results with experimental results and found them to be in good agreement.

Condesidering the above literature survey, it is seen that there is much research on the aerodynamic performance of different wind turbine blades. To the best of the authors' knowledge, comparison of the aerodynamic performance of wind turbine airfoils including FX 63-137, NACA 63-415, and NACA 6415 using real wind measurement data has not been yet investigated at different Re numbers and low angles of attack for Bandırma, Turkiye. In this study, the aerodynamic performance of new types of wind turbine blades is examined using actual wind data of a certain region.

Table 1. Turkiye's electricity production forecast from different sources [3] (Türkiye'nin farklı kaynak elektrik üretim tahmini [3])

	Year		
Source	**2025 [TWh]**	**2030**	**2035**
Thermal	196.4	201.2	173.7
Nuclear	18.6	37.2	55.8
Hydroelectric	81.9	87.9	87.9
Wind	38.3	53.7	90.1
Solar	28.3	52.2	84.0
Other	16.7	20.5	16.2
Total	380.2	452.7	507.7

2. ANALYSIS OF WIND TURBINE BLADES USING XFRL5 (XFRL5 KULLANILARAK RÜZGÂR TÜRBİN KANATLARININ ANALİZİ)

Aerodynamic performance analysis of blades used in wind turbines can be performed by various methods. These include experimental methods such as wind tunnel tests, theoretical and empirical methods, techniques such as computational fluid dynamics (CFD) and regional momentum theory (BEM). In the present study, the aerodynamic performance analysis of wind turbine blades was performed by a method based on potential flow theory. XFLR5, which is widely preferred for aerodynamic calculations and design, was used in the analyses[11]. XFLR5 is an open source potential flow solver enhanced with various features and interfaces added to the XFOIL code developed by Mark Drela [13]. In this study, the aerodynamic performance parameters such as lift coefficient (C_L), drag coefficient (C_D), moment coefficient (C_M) and aerodynamic efficiency ratio (C_L/C_D) were investigated in detail. According to the obtained data, the performances of the blade profiles commonly used in wind turbines were evaluated comparatively. For the selection of the region, the wind potential in Bandırma, Türkiye was evaluated and it was decided to carry out the study in the Bandırma region. The average wind speed measured at 80 m height in the Bandırma region was determined as 7.6 m/s [13]. As a result of the literature review, analyses were performed on three different wing turbine blades including NACA 63-415, NACA 6415 and FX 63-137, which were determined to have high aerodynamic performance. While the NACA series offers classical designs optimized for laminar flow, the FX 63-137 is a modern and efficient blade. All three blades selected in the study are widely used in today's wind turbines.

Reynolds number is defined by the ratio of inertial forces to that of viscous forces as stated in equation (1). This dimensionless number is used to determine the type of flow pattern as laminar or turbulent.

Re number for airfoil is defined as

$$\mathrm{Re} = \frac{\rho V c}{\mu} \tag{1}$$

where ρ is the fluid density, V is the flow velocity, c is the cord length of airfoil, and μ is dynamic viscosity of the fluid.

The lift and drag forces acting on the wind turbine blade and pitching moment are given below:

$$\mathrm{L} = \frac{1}{2}\mathrm{C_L}\rho\mathrm{AV}^2 \tag{2}$$

$$\mathrm{D} = \frac{1}{2}\mathrm{C_D}\rho\mathrm{AV}^2 \tag{3}$$

$$\mathrm{M} = \frac{1}{2}C_{\mathrm{m}}\rho\mathrm{cAV}^2 \tag{4}$$

where L is the lift force, D is the drag force, M is the pitching moment, ρ is the fluid density, A is the reference area, V is the velocity, c is the chord-length and C_L, C_D, and C_{m} are the lift, drag, and pitching moment coefficients, respectively. The geometric properties of the airfoils selected for the study are given in Table 2.

In the present study, three different non-symmetrical airfoil geometries were taken from Ref [14]. These geometries are given in Figure 1a-c.

Table 2. Geometric properties of the blades used in study[14] (Çalışmada kullanılan kanatların geometrik özellikleri[14])

Blade profile	M (Serial Number)	P (distance from minimum pressure zone)	t (thickness)
FX63-137	63	30%	13.5%
NACA 63-415	6	30%	15%
NACA 6415	6	40%	15%

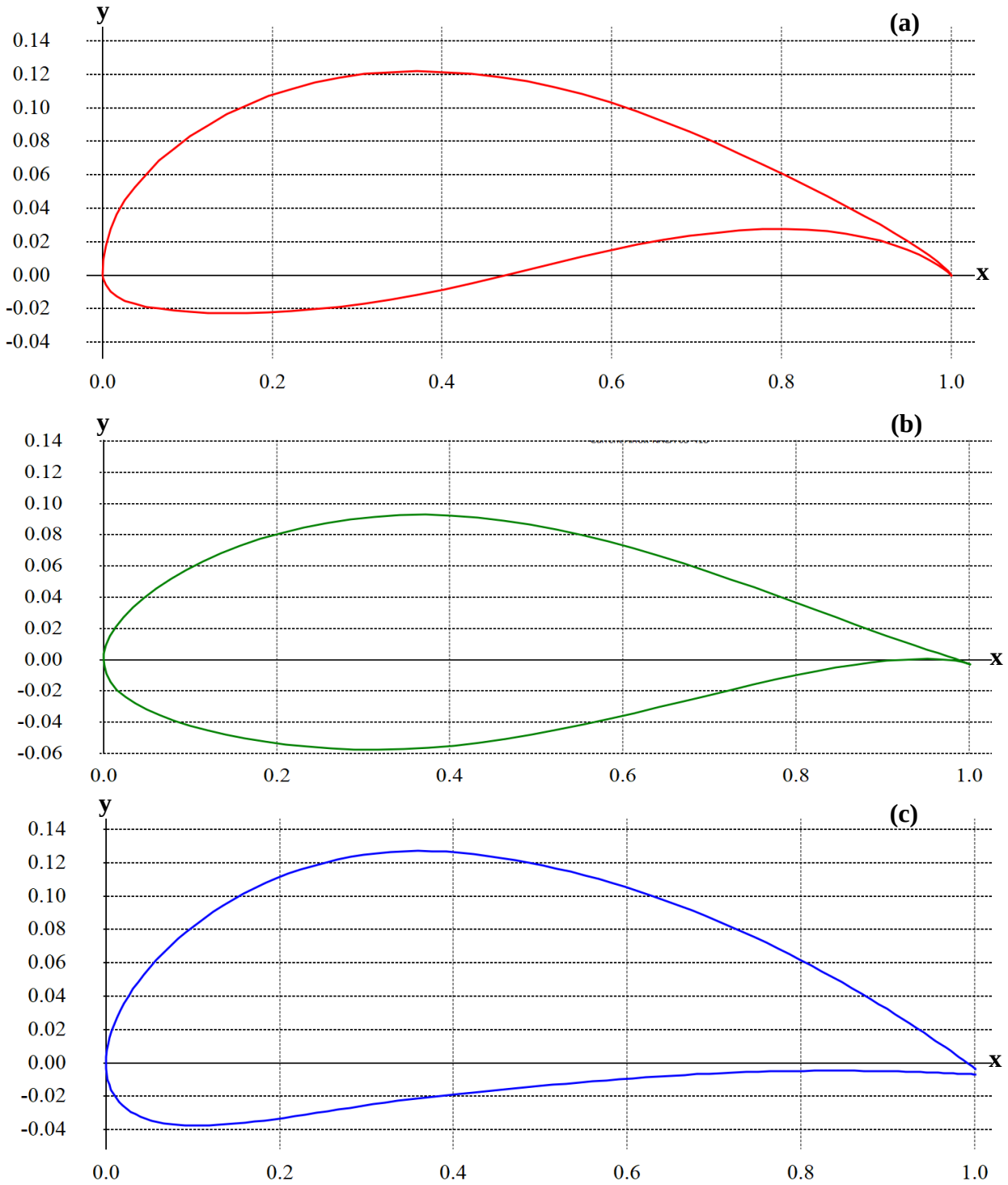


Figure 1. Geometric views of the airfoils used in the study: a- FX 63-137, b- NACA 63-415, c- NACA 6415 (Çalışmada kullanılan kanat profillerinin geometrik görünümleri, a- FX 63-137 b- NACA 63-415, c- NACA 6415)

From literature research, it was determined that Bandirma, Türkiye was suitable for this study. High wind potentials were discovered in different regions in Balıkesir, Türkiye. However, the wind data to be used in this study will be taken from the Bandırma, Türkiye. The wind properties for Bandirma region at 80 m are given in Table 3.

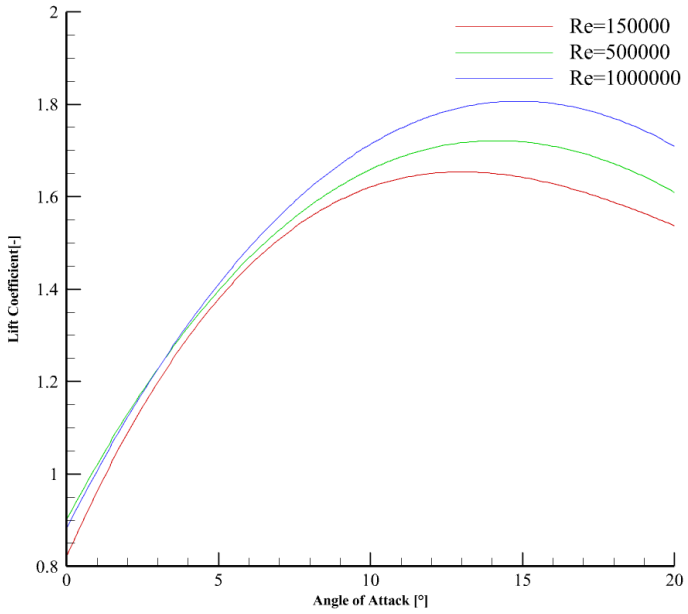
The numerical analyses were performed by comparing the aerodynamic performances of these wind turbine blades defined in the XFLR5. In the analyses, the performances of the blade profiles for the ranges of changes in angles of attack from 0 to 20 degrees and using three different Re numbers including 1×10^5, 5×10^5, and 1×10^6 were examined.

Table 3. Wind speeds (m/s) at 50m and 80m altitude for Bandırma, Türkiye [9] (Türkiye /Bandırma 50 m ve 80 m irtifadeki rüzgar hızları[9] (m/s))

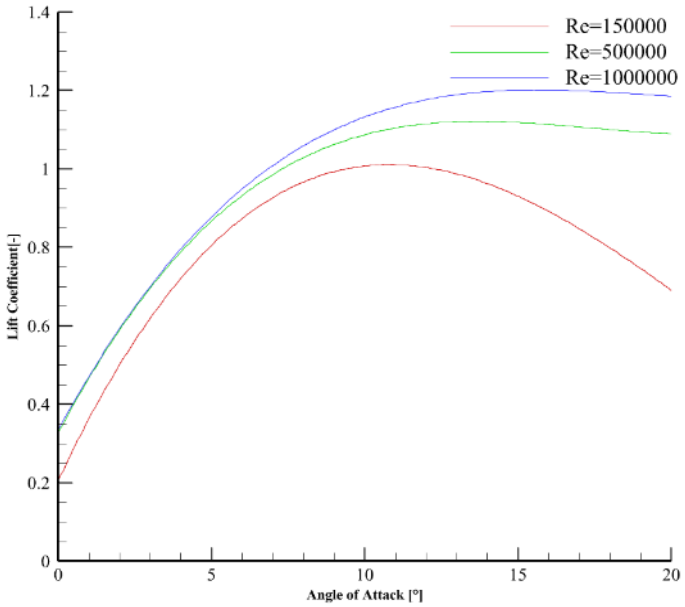
Altitude [m]	Highest wind speed [m/s]	Lowest wind speed [m/s]	Average wind speed [m/s]
50	8.19	5.32	6.61
80	9.89	6.17	7.6

3. RESULTS AND DISCUSSION (SONUÇLAR VE TARTIŞMA)

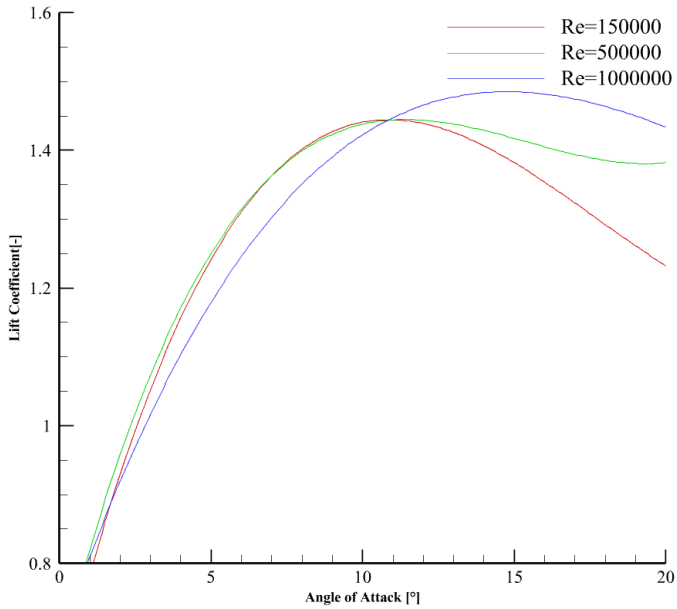
In this study, aerodynamics performance of three different wind blade profiles including FX 63-137, NACA 6415 and NACA 63-415 was comparatively analyzed using XFLR5 at a speed of 7.6 m/s and angles of attack between 0° and 20°. Within the scope of the analyses, lift coefficient (C_L), drag coefficient (C_D), lift coefficient/drag coefficient ratio (C_L/C_D) and pitching moment coefficient (C_m) values of each blade airfoil were investigated at different angles of attack ($0^0 \leq \alpha \leq 20^0$) and different Re numbers. These parameters were compared with each other in detail. Lift coefficients of the blade profiles vs angles of attack of airfoils are given in Figure 2a-c. As seen from this figure, all three airfoils exhibited stall behavior in the range of approximately 16-17 degree angle of attack. This situation reveals that the examined airfoils exhibit similar properties in terms of stall characteristic. The FX 63-137 profile stands out as the profile with the highest lift coefficient among the three airfoils studied, reaching a C_L of 1.80 just before the stall point in the attack angle range between 0° and 20°. NACA 6415 and NACA 63-415 profiles exhibit a similar trend and lower lift coefficient. At all blade profiles, lift coefficient increases with increasing of Re number and increase with the increasing of the angle of attack up to the stall angle, and then begins to decrease. This phenomenon is known as stall in flows over airfoils and at sufficiently large angles of attack the boundary layer is no longer adhering to the surface and separates from it.



(a)



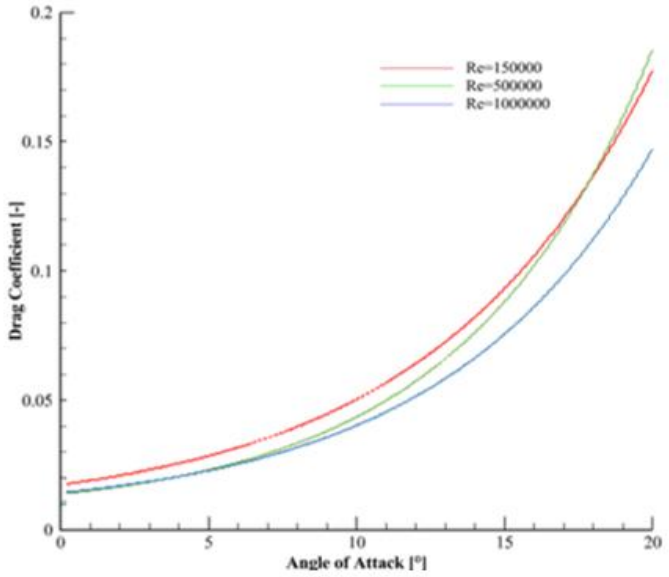
(b)



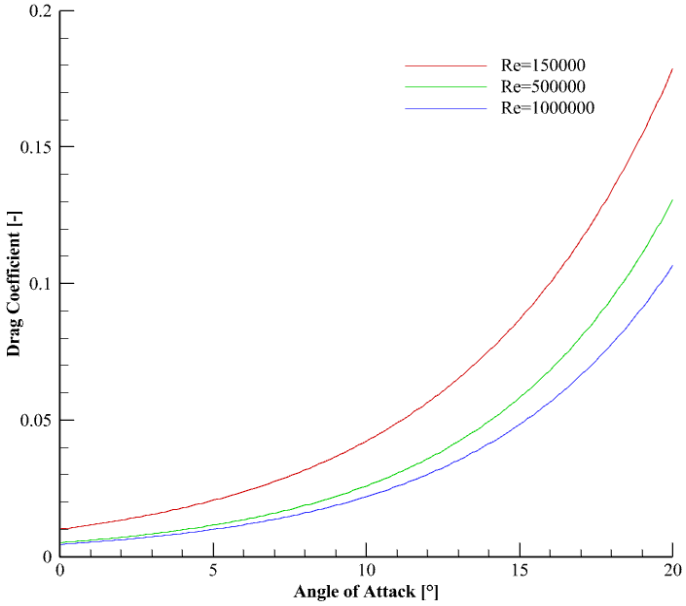
(c)

Figure 2. Change of the lift coefficient (C_L) of the blade profile with the angle of attack at different Re numbers: a- FX 63-137, b- NACA 63-415, c- NACA 6415 (Kanat profilinin taşıma katsayısının (C_L) farklı Re sayılarında hücum açısı ile değişimi: a- FX 63-137, b- NACA 63-415, c- NACA)

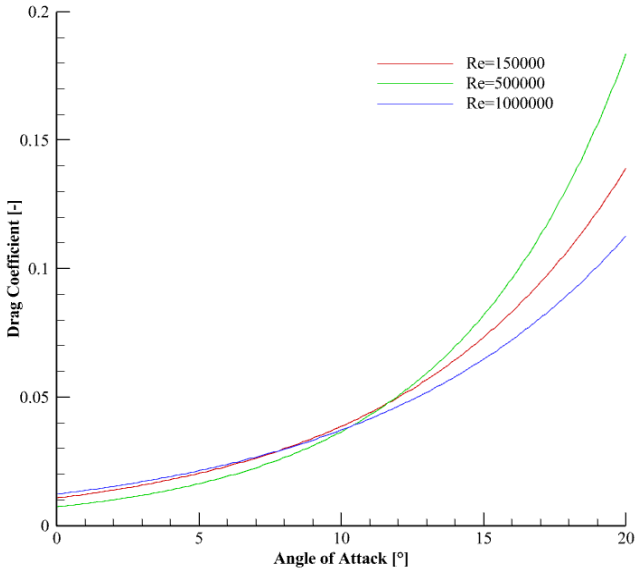
Variation of drag coefficient, C_D, with angle of attack is depicted in Figure 3a-c at different Re numbers. As it can be clearly seen in Figure 3a-c, CD increases with increasing of the angle of attack and decreases by increasing the Reynolds number. In order to obtain a blade profile with high aerodynamic efficiency, it is desired that the drag coefficient is minimum and the lift coefficient is maximum. It is clearly seen from Figure 3 that for all airfoils, the drag coefficient increases very little at low angles of attack (up to 5 degree), while the drag coefficient increases exponantially at higher angles of attack (above 5 degrees). As is well known, the scientific basis behind this phenomenon is the generation of drag forces due to viscous effects at low angles of attack. However, boundary layer separation occurs at higher angles of attack, and form drag (known as pressure drag) effects begin to appear as the dominant mechanism.


Re=150000
Re=500000
Re=1000000
Drag Coefficient [-]
Angle of Attack [°]
0
0.05
0.1
0.15
0.2
0
5
10
15
20

(a)


Re=150000
Re=500000
Re=1000000
Drag Coefficient [-]
Angle of Attack [°]
0
0.05
0.1
0.15
0.2
0
5
10
15
20

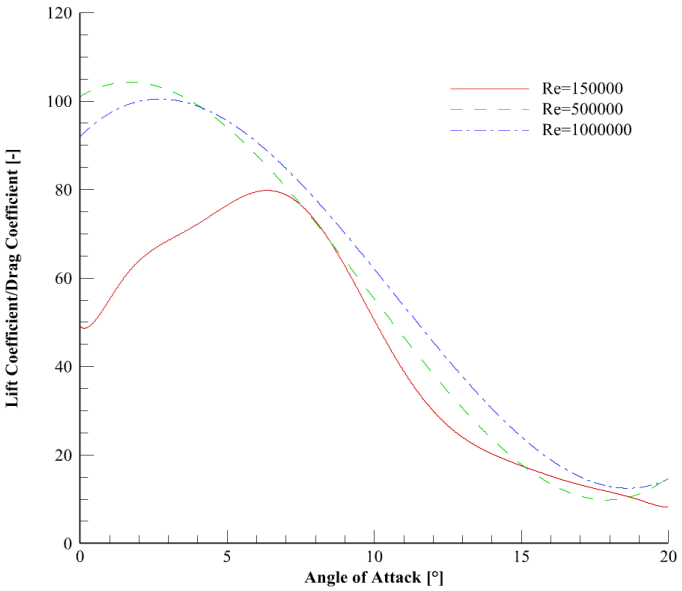
(b)



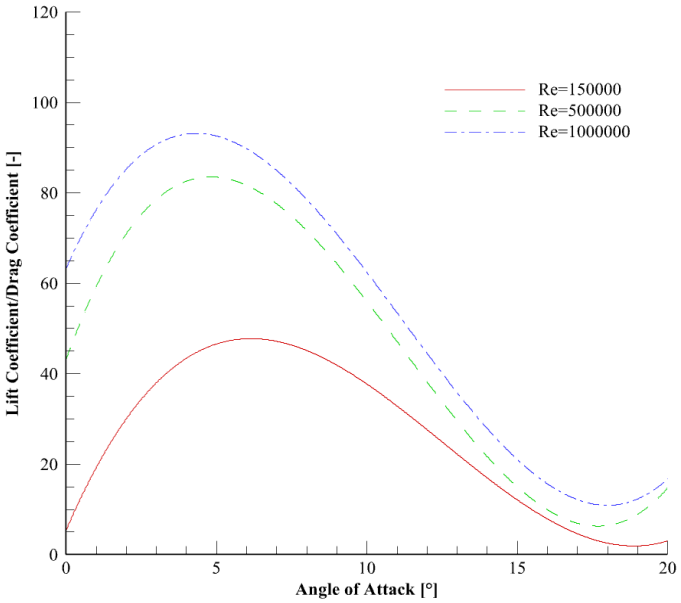
(c)

Figure 3. Change of the drag coefficient (C_D) of the blade profile with the angle of attack at different Re numbers: a- FX 63-137, b- NACA 63-415, c- NACA 6415 (Kanat profilinin sürükleme katsayısının (C_D) farklı Re sayılarında hücum açısı ile değişimi: a- FX 63-137, b- NACA 63-415, c- NACA)

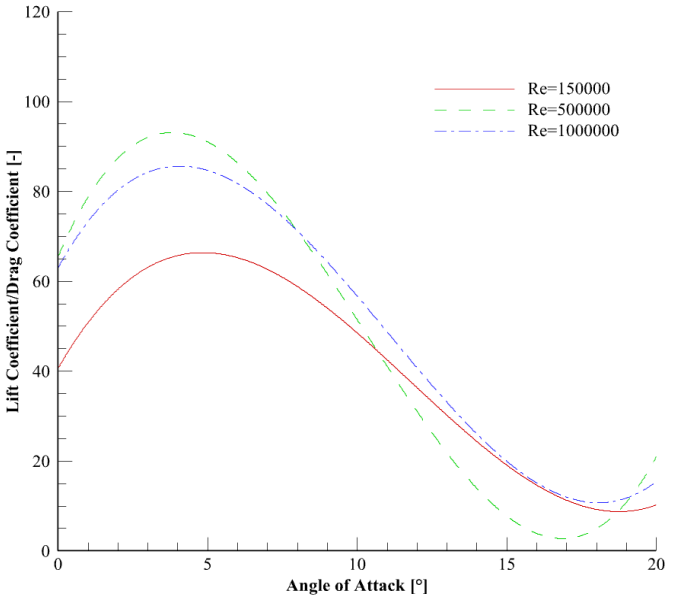
In order to the all airfoils used, figure 4 shows the relationship between lift coefficient / drag coefficient ratio, (C_L/C_D), and angle of attack for different Re numbers. As is well known, the maximum C_L/C_D ratio is required to gain the highest power from the wind turbines. Therefore, the aerodynamic performance and efficiency of the wind blade airfoil with the highest C_L/C_D ratio will also be high. In the study, the highest C_L/C_D ratio was obtained as 109.14 with FX63-137 blade profile at 3 degree angle of attack and Re number of $1x10^6$. For NACA 63-415 and NACA 6415 blade profiles, the maximum C_L/C_D ratio is as 104.28 with NACA 63-415 blade profile at 4 degree angle of attack for Re number of $1x10^6$, and is as 102.11 with NACA 6415 blade profile at 6 degree angle of attack for Re number of $1x10^6$, respectively.



(a)



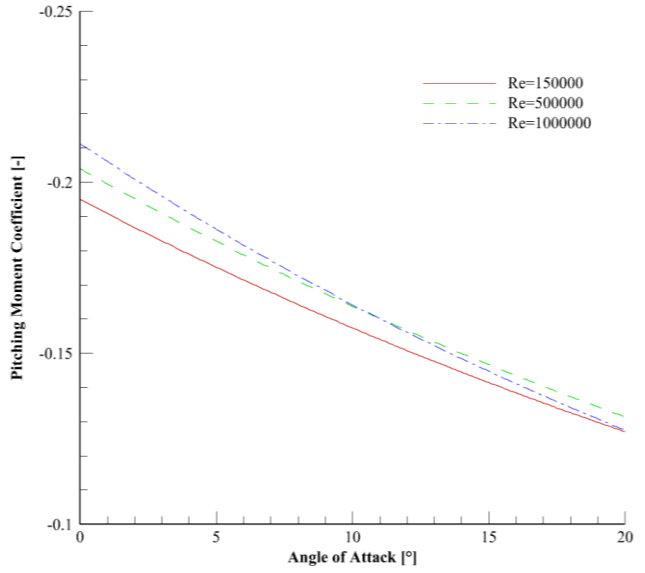
(b)



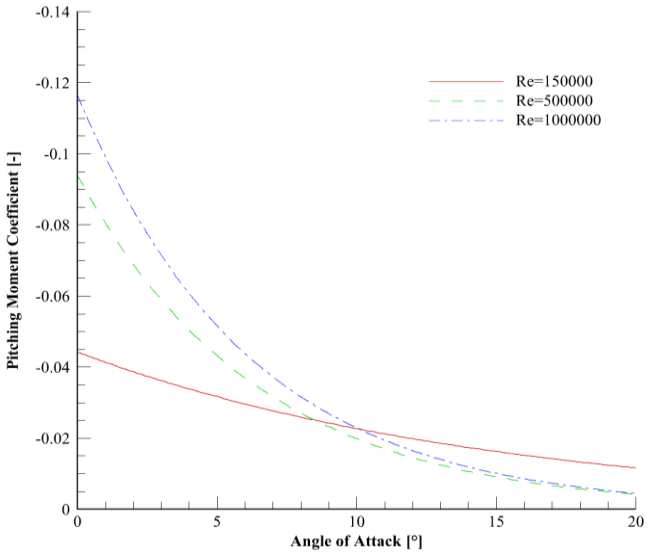
(c)

Figure 4. Change of the lift coefficient /drag coefficient ratio (C_L/C_D) of the blade profiles with the angle of attack at different Re numbers: a- FX 63-137, b- NACA 63-415, c- NACA 6415 (Kanat profilinin taşıma katsayısı/sürüklenme katsayısı oranının (C_L/C_D) farklı Re sayılarında hücum açısı ile değişimi: a- FX 63-137, b- NACA 63-415, c- NACA)

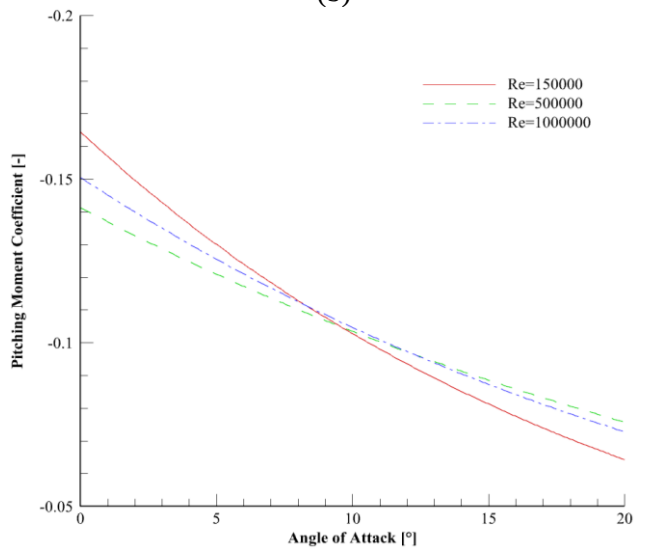
For three different blade profiles, the variation of the pitching moment coefficient with angle of attack at diferent Re numbers is shown in Figure 5. As can be clearly seen from the figure, each of the blade profiles has negative C_M values, that all blade means to be stable.



(a)



(b)



(c)

Figure 5. Change of the pitching moment coefficient (C_M) of the blade profile with the angle of attack at different Re numbers: a- FX 63-137, b- NACA 63-415, c- NACA 6415 (Kanat profilinin farklı Re sayılarında hücum açısı ile yunuslama moment katsayısının (C_M) değişimi)

Comparisons were made with similar studies on the aerodynamic performance of the same airfoils in the current literature. Table 4 shows the comparison of lift coefficient from numerical analysis with published data in the literature. Considering values given in Table 4, it is seen that the present study values are very close to published data for NACA63-415 airfoil. The lift coefficients of present study show close agreement with the published results of Ref[7]. At the same time, it can be seen that the numerical results follow the trend of the results of Lei and Zha[15] for NACA 6415 airfoil. For FX 63-137 airfoil, the current simulation results closely match with the study conducted in Ref [16] at all angles of attack. At studied airfoils, numerical results from XFLR5 also follow the same trend. Comparisons between numerical results and published data were made at Reynolds values close to each other.

Table 4. Comparison of lift coefficient with published data (Taşıma katsayısının yayınlanan verilerle karşılaştırılması)

Airfoil Profile	Angle of Attack (°)	Lift Coefficient			
		Present XFRL5	Ref [7]	Ref [15]	Ref [16]
NACA63-415	0	0.338	0.3		
	5	0.889	0.8		
	10	1.147	1.22		
NACA 6415	5	1.190		1.18	
	10	1.522		1.52	
	15	1.329		1.70	
FX 63-137	0	0.852			0.803
	5	1.3			1.328
	10	1.649			1.753

4. CONCLUSION (SONUÇ)

The study presents the aerodynamic performance of wind turbine blades including FX 63-137, NACA 63-415, and NACA 6415 at Reynolds numbers ranging from $1.5x10^5$ to $1x10^6$ and low angles of attack ($0^0 \leq \alpha \leq 20^0$). The best aerodynamic performance (the higher C_L/C_D ratio) was 109.14 with FX 63-137 blade profile at angle of attack 3 degree and $1x10^6$ Re number. The maximum C_L/C_D ratio with the NACA 63-415 blade profile was 104.28 at 4 degree angle of attack, while that for the NACA6415 blade profile was is 102.11 at the 6 degree angle of attack and $1x10^6$ Re number. According to the findings of this study, it found that FX 63-137 blade profile exhibited better aerodynamic performance than NACA 63-415 and NACA 6415. The numerical results show that the Reynolds number affects the lift, drag, and pitching moment coefficients, C_L/C_D at all angles of attack. As a result, the numerical results obtained in this study are in good agreement with the previously published studies.

In future studies, since the aerodynamic efficiency of wind turbines is largely affected by the shape of their airfoils, investigating different airfoils will enable the use of efficient airfoil geometries. With high performance wind turbine airfoils, it will be possible to obtain more energy and increase the share of renewable energy in electricity generation.

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)

***İlker YILMAZ*:** Writing – review & editing, Writing – original draft, Supervision, Conceptualization, Methodology, Literature survey.

Yazım - inceleme ve düzenleme, Yazım - orijinal taslak, Denetim, Kavramsallaştırma, Metodoloji Literatür araştırması.

Ayşegül AVCI: Numerical analyses, Literature survey.

Sayısal analizler, literatür araştırması.

Ekin AKÖZ ARSLANKAYA: Numerical analyses, Literature survey.

Sayısal analizler, literatür araştırması.

CONFLICT OF INTEREST (ÇIKAR ÇATIŞMASI)

There is no conflict of interest in this study.

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

REFERENCES (KAYNAKLAR)

[1] Ministry of Energy and Natural Resources, Info bank, (https://enerji.gov.tr/infobank-energy-electricity), (Access: 05/05/2025).

[2] International Energy Agency, World Energy Outlook, 2004.

[3] Ministry of Energy and Natural Resources, Turkiye National Energy Plan, 2022.

[4] A.H. Rahman, M.S. Majid, A.R. Jordehi, C.K. Ganc, M.Y. Hassan, S.O. Fadhl, Operation and control strategies of integrated distributed energy resources: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 51 (2015) 1412-1420.

[5] K.M. Güleren, S. Demir, Performance analysis of different airfoils at low angles of attack for wind turbines. Journal of Thermal Science and Technology, 31:2 (2011) 51-59.

[6] S. Evran, S.Z. Yıldır, Numerical and statistical aerodynamics performance analysis of NACA0009 and NACA4415 airfoils. Journal of Polytechnic, 27:3 (2024) 849-856.

[7] H. İnan, M. Kaplan, Numerical analysis of the aerodynamic performance of the NACA 63-415 airfoil with modified sub-surface. European Journal of Science and Technology, 34 (2022) 121-125.

[8] A.G. Akın, H.E. Tanürün, A. Acır, Numerical investigation of rib structure effects on performance of wind turbines. Journal of Polytechnic, 24:3 (2021) 1219-1226.

[9] H, Düz, S. Yıldız, Numerical performance analyses of different airfoils for use in wind turbines, International Journal of Renewable Energy Development, 7:2 (2018) 151-157.

[10] İ.H. Güzelbey, Y. Eraslan, M.H. Doğru, Numerical investigation of different airfoils at low reynolds number in terms of aerodynamic performance of sailplanes by using XFLR5. The Black Sea Journal of Sciences, 8:1 (2018) 47-65.

[11] A. Deperrois, XFLR5 Software, Open-source airfoil and wing analysis tool, 2023.

[12] M. Drela, XFOIL – an analysis and design system for low Reynolds number airfoils, in: T.J. Mueller (Ed.), Low Reynolds Number Aerodynamics, Springer Verlag, Berlin, 1989.

[13] S.S. Yıldız, Preparation of wind speed maps of Balıkesir province and examination in terms of wind energy potential. Geomatics Journal, 6:3 (2021) 198-206.

[14] D. Marten, J. Wendler, Qblade guidelines, Technical University of (TU Berlin), Berlin, Germany, (2013).

[15] Z. Lei, G. Zha, Numerical simulation of discrete co-flow jets NACA-6415 airfoil in varied flow conditions. AIAA SciTech Forum, National Harbor, 2023.

[16] H. Düz, Numerical testing of the airfoil profiles for the wind turbines. Journal of Engineering and Science, 4:2 (2016) 41-51.

[17] H.Y. Xu, C.L. Qiao, Z.Y. Ye, Dynamic stall control on the wind turbine airfoil via a co-flow jet. Energies,9 (2016) 1-25.

[18] İ. Şahin, A. Acır, Numerical and experimental investigations of lift and drag performances of NACA 0015 wind turbine airfoil. International Journal of Materials, Mechanics and Manufacturing, 3(1) (2015) 22-25.

[19] M.S. Selig, B.D. Granahan, Wind tunnel aerodynamic tests of six airfoils for use on small wind turbines. National Renewable Energy Laboratory, Period of Performance, Tehnical Report, 2002.

[20] M. Alaskari, O. Abdullah, M.H. Majeed, Analysis of wind turbine using QBlade software. In IOP Conference series: Materials Science and Engineering, 518 (2018) .

[21] E. Koç, O, Günel, T. Yavuz, Mini-scaled horizontal axis wind turbine analysis by Qblade and Cfd. International Journal of Energy Applications and Technologies, 3:2 (2016) 87-92.

[22] V. Parezanovic, B. Rasuo, M. Adzic, Design of Airfoils for Wind Turbine Blades, The French-Serbian European Summer University: Renewable Energy Sources and Environment- Multidisciplinary Aspect, 17-24 October 2006,

Gazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Dergisi
PART C: TASARIM VE TEKNOLOJİ

Gazi University
Journal of Science
PART C: DESIGN AND TECHNOLOGY

GU J Sci, Part C, 13(2): 653-664 (2025)

Dynamic Voting-Based Ensemble Deep Learning for Closely Resembling Crop Classification

Engin EŞME[1*] Muhammed Arif ŞEN[1] Halil ÇİMEN[1]

[1]*Konya Technical University, Artificial Intelligence Application and Research Center, Konya, Turkey*

Article Info

Research article
Received: 04/02/2025
Revision: 11/03/2025
Accepted: 17/06/2025

Keywords

Deep Learning
Dynamic Voting
Crop Classification
Smart Agriculture
Technologies

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 04/02/2025
Düzeltme: 11/03/2025
Kabul: 17/06/2025

Anahtar Kelimeler

Derin Öğrenme
Dinamik Oylama
Mahsul Sınıflandırma
Akıllı Tarım Teknolojileri

Graphical/Tabular Abstract (Grafik Özet)

To classify closely resembling agricultural crops, this study uses a dynamic voting approach. A meta-dataset, created from 17 model predictions, is trained with a CNN to select the most suitable models for each instance, enhancing accuracy and stability. / Bu çalışma, birbirine çok benzeyen tarımsal mahsulleri sınıflandırmak için dinamik bir oylama yaklaşımı kullanmaktadır. 17 modelin tahminlerinden oluşturulan bir meta-veri seti, her bir örnek için en uygun modelleri seçmek üzere bir CNN ile eğitilerek doğruluk ve kararlılık artırılır.

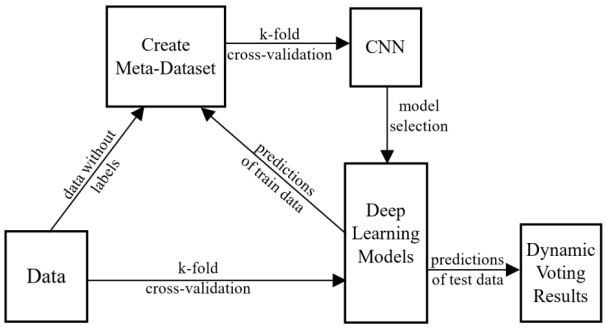


***Figure A**: Dynamic voting approach / **Şekil A:** Dinamik Oylama Yaklaşımı*

Highlights (Önemli noktalar)

- *This study addresses the problem of classifying closely resembling agricultural crops, which is a challenging task. / Bu çalışma birbirine çok benzeyen ve bu nedenle sınıflandırılması zor olan tarımsal mahsul türlerini ayırt etme problemini ele alır.*
- *The study presents a dynamic ensemble approach that intelligently selects the most expert models from among 17 candidates for each image to participate in the vote. / Çalışma, her görüntü için 17 model arasından en yetkin olanları akıllıca seçip oylamaya dahil eden dinamik bir topluluk yaklaşımı sunar.*
- *Dynamic voting addresses weaknesses in individual models, such as overfitting and performance inconsistency, to create a more robust, and stable, reliable classification system. / Dinamik oylama tekil modellerdeki aşırı öğrenme ve tutarsızlık gibi zayıflıkları gidererek daha sağlam, kararlı ve güvenilir bir sınıflandırma sistemi oluşturur.*

***Aim (Amaç):** This research aims to make a significant contribution to the automatic recognition and classification of closely resembling agricultural crops by providing a theoretical foundation for the development of smart farming technologies. / Bu araştırma, akıllı tarım teknolojilerinin geliştirilmesi için teorik bir temel oluşturarak benzer görünümlü tarımsal ürünlerin otomatik olarak tanınmasına ve sınıflandırılmasına önemli bir katkı sağlamayı hedeflemektedir.*

***Originality (Özgünlük):** The developed dynamic voting mechanism differs from fixed voting systems by selecting the most competent models for each test instance, thereby increasing classification accuracy and stability. / Geliştirilen dinamik oylama mekanizması, her bir test örneği için en yetkin modelleri seçerek sabit oylama sistemlerinden ayrışır ve bu yolla sınıflandırma doğruluğunu ve sistemin kararlılığını artırır.*

***Results (Bulgular):** The proposed ensemble model achieved the best results across all performance metrics with 100% sensitivity and 99.7% specificity, minimizing the false positive rate and ensuring no positive instances were missed. / Önerilen topluluk modeli, %100 hassasiyet ve %99,7 özgüllük değerleriyle, yanlış pozitif oranını en aza indirip hiçbir pozitif örneği kaçırmayarak tüm performans metriklerinde en üstün sonucu elde etmiştir.*

***Conclusion (Sonuç):** The proposed ensemble learning method addresses the weaknesses of individual models to provide a more robust classification system, preparing a practical foundation for the development of smart farming technologies. / Önerilen topluluk öğrenmesi yöntemi, bireysel modellerin zayıflıklarını gidererek daha sağlam bir sınıflandırma sistemi sunar ve akıllı tarım teknolojilerinin geliştirilmesi için pratik bir zemin hazırlar.*

*Corresponding author, e-mail: eesme@ktun.edu.tr
DOI: 10.29109/gujsc.1632938

GU J Sci, Part C, 13(2): 653-664 (2025)

Gazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Dergisi
PART C: TASARIM VE TEKNOLOJİ

Gazi University
Journal of Science
PART C: DESIGN AND TECHNOLOGY

http://dergipark.gov.tr/gujsc

Dynamic Voting-Based Ensemble Deep Learning for Closely Resembling Crop Classification

Engin EŞME[1*] Muhammed Arif ŞEN[1] Halil ÇİMEN[1]

[1]*Konya Technical University, Artificial Intelligence Application and Research Center, Konya, Turkey*

Article Info

Research article
Received: 04/02/2025
Revision: 11/03/2025
Accepted: 17/06/2025

Keywords

Deep Learning
Dynamic Voting
Crop Classification
Smart Agriculture
Technologies

Abstract

Deep learning-based approaches in developing autonomous machines that can perform smart agricultural applications such as spraying, irrigation, and harvesting per product exhibit successful applications, especially in tasks such as image classification and data analysis. Accurate identification of plant species and differentiation from weeds are crucial for increasing efficiency and ensuring sustainability in agricultural production. Classifying agricultural crops with similar appearances remains a challenging problem with existing methods. This research represents a significant step toward the automatic recognition and classification of closely resembling agricultural crops while providing a theoretical and practical foundation for the development of smart farming technologies. This study focuses on classifying agricultural crop images, which often bear close resemblance, employing 17 distinct deep learning models and dynamic voting. The dataset consists of 804 images representing five closely resembling crop types: jute, maize, rice, sugarcane, and wheat. To ensure robustness, 10-fold cross-validation is employed, and experiments are conducted consistently across all models using the same sample sets. The results report the models' classification performance on closely resembling agricultural crop images in terms of accuracy, training time, and disk space. According to the experimental findings, ShuffleNet achieved the highest individual accuracy of 98.63% on the test set, but the ensemble approach increased this value to 99.75%. The proposed ensemble approach improves accuracy and ensures greater robustness and stability. Further, the theoretical knowledge and results obtained can be integrated into smart agricultural machines to be developed in this field and will enable them to operate more efficiently.

Dinamik Oylama Tabanlı Topluluk Derin Öğrenme ile Benzer Mahsullerin Sınıflandırılması

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 04/02/2025
Düzeltme: 11/03/2025
Kabul: 17/06/2025

Anahtar Kelimeler

Derin Öğrenme
Dinamik Oylama
Mahsul Sınıflandırma
Akıllı Tarım Teknolojileri

Öz

Ürün başına ilaçlama, sulama ve hasat gibi akıllı tarım uygulamalarını gerçekleştirebilen otonom makinelerin geliştirilmesinde derin öğrenme tabanlı yaklaşımlar, özellikle görüntü sınıflandırma ve veri analizi gibi görevlerde başarılı uygulamalar sergilemektedir. Tarımsal üretimde verimliliği artırmak ve sürdürülebilirliği sağlamak için bitki türlerinin doğru tanınması ve yabancı otlardan ayırt edilmesi kritik bir öneme sahiptir. Birbirine benzer görünüme sahip tarımsal mahsullerin sınıflandırılması, mevcut yöntemlerle zorlu bir problem olmaya devam etmektedir. Bu araştırma, benzer görünümlü tarımsal ürünlerin otomatik olarak tanınması ve sınıflandırılması konusunda önemli bir adım olmakla birlikte, akıllı tarım teknolojilerinin geliştirilmesine yönelik teorik ve pratik bir temel oluşturmaktadır. Bu çalışma, genellikle birbirine çok benzeyen tarımsal mahsul görüntülerini sınıflandırmayı amaçlayarak 17 farklı derin öğrenme modeli ve dinamik oylama yöntemini kullanmaktadır. Veri seti, kenevir, mısır, pirinç, şeker kamışı ve buğday olmak üzere beş benzer görünümlü mahsul türüne ait toplam 804 görüntüden oluşmaktadır. Güvenilirliği sağlamak amacıyla 10 katlı çapraz doğrulama kullanılmış ve tüm modellerde aynı örnek setleriyle tutarlı deneyler gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar modellerin birbirine çok benzer tarımsal mahsül görüntülerini sınıflandırma performanslarını doğruluk, eğitim süresi ve disk alanı açısından rapor etmektedir. Deneysel bulgulara göre, ShuffleNet test setinde %98,63 ile en yüksek bireysel doğruluğa ulaşmış, ancak topluluk yaklaşımı bu değeri %99,75'e yükseltmiştir. Önerilen topluluk yaklaşımı doğruluğu artırmakla kalmayıp daha fazla sağlamlık ve kararlılık sağlamaktadır. Ayrıca elde edilen teorik bilgi ve sonuçlar, bu alanda geliştirilecek akıllı tarım makinelerine entegre edilebilecek ve daha verimli şekilde çalışmasını sağlayacaktır.

*Corresponding author, e-mail: eesme@ktun.edu.tr
DOI: 10.29109/gujsc.1632938

1. INTRODUCTION (GİRİŞ)

It is known that agriculture began 13.000 years ago in the northern region of present-day Iraq (between the Tigris and Euphrates rivers). Agriculture, which in the early periods was limited to the cultivation and collection of spontaneously growing wheat and wild plants with primitive methods, has now become a strategic issue of great importance [1]. While the number of people to feed was quite limited in the early periods, today agriculture plays a critical role in feeding more than seven billion people worldwide. Moreover, considering the United Nations (UN) estimate that the world population will be 10 billion in 2050, it can be said that agricultural technological developments and digital transformation efforts are of more strategic and vital importance [2].

Efficiency and quality of agricultural products, which are the main food source of humanity, are decreasing due to many problems such as urban expansion, lack of irrigation, decrease in agricultural lands, desertification, and agricultural diseases. Crop disease detection is crucial for global food security, requiring accurate and timely identification for effective intervention. A recent study reviewed various machine learning and deep learning models, highlighting the challenges of dataset imbalances and emphasizing the effectiveness of Vision Transformers and hybrid approaches in improving classification accuracy [3]. In addition, the COVID-19 epidemic and international political problems that we have experienced in recent years negatively affect the sustainable agricultural economy and pose a serious threat to food security and supply [4]. Overcoming all these problems in agriculture depends on improving agricultural equipment technology, increasing digital conversions in agricultural areas, and applying today's modern techniques such as artificial intelligence and machine learning more in agricultural areas. Thus, it will be possible to achieve more efficient and reliable production and increase food supply by using fewer human resources and more technological equipment.

Findings of recent studies indicate that deep learning methods provide high accuracy and more performance than traditional image-processing methods. Image data collected from agricultural areas usually allows the definition of the agricultural environments and variety of crops. For this reason, imaging collection and analysis with intelligent learning techniques are important to the classification of crops or the detection of anomalies in agricultural areas [5]. Image analysis in the agricultural domain includes three main issues such as image recognition [6], image classification [7], and anomaly detection [8]. The most commonly used sensing methods are satellite-based and used for multi and hyperspectral imaging. Using synthetic aperture radar systems and thermal/near-infrared cameras has become increasing extent, also X-ray and optical techniques are being implemented [9]. In image analyses, some of the most popular methods include machine learning techniques such as K-means and Support Vector Machines, Artificial Neural Network approaches, linear polarization, and regression analysis [10]. Accurate crop mapping is crucial for agricultural production and food security, especially amid climate change and population growth. A study utilizing an Attention-based Bidirectional GRU (A-BiGRU) model on Sentinel-2 time-series images demonstrated superior performance over traditional classifiers, achieving an overall accuracy of 98.04% in identifying rice, maize, and soybean [11]. Pratama et al. (2024) proposed an integrated voting classifier for multiple classification of dry bean varieties with a machine learning approach based on Gaussian Naive Bayes, Decision Tree and Logistic Regression. According to the results, they stated that the accuracy rates of the models varied significantly according to different data subsets, which showed the performance of the classifier under certain conditions and also highlighted areas for improvement [12].

Generally, deep learning models have significantly enhanced predictive accuracy in machine learning applications across a broad spectrum of areas. In the field of machine learning, ensemble learning in deep learning has demonstrated superior performance compared to traditional algorithms. Despite the ability of various deep learning algorithms to automatically extract features and address complex challenges, the primary difficulty lies in the necessity for substantial expertise and experience to fine-tune optimal parameters, making the process time-consuming. For this reason, recent research efforts have sought to merge ensemble learning with deep learning to mitigate this challenge. Ensemble learning encompasses techniques that combine multiple base models within a unified framework to create a more robust model. The effectiveness of an ensemble method depends on various factors, including the training of the baseline models and the manner in which they are integrated [13–15].

Deep neural networks, as a flexible training method for learning, can represent more complex nonlinear structures. However, this flexibility often results in higher variance in deep models. To mitigate the

high variance in deep models, ensemble deep learning approaches can be employed. These approaches involve training multiple deep models on the same problem and aggregating their predictions. The primary goal of ensemble techniques is to enhance predictive performance by effectively combining the strengths of various deep learning models [16], [17].

Recent literature commonly focuses on the application of majority fusion methods, particularly voting algorithms, to improve prediction performance in classification or regression problems involving ensemble deep models. This is due to their straightforward and intuitive nature. The most popular voting methods include Max Voting [18], Averaging Voting [19], Weighted Average Voting [20], and hybrid approaches [21]. Each of these methods has its own advantages and disadvantages, which must be carefully considered during implementation.

The classification of crops is very important to increase agricultural productivity. Distinguishing crops from harmful weeds in agricultural activities such as spraying and irrigation ensures better growth and efficiency of the product. For this reason, studies on the classification of agricultural products using deep learning-based image classification and ensemble methods are a current and popular topic in the literature due to their ability to automatically learn data-dependent features. Ayan et al. (2020) adapted and re-trained seven distinct pre-trained convolutional neural network (CNN) models using suitable transfer learning and fine-tuning methods on a publicly available dataset that includes images of insects harmful to crops. Subsequently, the three highest-performing CNN models (InceptionV3, Xception, and MobileNet) were ensembled using a strategy based on the sum of maximum probabilities to enhance classification performance. They stated that the weights of CNN models were adjusted using a genetic algorithm, and the proposed model achieved the highest classification accuracy [22]. Chen et al. (2024) proposed two weight-based ensemble deep learning methods constructed from vector- and matrix-based weights for the detection and classification of crop pests. To address the challenge of weight design, which is critical for the effectiveness of ensemble methods, they formulated the weight design problem as a quadratic convex optimization problem. The solution to this problem has a closed-form expression and can be computed efficiently. They demonstrated that the proposed approach is competitive with other leading methods, achieving high accuracy [23]. To tackle the challenges of early detection and effective crop management, Shahid et al. (2024) proposed a framework for classifying healthy and unhealthy cotton plants. The framework leverages advanced techniques, particularly deep learning, computer vision, and artificial intelligence. They employed feature extraction techniques, including continuous wavelet transform (CWT) and fast Fourier transform (FFT), in their strategy, which utilizes an averaging method to combine the classification scores [24]. Hyder and Talpur (2024) investigated the use of CNNs for the early detection of cotton leaf diseases. The study classified bacterial blight, curl virus, Fusarium wilt, and healthy leaves. It highlighted that CNNs and image processing techniques are effective in diagnosing diseases. The proposed approach simplifies the detection of cotton leaf diseases, contributing to the preservation of crop productivity [25]. Nanni et al. (2020) proposed an automatic classifier for the detection of pests for crop protection by integrating CNN with saliency methods. They developed three different saliency methods for image preprocessing. They stated that they obtained high accuracy results by testing their proposed method on both large and small datasets [26]. Leaf classification is a challenging task, particularly when distinguishing between crop plants of similar size. A study using Deep Learning models achieved a maximum test accuracy of 94.3% on augmented data from a dataset consisting of 570 high-resolution images of agricultural plant leaves organized into 21 categories [27].

This study provides a comprehensive evaluation by comparing the performance of 17 different deep learning models for the classification of closely resembling agricultural crop images. Since an ensemble learning approach is adopted, model diversity plays a crucial role in this study. Utilizing 17 models with different architectures ensures diversity in ensemble learning based on dynamic voting, allowing the strengths of each model to be leveraged while compensating for their weaknesses. The obtained results thoroughly report the models' classification performance for closely resembling agricultural crops in terms of accuracy, training time, and disk space. This diversity not only enhances overall performance but also provides a more robust and stable classification system. In addition to being a significant step toward the automatic recognition and classification of closely resembling agricultural crops, this research establishes a theoretical and practical foundation for the development of smart farming technologies. Initially, the paper provides an overview of the dataset, the deep learning methodologies utilized, and the proposed dynamic voting approach.

Subsequently, it details the training and testing processes, all of which were conducted using a dataset comprising 804 images representing five distinct crop types: jute, maize, rice, sugarcane, and wheat.

2. MATERIALS AND METHODS (MATERYAL VE METOD)

In this study, a deep learning-based ensemble model is proposed for classifying images of agricultural products. In the first stage, 17 different deep learning models are trained on a dataset of agricultural product images consisting of five classes. The architectures and key details of these 17 models are summarized in Table 1. Then, a dynamic voting-based ensemble approach is developed by utilizing the outputs of these models. In this method, only models with high expertise on the relevant class are involved in the decision-making process for classifying each new example, while models with low performance are excluded from the voting. This adaptive decision-making mechanism aims to increase classification accuracy.

2.1. Proposed Ensemble Model (Önerilen Topluluk Modeli)

Dynamic voting is an ensemble learning method and represents a process in which predictions from different models are evaluated. This method enables the identification of the most suitable models for each instance and considers only the predictions of models that perform with higher accuracy on the specific instance. By leveraging the strengths of each model, overall performance is enhanced. Unlike a fixed voting mechanism, dynamic voting takes into account the unique characteristics of each instance and provides an adaptive decision-making process. A diagram illustrating the proposed ensemble approach based on dynamic voting is presented in Figure 1 of this study.

Table 1. Used deep learning models (Kullanılan derin öğrenme modelleri)

AlexNet	AlexNet, a deeper and wider CNN model compared to the traditional LeNet method, was proposed by Alex Krizhevesky et al. in 2012 [28]. AlexNet can provide very successful results in large-scale image recognition compared to common traditional machine learning and computer vision approaches. Thus, it is considered as a significant development that the interest in deep learning-based image recognition is rapidly increasing [29].
DarkNet19 DarkNet53	DarkNet19 is a CNN with 19 layers usually used for object detection. Owing to the pre-trained of the network, it can classify a wide range of images and provide rich feature representations [30]. DarkNet53, a CNN technique, is a basic method used to extract features from images, classify images, and verify them by detecting specific elements. DarkNet53 has a ReLu layer as part of its design in its architecture. Due to its fully connected layers with adjustable number of neurons, it can perform feature synthesis and nonlinear transformations more easily [31].
DenseNet201	Dense Convolutional Network is a CNN architecture proposed by Huang et al. in 2017. It can scale to hundreds of layers by providing direct connections between two layers with the same feature map size. It can achieve the performance of advanced network architectures with fewer parameters and less computation and tend to provide more consistent improvements [32].
EfficientNetB0	EfficientNet model was proposed by Tan and Quoc in 2019 to provide a simple and efficient way to easily scale a basic CNN to any target resource constraint in a more principled manner. EfficientNets are neural architectures that can provide much better accuracy and efficiency with fewer parameters compared to ConvNets [33].
GoogLeNet	A specific example of the Inception architecture, GoogLeNet, is a convolutional neural network proposed by Szegedy et al. in 2015, with a depth of 22 layers. The main advantage of the GoogLeNet architecture is that it can provide a significant increase in quality, despite a reasonable increase in computational requirements, compared to shallower and narrower architectures. It can provide similar quality results in identification and classification with more expensive non-Inception architectures of similar depth and width [34].

Inceptionv3	Inception-v3 is a 48-layer deep convolutional neural network, proposed by Szegedy et al. in 2016. Inception-v3 can provide high-performance image networks at an acceptable computational cost compared to simpler and more monolithic architectures. It allows training relatively smaller training sets with higher performance with lower parameter count and batch-normalized auxiliary classifiers [35].
MobileNetv2	MobileNetV2, an advanced mobile architecture, is a highly usable neural network proposed by Sandler et al. in 2018. It shows high performance especially for standard operations of mobile applications due to its simple and high-throughput structure [36].
NASNet-Large	NASNet architecture was proposed by Zoph et al. in 2018 to design a new search space that can separate the complexity of a neural architecture from the depth of a network and ensure transferability. The proposed method has a highly flexible architecture that can be scaled in terms of computational cost and parameters to easily address many different problems [37].
ResNet18 ResNet50 ResNet101	ResNets (Recently proposed residual networks) is a widely used CNN architecture developed by Kaiming He et al. in 2015, which allows training of high deep networks up to 1000 layers. ResNets architecture is a method that introduces the concept of residual connections, addressing the problem of vanishing gradients in deep networks. ResNets are neural network models that can be designed in different structures according to the number of layers, can be easily implemented without computational burden, and can generalize standard CNNs [38], [39].
ShuffleNet	ShuffleNet, a computationally efficient CNN, was introduced and developed by Zhang et al. in 2017 to greatly reduce the computational cost without decreasing the accuracy performance. Designed specifically for mobile devices with very limited processing power, ShuffleNet architecture can provide approximately 13 times the speedup compared to AlexNet on an ARM-based mobile device with similar accuracy value [40].
SqueezeNet	SqueezeNet, proposed by Iandola et al. in 2016, requires less communication and bandwidth compared to other CNN architectures due to its smaller architecture structure. SqueezeNet, which is suitable for many hardware with limited memory, can achieve the same level of accuracy with 50 times fewer parameters compared to AlexNet [41].
VGG16 VGG19	It was developed by the VGG team to investigate the effect of network depth on accuracy in large-scale image recognition and classification. Compared to a traditional ConvNet architecture, VGG models were able to provide more generalized performance by identifying more complex structures with less deep image representations [42].
Xception	The Xception architecture is a convolutional neural network model proposed by Chollet in 2017 to improve Inception modules. It has been stated that an Xception architecture with a similar number of parameters to Inception V3 performs better on a large image classification dataset and is easier and more efficient to use [43].

In this study, an ensemble is formed using the majority of state-of-the-art deep learning models in the literature. In the first stage, 17 deep learning models are trained on the dataset using a 10-fold cross-validation method. As shown in Figure 1, in the second stage, a meta-dataset is created based on the prediction results of these models on the training set. For each training instance, the models are labeled with 1 or 0 depending on whether their predictions are correct. Thus, a 17-element binary vector is obtained for each instance. These binary vectors are labeled with the class label of the corresponding instances. Consequently, in the meta-dataset, each instance's label consists of a binary vector representing the prediction results of the 17 models. This approach ensures that each instance in the meta-dataset reflects the performance of the models in correctly or incorrectly predicting that specific instance. In the third stage, the constructed meta-dataset is trained using a CNN model. ShuffleNet is chosen for this process due to its superior performance on crop data. ShuffleNet provides a dynamic selection mechanism for each crop instance, determining which deep learning models' predictions should be considered.

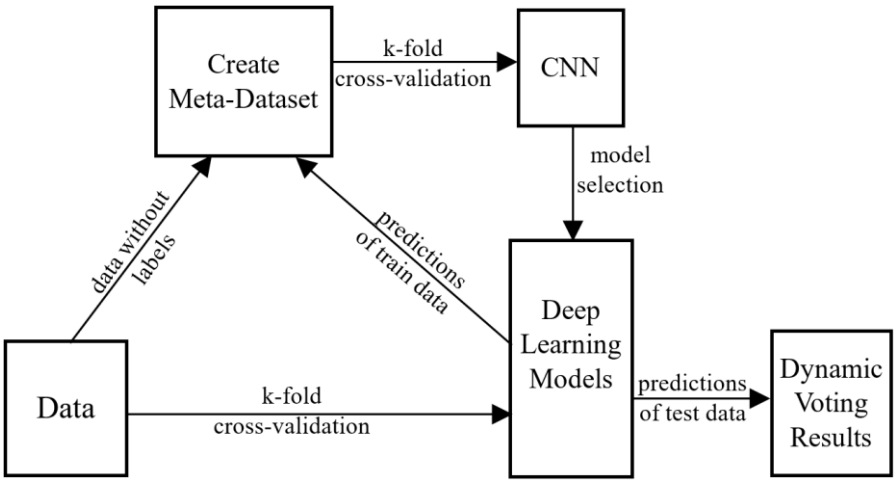


Figure 1. Proposed dynamic voting scheme (Önerilen dinamik oylama şeması)

This method allows the models participating in the voting process to be dynamically selected. Consequently, the predictions of models that are more specialized for a specific instance are prioritized, while the predictions of models that lack sufficient expertise on that instance are disregarded. This approach aims to maximize the contributions of expert models and enhance the accuracy of the predictions resulting from the ensemble voting process.

2.2. Experimental design (Deney tasarımı)

In this paper, a dataset of five different types of crops - namely jute, maize, rice, sugarcane, and wheat - is used for crop classification. The dataset was collected by Jaiswal and is accessible on Kaggle [44]. Images in the jute class generally include thin and long plants with green and small leaves, while images in the maize class typically feature plants with green, long, and wider leaves. Rice class images consist of green and short plants with seeds on them. When sugarcane images are examined, it can be observed that their leaves are green, while their stems are somewhat gray. Unlike the other classes, images in the wheat class mostly depict yellow plants. An example from each class is illustrated in Figure 2.

As seen in Figure 2, all images are different from each other. However, since there are sample images that are similar to each other in all classes, the classification process can be done with artificial intelligence to have a higher classification accuracy. Sample images that may cause errors during classification are presented in Figure 3.

Each class in the dataset consists of 40 images, and each image is 224*224*3 in size, has a resolution of 96 dpi and a depth of 24 bits. The dataset has also augmented images. The augmentation process is conducted by horizontally flipping, shifting, rotating, and vertically shifting the raw images. For each class, about 120 augmented images are obtained by using 40 raw images in a single class and the dataset contains 804 crop images in total

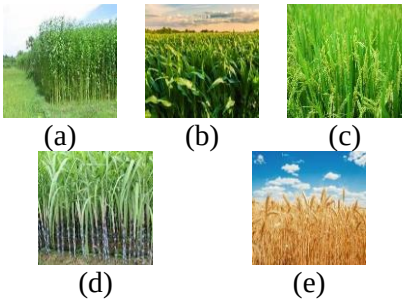


Figure 2. Sample images of each class: a) jute b) maize c) rice d) sugarcane e) wheat (Her sınıftan örnek görüntüler: a) jüt b) mısır c) pirinç d) şeker kamışı e) buğday)

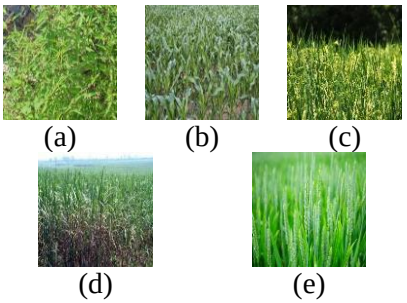


Figure 3. *Similar images from each class: a) jute b) maize c) rice d) sugarcane e) wheat (*Her sınıftan benzer görüntüler: a) jüt b) mısır c) pirinç d) şeker kamışı e) buğday*)*

3. RESULTS (BULGULAR)

17 deep learning models are trained on the dataset. The models are used in their original forms as introduced in the literature, with images resized to match the input dimensions and the final layers modified to classify into five categories. Transfer learning is not employed; the weights are initialized randomly, and the training process is conducted entirely on the agricultural dataset. Models are set parameters with MiniBatchSize 32, Max epoch 100,

Learning rate 0.0001. During training a randomly selected validation set, which is 30% of the training set is used. The accuracy of the models is evaluated by using 10-fold cross-validation. In addition, a fair classification environment is provided by fixing the training and test samples in all models. The experiments are conducted on a computer equipped with an AMD Ryzen 9 5950X CPU@3.40 GHz, 64 GB RAM, and an Nvidia GeForce RTX 3080 (12 GB) GPU. The models are designed and trained in the MATLAB environment using the Deep Learning Toolbox. The Parameters of the experiments are presented in Table 2.

Table 2. Parameters of the experiments (Deneylerin parametreleri)

Option	Value
kfold	10
Train/Validation Ratio	0.7 / 0.3
Shuffle	Each Epoch
SolverName	Adaptive moment est.
MiniBatchSize	32
MaxEpochs	100
LearnRate	0.0001

Table 3 presents the validation accuracy results for the models upon completion of training. The results are listed separately for each fold. To enable a general comparison of performance, the table also includes the average across all 10 folds, standard deviation and the corresponding ranking.

To detail the results presented in Table 3, the ShuffleNet model demonstrated the best performance with an average accuracy of 98.20%, ranking first. Notably, it achieved 100% accuracy in certain folds. NASNet-Large ranked second with an average accuracy of 97.83%, consistently delivering high performance across all folds. GoogLeNet secured third place with an accuracy of 97.69%, achieving over 98% accuracy in most folds. Among the other models, DenseNet201, ResNet18, and Xception showed strong performance with accuracy rates exceeding 96%. Models such as AlexNet, DarkNet19, DarkNet53, EfficientNetB0, Inceptionv3, ResNet50, and ResNet101 exhibited moderate performance, with accuracy ranging between 90% and 96%. Meanwhile, MobileNetv2, SqueezeNet, VGG16, and VGG19 were the lowest-performing models.

Overall, even models with relatively lower average performance demonstrated high accuracy in certain folds. This suggests that some models may specialize in specific examples. Therefore, it would be a suitable approach to dynamically select the models participating in majority voting based on the test sample. Additionally, models like MobileNetv2 and SqueezeNet, which rank at the bottom with average accuracies below 80%, could be considered for complete exclusion from majority voting.

Figure 4 shows the time taken to complete training for a fold during the training process, as well as the disk space used by the model file generated for that fold. NASNet-Large has the longest training time (445 minutes), while VGG19 requires the most disk space. In contrast, lightweight models like AlexNet and SqueezeNet have minimal training times (4-6 minutes) and low disk usage, making them resource-efficient. This comparison in Figure 4 highlights trade-offs between resource demands and practical model selection based on computational constraints.

Table 3. The validation accuracy results of deep learning models (Modellerinin doğrulama başarısı)

Model	Fold 1	Fold 2	Fold 3	Fold 4	Fold 5	Fold 6	Fold 7	Fold 8	Fold 9	Fold 10	Std.	Avg.	Ranks
AlexNet	97.24	97.24	93.09	94.47	94.04	97.22	98.14	94.93	94.50	94.44	1.66	95.53	10
DarkNet19	99.08	94.47	97.70	97.24	98.17	**99.07**	98.14	93.09	91.74	98.61	2.51	96.73	7
DarkNet53	97.24	95.85	94.47	93.55	96.79	98.15	93.95	**99.54**	96.33	92.13	2.16	95.80	9
DenseNet201	97.24	97.70	**99.54**	94.47	97.25	96.30	96.28	96.31	96.79	**99.07**	1.39	97.09	4
EfficientNetB0	94.47	94.47	92.17	89.86	90.37	94.44	87.91	93.55	97.25	92.59	2.60	92.71	13
GoogLeNet	98.62	**99.54**	97.70	98.16	98.17	92.13	98.14	97.70	98.62	98.15	1.92	97.69	3
Inceptionv3	96.31	94.93	99.08	96.31	97.71	97.22	97.21	94.93	97.71	93.52	1.56	96.49	8
MobileNetv2	78.34	81.11	84.33	78.34	82.11	79.63	75.81	83.41	77.98	78.70	2.55	79.98	16
NASNet-Large	**100.00**	97.24	98.62	97.70	96.33	97.69	97.67	96.31	98.17	98.61	**1.05**	97.83	2
ResNet18	94.47	91.71	97.24	97.24	98.62	97.69	**99.07**	99.08	97.25	97.22	2.15	96.96	5
ResNet50	96.31	99.08	97.24	95.39	93.12	96.30	92.09	97.24	94.50	93.98	2.02	95.52	11
ResNet101	88.94	92.63	96.31	94.01	96.33	91.20	95.81	94.47	93.58	92.13	2.26	93.54	12
ShuffleNet	98.62	97.24	**99.54**	**100.00**	**100.00**	96.76	97.21	98.62	97.71	96.30	1.28	**98.20**	1
SqueezeNet	80.18	58.99	81.11	77.88	77.52	81.48	75.35	82.95	80.28	75.00	6.52	77.07	17
VGG16	86.64	93.55	77.42	88.94	92.66	90.28	90.70	82.95	87.61	93.06	4.79	88.38	14
VGG19	88.48	82.95	88.48	85.25	74.77	91.67	84.65	87.56	88.53	87.04	4.38	85.94	15
Xception	94.47	96.31	97.24	96.77	99.08	96.30	98.14	96.77	**99.54**	94.91	1.55	96.95	6

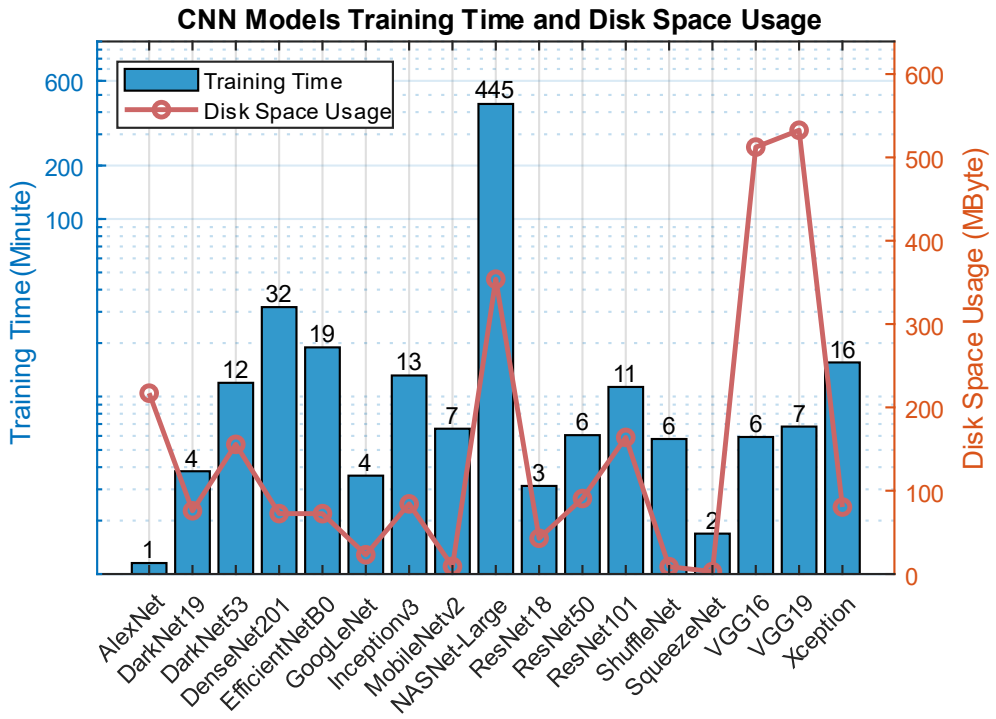


Figure 4. Training Time and Disk Space Utilization of Models (Modellerin Eğitim Süresi ve Disk Alanı Kullanımı)

Table 4 presents the accuracy rates of the models on the test set for each fold, along with their average accuracy and rankings across all folds.

To detail the results presented in Table 4 the ShuffleNet model achieved the second-highest performance on the test set, following the ensemble model, with an average accuracy of 98.63%, consistent with its performance on the validation set. Similarly, models like NASNet-Large, GoogLeNet, and Xception demonstrated stable performance on the test set, aligning with their validation set results, highlighting their robustness. In contrast, AlexNet and DarkNet53, which ranked mid-tier on the validation set, showed improved performance on the test set, indicating better generalization capabilities compared to other models. On the other hand, DenseNet201 and ResNet18, despite their high rankings on the validation set, dropped by five positions on the test set. This decline suggests weaker generalization ability and a tendency to overfit the training data. Models such as DarkNet19, EfficientNetB0, Inceptionv3, MobileNetv2, ResNet50, ResNet101, SqueezeNet, VGG16, and VGG19 exhibited greater variability in performance across folds, as indicated by their higher standard deviations.

Table 4. The test accuracy results of deep learning models (Modellerinin test başarısı)

Model	Fold 1	Fold 2	Fold 3	Fold 4	Fold 5	Fold 6	Fold 7	Fold 8	Fold 9	Fold 10	Std.	Avg.	Ranks
AlexNet	97.50	93.83	92.59	98.77	93.83	97.50	95.00	98.75	93.75	95.00	2.16	95.65	6
DarkNet19	98.75	90.12	95.06	97.53	**100.00**	95.00	**100.00**	85.00	87.50	90.00	5.13	93.90	9
DarkNet53	93.75	93.83	93.83	95.06	91.36	95.00	91.25	96.25	97.50	96.25	1.94	94.41	7
DenseNet201	88.75	91.36	93.83	90.12	96.30	92.50	95.00	91.25	95.00	96.25	2.50	93.04	10
EfficientNetB0	76.25	83.95	82.72	83.95	88.89	88.75	83.75	77.50	80.00	82.50	3.94	82.83	16
GoogLeNet	98.75	96.30	96.30	**100.00**	98.77	91.25	93.75	96.25	**100.00**	**100.00**	2.80	97.14	4
Inceptionv3	96.25	96.30	97.53	96.30	98.77	93.75	92.50	88.75	91.25	91.25	3.08	94.26	8
MobileNetv2	70.00	75.31	82.72	71.60	82.72	80.00	65.00	68.75	70.00	56.25	7.87	72.23	18
NASNet-Large	**100.00**	97.53	98.77	98.77	91.36	98.75	97.50	**100.00**	**100.00**	98.75	2.42	98.14	3
ResNet18	93.75	85.19	95.06	91.36	92.59	92.50	96.25	92.50	93.75	96.25	3.01	92.92	11
ResNet50	87.50	97.53	95.06	93.83	85.19	92.50	86.25	92.50	83.75	93.75	4.47	90.79	12
ResNet101	77.50	86.42	95.06	91.36	88.89	92.50	93.75	88.75	93.75	90.00	4.83	89.80	13
ShuffleNet	98.75	95.06	98.77	**100.00**	**100.00**	98.75	**100.00**	97.50	98.75	98.75	1.40	98.63	2
SqueezeNet	80.00	49.38	72.84	70.37	69.14	80.00	71.25	81.25	78.75	78.75	9.03	73.17	17
VGG16	88.75	85.19	81.48	90.12	88.89	86.25	93.75	82.50	83.75	92.50	3.95	87.32	14
VGG19	90.00	85.19	88.89	85.19	81.48	85.00	80.00	86.25	88.75	91.25	3.43	86.20	15
Xception	96.25	93.83	97.53	93.83	97.53	98.75	93.75	95.00	97.50	97.50	1.79	96.15	5
Ensemble	**100.00**	**98.77**	**100.00**	**100.00**	**100.00**	**100.00**	98.75	**100.00**	**100.00**	**100.00**	**0.50**	**99.75**	1

The ensemble model, with an average accuracy of 99.75%, outperformed all other models and secured the top position. Its low standard deviation indicates minimal performance differences across folds, demonstrating that it is a robust and reliable ensemble model compared to individual models.

Table 5 presents the 10-fold averages of all models and provides a detailed listing of their performance on the test set. The ensemble model achieved the highest classification accuracy, outperforming all other models with an accuracy of 99.75%. While models like SqueezeNet and MobileNetv2 showed very low accuracy in some samples, and models like DarkNet19 and EfficientNetB0 demonstrated relatively low accuracy in certain folds, the ensemble model compensated for these inconsistencies through dynamic majority voting. This approach allowed the ensemble model to achieve 100% sensitivity, ensuring no positive samples were missed, while also minimizing the false positive rate. The high F-Measure value indicates that both the ensemble and ShuffleNet models maintain a strong balance between sensitivity and precision.

Table 5. Average test performances of the models (Modellerin ortalama test performansları)

Model	Accuracy	Sensitivity	Specificity	Precision	F-Measure	G-mean
AlexNet	0.9565	0.9867	0.9488	0.8319	0.8999	0.9672
DarkNet19	0.9390	0.9214	0.9430	0.8064	0.8567	0.9317
DarkNet53	0.9441	0.9354	0.9473	0.8248	0.8707	0.9403
DenseNet201	0.9304	0.9298	0.9299	0.7711	0.8405	0.9290
EfficientNetB0	0.8283	0.8806	0.8165	0.5412	0.6681	0.8460
GoogLeNet	0.9714	1.0000	0.9645	0.8836	0.9344	0.9819
Inceptionv3	0.9426	0.9588	0.9398	0.7986	0.8682	0.9488
MobileNetv2	0.7223	0.8026	0.7012	0.4084	0.5377	0.7473
NASNet-Large	0.9814	0.9889	0.9798	0.9274	0.9564	0.9843
ResNet18	0.9292	0.9316	0.9273	0.7591	0.8342	0.9281
ResNet50	0.9079	0.9261	0.9054	0.7279	0.8058	0.9141
ResNet101	0.8980	0.9390	0.8871	0.6886	0.7911	0.9120
ShuffleNet	0.9863	0.9868	0.9862	0.9453	0.9649	0.9864
SqueezeNet	0.7317	0.7871	0.7193	0.4232	0.5456	0.7517
VGG16	0.8732	0.9180	0.8619	0.6312	0.7431	0.8884
VGG19	0.8620	0.8477	0.8671	0.6150	0.7072	0.8556
Xception	0.9615	0.9594	0.9612	0.8603	0.9055	0.9596
Ensemble	**0.9975**	**1.0000**	**0.9970**	**0.9866**	**0.9931**	**0.9985**

In conclusion, the ensemble model demonstrated the best performance across all metrics. This makes the ensemble model an ideal choice for applications requiring minimal false positives, no missed positive instances, and maximum accuracy.

4. DISCUSSION (Tartışma)

This paper investigates the task of classifying closely resembling agricultural crop images using deep learning models. The paper presents 17 deep learning model performances on the task of classifying and an ensemble learning approach based on dynamic voting. Dynamic voting doesn't use the same voting models on each test sample. For each test sample, the number of voting models and voters varies. The results demonstrate the robustness and effectiveness of this approach across all evaluated metrics, highlighting its potential as a reliable solution for classification problems.

The ensemble model achieved the highest average accuracy (99.75%), surpassing all individual models, including ShuffleNet. This success stems from its dynamic voting mechanism, which compensates for inconsistent performances across samples by prioritizing reliable models. For instance, it mitigates the weaknesses of models like SqueezeNet and MobileNetv2, which showed low accuracy in some folds, ensuring high sensitivity (100%) and a balanced F-Measure. Additionally, the improved generalization of AlexNet and DarkNet53 on the test set emphasizes the importance of evaluating models on diverse datasets. In contrast, the ensemble model addresses the overfitting issues observed in DenseNet201 and ResNet18, ensuring greater robustness and stability.

Overall, ensemble learning based on dynamic voting provides a promising framework for improving the performance of classifying closely resembling agricultural crop images and addressing the challenges of variability and overfitting in deep learning.

5. CONCLUSIONS (SONUÇLAR)

This study offers a comprehensive assessment by evaluating the performance of 17 deep learning models in classifying closely resembling agricultural crops. Given the adoption of an ensemble learning approach, model diversity is a key focus. The use of 17 models with distinct architectures enhances diversity, enabling the strengths of each model to be utilized while mitigating their weaknesses. The results provide a detailed analysis of the models' classification performance in terms of accuracy, training time, and disk space. This diversity not only improves overall performance but also contributes to a more robust and reliable classification system. Beyond advancing the automatic recognition and classification of closely resembling agricultural crops, this research lays a theoretical and practical foundation for the development of smart farming technologies. The study employs a 10-fold cross-validation approach and consistently utilizes the same samples across all models in the experiments. The results obtained substantiate the capability of the models to accurately detect and categorize agricultural crop images. Notably, ShuffleNet, NASNet-Large, GoogLeNet and DenseNet emerged as the top performers with an impressive between 97.09% and 98.20% accuracy on the test set, as indicated by the experimental outcomes. On the other hand, overfitting problems have been also observed in models such as MobileNet and SqueezeNet. Therefore, instead of traditional majority voting, dynamic voting provides more robustness and stability by addressing the observed overfitting issues. As a result, the dynamic voting approach has improved the accuracy in the problem of classifying very similar agricultural crops.

While the proposed dynamic voting mechanism proves to be a significant advancement, it comes with certain limitations. The computational complexity of dynamically selecting models for each sample may pose challenges for large-scale datasets or real-time applications. Future research focuses on designing and developing a smart vehicle which works autonomously and is able to collect data from the field to optimize this process and more real-time testing of the proposed approach.

ACKNOWLEDGMENTS (TEŞEKKÜR)

This study was conducted at the Artificial Intelligence Application and Research Center of Konya Technical University.

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.

AUTHORS' CONTRIBUTIONS (YAZARLARIN KATKILARI)

Engin EŞME: Conceptualisation, Methodology, Software, Formal Analysis, Investigation, Data Processing, Writing.
Muhammed Arif ŞEN: Conceptualisation, Literature Search, Validation, Investigation, Resources, Writing.
Halil ÇİMEN: Conceptualisation, Literature Search, Validation, Investigation, Resources, Writing.

CONFLICT OF INTEREST (ÇIKAR ÇATIŞMASI)

There is no conflict of interest in this study.

REFERENCES (KAYNAKLAR)

[1] Gray H, Nuri KR. Differing Visions of Agriculture: Industrial-Chemical vs. Small Farm and Urban Organic Production. American Journal of Economics and Sociology. 2020; 79(3): 813-832. doi:10.1111/ajes.12344
[2] Bouguettaya A, Zarzour H, Kechida A, Taberkit AM. Deep learning techniques to classify agricultural crops through UAV imagery: A review. Neural computing and applications. 2022;34(12):9511-9536.
[3] Ngugi HN, Akinyelu AA, Ezugwu AE. Machine Learning and Deep Learning for Crop Disease Diagnosis: Performance Analysis and Review. Agronomy. 2024;14(12):3001.
[4] Jámbor A, Czine P, Balogh P. The impact of the coronavirus on agriculture: first evidence based on global newspapers. Sustainability. 2020;12(11):4535.
[5] Kamilaris A, Prenafeta-Boldú FX. Deep learning in agriculture: A survey. Comput Electron Agric. 2018;147:70-90.
[6] Abdullahi HS, Sheriff R, Mahieddine F. Convolution neural network in precision agriculture for plant image recognition and classification. In: 2017 Seventh International Conference on Innovative Computing Technology (INTECH). Vol 10 ; 2017:256-272.
[7] Yu S, Jia S, Xu C. Convolutional neural networks for hyperspectral image classification. Neurocomputing. 2017;219:88-98.

[8] Mohanty SP, Hughes DP, Salathé M. Using deep learning for image-based plant disease detection. Frontiers in plant science. 2016;7:1419.
[9] Ishimwe R, Abutaleb K, Ahmed F, others. Applications of thermal imaging in agriculture—A review. Advances in remote Sensing. 2014;3(03):128.
[10] Saxena L, Armstrong L. A survey of image processing techniques for agriculture. Published online 2014.
[11] Feng F, Gao M, Liu R, Yao S, Yang G. A deep learning framework for crop mapping with reconstructed Sentinel-2 time series images. Comput Electron Agric. 2023;213:108227.
[12] Pratama IPA, Atmadji ESJ, Purnamasar DA, Faizal E. Evaluating the performance of voting classifier in multiclass classification of dry bean varieties. Indonesian Journal of Data and Science. 2024;5(1):23-29.
[13] Schmidhuber J. Deep learning in neural networks: An overview. Neural networks. 2015;61:85-117.
[14] Pan SJ, Yang Q. A survey on transfer learning. IEEE Trans Knowl Data Eng. 2009;22(10):1345-1359.
[15] Mohammed A, Kora R. A comprehensive review on ensemble deep learning: Opportunities and challenges. Journal of King Saud University-Computer and Information Sciences. 2023;35(2):757-774.
[16] Amara J, Bouaziz B, Algergawy A. A deep learning-based approach for banana leaf diseases classification. Published online 2017.
[17] Mohammed A, Kora R. An effective ensemble deep learning framework for text classification. Journal of King Saud University-Computer and Information Sciences. 2022;34(10):8825-8837.
[18] Kim HC, Pang S, Je HM, Kim D, Bang SY. Constructing support vector machine ensemble. Pattern Recognit. 2003;36(12):2757-2767.
[19] Montgomery JM, Hollenbach FM, Ward MD. Improving predictions using ensemble Bayesian model averaging. Political Analysis. 2012;20(3):271-291.
[20] Latif-Shabgahi GR. A novel algorithm for weighted average voting used in fault tolerant computing systems. Microprocess Microsyst. 2004;28(7):357-361.
[21] Atay Y, Yildirim MO, Dogan CU. High performance classification of cancer types with gene microarray datasets: hybrid approach. Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology. 2021;9(4):811-827.
[22] Ayan E, Erbay H, Varç\in F. Crop pest classification with a genetic algorithm-based weighted ensemble of deep convolutional neural networks. Comput Electron Agric. 2020;179:105809.
[23] Chen M, Wang J, Chen Y, Guo M, Zheng N. Weight-based ensemble method for crop pest identification. Ecol Inform. Published online 2024:102693.
[24] Shahid MF, Khanzada TJS, Aslam MA, Hussain S, Baowidan SA, Ashari RB. An ensemble deep learning models approach using image analysis for cotton crop classification in AI-enabled smart agriculture. Plant Methods. 2024;20(1):104.
[25] Hyder U, Talpur MRH. Detection of cotton leaf disease with machine learning model. Turkish Journal of Engineering. 2024;8(2):380-393. doi:10.31127/tuje.1406755
[26] Nanni L, Maguolo G, Pancino F. Insect pest image detection and recognition based on bio-inspired methods. Ecol Inform. 2020;57:101089.
[27] Varma WK, Kumar V. Analysis of Crop Leaf Image Classification using Deep Learning Models over Novel Dataset. In: 2023 10th International Conference on Signal Processing and Integrated Networks (SPIN). 2023:14-19.
[28] Krizhevsky A, Sutskever I, Hinton GE. Imagenet classification with deep convolutional neural networks. Adv Neural Inf Process Syst. 2012;25.
[29] Alom MZ, Taha TM, Yakopcic C, et al. The history began from alexnet: A comprehensive survey on deep learning approaches. arXiv preprint arXiv:180301164. Published online 2018.
[30] Al-Haija QA, Smadi M, Al-Bataineh OM. Identifying phasic dopamine releases using darknet-19 convolutional neural network. In: 2021 IEEE International IOT, Electronics and Mechatronics Conference (IEMTRONICS). 2021:1-5.
[31] Rajkumar R, Gopalakrishnan S, Praveena K, Venkatesan M, Ramamoorthy K, Hephzipah JJ. Darknet-53 convolutional neural network-based image processing for breast cancer detection. Mesopotamian Journal of Artificial Intelligence in Healthcare. 2024;2024:59-68.
[32] Huang G, Liu Z, Van Der Maaten L, Weinberger KQ. Densely connected convolutional networks. In: Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 2017:4700-4708.
[33] Tan M, Le Q. Efficientnet: Rethinking model scaling for convolutional neural networks. In: International Conference on Machine Learning. 2019:6105-6114.

[34] Szegedy C, Liu W, Jia Y, et al. Going deeper with convolutions. In: Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 2015:1-9.

[35] Szegedy C, Vanhoucke V, Ioffe S, Shlens J, Wojna Z. Rethinking the inception architecture for computer vision. In: Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 2016:2818-2826.

[36] Sandler M, Howard A, Zhu M, Zhmoginov A, Chen LC. Mobilenetv2: Inverted residuals and linear bottlenecks. In: Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 2018:4510-4520.

[37] Zoph B, Vasudevan V, Shlens J, Le Q V. Learning transferable architectures for scalable image recognition. In: Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 2018:8697-8710.

[38] Targ S, Almeida D, Lyman K. Resnet in resnet: Generalizing residual architectures. arXiv preprint arXiv:160308029. Published online 2016.

[39] He K, Zhang X, Ren S, Sun J. Deep residual learning for image recognition. In: Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 2016:770-778.

[40] Zhang X, Zhou X, Lin M, Sun J. Shufflenet: An extremely efficient convolutional neural network for mobile devices. In: Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 2018:6848-6856.

[41] Iandola FN. SqueezeNet: AlexNet-level accuracy with 50x fewer parameters and< 0.5 MB model size. arXiv preprint arXiv:160207360. Published online 2016.

[42] Simonyan K. Very deep convolutional networks for large-scale image recognition. arXiv preprint arXiv:14091556. Published online 2014.

[43] Chollet F. Xception: Deep learning with depthwise separable convolutions. In: Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 2017:1251-1258.

[44] Aman Jaiswal. Agriculture crop images. 2020. https://www.kaggle.com/datasets/aman2000jaiswal/agriculture-crop-images

Gazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Dergisi
PART C: TASARIM VE TEKNOLOJİ

Gazi University
Journal of Science
PART C: DESIGN AND TECHNOLOGY

GU J Sci, Part C, 13(2): 665-679 (2025)

Seviye 3 ve Seviye 4 Otonom Araçlarda FMEA Yöntemi Kullanılarak Risk Öncelik Değerlendirmesi Yapılması

Elif Tuğba GÜNGÖR[1*] Mustafa KURT[2]

[1]*Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kazaların Çevresel ve Teknik Araştırması Anabilim Dalı, Ankara, Türkiye*

[2]*OSTİM Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye*

Article Info

Research article
Received: 11/10/2024
Revision: 11/05/2025
Accepted: 12/05/2025

Keywords

Autonomous Vehicles, Risk Analysis, Failure Mode and Effects Analysis (FMEA), Autonomy Levels, NHTSA

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 11/10/2024
Düzeltme: 11/05/2025
Kabul: 12/05/2025

Anahtar Kelimeler

Otonom Araçlar, Risk Analizi, Hata Türü ve Etkileri Analizi (FMEA), Otonomi Seviyeleri, NHTSA

Grafik Özet (Graphical/Tabular Abstract)

Bu çalışma, Seviye 3 ve Seviye 4 otonom araçlara ilişkin kaza verilerini FMEA yöntemiyle analiz ederek risk önceliklerini belirlemektedir. NHTSA'ya ait 614 kaza raporu nitel analizle değerlendirilmiş; insan, çevre ve araç kaynaklı riskler sistematik olarak sınıflandırılmıştır. / This study analyzes accident data related to Level 3 and Level 4 autonomous vehicles using FMEA method to determine risk priorities. 614 accident reports belonging to NHTSA were evaluated with qualitative analysis; human, environmental and vehicle-related risks were systematically classified.



Şekil A:*SAE otonomluk seviyeleri /* ***Figure A****: SAE autonomy levels*

Önemli noktalar (Highlights)

- *614 NHTSA kaza raporunun analiz edilmesi. / Analysis of 614 NHTSA accident reports.*
- *FMEA yöntemiyle risk önceliklerinin hesaplanması. / Calculating risk priorities with the FMEA method.*
- *Açık, eksensel ve seçici kodlama yöntemlerinin uygulanması. / Application of open, axial and selective coding methods.*
- *Risklerin insan, çevre ve teknoloji boyutlarında sınıflandırılması. / Classification of risks in terms of human, environmental and technological dimensions.*
- *En yüksek riskin karşı sürücülerden kaynaklanması. / The highest risk comes from opposite drivers.*

Amaç (Aim): *Bu çalışmanın amacı, Seviye 3 ve 4 otonom araç kazalarındaki risk faktörlerini FMEA yöntemiyle analiz ederek önceliklendirmektir. / The aim of this study is to prioritize the risk factors in Level 3 and 4 autonomous vehicle accidents by analyzing them using the FMEA method.*

Özgünlük (Originality): *Bu çalışma, ileri seviye otonom araçlara ait kaza verilerinin FMEA ile analiz edilerek çok katmanlı risk değerlendirmesi sunması yönüyle özgünlük taşımaktadır. / This study is original in that it presents a multi-layered risk assessment by analyzing accident data of advanced autonomous vehicles with FMEA.*

Bulgular (Results): *Çalışmada, en yüksek riskin karşı sürücülerden kaynaklandığı, en sık karşılaşılan sorunların insan faktörlü olduğu ve tespit edilebilirliğin genel olarak düşük seviyede kaldığı belirlenmiştir. / The study determined that the highest risk was caused by opposing drivers, the most common problems were human-related, and detectability remained generally low.*

Sonuç (Conclusion): *Çalışma sonucunda, otonom araçların güvenliğini artırmak için öncelikle tespit edilebilirliğin iyileştirilmesi ve insan faktörüne yönelik önlemlerin güçlendirilmesi gerektiği ortaya konmuştur. / As a result of the study, it was revealed that in order to increase the safety of autonomous vehicles, detectability should be improved and measures against human factors should be strengthened.*

*Sorumlu yazar, e-mail: eliftugbagungor35@gmail.com
DOI: 10.29109/gujsc.1565119

GU J Sci, Part C, 13(2): 665-679 (2025)

Gazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Dergisi
PART C: TASARIM VE TEKNOLOJİ

Gazi University
Journal of Science
PART C: DESIGN AND TECHNOLOGY

http://dergipark.gov.tr/gujsc

Seviye 3 ve Seviye 4 Otonom Araçlarda FMEA Yöntemi Kullanılarak Risk Öncelik Değerlendirmesi Yapılması

Elif Tuğba GÜNGÖR[1*] Mustafa KURT[2]

[1]*Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kazaların Çevresel ve Teknik Araştırması Anabilim Dalı, Ankara, Türkiye*

[2]*OSTİM Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye*

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 11/10/2024
Düzeltme: 11/05/2025
Kabul: 12/05/2025

Anahtar Kelimeler

Otonom Araçlar, Risk Analizi, Hata Türü ve Etkileri Analizi (FMEA), Otonomi Seviyeleri, NHTSA

Öz

Hata Türü ve Etkileri Analizi (FMEA), gözlemlenen bir sistemde meydana gelme olasılığı bulunan hataların öngörülmesi, bu hataların potansiyel etkilerinin belirlenmesi ve buna bağlı olarak spesifik önleyici tedbirlerin geliştirilmesi amacıyla kullanılan sistematik bir analiz yöntemidir. FMEA sürecinde, olasılık (İ), şiddet düzeyi (Ş) ve tespit edilebilirlik (T) parametrelerine göre farklı değerlendirme kriterlerine sahip ölçekler oluşturulmakta; incelenmesi hedeflenen hata faktörlerinin her biri bu parametrik ölçeklere uygun değerlerle derecelendirilmektedir. Bu değerlerin çarpılması sonucunda, her bir hata faktörü için Risk Öncelik Değeri (RÖD) hesaplanmakta ve elde edilen RÖD değerlerine göre hata faktörleri, öncelik ve önem sıralamasına tabi tutulmaktadır. Bu çalışmada, Seviye 3 ve Seviye 4 otonom sürüş sistemlerine (ADS) sahip araçlara ilişkin A.B.D.'ye bağlı Ulusal Karayolu Trafik Güvenliği İdaresi (NHTSA) tarafından kayıt altına alınmış toplam 614 kaza raporu dosyası kullanılmıştır. Bu rapor dosyalarındaki vakalar, nitel analiz yaklaşımı kullanılarak incelenmiş ve risk analizi açısından anlamlı olan açık kodlama bilgileri elde edilmiştir. Elde edilen açık kodlar, eksensel kodlama ve seçici kodlama yaklaşımlarıyla tekrar gözden geçirilmiş; bu süreçte FMEA analiz yöntemi kapsamında temel parametreler olan İhtimal (İ), Şiddet düzeyi (Ş) ve Tespit edilebilirlik (T) tahmini kodlamaları oluşturulmuştur. Son olarak, her bir vaka için elde edilen kodların istatistiksel dağılımları hesaplanmıştır. Yapılan nitel analiz sonucunda, kaza raporlarında yer alan risk faktörlerinin üç ana boyutta toplandığı belirlenmiştir. Bu çalışma kapsamında, söz konusu üç ana boyut ve bu boyutlara ait alt boyutlardaki risk faktörlerinin ayrıntılı analizi gerçekleştirilmiştir.

Risk Priority Assessment Using the FMEA Method in Level 3 and Level 4 Autonomous Vehicles

Article Info

Research article
Received: 11/10/2024
Revision: 11/05/2025
Accepted: 12/05/2025

Keywords

Autonomous Vehicles, Risk Analysis, Failure Mode and Effects Analysis (FMEA), Autonomy Levels, NHTSA

Abstract

The Failure Modes and Effects Analysis (FMEA) is a systematic analysis method used to predict potential failures that may occur within an observed system, identify the potential effects of these failures, and develop specific preventive measures accordingly. During the FMEA process, scales with different evaluation criteria are created based on the parameters of probability (P), severity (S), and detectability (D). Each failure factor targeted for examination is rated according to these parametric scales with appropriate values. By multiplying these values, the Risk Priority Number (RPN) for each failure factor is calculated, and the failure factors are prioritized based on the obtained RPN values. In this study, a total of 614 accident report files recorded by the National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA) of the United States, involving vehicles equipped with Level 3 and Level 4 autonomous driving systems (ADS), were utilized. The cases in these report files were examined using a qualitative analysis approach, and open coding information deemed meaningful in terms of risk analysis was obtained. The obtained open codes were re-examined through axial coding and selective coding approaches; during this process, the basic parameters within the scope of the FMEA analysis method, namely Probability (P), Severity (S), and Detectability (D), were estimated and coded. Finally, the statistical distributions of the codes obtained for each case were calculated. As a result of the qualitative analysis, it was determined that the risk factors presented in the accident reports were grouped into three main dimensions. Within the scope of this study, a detailed analysis of these three main dimensions and the sub-dimensions of risk factors associated with them was conducted.

*Sorumlu yazar, e-mail: eliftugbagungor35@gmail.com
DOI: 10.29109/gujsc.1565119

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Otonom araçlar, diğer bir deyişle sürücüsüz araçlar, insan müdahalesinin farklı seviyelerde (çok, orta, az, çok az, tamamen insansız) gerçekleştiği hareket kabiliyetine sahip sistemlerdir. Bu araçlar; radar, LİDAR, sonar, küresel konumlama sistemi (GPS), odyometre ve ataletsel ölçüm birimlerinden elde edilen verileri kullanarak çalışmaktadır. Sinyalizasyon verilerini işleyen bu sistem, çeşitli sensörlerden gelen verileri bir araya getirerek analiz eden ve aracı yönlendiren akıllı yazılımlara komuta eden bir elektronik bilgisayar ünitesine dayanmaktadır.

Otonom araçlar, ulaşım ve nakliye alanında yeni ufuklar açmakla birlikte, özellikle ulaşım altyapısında meydana gelecek yeniliklerle lojistik faaliyetlere önemli katkılar sağlayabileceği değerlendirilmektedir. Modern şehirleşmenin vazgeçilmez bir unsuru olan akıllı taşımacılık ve ulaşım alanında güçlü bir kuvvet çarpanı olarak kabul edilen otonom araçların, yeterli altyapı ve yasal düzenlemeler yapılmaksızın kullanıma geçirilmesi durumunda ciddi güvenlik riskleri oluşturma potansiyeli bulunmaktadır. Bu bağlamda, otonom araçların sürüş sistemlerine ilişkin standartların belirlenmesinde, havacılık sektöründe uygulanan kurallara benzer, kapsamlı ve bağlayıcı düzenlemelerin yapılması gerektiği savunulmaktadır [1].

Otonom araçların seviyeleri, normal sürüş esnasında sürücünün müdahaleleri ile aracın bilgisayar destekli karar verme mekanizmasının gerçekleştirdiği otonom manevraların oranına göre belirlenmektedir. Sürücü müdahalesinin tamamen ortadan kaldırıldığı bir sürüş ortamında, aracın kontrolü tamamen bilgisayar sistemine bırakıldığında, bu sürüşe "tam otonom sürüş" denmektedir.

Yeterli ulaşım altyapısının oluşturulması, etkili yasal düzenlemelerin hayata geçirilmesi ve en önemlisi toplumsal algı ile bilinç düzeyinde farkındalık yaratılması sayesinde, otonom araçların ulaşım güvenliğini ve konforunu artıracağı öngörülmektedir. Bu bağlamda, çevre kirliliğini azaltarak ve trafik kazası riskini düşürerek daha sürdürülebilir ve yeşil bir toplumun oluşumuna katkı sağlayabileceği değerlendirilmektedir [2].

Bu makalede, ikinci bölümde otonom araçlar ve çalışmada kullanılan FMEA yöntemine ilişkin literatür taramasına yer verilmiştir. Üçüncü bölümde, çalışmanın metodolojik yaklaşımı şematik olarak sunulmuş; dördüncü bölümde ise FMEA yöntemi kullanılarak belirlenen kaza risk faktörleri ve bu analizlerden elde edilen bulgular ayrıntılı olarak ele alınmıştır. Son olarak, beşinci bölümde, çalışmadan elde edilen sonuçların analizi özetlenerek değerlendirmeler sunulmuştur.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI (LITERATURE SURVEY)

Bu bölümde çalışmada kullanılan FMEA yöntemi ve otonom araç sürüş seviyeleri ile ilgili literatür araştırması yapılmıştır.

2.1. FMEA (Hata Türü ve Etkileri Analizi) (FMEA (Failure Mode and Effects Analysis))

FMEA (Hata Türü ve Etkileri Analizi), ilk kez 9 Kasım 1949 tarihinde Amerikan ordusu tarafından, silah sistemlerinde meydana gelebilecek hataların nedenlerini ve bu hataların teçhizat, malzeme ve insan üzerindeki olası etkilerini incelemek amacıyla bilimsel bir karar destek mekanizması olarak kullanılmıştır. Bu yöntem, potansiyel kaza veya kırımları öngörerek önleyici tedbirlerin alınmasına katkı sağlamıştır. Askerî uygulamalarda sağladığı etkinlik ile dikkat çeken FMEA, 1960-1965 yılları arasında NASA tarafından yürütülen Ay yolculuğu projelerinde de kullanılarak uzay araştırmalarında önemli bir rol oynamıştır.

Savunma, güvenlik ve uzay araştırmaları alanlarında yüksek verimliliği kanıtlanan FMEA, zamanla endüstriyel süreçlerde de uygulanmaya başlanmıştır. Özellikle 1970-1975 yılları arasında ABD uçak sanayinde, 1972 yılında Ford Motor üretim hattında ve 1975 yılında ABD'li bilgisayar üreticileri ile Japon NEC teknoloji firmasında etkin bir şekilde kullanılmıştır. 1988 yılında ise Chrysler, Ford ve General Motors tarafından genel bir standart olarak benimsenmiş ve günümüzde QS 9000, ISO/TS 16949, ISO 9001:2000 ve diğer kalite yönetim sistemlerinde zorunlu bir uygulama haline gelmiştir [3].

Günümüzde FMEA, otomotiv sektörü başta olmak üzere gıda, metal, deniz taşıtları imalatı, yazılım geliştirme ve nükleer tasarımlar gibi birçok farklı alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu geniş uygulama yelpazesi, FMEA'nın süreç güvenliği ve risk yönetimi açısından sağladığı önemli katkılardan kaynaklanmaktadır.

2.2. Otonom Araç Sürüş Seviyeleri (Autonomous Vehicle Driving Levels)

Otomotiv Mühendisleri Topluluğu (SAE - Society of Automotive Engineers) tarafından tanımlanan ve dünya genelinde kabul gören altı otomasyon

seviyesi bulunmaktadır (L0'dan L5'e kadar). J3016 Araç Otomasyonu Esasları doğrultusunda yapılan bu sınıflandırma, sürüş esnasında araç ile sürücü arasındaki sorumluluk dağılımına göre belirlenmiştir [4].

Şekil 1'de gösterilen Seviye 0 (L0), herhangi bir otomasyon teknolojisine sahip olmayan araçları tanımlamaktadır. Bu seviyede, hızlanma, vites değiştirme ve direksiyon kontrolü gibi temel sürüş dinamikleri tamamen sürücü tarafından yönetilmektedir.

Seviye 1 (L1) araçlar ise otonom araç sistemlerine geçişte teknolojik serüvenin ilk adımını temsil etmektedir. Bu seviyedeki araçlar, şerit takip sistemi, fren asistanı ve hız sabitleyici gibi temel sürücü destek sistemlerini içermekte olup, sürücünün aktif kontrolünü kısmen desteklemektedir.

Seviye 2 (L2) araçlar, hızlanma, yavaşlama ve direksiyon kontrolü gibi temel sürüş fonksiyonlarını sürücü müdahalesi olmadan gerçekleştirebilen araçları ifade etmektedir. Ancak bu seviyedeki araçlarda, çevresel koşulların takibi hala sürücü tarafından yapılmaktadır.

Seviye 3 (L3) araçlar ise çevresel koşulları kısmen kontrol altına alabilmekte ve engeller karşısında frenleme yapabilme yeteneğine sahiptir. Bununla birlikte, yol engelleri veya olumsuz hava koşulları gibi durumlarda araç tepki veremediğinde sürücünün müdahalesi zorunlu hale gelmektedir.

Seviye 4 (L4) araçlar, otonom araç endüstrisinin ulaştığı en gelişmiş seviyelerden birini temsil etmektedir. Bu seviyede, sürüşün tüm aşamaları otonom sistem tarafından kontrol edilmektedir. Ancak, dış faktörlerden kaynaklanan (çevresel koşullar, diğer araçların hareketleri vb.) beklenmedik durumlarda sistemin tepki verme yeteneği henüz tam anlamıyla güvenilir değildir.

Seviye 5 (L5) araçlar ise otonom araç teknolojisinin nihai hedefi olarak kabul edilmektedir. Bu seviyedeki araçların, sürücü müdahalesi olmaksızın her türlü arazi, hava ve engel koşuluna uyum sağlayabilmesi amaçlanmakta ve bu doğrultuda geliştirme çalışmaları devam etmektedir.

Günümüzde, Seviye 5 otonom araçların henüz trafikte aktif olarak kullanılmaması ve Seviye 0-2 arası otonom araçların yaygın kullanımı nedeniyle bu seviyelere ilişkin literatürde çok sayıda çalışma bulunmaktadır. Bu bağlamda, bu makale, daha yüksek otomasyon seviyelerini temsil eden Seviye 3 ve Seviye 4 otonom araç kazalarının risk değerlendirmesine odaklanmaktadır.



Şekil 1. SAE otonomluk seviyeleri [4] (SAE autonomy levels [4])

3. MATERYAL ve METOD (MATERIAL and METHOD)

3.1. Materyal (Material)

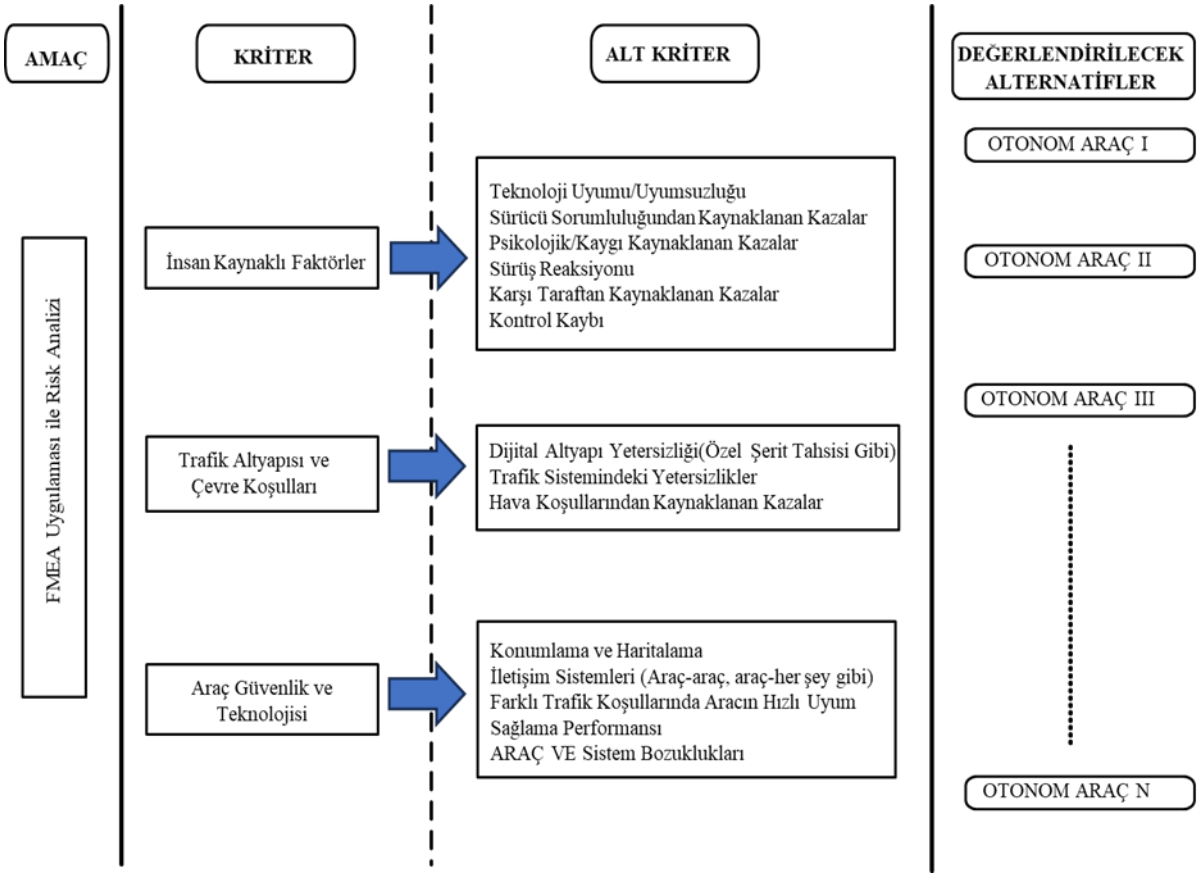
Bu çalışmada, A.B.D. Ulusal Karayolu Trafik Güvenliği İdaresi'ne (NHTSA) ait resmi web sitesi olan NHTSA adresinden (erişim tarihi: Şubat 2024) elde edilen ADS sistemi araçlarına ilişkin kaza raporu dosyası, FMEA analizinde kullanılmıştır.

Söz konusu dosyada kayıtlı bulunan 614 vaka, nitel analiz yaklaşımı kullanılarak incelenmiş ve risk analizi açısından anlamlı olan açık kodlama bilgileri (risk faktörlerini ifade eden kavram ve kelime öbekleri) elde edilmiştir.

Bu açık kodlar daha sonra tekrar gözden geçirilerek sırasıyla eksensel kodlama ve seçici kodlama [5, 6] yaklaşımları ile analiz edilmiştir. Bu süreçte, FMEA analiz yönteminin temel parametreleri olan İhtimal (İ), Şiddet düzeyi (Ş) ve Tespit edilebilirlik (T) tahmini kodlamaları oluşturulmuştur. Kodlama bilgileri elde edildikten sonra, her bir vaka için bu kodların istatistiksel dağılımları hesaplanmıştır.

3.2. Metod (Method)

Bu çalışma ile Seviye 3 ve Seviye 4 otonom sürüş sistemlerine etki eden risk faktörlerinin belirlenmesi hedeflenmiştir. Bu kapsamda, risk faktörü olarak değerlendirilen kriterler ve alt kriterler tanımlanarak, kaza ve yaralanmalara yol açabilecek düzeydeki hataların tespit edilmesi amacıyla risk değerlendirmesi yapılması amaçlanmıştır. Çalışmada kullanılacak metodolojiye ilişkin akış diyagramı ise Şekil 2'de sunulmuştur.



Şekil 2. FMEA Uygulaması Akış Diyagramı (FMEA Application Flow Diagram)

4. FMEA ANALİZİ (FMEA ANALYSIS)

FMEA (Hata Türü ve Etkileri Analizi), bir sistem, süreç veya ürün için olası hata durumlarını ve bu hataların potansiyel etkilerini tanımlayan bir risk yönetimi yöntemidir. Bu yöntemin temel amacı, olası hata durumlarını önceden belirlemek, bu hataların muhtemel etkilerini değerlendirmek ve gerçekleşmelerini önlemeye yönelik gerekli önlemler için bilgi sağlamaktır.

FMEA, bir sistemin donanım ve bileşenlerinde meydana gelebilecek bir hatanın tüm sisteme etkilerini ve potansiyel tehlikelerini, risk öncelik sırasına göre derecelendiren bir yaklaşımdır. Diğer bir deyişle, bu yöntem, bir sistemin ana ve alt bileşenlerinin birbiriyle uyumunu ve bu bileşenlerde meydana gelebilecek arıza durumlarının sistem üzerindeki etkilerini analiz eder [7].

FMEA, meydana gelebilecek hatalara karşı önleyici tedbirlerin alınmasına olanak tanıyan etkili bir

yöntemdir. Benzer şekilde, sistem bileşen hatalarının son kullanıcıya olan etkilerini tüketici perspektifinden ele alarak değerlendirme yapar [8]. FMEA'nın temel adımları aşağıdaki gibi sıralanabilir:

Sistem veya Sürecin Tanımlanması:

Analiz edilecek sistemin, ürünün veya sürecin kapsamı belirlenmekte ve bu kapsam detaylı bir şekilde tanımlanmaktadır. Bu adımda, analiz sürecine yönelik sınırların ve ana bileşenlerin belirlenmesi önem arz etmektedir.

Hata Olaylarının Belirlenmesi ve Etkilerin Değerlendirilmesi:

Bu aşamada, sistemde veya süreçte meydana gelebilecek potansiyel hata olayları tanımlanmakta ve bu hataların nasıl gerçekleşeceği detaylandırılmaktadır. Belirlenen her hata olayının olası etkileri sistematik bir biçimde değerlendirilmekte; bu değerlendirme kapsamında, etki düzeyi performans, güvenlik ve maliyet gibi ölçütler dikkate alınarak analiz edilmektedir.

Risk değerlendirme süreçlerinde kullanılan derecelendirme ölçekleri, genellikle risk faktörlerinin nitel ve nicel olarak sınıflandırılmasını sağlamak amacıyla oluşturulmaktadır. Bu ölçeklerin hesaplanmasında, risk olasılığı, risk şiddeti ve tespit edilebilirlik gibi temel bileşenler dikkate alınmaktadır. Derecelendirme ölçekleri çoğunlukla sayısal değerlerle ifade edilmekte olup, her bir bileşen için ayrı ayrı belirlenmektedir.

Özellikle FMEA yönteminde, risk olasılığı, risk şiddeti ve tespit edilebilirlik genellikle 1 ile 10 arasında derecelendirilmektedir [9]. Bu sayısal değerler; bir olayın meydana gelme olasılığı, gerçekleşmesi durumunda yaratacağı etkinin büyüklüğü ve hatanın tespit edilme olasılığına göre belirlenmektedir. Derecelendirme sürecinde, her bir kriterin tanımlayıcı özellikleri önceden belirlenmiş kategorilere ayrılmakta ve bu kategoriler saha deneyimleri, uzman görüşleri ve literatürde yer alan standartlar temel alınarak oluşturulmaktadır.

Sonuç olarak, derecelendirme ölçeklerinin hesaplanması, risk bileşenlerinin sayısal olarak ifade edilmesiyle sistematik bir yaklaşımla gerçekleştirilmektedir. Bu sayede, risklerin objektif olarak karşılaştırılması ve önceliklendirilmesi mümkün hale gelmektedir [9,10].

Risk olasılığı, risk şiddeti ve tespit edilebilirlik hesaplama ve değerlendirme işlemleri için kullanılan kriter değerleri, sırasıyla Tablo 1, Tablo 2 ve Tablo 3'te sunulmuştur. Bu tablolar, her bir kriterin değerlendirme ölçeklerini ve derecelendirme aralıklarını detaylı bir şekilde göstermektedir.

Tablo 1. FMEA analizi etki sınıflandırması (FMEA analysis impact classification)

Etki	Şiddetin Etkisi	Derece
Uyarısız Gelen Tehlike	Felakete yol açabilecek etkiye sahip ve uyarısız gelen potansiyel hata	10
Uyarısız Gelen Tehlike	Yüksek hasara ve toplu ölümlere yol açabilecek etkiye sahip ve uyarısız gelen potansiyel hata	9
Çok Yüksek	Sistemin tamamen hasar görmesini sağlayan yıkıcı etkiye sahip ağır yaralanmalara, 3.derece yanık, akut ölüm vb. etkiye sahip hata	8
Yüksek	Ekipmanı tamamen hasar görmesine sebep olan ve ölüme, zehirlenme, 3.derece yanık, akut ölümcül hastalık vb. etkiye sahip hata	7
Orta	Sistemin performansını etkileyen, uzuv ve organ kaybı, ağır yaralanma, kanser vb. yol açan hata	6
Düşük	Kırık, kalıcı küçük iş görmemezlik, 2.derece yanık, beyin sarsıntısı vb. etkiye sahip hata	5

Çok Düşük	İncinme, küçük kesik ve sıyrıklar, ezilmeler vb. hafif yaralanmalar ile kısa süreli rahatsızlıklara neden olan hata	4
Küçük	Sistemin çalışmasını yavaşlatan hata	3
Çok Küçük	Sistemin çalışmasında kargaşaya yol açan hata	2
Yok	Etki yok	1

Tablo 2. Hata olasılığı ve değerlendirme dereceleri (Error probability and evaluation levels)

Hata Olasılığı	**Hata Kümülatif Sayısı**	**Derece**
Çok Yüksek: Kaçınılmaz Hata	1/2 ‘den fazla	10
	1/3	9
Yüksek: Tekrar Tekrar Hata	1/8	8
	1/20	7
Orta: Ara Sıra Olan Hata	1/80	6
	1/400	5
	1/2.000	4
Düşük: Nispeten Az Olan Hata	1/15.000	3
	1/150.000	2
Pek Az: Olası Olmayan Hata	1/1.500.000’den düşük	1

Tablo 3. Olası hatanın tespit edilebilirlik düzeyleri (Possible error detection levels)

Tespit Edilebilirlik	**Potansiyel ve Takip Eden Hatanın Nedeninin Keşfedilebilirliği**	**Derece**
Tespit Edilemez	Mümkün değil	10
Çok Az	Çok uzak	9
Az	Uzak	8
Çok Düşük	Düşük	7
Düşük	Çok düşük	6
Orta	Orta	5
Yüksek Ortalama	Yüksek ortalama	4
Yüksek	Yüksek	3

Çok Yüksek	Çok yüksek	2
Hemen Hemen Kesin	Kesinlikle tespit edilebilir	1

Risk Önceliklendirme:

Her bir hata olayının risk seviyesi değerlendirilerek, olası risklerin sıralanması yapılmaktadır. Risk seviyesi, üç ana faktöre dayanmaktadır: hata olayının gerçekleşme olasılığı (frekansı), bu hatanın etkisinin şiddeti (ciddiyeti) ve hata olayının tespit edilme zorluğu. Bu üç temel faktörün çarpımı, Risk Öncelik Değeri'ni (R.Ö.D.) oluşturmaktadır.

Matematiksel olarak, Risk Öncelik Değeri aşağıdaki formülle ifade edilmektedir:

R.Ö.D. =İhtimal×Şiddet×Tespit Edilebilirlik

Yukarıda, Tablo 1-3'te verilen kriter değerlerine göre hesaplanan risk önceliklendirme puanı, 1 ile 1000 arasında bir değer alabilmektedir. Bu puan aralığı, hata olayının olasılığı, şiddeti ve tespit edilebilirlik düzeylerinin çarpımı ile elde edilmektedir. Risk önceliklendirme puanına bağlı olarak tanımlanan risk öncelik kategorileri ise Tablo 4'te sunulmuştur.

Tablo 4. Risk öncelik değeri için kriter kararları (Criteria decisions for risk priority value)

Sıra	Risk Öncelik Değeri	Karar
1	01 -50 arası	Düşük Riskli
2	50 -100 arası	Orta Riskli
3	100 -200 arası	Yüksek Riskli
4	200 -1000 arası	Çok Yüksek Riskli

Önlemler ve İyileştirmeler:

Bu aşamada, risk öncelik puanı dikkate alınarak, her bir hata olayı için uygulanabilecek iyileştirme önerileri geliştirilir. Bu süreçte, uzman görüşleri ve süreç bilgisi kritik bir rol oynamaktadır. Yapılan değerlendirmeler sonucunda, risk seviyesini azaltmak veya tamamen ortadan kaldırmak amacıyla alınacak önlemler belirlenir.

Takip ve İzleme:

Alınan önlemlerin etkinliğini değerlendirmek amacıyla uygulama sonuçları düzenli olarak izlenir ve takip edilir. Bu izleme sürecinde, FMEA analizinin güncel verilerle yeniden yapılması, önerilen değişikliklerin etkisini görmek ve süreç iyileştirmelerini doğrulamak açısından önemli katkı sağlar. Bu sayede, risk yönetimi sürecinde sürekli iyileştirme sağlanmış olur.

FMEA (Hata Türü ve Etkileri Analizi), özellikle üretim endüstrisi başta olmak üzere, hata olaylarının gerçekleşme olasılığı bulunan tüm süreçlerde uygulanabilir bir yöntemdir [10]. Literatürde, otomotiv, havacılık, elektronik ve üretim sektörleri gibi birçok farklı endüstride FMEA uygulamalarına yönelik çalışmalar bulunmaktadır. Bu yöntemin temel amacı, olası hataların önceden belirlenmesi ve bu hataların etkilerinin en aza indirilmesiyle daha güvenilir ve verimli sistemler, süreçler veya ürünler oluşturmaktır.

FMEA analiz sürecinde, genellikle çalışma sistemindeki muhtemel hatalar tespit edilmekte; bu hataların nedenleri, risk düzeyleri ve potansiyel etkileri analiz edilerek ortadan kaldırılmaya çalışılmaktadır. Burada dikkat edilmesi gereken en önemli nokta, FMEA çalışmalarının ne zaman başlatılması gerektiğidir. FMEA'nın temel amacı, bilinen ve potansiyel sorunları müşteriye ulaşmadan önce belirlemek ve gerekli önlemleri almaktır. Bu nedenle, FMEA çalışmalarının mümkün olan en erken aşamada başlatılması büyük önem taşımaktadır.

FMEA analizinin başlatılabileceği bazı durumlar ve analizin sonlandırılma koşulları, Stamatis (2003) tarafından aşağıda belirtilmiştir [10,11]:

Çalışmanın başlatılabileceği durumlar:

• Yeni sistemler, tasarımlar, süreçler veya hizmetler oluşturulurken: Sistem, ürün veya süreç tasarımında yenilikçi yaklaşımlar geliştirildiğinde, olası hata türlerini ve etkilerini önceden belirlemek için FMEA çalışması yapılması gereklidir.

• Mevcut sistem, tasarım, ürün, süreç veya hizmet değiştirilirken: Halihazırda var olan bir yapıda yapılacak değişiklikler, risk profillerini etkileyebileceği için, bu değişikliklerin potansiyel hatalar açısından analiz edilmesi önemlidir.

• Mevcut koşullardaki sistem, tasarım, ürün, süreç veya hizmet için yeni uygulamalar geliştirildiğinde: Sistemin mevcut işleyişine eklenen yeni uygulamalar, olası risklerin yeniden değerlendirilmesini gerektirmektedir.

• Mevcut koşullardaki sistem, tasarım, ürün, süreç veya hizmetlerin iyileştirilmesine karar verildiğinde: İyileştirme çalışmaları kapsamında, mevcut yapıların risklerinin analiz edilmesi ve yeni düzenlemelerin potansiyel etkilerinin değerlendirilmesi gerekmektedir.

FMEA analizinin sonlandırılabileceği belirli durumlar bulunmaktadır. Stamatis (2003) tarafından belirtilen bu koşullar aşağıdaki gibi sıralanmıştır [11]:

• Sistem FMEA: Tüm donanım ve tasarım unsurlarının kesin olarak belirlendiği ve karar verildiği noktada çalışma sonlandırılabilir.

• Tasarım FMEA: Üretim başlangıcının kesin tarihinin belirlenmiş olduğu durumda, tasarım sürecine yönelik FMEA çalışması tamamlanabilir.

• Süreç FMEA: Tüm süreçlerin kararlaştırıldığı, değerlendirildiği ve kritik ile önemli özelliklerin kontrol planlarına aktarıldığı noktada çalışma sonlandırılabilir.

• Hizmet FMEA: Sistem tasarımı ve kişisel görevlerin tanımlandığı, değerlendirildiği ve önemli özelliklerin kontrol planlarına aktarıldığı noktada hizmet FMEA süreci tamamlanabilir.

5. BULGULAR ve TARTIŞMA (FINDINGS and DISCUSSION)

FMEA yöntemi ile gerçekleştirilen nitel analiz sonucunda, kaza raporlarına göre risk faktörlerinin üç ana boyutta (seçici kodlama) toplandığı belirlenmiştir. Bu kodlama kapsamında belirlenen ana boyutlar; insan kaynaklı faktörler, trafik altyapısı ve çevre koşullarına ilişkin faktörler ile araçların güvenlik ve teknolojik özelliklerinden kaynaklanan faktörlerdir.

Araştırmada, FMEA analiz metodolojisine geçilmeden önce, nitel analiz yaklaşımı kullanılarak belirlenen risk faktörlerinin betimleyici analiz çerçevesinde genel istatistikleri sunulmuştur. FMEA analizine hazırlık niteliğinde değerlendirilen bu aşamada, özellikle otonom araçların kaza riski açısından genel bir durum değerlendirmesi yapılmıştır.

Tablo 5. Otonom araçlarda kaza risk faktörleri (Accident risk factors in autonomous vehicles)

Kaza/Risk Faktörleri	**Sayı**	**Yüzde**
İnsan kaynaklı faktörlerden kaynaklanan kazalar		
Teknoloji uyumu/uyumsuzluğu	9	1,5
Sürücü sorumluluğundan kaynaklanan kazalar	118	19,2
Psikolojik/kaygı kaynaklanan kazalar	4	0,7
Sürüş reaksiyonu	42	6,8
Karşı taraftan kaynaklanan kazalar	*513*	*83,6*
Kontrol kaybı	13	2,1
Trafik altyapısı ve çevre koşullarından kaynaklanan kazalar		

Dijital altyapı yetersizliği (özel şerit tahsisi gibi)	1	0,2
Trafik sistemindeki yetersizlikler	5	0,8
Hava koşullarından kaynaklanan kazalar	*84*	*13,7*
Araç güvenlik ve teknolojisinden kaynaklanan kazalar		
Konumlama ve haritalama	0	0,0
İletişim sistemleri (Araç-araç, araç-altyapı, araç-her şey gibi)	13	2,1
Farklı trafik koşullarında aracın hızlı uyum sağlama performansı	10	1,6
Araç ve sistem bozuklukları	*63*	*10,3*
Toplam	614	***100,0**

** 614 olayın tümü incelenmiştir.*

Kaza tutanaklarında yapılan nitel analiz sonucunda, fiili olarak raporlanan risk faktörlerinin sıklık dağılımları Tablo 5'te sunulmuştur. Trafik kazalarının doğası gereği, her bir kaza için birden fazla risk faktörü etkili olabilmektedir. Bu durum, risk faktörlerinin ayrı ayrı yüzde frekanslarının toplamının %100'ün üzerinde olmasını doğal bir sonuç haline getirmektedir.

Risk faktör boyutlarından bağımsız olarak, karşı taraftan kaynaklanan risk faktörlerinin yüksek bir frekansa (%83,6) sahip olduğu gözlemlenmiştir. Bu bulgu, otonom araçların otomasyon sistemlerinin genel anlamda "güvenilebilir" olduğunu ve gelecekte bu sistemlerin daha da geliştirilerek yaygınlaşma potansiyeline sahip bulunduğunu göstermektedir.

Boyutlar ayrı ayrı incelendiğinde, en önemli risk faktörünün insan kaynaklı faktörler olduğu tespit edilmiştir. Trafik altyapısı ve çevre koşullarından kaynaklanan kazalar ile araç güvenlik ve teknolojisinden kaynaklanan kazalar ise birbirine oldukça yakın bir frekans dağılımına sahiptir (%14-15). Bu sonuç, mevcut durumda otonom araçlarda güvenlik düzeyini artırmak için öncelikli olarak insan faktörü üzerinde çalışılması gerektiğini göstermektedir.

İnsan faktörü ele alınırken, otonom araçları "kullanan" sürücülerle birlikte, trafik sistemine dahil olan diğer araç sürücüleri ve trafik alanını kullanan yayaların da dikkate alınması büyük önem taşımaktadır. Bu yaklaşım, güvenlik seviyesini artırmaya yönelik kapsamlı bir stratejinin temelini oluşturmaktadır.

Trafik altyapısı ve çevre koşullarından kaynaklanan kazalar boyutunda, hava koşullarının en önemli risk faktörü olduğu tespit edilmiştir. Bu bağlamda, otonom araçların teknolojik olarak geliştirilmesi ve/veya trafik altyapısının otonom araçlara uyumlu hale getirilmesi sürecinde birinci öncelikli konunun, hava koşullarının otonom araçların trafik davranışları üzerindeki etkilerinin analiz edilmesi olduğu değerlendirilmektedir. Bu doğrultuda, yapılacak çalışmaların analiz bulgularına dayalı olarak yönlendirilmesi büyük önem arz etmektedir.

Araç güvenlik ve teknolojisinden kaynaklanan kazalar boyutunda ise en önemli risk faktörünün, araç ve sistem bozuklukları olduğu belirlenmiştir. Otonom araçların otomasyon sistemlerinin simülasyon ortamlarında detaylı bir şekilde test edildiği ve gerçek kullanım verilerinin Ar-Ge birimlerinde değerlendirildiği göz önüne alındığında, araç sistemlerinin daha kapsamlı bir yaklaşımla ele alınması gerekliliği ortaya çıkmaktadır. Bu kapsamda, otomasyon sistemlerinin sahadaki koşullarla uyumlu hale getirilmesi ve olası arıza senaryolarının daha geniş bir çerçevede değerlendirilmesi gerektiği sonucuna varılmaktadır.

Tablo 6. Otonom araçlarda kazanın şiddet düzeyi (Accident severity level in autonomous vehicles)

Şiddet Düzeyi	Sayı	Yüzde
Araç/Araçlarda/Kazaya Dahil Olan Diğer Unsurlarda Meydana Gelen Sonuçların Şiddeti		
Çok düşük - 1	0	0,0
2	5	0,8
3	*314,0*	*51,1*
4	*128,0*	*20,8*
5	*112,0*	*18,2*
6	42,0	6,8
7	11,0	1,8
8	2,0	0,3
İnsan Sağlığında Meydana Gelen Sonuçların Şiddeti		
Çok düşük - 1	2,0	0,3
2	*463,0*	*75,4*
3	*103,0*	*16,8*
4	4,0	0,7
5	19,0	3,1
6	6,0	1,0
7	5,0	0,8
8	10,0	1,6
9	2,0	0,3
Toplam	**614,0**	**100,0**

FMEA analizinin önemli işlem adımlarından biri, meydana gelen kazaların şiddet düzeyinin değerlendirilmesidir. Bu çalışmada, otonom araçlarda meydana gelen kazaların şiddet düzeyi iki farklı bakış açısıyla ele alınmıştır. Birinci analizde, kazaya karışan araç veya diğer unsurlar açısından risk faktörünün şiddeti incelenmiş; ikinci analizde ise kaza riskinin insan sağlığı üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Bu yaklaşımla, trafik kazalarının doğasına uygun bir sınıflandırma yapılması hedeflenmiştir. İlgili analiz sonuçları Tablo 6'da sunulmuştur.

Araç ve diğer unsurlarda meydana gelen sonuçların şiddeti incelendiğinde, şiddet frekansının 3 ile 5 arasında yoğunlaştığı gözlemlenmiştir. Tanımlanan şiddet skalasında, 5'in orta düzey şiddeti temsil ettiği dikkate alındığında, araçlarda meydana gelen sonuçların genel olarak düşük ile orta düzey arasında bir dağılım gösterdiği anlaşılmaktadır. Bu

durum, otonom araç kazalarının çoğunlukla ciddi sonuçlar doğurmadığını ancak yine de belirli bir risk seviyesi taşıdığını göstermektedir.

İnsan sağlığı üzerinde meydana gelen sonuçların şiddeti incelendiğinde, şiddet frekansının 2 ile 3 arasında yoğunlaştığı gözlemlenmiştir. Bu bulgu, otonom araçlarda meydana gelen kazaların insan sağlığı açısından düşük şiddetli bir risk faktörü oluşturduğunu göstermektedir.

Elde edilen veriler, otonom araçların şehir içi trafiğinde karşılaştıkları kazalardan elde edilmiştir. Bu bağlamda, aynı trafik koşullarında otonom olmayan araçlarla meydana gelen kazalar için de şiddet analizi yapılarak, otonom araçların trafik güvenliği ile karşılaştırılması mümkündür. Böylece, otonom araçların kullanım güvenilirliği hakkında veriye dayalı yorum yapma olanağı sağlanacaktır.

Tablo 7. Otonom araçlarda meydana gelen kazaların tespit edilebilirlik tahmini (Detectability estimation of accidents occurring in autonomous vehicles)

Kaza Nedeninin Önceden Tespit Edilebilirlik Düzeyi	**Sayı**	**Yüzde**
Kesinlikle tespit edilebilir -1	5	0,8
2	24	3,9
3	38	6,2
4	12	2,0
5	62	10,1
6	13	2,1
7	21	3,4
8	*436*	*71,0*
9	3	0,5
Toplam	**614**	**100,0**

Otonom araçlarda meydana gelen kazaların tespit edilebilirlik tahmini, Tablo 7'de sunulmuştur. Elde edilen bulgulara göre, tespit edilebilirlik tahmini (potansiyel hatanın nedeninin ve sonucunda gerçekleşen kazanın tespiti) 8 olan kazaların oranı %71 olarak belirlenmiştir. Bu bulgu, otonom araçların karıştığı kazaların nedenlerinin önceden tespit edilebilme olasılığının düşük olduğunu göstermektedir.

Kazalarda önceden tespit edilebilirliğin artırılması, hem kazaların önlenmesine yönelik tedbirlerin alınması hem de daha güvenilir bir sürüş ortamının sağlanması açısından kritik öneme sahiptir. Bu bağlamda, otonom araçlarla ilgili kaza risklerinin daha doğru analiz edilebilmesi için daha fazla ve farklı nitelikte verilerin toplanması gerekmektedir.

Sadece kaza verileri ile sınırlı kalmamak adına, uzman değerlendirmeleri, kullanıcı deneyimleri ve otonom araç teknik kontrol verilerinin analiz edilmesi, tespit edilebilirlik tahminini güçlendirecek ve daha güvenilir risk değerlendirmeleri yapılmasına olanak tanıyacaktır. Bu kapsamda, multidisipliner yaklaşımların entegrasyonu, tespit edilebilirlik düzeyini artırmak için önemli bir adım olarak değerlendirilmektedir.

Tablo 8. Araç/araçlarda/kazaya dâhil olan diğer unsurlarda meydana gelen sonuçların risk öncelik analizi
(Risk priority analysis of the consequences of the vehicle/vehicles/other elements involved in the accident)

Kaza/Risk Faktörleri	**İhtimal (İ)**	**Şiddet (Ş)**	**Tespit (T)**	**Risk öncelik değeri (RÖD)**	**Karar**
İnsan kaynaklı faktörlerden kaynaklanan kazalar					
Teknoloji uyumu/uyumsuzluğu	6	4	4	96	Orta
Sürücü sorumluluğundan kaynaklanan kazalar	8	4	4	128	Yüksek
Psikolojik/kaygı kaynaklanan kazalar	6	4	4	96	Orta
Sürüş reaksiyonu	7	4	4	112	Yüksek
Karşı taraftan kaynaklanan kazalar	*10*	*4*	*7*	*280*	*Çok yüksek*
Kontrol kaybı	6	4	5	120	Yüksek
Trafik altyapısı ve çevre koşullarından kaynaklanan kazalar					
Dijital altyapı yetersizliği (özel şerit tahsisi gibi)	4	4	8	128	Yüksek
Trafik sistemindeki yetersizlikler	7	4	6	168	Yüksek
Hava koşullarından kaynaklanan kazalar	8	4	6	192	Yüksek
Araç güvenlik ve teknolojisinden kaynaklanan kazalar					
İletişim sistemleri (Araç-araç, araç-altyapı, araç-her şey gibi)	6	4	6	144	Yüksek
Farklı trafik koşullarında aracın hızlı uyum sağlama performansı	6	4	4	96	Orta
Araç ve sistem bozuklukları	7	4	5	140	Yüksek

Otonom araçların karıştığı trafik kazalarına ilişkin bulgular analiz edilerek elde edilen FMEA risk öncelik analizi sonuçları, araç veya diğer unsurlar için Tablo 8'de sunulmuştur. Risk faktör boyutlarından bağımsız olarak, en yüksek kaza riskinin karşı taraftan kaynaklanan kazalarda olduğu belirlenmiştir. Bu durum, otonom araçların yaygınlaştırılması sürecinde, bu risk faktörünün kontrol altına alınmasının öncelik taşıdığını göstermektedir. Bu bağlamda, kazalara ilişkin tutanakların nitel araştırma yöntemleriyle analiz edilmesi ve karşı tarafın hangi davranışlarının kaza riskini artırdığına dair bulguların ortaya konması önemli bir araştırma alanı olarak öne çıkmaktadır. Elde edilen bulguların, otonom araç teknolojileri geliştiren Ar-Ge laboratuvarları için girdi bilgisi olarak değerlendirilmesi gerekmektedir.

Risk faktörleri detaylı olarak incelendiğinde, insan kaynaklı faktörler boyutunda "teknoloji uyumu/uyumsuzluğu" ile "psikolojik/kaygı kaynaklı" risk faktörlerinin risk önceliğinin diğer faktörlere göre daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. Bu sonuç, günümüz toplumlarında yaygın olarak gözlemlenen teknolojiye hızlı uyum sürecinin, otonom araçlarda da benzer şekilde gerçekleştiğini ortaya koymaktadır. Ayrıca, otonom araç kullanıcılarının psikolojik kaygılarının kaza

nedenleri açısından belirgin bir risk taşımadığı görülmüştür. Diğer bir deyişle, otonom araç kullanıcılarının geleneksel araç kullanıcılarına kıyasla daha fazla kaygı taşımadığı sonucuna varılabilir.

FMEA analizinden elde edilen bir diğer dikkat çekici bulgu, "Farklı trafik koşullarında aracın hızlı uyum sağlama performansı" faktörünün risk önceliğinin düşük olmasıdır. Bu durum, otonom araçların değişen trafik koşullarına hızlı bir şekilde uyum sağlayarak güvenli sürüş sağlama yeteneği ile geliştirildiğini göstermektedir. Bu bulgu, otonom araçların trafik güvenliği açısından yüksek adaptasyon yeteneğine sahip olduğunu kanıtlamaktadır.

Tablo 9. İnsan sağlığında meydana gelen sonuçların risk öncelik değerlendirmesi (Risk priority assessment of human health consequences)

Kaza/Risk Faktörleri	**İhtimal (İ)**	**Şiddet (Ş)**	**Tespit (T)**	**Risk öncelik değeri (RÖD)**	**Karar**
İnsan kaynaklı faktörlerden kaynaklanan kazalar					
Teknoloji uyumu/uyumsuzluğu	6	3	4	72	Orta
Sürücü sorumluluğundan kaynaklanan kazalar	8	2	4	64	Orta
Psikolojik/kaygı kaynaklanan kazalar	6	2	4	48	Düşük
Sürüş reaksiyonu	7	3	4	84	Orta
Karşı taraftan kaynaklanan kazalar	*10*	*2*	*7*	*140*	*Yüksek*
Kontrol kaybı	6	3	5	90	Orta
Trafik altyapısı ve çevre koşullarından kaynaklanan kazalar					
Dijital altyapı yetersizliği (özel şerit tahsisi gibi)	4	2	8	64	Orta
Trafik sistemindeki yetersizlikler	7	3	6	126	Yüksek
Hava koşullarından kaynaklanan kazalar	8	2	6	96	Orta
Araç güvenlik ve teknolojisinden kaynaklanan kazalar					
İletişim sistemleri (Araç-araç, araç-altyapı, araç-her şey gibi)	6	3	6	108	Yüksek
Farklı trafik koşullarında aracın hızlı uyum sağlama performansı	6	3	4	72	Orta
Araç ve sistem bozuklukları	7	3	5	105	Yüksek

Otonom araçların karıştığı trafik kazalarına ilişkin bulgular analiz edilerek elde edilen FMEA risk öncelik analizi sonuçları, insan sağlığı üzerindeki etkiler açısından Tablo 9'da sunulmuştur. Analiz sonuçlarına göre, insan sağlığı açısından "çok yüksek" risk önceliğine sahip herhangi bir faktörün

bulunmaması, otonom araçların insan sağlığı bakımından "güvenilir" kabul edilebilecek bir sürüş sağladığını göstermektedir.

İnsan sağlığı açısından değerlendirildiğinde, karşı taraftan kaynaklanan kazalar faktörünün en yüksek FMEA risk öncelik değerine (140) sahip olduğu belirlenmiştir. Bu bulgu, Tablo 4'te sunulan analiz sonuçları ile uyumlu olup, karşı taraftan kaynaklanan kazaların otonom araçlarda önemli bir risk unsuru olarak öne çıktığını doğrulamaktadır.

Ayrıca, trafik sistemindeki yetersizliklerin de insan sağlığı açısından önemli bir risk faktörü olduğu gözlemlenmiş ve bu bulgu, Tablo 4'te yer alan sonuçlarla tutarlılık göstermektedir. Bu durum, trafik altyapısının yetersizliğinin otonom araçların güvenli sürüş performansı üzerinde belirgin bir etkisi olduğunu ortaya koymaktadır.

6. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Elde edilen bulgular ışığında, önlemler ve iyileştirme çalışmalarının birinci adımının, tespit edilebilirlik alanında atılması gerektiği sonucuna varılmaktadır. Otonom araçların güvenli sürüş performansını artırmak amacıyla, tespit edilebilirlik düzeyinin yükseltilmesi kritik bir gereklilik olarak ortaya çıkmaktadır.

Bunun yanı sıra, trafik altyapısının ve trafikte yer alan diğer unsurların otonom araçlarla uyumlu hale getirilmesi, kaza risklerinin azaltılması açısından önemli bir strateji olarak değerlendirilmektedir. Bu uyumun sağlanması, otonom araçların yaygınlaşması sürecinde trafik güvenliğinin artırılmasına katkı sağlayacaktır.

Takip ve izleme süreci açısından en önemli unsur, otonom araçlara ilişkin kullanım verilerinin elde edilmesidir. Mevcut durumda erişilebilir olan tek açık kaynaklı veri, kaza raporu tutanak bilgileridir. Ancak bu verilerin yetersizliği göz önüne alındığında, otonom araçların kullanımı ve gerçekleştirilen iyileştirme/geliştirme çalışmalarının sonuçları hakkında düzenli veri toplayan veri tabanlarının oluşturulması büyük önem arz etmektedir. Bu tür veri tabanları, hem güvenlik performansının izlenmesine olanak tanıyacak hem de gelecekte yapılacak iyileştirme çalışmalarına bilimsel bir temel oluşturacaktır.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

Bu çalışma Ford OTOSAN Mühendisleri, Gazi Üniversitesi Otomotiv Mühendisliği Bölümü Öğretim Görevlileri, Gaziantep Üniversitesi Otomotiv Teknolojisi Bölümü Öğretim Görevlilerinin katkıları ile tamamlanmıştır. / This study was completed with the contributions of Ford OTOSAN Engineers, Gazi University Automotive Engineering Department Instructors, Gaziantep University Automotive Technology Department Instructors.

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)

***Elif Tuğba GÜNGÖR*:** Çalışma fikrinin oluşturulması, literatür taraması ve metodolojinin belirlenmesi işlemini gerçekleştirmiştir. Veri toplama, analiz süreçleri ve yorumlamalarını yürütmüş, makale taslağı yazımı ve son okuma süreçlerini tamamlamıştır.

She carried out the process of creating the study idea, literature review and determining the methodology. He/she carried out the data collection, analysis processes and interpretations, and completed the article draft writing and final reading processes.

***Mustafa KURT*:** Tüm süreç boyunca bilimsel danışmanlık ve yönlendirmeleri sağlamıştır.

He provided scientific consultancy and guidance throughout the entire 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] Kaur, K., & Rampersad, G. (2018). Trust in driverless cars: Investigating key factors influencing the adoption of driverless cars. Journal of Engineering and Technology Management, 48, 87-96.

[2] Mordue, G., Yeung, A., & Wu, F. (2020). The looming challenges of regulating high level autonomous vehicles. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 132, 174-187.

[3] Durhan, D. (2006). Hata türü ve etkileri analizi (FMEA) ve bir uygulama (Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü).

[4] Akar, F., & Orman, K. (2020). Otonom kara araçlarındaki görüş sistemlerinin incelenmesi.

[5] Moghaddam, A. (2006). Coding issues in grounded theory. The Qualitative Report, 16(1), 52-66.

[6] MWilliams, M., & Moser, T. (2019). The art of coding and thematic exploration in qualitative research. International Journal of Qualitative Methods, 18, 1-12.

[7] Dizdar, E. N., & Kurt, M. (1996). Olası iş kazaları için bir erken uyarı modeli. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 9(4), 525-532.

[8] Baysal, M. E., Canıyılmaz, E., & Eren, T. (2002). Otomotiv yan sanayiinde hata türü ve etkileri analizi. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi.

[9] McDermott, R. E., Mikulak, R. J., & Beauregard, M. (2009). The basics of FMEA. CRC Press.

[10] Stamatis, D. H. (2003). Failure Mode and Effect Analysis: FMEA from Theory to Execution. ASQ Quality Press.

[11] Ö. Özkılıç, İş sağliği ve güvenliği, yönetim sistemleri ve risk değerlendirme metodolojileri, Ankara: TİSK Yayınları, 2005.

Gazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Dergisi
PART C: TASARIM VE TEKNOLOJİ

Gazi University
Journal of Science
PART C: DESIGN AND TECHNOLOGY

GU J Sci, Part C, 13(2): 680-691 (2025)

Akarçay Havzası Hidrolojisinin SWAT Modeli ile Değerlendirilmesi

Zeliha SELEK [1], Cihangir ARSLAN [2*]

[1] *Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye*

[2] *Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği (Teknoloji Fakültesi) Ana Bilim Dalı, Ankara, Türkiye*

Article Info

Research article
Received: 15/03/2025
Revision: 09/05/2025
Accepted: 26/05/2025

Keywords

Akarçay Basin
Hydrological Processes
SWAT Model
Sustainability of Water and Soil Resources

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 15/03/2025
Düzeltme: 09/05/2025
Kabul: 26/05/2025

Anahtar Kelimeler

Akarçay Havzası
Hidrolojik Süreçler
SWAT Modeli
Su ve Toprak Kaynaklarının Sürdürülebilirliği

Grafik Özet (Graphical/Tabular Abstract)

Çalışma kapsamında SWAT modeli ile Akarçay Havzası'nın hidrolojik süreçleri simüle edilmiş, su kaynakları üzerindeki etkiler değerlendirilmiştir. Kalibrasyon ve validasyon başarıyla tamamlanmış, kritik parametreler tespit edilmiştir. Sürdürülebilir su yönetimi için bilimsel temelli öneriler geliştirilmiştir. / Within the scope of the study, hydrological processes of Akarçay Basin were simulated with SWAT model and impacts on water resources were evaluated. Calibration and validation were successfully completed and critical parameters were identified. Scientifically based recommendations have been developed for sustainable water management.



Şekil A: *Akarçay Havzası SWAT Model Aşamaları /* ***Figure A****: Akarçay Basin SWAT Model Stages*

Önemli noktalar (Highlights)

- *SWAT modeli, Akarçay Havzası'nda yüksek doğrulukla akım simülasyonu gerçekleştirmiştir. / The SWAT model has simulated flow in the Akarçay Basin with high accuracy.*
- *Toprak profili ve yeraltı suyu parametreleri hidrolojik süreçlerde en hassas faktörler olarak belirlenmiştir. / Soil profile and groundwater parameters were identified as the most sensitive factors in hydrological processes.*
- *Kalibrasyon (NSE: 0.71) ve validasyon (NSE: 0.65) sonuçları modelin başarılı olduğunu göstermiştir. / Calibration (NSE: 0.71) and validation (NSE: 0.65) results showed that the model was successful.*

Amaç (Aim): *Bu çalışma, Akarçay Havzası'nda SWAT modelini kullanarak çeşitli yönetim senaryolarının etkilerini değerlendirmeyi ve havzanın hidrolojik süreçlerini incelemeyi amaçlamaktadır. / This study aims to evaluate the impacts of various management scenarios using SWAT model in Akarçay Basin and to examine the hydrological processes of the basin.*

Özgünlük (Originality): *Çalışma, Akarçay Havzası özelinde yüksek çözünürlüklü mekânsal ve meteorolojik verilerle yapılan detaylı kalibrasyon ve hassasiyet analizi ile bölgeye özgü öneriler sunmaktadır. / The study provides region-specific recommendations for the Akarçay Basin through detailed calibration and sensitivity analysis with high-resolution spatial and meteorological data.*

Bulgular (Results): *Modelin kalibrasyon döneminde NSE değeri 0.71, validasyon döneminde 0.65 olarak elde edilmiştir. En hassas parametreler arasında CN2, ESCO, SOL_AWC, SOL_Z ve REVAPMN yer almıştır. Tarımsal uygulamaların yüzey akışı ve su kalitesi üzerinde belirgin etkileri gözlemlenmiştir. / The NSE value of the model was 0.71 in the calibration period and 0.65 in the validation period. The most sensitive parameters were CN2, ESCO, SOL_AWC, SOL_Z and REVAPMN. Significant impacts of agricultural practices on runoff and water quality were observed.*

Sonuç (Conclusion): *SWAT modeli Akarçay Havzası'nda başarılı bir şekilde uygulanmış, modelleme sonuçları sürdürülebilir su yönetimi için güvenilir bir temel oluşturmuştur. Bölgesel düzeyde modern sulama, arazi kullanımı planlaması ve iklim senaryolarına dayalı yönetim stratejileri önerilmektedir. / The SWAT model has been successfully applied in the Akarçay Basin and the modeling results have provided a reliable basis for sustainable water management. Modern irrigation, land use planning and management strategies based on climate scenarios are proposed at the regional level.*

*Sorumlu yazar, e-mail: 208332501@gazi.edu.tr
DOI: 10.29109/gujsc.1658344

GU J Sci, Part C, 13(2): 680-691 (2025)

Gazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Dergisi
PART C: TASARIM VE TEKNOLOJİ

Gazi University
Journal of Science
PART C: DESIGN AND TECHNOLOGY

http://dergipark.gov.tr/gujsc

Akarçay Havzası Hidrolojisinin SWAT Modeli ile Değerlendirilmesi

Zeliha SELEK [1], Cihangir ARSLAN [2*]

[1] *Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye*

[2] *Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği (Teknoloji Fakültesi) Ana Bilim Dalı, Ankara, Türkiye*

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 15/03/2025
Düzeltme: 09/05/2025
Kabul: 26/05/2025

Anahtar Kelimeler

Akarçay Havzası
Hidrolojik Süreçler
SWAT Modeli
Su ve Toprak Kaynaklarının Sürdürülebilirliği

Öz

Bu araştırma, Akarçay Havzası'ndaki su ve toprak kaynaklarının sürdürülebilir bir şekilde korunması ve yönetilmesi için SWAT (Toprak ve Su Değerlendirme Aracı) modelinin kullanımını ve bölgeye özgü su ve toprak kaynaklarının değerlendirilmesini tartışmaktadır. Akarçay Havzası, geniş tarım arazileri ve su kaynaklarının önemi nedeniyle Türkiye'nin stratejik öneme sahip havzalarından biridir. Ancak bölgedeki su ve toprak kaynaklarının sürdürülebilirliği; artan tarımsal faaliyetler, nüfus alanlarının büyümesi ve iklim değişikliği nedeniyle tehdit altındadır.

Çalışma kapsamında havzanın hidrolojik özelliklerini ve toprak-su dinamiklerinin modele tanımlanması amacıyla meteorolojik veriler, arazi kullanım haritaları, toprak yapısı ve hidrolojik parametreler ilgili kurum ve kuruluşlardan veriler temin edilerek hidrolojik süreçlerin simüle edildiği SWAT modeli oluşturulmuş ve söz konusu model ile su kaynakları yönetiminin etkileri incelenmiştir. Kalibrasyon ve doğrulama prosedürleri için SWAT-CUP yazılımı kullanılmış ve modelin doğruluğunu artırmak için performans metrikleri (NSE, RSR, vb.) değerlendirilmiştir.

Bulgular, havzanın tarımsal uygulamaların su kalitesini nasıl etkilediğini ve arazi kullanımındaki potansiyel değişikliklerin hidrolojik süreçleri nasıl etkileyebileceğini göstermiştir. Akarçay Havzası hassasiyet analizi sonucunda en duyarlı unsurların toprak profili parametreleri (SOL_Z, SOL_AWC), yeraltı suyu katsayısı (REWAPMN), toprak buharlaşma dengeleme faktörü (ESCO) ve yüzey suyu akış miktarını etkileyen eğri katsayısı (CN2) olduğu tespit edilmiştir. Bu çalışmanın ortaya koyduğu öneriler, ulusal ve bölgesel su yönetimi düzenlemelerinin oluşturulmasına yardımcı olacaktır. Sonuçlar, Akarçay Havzası'ndaki konut, ticari ve tarımsal faaliyetlerin daha sürdürülebilir bir şekilde yönetilmesi için bilimsel bir temel sunmaktadır.

Evaluation of Akarçay Basin Hydrology with SWAT Model

Article Info

Research article
Received: 15/03/2025
Revision: 09/05/2025
Accepted: 26/05/2025

Keywords

Akarçay Basin
Hydrological Processes
SWAT Model
Sustainability of Water and Soil Resources

Abstract

This research discusses the use of SWAT (Soil and Water Assessment Tool) model for sustainable conservation and management of water and soil resources in Akarçay Basin and the assessment of water and soil resources specific to the region. Akarçay Basin is one of the strategically important basins of Turkey due to its large agricultural lands and the importance of water resources. However, the sustainability of water and soil resources in the region is under threat due to increasing agricultural activities, population growth and climate change.

Within the scope of the study, meteorological data, land use maps, soil structure and hydrological parameters were obtained from relevant institutions and organizations in order to define the hydrological characteristics of the basin and soil-water dynamics to the model, and a SWAT model was created to simulate hydrological processes and the effects of water resources management were examined with the model. SWAT-CUP software was used for calibration and validation procedures and performance metrics (NSE, RSR, etc.) were evaluated to improve the accuracy of the model.

The findings showed how the basin's agricultural practices affect water quality and how potential changes in land use can affect hydrological processes. As a result of the sensitivity analysis of Akarçay Basin, it was determined that the most sensitive elements are soil profile parameters (SOL_Z, SOL_AWC), groundwater coefficient (REWAPMN), soil evaporation compensation factor (ESCO) and curve coefficient affecting the amount of surface water runoff (CN2). The recommendations of this study will help to establish national and regional water management regulations. The results provide a scientific basis for more sustainable management of residential, commercial and agricultural activities in the Akarçay Basin.

*Corresponding author, e-mail: 208332501@gazi.edu.tr
DOI: 10.29109/gujsc.1658344

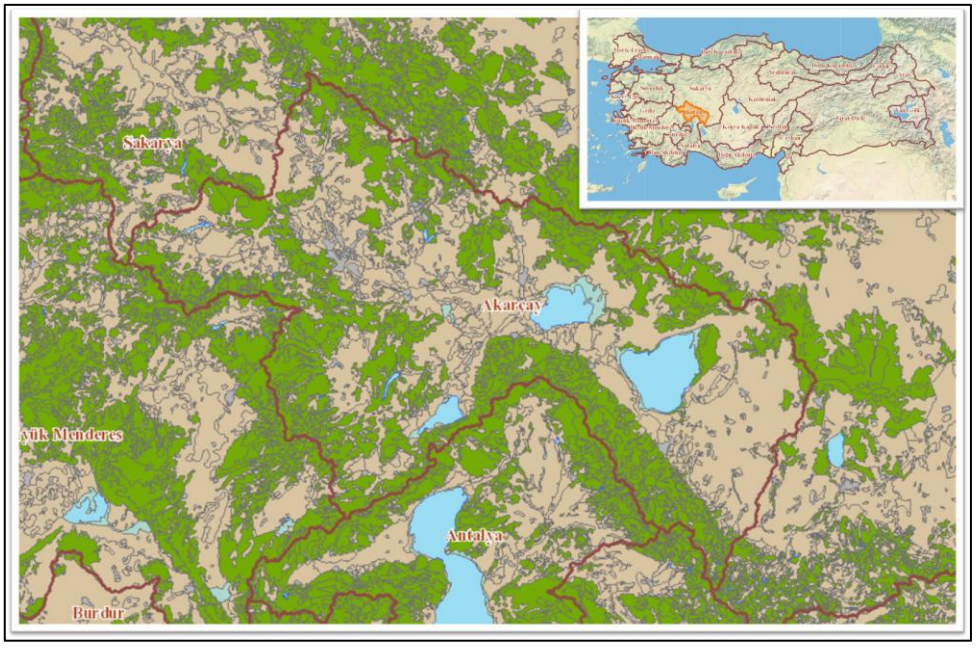
1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Hem insan faaliyetlerinin devamı hem de doğal yaşamın sürdürülebilirliği toprak ve su kaynaklarına bağlıdır. Ancak dünya nüfusundaki artış, hızlı kentleşme, sanayileşme ve iklim değişikliği gibi nedenlerle bu kaynakların korunması ve sürdürülebilir yönetimi konusunda önemli kısıtlamalar bulunmaktadır. Türkiye, bol miktarda doğal kaynağa sahip olmasına rağmen kişi başına kullanılabilir su potansiyeline bakıldığında su baskısı yaşayan ülkeler arasında yer almaktadır. Sürdürülebilir kaynak yönetimi, özellikle tarımsal faaliyetlerin yüksek olduğu ve su kaynaklarının kıt olduğu bölgelerde hayati önem taşımaktadır. Akarçay Havzası hem tarımsal üretim hem de yerleşim için hayati bir su kaynağı olduğundan, sürdürülebilir su kaynaklarının yönetimi açısından özellikle önemlidir.

İleri modelleme teknikleri ve bilimsel temelli yaklaşımlar, su kaynaklarının yönetiminde karar verme sürecine yardımcı olan önemli araçlardır. Hidrolojik modeller, havza ölçeğinde yüzey akışı, yeraltı suyu hareketi, tortu taşınımı ve besin döngüsü gibi önemli süreçleri modelleyerek su ve toprak kaynaklarını daha iyi anlamamıza yardımcı olur [1]. Bu modeller yönetim planları oluşturmak ve arazi kullanımı değişiklikleri, iklim değişikliği ve insan faaliyetlerinin su havzaları üzerindeki etkilerini tahmin etmek için yararlı bir araç sunmaktadır [2]. Karar vericiler, çeşitli yönetim senaryolarının etkilerini simüle etmek için hidrolojik modelleri kullanarak daha iyi planlama kararları alabilirler [3].

Fiziksel tabanlı SWAT (Toprak ve Su Değerlendirme Aracı) modeli, havza düzeyinde insan etkilerini ve hidrolojik süreçleri değerlendirmek için dünya genelinde yaygın olarak kullanılmaktadır. SWAT modeli Arnold ve arkadaşları (1998) tarafından uzun vadeli planlama ve sürdürülebilir su kaynakları yönetimi düşünülerek oluşturulmuştur. Meteorolojik veriler, toprak özellikleri, arazi kullanımı ve bitki örtüsü gibi girdileri kullanan model, su akışı, tortu taşınımı ve besin maddesi transferi gibi hidrolojik süreçleri doğru bir şekilde simüle etmektedir. [1]. SWAT'ın uyarlanabilirliği, çeşitli arazi kullanım senaryolarının, yönetim yaklaşımlarının ve iklim değişikliği tahminlerinin su havzasını nasıl etkilediğini araştırma şansı sunmaktadır. [4]. Ayrıca, SWAT modeli hem yüzey hem de yeraltı suyu süreçlerini simüle edebildiğinden, geniş havzalarda karar desteği için yararlı bir araç olarak kullanılmaktadır [3].

Bu çalışma, Akarçay Havzası'nda SWAT modelini kullanarak çeşitli yönetim senaryolarının etkilerini değerlendirmeyi ve havzanın hidrolojik süreçlerini incelemeyi amaçlamaktadır. Araştırma, havzanın toprak ve su kaynaklarının mevcut durumunu ortaya koymakta ve değişen arazi kullanımı, toprak yapısı gibi senaryoların etkilerini analiz etmektedir. Çalışma bulgularının tarım, su yönetimi ve ekosistemin korunmasına yönelik politikaların oluşturulmasına yardımcı olmasının yanı sıra, havzanın sürdürülebilir yönetimi için bilimsel bir temel oluşturması amaçlanmaktadır.



Şekil 1. Akarçay Havzası çalışma alanı (Akarçay Basin study area) [6]

2. MATERYAL VE METOD (MATERIALS AND METHODS)

2.1. Çalışma Alanı (Study Area)

Türkiye'nin İç Anadolu Bölgesi'nde yer alan Akarçay Havzası ekolojik önemi, su kaynaklarının çeşitliliği ve tarımsal faaliyet düzeyi ile tanınmaktadır. Havzanın büyük bölümü Afyonkarahisar ili sınırları içinde yer alırken, küçük bir bölümü de Konya ve Eskişehir illerine uzanmaktadır. Akşehir ve Eber Gölleri, toplam yüzölçümü yaklaşık 7.979 km² olan havzanın birincil su toplama bölgesini oluşturmaktadır. Bölgenin ekolojik ve ekonomik dengesi bu göllere bağlıdır. Havza geniş düzlükler, alçak platolar ve yüksek dağlardan oluşmaktadır. Bataklıklar, ormanlar ve tarım bölgeleri de dahil olmak üzere çeşitli coğrafi türleri kapsar ve 1000m (Sincanlı Ovası) ila 2500 m (Sultan Dağları) arasında değişen yükseklikliere sahiptir. Birkaç küçük dere ve çay yardımıyla havzanın ana nehri olan Akarçay Nehri su ulaşım ağını oluşturmaktadır [5].

Havzanın yıllık ortalama sıcaklığı 11-13°C ve yıllık yağış miktarı 400-600 mm'dir ve bunların tümü İç Anadolu Bölgesi'nin tipik karasal ikliminin bir göstergesidir. Tipik olarak, ilkbahar ve Ekim ayları en fazla yağışın görüldüğü aylardır. Havzanın su rejimi ve hidrolojik döngüsü bu iklim koşulları tarafından belirlenmektedir. Yeraltı suyu kaynakları tarımsal sulama için çok önemli olsa da, aşırı kullanım su seviyelerinin düşmesine neden olmaktadır. Akşehir ve Eber Gölleri gibi sulak alanlara sahip olan Akarçay Havzası, su kuşları da dahil olmak üzere çok sayıda bitki ve hayvan türüne ev sahipliği yapmaktadır [5].

Ancak bölgenin biyolojik dengesi, kirlilik ve göllerin azalan su seviyeleri nedeniyle tehlike altındadır. Havza, tarım ve hayvancılık faaliyetleri nedeniyle yerel halk için de önemli bir gelir kaynağıdır. Tahıllar, şeker pancarı ve yem bitkileri başlıca ürünlerdir. Balıkçılık da birçok yerel halk için bir gelir kaynağıdır [5].

Havza, toprak erozyonu, yeraltı su seviyesinin düşmesi, su kirliliği ve tarımdan kaynaklanan kimyasal kirlenme gibi çevresel sorunlarla boğuşmaktadır. Uygunsuz arazi kullanımı toprak kaybına ve ekosistemin zarar görmesine neden olurken, yoğun sulama faaliyetleri yeraltı su kaynaklarının tükenmesi tehlikesini artırmaktadır. Bu sorunlar nedeniyle havza kaynak yönetimi sürdürülebilir olmalıdır. Bu özellikler, SWAT modelini uygulamak ve Akarçay Havzası'nın mevcut durumunu anlamak için gereken temel bilgileri oluşturmaktadır. Sürdürülebilir su ve arazi yönetimi stratejilerinin geliştirilmesi, havzanın hidrolojik ve çevresel dinamiklerinin anlaşılmasını gerektirmektedir [5].

2.2. SWAT Hidrolojik Modeli (SWAT Hydrological Model)

SWAT (Soil and Water Assessment Tool), büyük ve karmaşık havzaların uzun dönemli hidrolojik süreçlerini simüle etmek amacıyla geliştirilmiş, fizik tabanlı ve yarı dağıtılmış bir modeldir. ABD Tarım Bakanlığı'na bağlı Tarımsal Araştırma Servisi (USDA-ARS) tarafından geliştirilmiştir [1]. Model, toprak, arazi kullanımı, topografya, iklim ve yönetim uygulamalarını dikkate alarak su akışı, sediment taşınımı, besin maddeleri ve pestisitlerin taşınımı gibi süreçleri simüle etmektedir.

Modelin en belirgin avantajlarından biri, büyük ölçekli havzaların uzun süreli hidrolojik simülasyonlarının yapılabilmesidir. SWAT, onlarca yıl sürebilecek süreçleri, yıllık, aylık veya günlük zaman adımlarıyla modelleyebilir. Bu özellik, özellikle iklim değişikliği, arazi kullanım senaryoları ve su yönetimi politikalarının uzun vadeli etkilerinin değerlendirilmesinde modelin güçlü bir araç haline gelmesini sağlamaktadır [1,2].

Bir diğer önemli avantajı, çok sayıda fiziksel, kimyasal ve biyolojik süreci aynı anda modelleyebilmesidir. SWAT, sadece yüzey akışı değil; aynı zamanda yeraltı suyu akışı, sediment taşınımı, azot ve fosfor gibi besin maddelerinin döngüsü, pestisitlerin taşınımı gibi süreçleri de entegre şekilde ele alabilmektedir. Bu bütüncül yaklaşım, havza ekosisteminin farklı bileşenleri arasındaki ilişkilerin daha doğru bir şekilde temsil edilmesine olanak tanımaktadır [2].

SWAT modelinin en önemli sınırlılıklarından biri, giriş verilerine olan yüksek bağımlılığıdır. Modelin doğru ve güvenilir sonuçlar verebilmesi, büyük ölçüde sağlanan meteorolojik, hidrolojik, topografik, arazi kullanımı ve toprak özellikleri verilerinin kalitesine ve çözünürlüğüne bağlıdır. Özellikle gelişmekte olan ülkelerde ve veri sıkıntısı yaşanan bölgelerde, bu tür verilerin yetersizliği modelin çıktılarında ciddi belirsizliklere neden olabilmektedir. Düşük çözünürlüklü DEM (sayısal yükseklik modeli) verileri, yanlış akarsu yönlenmelerine ve eğim hesaplamalarına yol açarken; eksik yağış ve sıcaklık verileri, su bütçesi hesaplarında önemli sapmalara neden olabilir [2].

Ayrıca SWAT modelinin çok sayıda parametreye dayalı olması, kalibrasyon ve validasyon süreçlerini karmaşık hale getirmektedir. Modelin her bileşeni

(hidroloji, sediment, besin maddeleri vb.) kendi içinde parametre setlerine sahiptir. Bu durum, parametreler arası etkileşimlerin karmaşıklaştığı ve kümülatif hata riskinin arttığı anlamına gelir. Uygun kalibrasyon yapılmadığında, modelin sonuçları güvenilirliğini kaybedebilir. Bu sebeple kalibrasyon çok fazla önem arz etmektedir [2].

Gassman ve arkadaşları (2007), SWAT ile yapılmış 300'den fazla uygulamayı analiz etmiş, modelin özellikle su bütçesi, sediment ve besin yüklerinin simülasyonunda etkin olduğunu belirtmiştir. Ancak veri yetersizliğinde modelin performansının zayıfladığı da vurgulanmıştır [2]. Korkmaz (2014) tarafından yapılan çalışmada Gediz Havzası için SWAT uygulanmış ve model, aylık akım simülasyonlarında NSE>0.6 ile orta-yüksek doğrulukta sonuçlar vermiştir [7]. Özcan ve arkadaşları (2011), Seyhan Havzası'nda SWAT modelini kullanarak farklı arazi kullanım senaryolarının (ormanlaştırma, tarım alanı artışı vb.) yüzey akışı ve sediment taşınımı üzerindeki etkilerini analiz etmişlerdir. Tarım alanlarının artması ile birlikte sediment yüklerinin yükseldiği, ormanlaştırmanın ise su kalitesi ve miktarı üzerinde olumlu etkiler sağladığı belirlenmiştir [8].

Fiziksel tabanlı bir hidrolojik model olan SWAT modeli havza üzerinde etkili olan temel parametreleri uzun vadeli dönemde simüle etmektedir. Aşağıdakiler yer alan maddeler modelin birincil girdileridir:

- Meteorolojik Veriler: Yağış, sıcaklık, rüzgar hızı, güneş ışığı ve bağıl nem verileri,
- Toprak Haritaları: Bölgenin toprak türleri ve özelliklerinin haritaları,
- Arazi Kullanım Haritaları: Ormanlar, tarımsal alanlar, yerleşim alanları ve diğer arazi türleri,
- Hidrolojik Veriler: Su kalitesi ölçümleri ve akış verileri [9].

SWAT modelinin su bütçesini belirlemek için kullanılan su hareketlerini temsil eden denklem aşağıda verilmiştir [10]:

$$SWt = SWo + \sum_{i=1}^{t}(Rday - Qsurf - Ea - Wseep - Qgw) \quad (1)$$

SWt : t zamanında toprakta su (mm)
SWo : toprağın başlangıç su içeriği (mm)
$Rday$: günlük yağış miktarı (mm)
$Qsurf$: yüzey akışı (mm)
Ea : buharlaşma miktarı (mm)
$Wseep$: toprak derinliklerine sızma (mm)
Qgw : yeraltı akışı (mm)

Modelin yüzey akışını belirlemek için aşağıdaki formül kullanılmaktadır [10]:

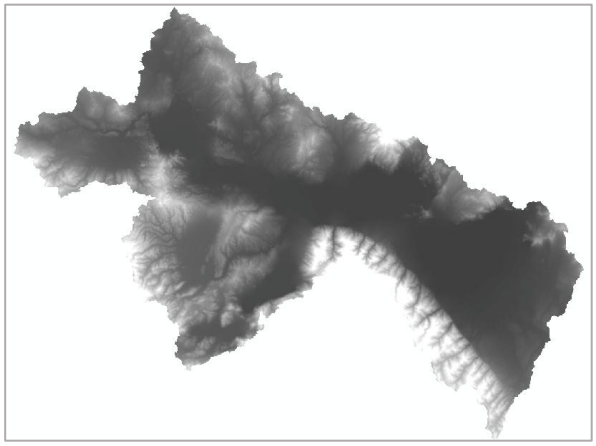
$$Qsurf = \frac{(Rday-Ia)^2}{(Rday-Ia+S)} \quad (2)$$

Ia: ilk tutulma (mm)
S: mümkün olan maksimum depolama (mm)

2.3. SWAT Verilerinin Toplanması ve Değerlendirilmesi (Collection and Evaluation of SWAT Data)

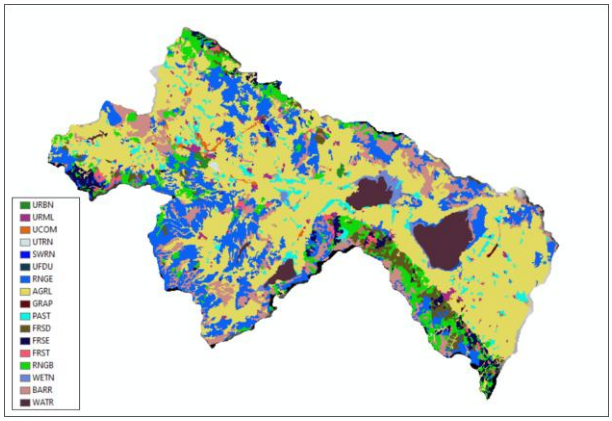
SWAT modeli, havzanın fiziksel parametrelerine dayalı olarak alt birimlere ayrılan Hidrolojik İşlem Birimlerinin (HRU'lar) kullanımı yoluyla hidrolojik süreçlerin kapsamlı bir şekilde modellenmesini sağlamaktadır [3]. Toprak ve arazi kullanım haritaları gibi temel girdiler HRU'ların geliştirilmesi için çok önemlidir. Hassas hidrolojik süreç modellemesi için gereken temel özellikler bu haritalar tarafından sağlanmaktadır.

30°- 32° doğu boylamları ile 38°- 39° kuzey enlemleri arasında yer alan Akarçay Havzası Havzasının sayısal yükseklik modeli (DEM) açık kaynak olan USGS Earth Explorer (https://earthexplorer.usgs.gov/) web sitesinden elde edilmiştir [11]. USGS'nin sunduğu DEM verileri genellikle SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) (25m çözünürlük), ASTER GDEM (27 m çözünürlük), ALOS – PALSAR (12,5 m çözünürlük) ve COVARAGEMAP (83 m çözünürlük) gibi kaynaklardan elde edilmektedir. Çalışma kapsamında çeşitli veri kaynakları incelenmiş ve karşılaştırılmıştır. Akarçay havzası SWAT modelinin oluşturulmasında 25 m çözünürlüklü SRTM datasının kullanılması kararlaştırılmıştır. Akarçay Havzası sayısal yükseklik haritası Şekil (2)'de gösterilmektedir.



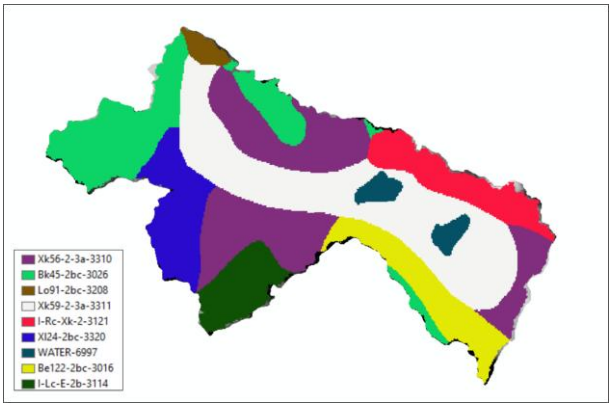
Şekil 2. Akarçay Havzası sayısal yükseklik haritası (Digital elevation map of Akarçay Basin)

Bir havza içindeki çeşitli arazi kullanım kategorileri (yerleşim alanları, ormanlık alanlar, tarım arazileri ve su yüzeyleri gibi) arazi kullanım haritalarında gösterilmektedir. Bu haritalar, insan faaliyetlerinin hidrolojik sistemleri nasıl etkilediğini incelemeyi mümkün kılmaktadır. Arazi kullanımının türü erozyon, buharlaşma ve yüzey akışı gibi süreçler üzerinde önemli bir etkiye sahip olmaktadır. Örneğin, gelişmiş bölgelerde yüzey akışı yükselerek sel tehlikesini artırırken, ormanlık bölgeler suyun toprağa sızmasına izin vermektedir [2]. Bu çalışmada söz konusu arazi kullanım haritası CORINE (Coordination of Information on the Environment) verilerinden temin edilmiştir. CORINE, Avrupa Çevre Ajansı tarafından belirlenen Arazi Örtüsü/Kullanımı Sınıflandırmasına göre uydu görüntüleri üzerinden bilgisayar destekli görsel yorumlama metodu ile üretilen arazi örtüsü/kullanımını verisidir [12,13]. Akarçay Havzası arazi kullanım haritası Şekil (3)'de gösterilmektedir.



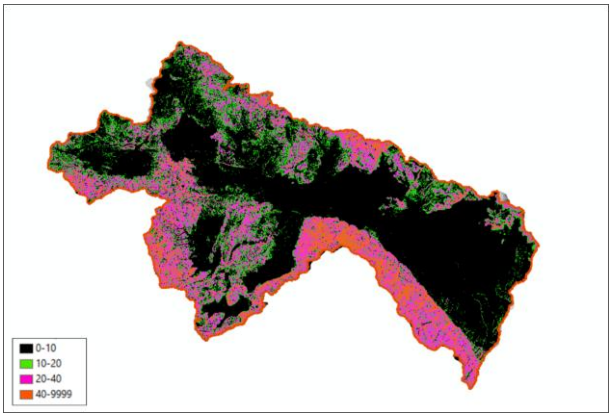
Şekil 3. Akarçay Havzası arazi kullanım haritası (Land use map of Akarçay Basin)

Havzaların toprak çeşitliliği ve özellikleri toprak haritalama yoluyla tespit edilmektedir. SWAT modelinde su geçirgenliği, su tutma kapasitesi ve erozyona yatkınlık gibi toprakların fiziksel özelliklerini hesaba katmak için toprak haritalarını kullanılmaktadır [1]. Hidrolojik süreçler modellenirken, kum, silt ve kil miktarlarının yanı sıra organik madde içeriği ve katman kalınlıkları da çok önemlidir. Yeraltı suyu akışı ve su infiltrasyon oranları toprak derinliği ve türünden doğrudan etkilenmektedir. Veri toplama aşamasında toprak haritası Birleşmiş Milletler Gıda ve Tarım Örgütü (FAO) veri tabanından temin edilmiş ve modele uygun hale getirilmiştir [14,15,16]. Akarçay Havzası toprak haritası Şekil (4)'de gösterilmektedir.



Şekil 4. Akarçay Havzası toprak haritası (Soil map of Akarçay Basin)

Akarçay havzasında 4 adet eğim sınıfı tanımlaması yapılmıştır. Eğim sınıfları Şekil (5)'te gösterilmektedir.



Şekil 5. Akarçay Havzası eğim sınıfları (Akarçay Basin slope classes)

HRU'ları oluşturmak için, arazi kullanımı, toprak tipi ve eğim sınıflandırmaları birleştirilerek havza içinde tek tip özelliklere sahip alt bölgeler tanımlanmaktadır. Modelin doğruluğu, bu prosedürde kullanılan toprak ve arazi kullanım haritalarının çözünürlüğünden doğrudan etkilenmektedir [1]. Hidrolojik süreçlerin daha gerçekçi ve derinlemesine modellenmesi için harita çözünürlüklerinin kaliteli ve birbirleriyle benzer olması modelleme aşamasında hata oranını en aza indirmektedir.

Sonuç olarak, SWAT modeli toprak ve arazi kullanım haritalarını entegre ederek havza düzeyinde hidrolojik süreçleri doğru bir şekilde simüle edebilmektedir. Bu haritalar aynı zamanda modelin doğrulama ve kalibrasyon prosedürleri için de gereklidir. Havza özelliklerinin haritalar üzerinde doğru bir şekilde gösterilmesi, modelin tahmin yeteneğini geliştirmekte ve daha verimli su kaynakları yönetim planlarının oluşturulmasını mümkün kılmaktadır.

2.4. Model Performansının Değerlendirilmesi Amacıyla Kullanılan İstatistiksel Ölçütler (Statistical Measures Used to Evaluate Model Performance)

Özellikle SWAT modeli, çeşitli istatistiksel metrikler kullanarak hidrolojik modellerin performansını değerlendirmek için kullanılmaktadır. Bu metrikler, modelin çıktısının gerçek değerlerle ne kadar iyi eşleştiğini belirlemek için oluşturulmuştur [17]. Literatürde sıklıkla kullanılan birincil göstergeler, formülleri ve açıklamaları ile birlikte aşağıda listelenmiştir.

2.4.1. NSE - Nash-Sutcliffe Verimlilik Katsayısı (Nash-Sutcliffe Efficiency Coefficient)

Modelin gözlemlere uyumu, bir performans ölçütü olan NSE ile ölçülmektedir. Değer 1'e yaklaştıkça model daha iyi performans göstermektedir. NSE 0'dan küçük olduğunda model, verilerin ortalama değerinden daha kötü performans gösterdiğini göstermektedir [18,19].

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(Qobs,i - Qsim,i)^2}{\sum_{i=1}^{n}(Qobs,i - \overline{Qobs})^2} \quad (3)$$

$Qobs, i$: $i. gözlemlenen\ değer$
$Qsim, i$: $i. simüle\ edilen\ değer$
$\overline{Qobs}$: $i. gözlemlenen\ değerin\ ortalaması$
n: $veri\ sayısı$
$Qobs, s$: $gözlemlenen\ değer\ standart\ sapma$

2.4.2. RSR - Ortalama Hatanın Karekökünün Standart Sapmaya Oranı (Ratio of the Root Mean Square Error to the Standard Deviation of Measured Data)

Model performansını değerlendirmek için kullanılan istatistiksel metriklerden biri de RSR'dir. RSR, model hatasını gözlemlenen verilerin değişkenliği ile karşılaştırarak modelin performansının değerlendirilmesine yardımcı olmaktadır [20].

RSR, gözlemlenen verilerin standart sapmasının (STDEV) Ortalama Hatanın Karekökü'ne (RMSE) bölünmesiyle hesaplanır:

$$RSR = \frac{\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(Qobs,i - Qsim,i)^2}}{Qobs,s} \quad (4)$$

2.4.3. PABIAS Yüzde Sapma (Percent Bias)

PABIAS adı verilen istatistiksel bir diğer metrik, gözlemlenen verileri model tahminlerindeki sistematik hata miktarıyla karşılaştırmaktadır. Modelin tahminleri, PABIAS kullanılarak gözlemlenen değerlerle karşılaştırılarak fazla veya eksik tahmin edilip edilmediğine bakılır. Özellikle mühendislik, hidroloji ve çevresel modellemelerde sıklıkla kullanılmaktadır [21].

$$PABIAS = \frac{\sum_{i=1}^{n}(Qobs,i - Qsim,i)}{\sum_{i=1}^{n}(Qobs,i)}\ x\ 100 \quad (5)$$

Yukarıda bahsi geçen istatistiksel ölçütlerin genel tablosu Tablo 1'de gösterilmektedir.

2.5. Kalibrasyon ve Validasyon (Calibration and Validation)

SWAT modelinin etkinliğini artırmak ve doğru sonuçlar üretmek için modelleme süreci boyunca iki önemli eylem gerçekleştirilmelidir. Bunlar doğrulama ve kalibrasyon aşamalarıdır. Kalibrasyon sürecinde model parametreleri yerel koşulları hesaba katacak şekilde değiştirilir. Model çıktılarını gözlemlenen hidrolojik verilerle uzlaştırmak için bu prosedür tekrar tekrar gerçekleştirilmiştir. Toprak doygunluk su içeriği (SOL_AWC), yüzey akış katsayısı (CN2) ve yeraltı suyu parametreleri (GW_DELAY, GWQMN) gibi önemli faktörler Akarçay Havzası'nda bu amaçla kullanılan ölçütler arasındadır.

Kalibrasyon işlemi, SUFI-2 algoritmasını içeren SWAT-CUP (SWAT-Calibration and Uncertinity Program) yazılımı aracılığıyla yürütülmüştür. Program özellikle havza alanı büyük ve karmaşık bir yapıya sahipse kalibrasyon sırasında zaman açısından büyük bir avantaj sağlamaktadır. SWAT-CUP yazılımı ücretsiz iken 2020 yılı sonrası ücretli hale gelmiştir. Fakat akademik alanda çalışılacak olmasından dolayı yetkililerle iletişime geçilmiş ve programdan ücretsiz bir şekilde yararlanılmıştır. Bu yazılım, gözlemlenen veriler ve model çıktıları arasındaki farkı en aza indirerek parametre aralıklarını optimize etmektedir [20]. Her iterasyon sonunda model sonuçları, gözlemlenen verilerle karşılaştırılarak parametre ayarları güncellenmiştir [23].

Tablo 1. İstatistiksel göstergelerin değerlendirilme kriterleri (Criteria for evaluation of statistical indicators)

Ölçüt	Değer Aralığı	Model Performansı	Yorum
NSE	NSE = 1	Mükemmel	Model gözlenen verileri mükemmel tahmin ediyor.
	NSE > 0.75	Çok iyi	Model oldukça başarılı.
	0.5 ≤ NSE ≤ 0.75	Kabul edilebilir	Modelin performansı yeterli düzeyde.
	0 ≤ NSE < 0.5	Zayıf	Model düşük güvenilirlikte tahmin yapıyor.
	NSE < 0	Başarısız	Model, gözlenen verilerin ortalamasından bile kötü tahmin yapıyor.
RSR	RSR = 0	Mükemmel	Modelin hata oranı sıfır.
	0 ≤ RSR < 0.5	Çok iyi	Model yüksek doğrulukla tahmin yapıyor.
	0.5 ≤ RSR < 0.6	İyi	Model yeterince başarılı.
	0.6 ≤ RSR < 0.7	Orta	Modelin performansı orta düzeyde.
	0.7 ≤ RSR < 1.0	Zayıf	Modelin tahmin hataları yüksek.
	RSR > 1.0	Başarısız	Model başarısız, hata oranı çok yüksek.
PABIAS	|PABIAS| < %10	Çok iyi	Model tahminleri gözlenen verilere çok yakın.
	%10 ≤ |PABIAS| < %20	İyi	Model küçük bir sistematik hata içeriyor.
	%20 ≤ |PABIAS| < %30	Orta	Modelde orta düzeyde hata mevcut.
	|PABIAS| ≥ %30	Kötü	Model tahminleri büyük ölçüde yanlış.

Tablo 2. SWAT modeli kalibrasyon parametreleri (SWAT model calibration parameters)

	PARAMETRE	AÇIKLAMA	MİN	MAX	KALİBRE DEĞERİ
1	r__CN2.mgt	İlk SCS akış eğrisi numarası (ortalama değer)	-0.35	0	-0.23625
2	r__GW_DELAY.gw	Yeraltı suyu gecikme süresi (gün)	90	200	197.25
3	r__GWQMN.gw	Geri dönüşün gerçekleşmesi için gereken sığ akiferdeki su eşik derinliği (mm H2 0)	-0.3	0.3	0.255
4	r__GW_REVAP.gw	Yeraltı suyu "revap" katsayısı	-0.4	0.4	0.22
5	r__REVAPMN.gw	Sığ akiferdeki "derinleşme" ya da oluşacak derin akiferin süzülmesi için su derinliğinde eşik derinliği (mm H2 O)	-0.4	0.4	0.02
6	v__ALPHA_BF.gw	Baz akım alfa katsayısı	1.3	1.45	1.31875
7	v__RCHRG_DP.gw	Derin akifer sızdırma fraksiyonu	0	0.5	0.2125
8	r__SOL_AWC(n).sol	Toprak tabakasının mevcut su kapasitesi	-0.25	0.25	0.2125
9	r__SOL_Z.sol	toprak yüzeyinden tabakanın altına kadar olan derinlik (mm)	-0.35	0.2	-0.00625
10	r__ESCO.hru	Toprak evapotranspirasyon faktörü	-0.3	0.3	0.165
11	r__SLSUBBSN.hru	Ortalama şev uzunluğu (m)	-0.19	0	-0.17575
12	r__CANMX.hru	Maksimum örtü deposu	0	100	12.5
13	r__CH_N2.rte	Kanal hidrolik iletkenlik değeri	-0.25	0.25	0.0125
14	r__CH_K2.rte	Ana dere için Manning "n" değeri	-0.3	0.3	-0.165
15	r__SURLAG.bsn	Yüzeysel akış gecikme katsayısı	1	24	11.925

Tablo 2'de yer aldığı üzere 15 parametrede kalibrasyon gerçekleştirilmiştir. Bu parametrelerden 6'sı yeraltı suyu (.gw), 4'ü en küçük işlem birimleri (.hru), (.mgt), 2'si nehir özellikleri (.rte), 2'si toprak özellikleri (.sol), 1'i ise havza özellikleri (.bsn) ile ilgilidir. Bu parametrelere yönelik hassasiyet analizi bir sonraki bölümde incelenmektedir [3].

Kalibrasyon 2015 ile 2019 yılları arasında gerçekleştirilmiştir. Modelin başlangıç koşullarının dengelenmesi ve belirli bir denge durumuna ulaşması için kullanılan ve modelin daha doğru ve güvenilir sonuçlar üretmesini sağlayan ısınma (warm-up) periyodu 3 yıl olarak belirlenmiştir.

Validasyon aşaması ise, kalibrasyonda optimize edilen parametrelerin bağımsız bir veri seti kullanılarak test edilmesini kapsamaktadır. Validasyon verileri, ısınma (warm-up) periyodu 2 yıl olmak üzere kalibrasyon verilerinden farklı bir dönemden seçilmiş (2020 – 2023) ve modelin genelleme kapasitesini değerlendirmek için kullanılmıştır.

2.6. Hassasiyet Analizi (Sensitivity Analysis)

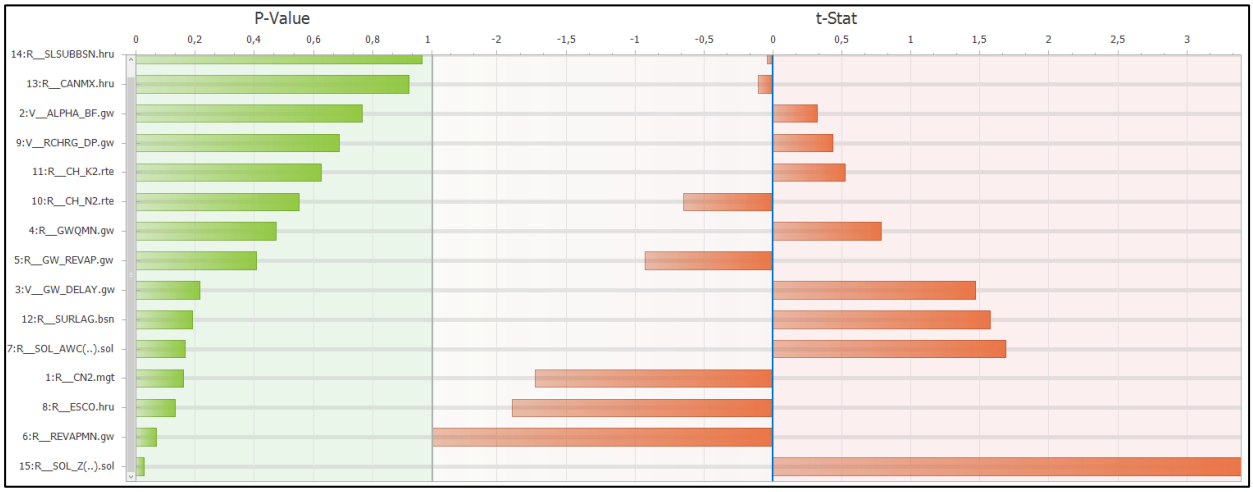
Hassas parametreler, SUFI2 kalibrasyon prosedüründeki global ve zamansal teknikler kullanılarak belirlenmektedir. Bu çalışmalar kapsamlı parametre seti içinde en hassas ve en az hassas parametreleri belirleyerek parametre sayısının azaltılmasını sağlamaktadır. Hassasiyet analizi çalışmanın verimliliğini artırırken zamandan da tasarruf sağlamaktadır [3].

Global duyarlılık analizinde P-değeri t-istatistiği ile karşılaştırılmaktadır. Bir parametrenin katsayısının standart hatasına bölünmesi t-istatistiğini vermekte olup bu değer regresyon katsayısının ne kadar iyi

hesaplandığının bir göstergesidir. P-değeri ise her bir parametrenin katsayısının sıfıra eşit olup olmadığını belirlemektedir. Bir analizde parametre ne kadar hassas olursa, mutlak değer olarak t-istatistiği değeri o kadar büyük ve p-değeri o kadar küçük olur [24].

Diğer tüm parametreler belirli bir değerde sabit tutulduğunda, zamansal duyarlılık analizi bir değişkenin bir parametredeki değişikliklere ne kadar duyarlı olduğunu göstermektedir.

Şekil 6'da görüldüğü üzere duyarlılık çalışmasına göre en hassas unsurlar toprak profili parametreleri (SOL_Z, SOL_AWC), yeraltı suyu katsayısı (REWAPMN), toprak buharlaşma dengeleme faktörü (ESCO) ve yüzey suyu akış miktarını etkileyen eğri katsayısıdır (CN2). Söz konusu parametrelerin sayısal değerleri Tablo 3'te yer almaktadır.



Şekil 6. Akarçay Havzası SWAT modeli kalibrasyon parametreleri hassasiyet analizi p-değeri ve t-istatistiği karşılaştırması (Akarçay Basin SWAT model calibration parameters sensitivity analysis p-value and t-statistics comparison)

Tablo 3. Akarçay Havzası SWAT modeli kalibrasyon parametreleri hassasiyet analizi p-değeri ve t-istatistiği değerleri (Akarçay Basin SWAT model calibration parameters sensitivity analysis p-value and t-statistic values)

Parametre Adı	t-İstatistiği	P-Değeri
14:r_SLSUBBSN.hru	-0.04331	0.96752
13:r_CANMX.hru	-0.10469	0.92166
2:v_ALPHA_BF.gw	0.32170	0.76379
9:v_RCHRG_DP.gw	0.43338	0.68709
11:r_CH_K2.rte	0.52514	0.62725
10:r_CH_N2.rte	-0.64745	0.55262
4:r_GWQMN.gw	0.78772	0.47492
5:r_GW_REVAP.gw	-0.92716	0.40632
3:v_GW_DELAY.gw	1.46846	0.21590
12:r_SURLAG.bsn	1.57378	0.19065
7:r_SOL_AWC	1.68758	0.16677
1:r_CN2.mgt	-1.72085	0.16039
8:r_ESCO.hru	-1.89015	0.13173
6:r_REVAPMN.gw	-2.46635	0.06922
15:r_SOL_Z(..).sol	3.39399	0.02743

3. BULGULAR (RESULTS)

Daha önce de belirtildiği gibi, bir modelin kabul edilebilir olması için performansının belirli gereklilikleri karşılaması gerekmektedir. Bu çalışmada modelin etkinliğini değerlendirmek için Nash-Sutcliffe Etkinlik Katsayısı (NSE), RSR (Ortalama Karesel Hatanın Standart Sapmaya Oranı) ve PABIAS (Yüzde Sapma) istatistiksel göstergeleri kullanılmıştır.

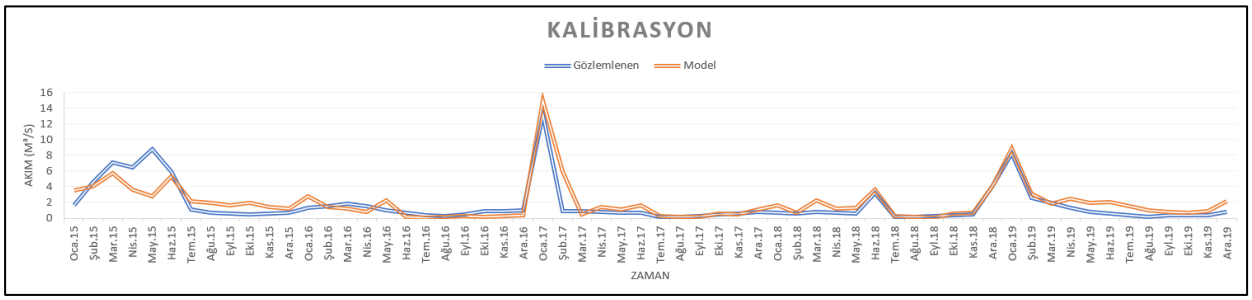
Şekil 7'deki grafik, kalibrasyon dönemi boyunca simüle edilen ve gerçek akış değerlerini göstermektedir. Kalibrasyon döneminde PBIAS değeri -32.9, RSR değeri 0.54 ve NSE değeri 0.71 olarak gerçekleşmiştir.

Şekil 8'deki grafik, doğrulama dönemi için simüle edilen ve gözlenen akış değerlerini göstermektedir. Bu değerler doğrulama dönemi boyunca NSE değeri 0.65, RSR değeri 0.59 ve PBIAS değeri -18.2 olarak belirlenmiştir. Bu ölçütler, modelin hidrolojik süreçleri ne kadar doğru bir şekilde yakaladığını göstermektedir. (Tablo 4)

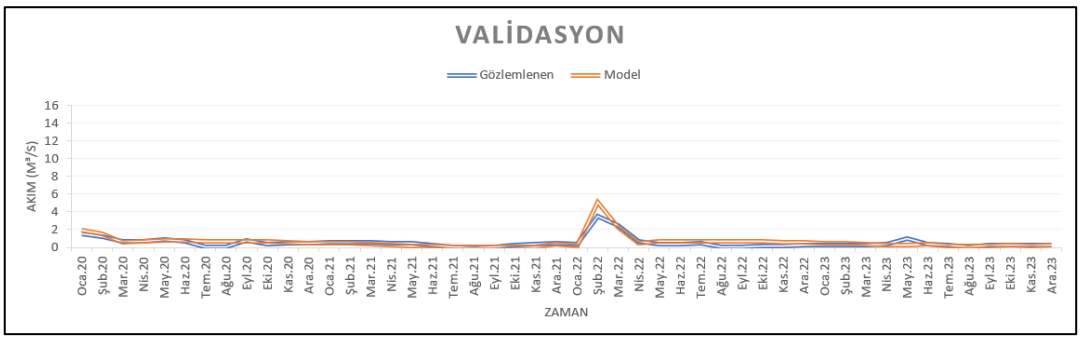
Kalibrasyon ve doğrulama bulgularına göre SWAT modelinin, Akarçay Havzası'nda su kaynakları yönetimi ve erozyon kontrolü de dahil olmak üzere çevresel değerlendirmelerde güvenle kullanılabileceğini ortaya koymaktadır.

Hassasiyet analizine göre en hassas parametreler toprak profili parametreleri (SOL_Z, SOL_AWC), yeraltı suyu katsayısı (REWAPMN), topraktaki buharlaşma dengeleme faktörü (ESCO) ve yüzey suyu akış miktarını etkileyen eğri katsayısıdır (CN). Bu göstergelerden biri (REVAPMN) taban akışı ile ilişkiliyken, diğer dördü (CN2, ESCO, SOL_AWC ve SOL_Z) yüzey akışı ile ilişkilidir.

Toprağın su tutma kapasitesini ölçen SOL_AWC değeri 0 ile 1 arasında değişmektedir. Bu parametrenin düşük olması durumunda bitkiler kurak dönemlerde su sıkıntısı çekerken yüksek olması durumunda suyun daha fazla tutulmasını sağlamaktadır. Özetle söz konusu parametre tarımsal verimin ve su döngüsünün üzerinde oldukça etkilidir [23]. SWAT modelinin hidrolojik bileşeninin duyarlılık analizi, SOL_AWC'yi tüm toprak türleri için -%25 ila %25 arasında değiştirmiştir. Bu parametrede %21'lik bir artışın en iyi NSE'yi ürettiği keşfedilmiştir.



Şekil 7. Kalibrasyon döneminde model akış ve gözlemlenen akış değerleri (Model flow and observed flow values during the calibration period)



Şekil 8. Validasyon döneminde model akış ve gözlemlenen akış değerleri (Model flow and observed flow values during the validation period)

Tablo 4. İstatistiksel göstergelere göre model performansı (Model performance according to statistical indicators)

	NSE	RSR	PBIAS
Kalibrasyon Dönemi (2015 ~ 2019)	0.71	0.54	-32.9
Validasyon Dönemi (2020 ~ 2023)	0.65	0.59	-18.2

Toprak buharlaşma telafi faktörü veya ESCO, toprak yüzeyinden gerçekleşen buharlaşmanın ne kadarının sınırlanacağını belirleyen bir faktördür. Toprak buharlaşmasının derinlik dağılımını gösteren 0 ile 1 arasında bir değere sahiptir. Düşük ESCO değerleri, bitkilerin su kullanımını artırırken yüzeyden doğrudan buharlaşmayı azaltır. Yüksek ESCO değerleri ise tersine, bitki köklerinden alınan suyun azalmasına ve daha fazla doğrudan buharlaşmaya yol açabilir [26]. Bu parametrede 0.165 değeri en iyi NSE değerini vermektedir.

Sığ akiferin REVAPMN değeri, yeniden buharlaşmanın gerçekleşmesi için gereken en düşük su derinliğidir. Su, sığ akiferden bu bariyerin altındaki doymamış bölgeye akamaz. Bu parametre 0,02 ile 0,2 arasında değişir. 0'a ne kadar yakınsa, suyun yüzeysel akiferden yukarı doğru hareketi o kadar azalır [25]. Bu parametrenin 0 değerine yakın kalibresi Akarçay Havzasında yağış sonrası suyun yeraltına sızmasının daha erken gerçekleştiği ve bu sebeple yüzey akışının azaldığı anlamına gelmektedir.

Yüzey akışını etkileyen en önemli parametrelerden biri olan CN2 parametresi arazi kullanımına, toprak özelliklerine ve nem durumuna göre değişkenlik göstermektedir. CN2 değeri yüksekse, yüzey akışı artar ve suyun toprak içine sızma oranı azalır. Düşük CN2 değerleri ise infiltrasyonu artırarak yüzey akışını azaltır [25]. Bu çalışma SWAT modeli tarafından CN2 değerinin düşük olması durumunda en iyi verimin ortaya çıktığını göstermiştir.

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada, Akarçay Havzası'nın hidrolojik süreçlerini anlamak ve su kaynaklarını daha etkin yönetmek amacıyla SWAT (Soil and Water Assessment Tool) modeli kullanılarak bir simülasyon gerçekleştirilmiştir.

Modelin oluşturulmasında, sayısal yükseklik modeli (DEM), toprak haritası ve arazi kullanım haritası gibi mekânsal veriler temel bileşenler olarak kullanılmıştır. Sayısal yükseklik modeli, havzanın eğim, akış yönü ve akarsu ağının belirlenmesinde kritik rol oynamıştır. Toprak haritası, su tutma kapasitesi ve infiltrasyon gibi hidrolojik süreçlerin modellenmesini sağlamıştır. Arazi kullanım haritası ise, tarım alanları, ormanlık alanlar ve yerleşim yerlerinin su bütçesine etkisini analiz etmek için kullanılmıştır. Bu mekânsal veriler, modelin doğru şekilde yapılandırılmasını ve hidrolojik süreçlerin gerçeğe en yakın şekilde temsil edilmesini sağlamıştır.

Modelleme sürecinde havzanın topoğrafik, iklimsel, hidrolojik ve arazi kullanımına ilişkin verileri kullanılarak kalibrasyon ve doğrulama işlemleri yapılmıştır. Model sonuçları, SWAT'ın Akarçay Havzası'ndaki akım tahminlerinde güvenilir sonuçlar verdiğini göstermektedir. Kalibrasyon ve doğrulama aşamalarında elde edilen istatistiksel performans kriterleri (NSE (0.71,0.65) , RSR (0.54, 0.59) ve PBIAS (-32.9, -18.2)) modelin iyi bir performans sergilediğini ortaya koymuştur. Modelin mevsimsel akım değişimlerini başarılı bir şekilde yansıttığı görülmüştür.

Hassasiyet analizi sonuçlarına göre, modelde en hassas parametreler toprak profili parametreleri (SOL_Z, SOL_AWC), yeraltı suyu katsayısı (REVAPMN), topraktaki buharlaşma dengeleme faktörü (ESCO) ve yüzey suyu akış miktarını etkileyen eğri katsayısıdır (CN). Bu parametrelerden REVAPMN taban akışı ile ilişkilendirilirken, CN2, ESCO, SOL_AWC ve SOL_Z yüzey akışını önemli ölçüde etkilemektedir. Bu durum, havzadaki yüzey ve taban suyu dengesinin modellenmesinde bu parametrelerin doğru şekilde kalibre edilmesinin kritik olduğunu göstermektedir.

Dikkat edilmesi gereken bir diğer önemli husus, yerel düzeyde daha spesifik veriler kullanıldığında modelin performansının çok daha fazla arttığıdır. Meteoroloji istasyonları, büyük ölçekli havzaların hidrolojik modellemesi için genellikle yetersizdir [27,28]. Yüksek çözünürlüklü meteorolojik veri setleri, özellikle hidrolojik modelleme gibi kapsamlı çalışmalarda giderek daha gerekli hale gelmektedir [28]. Bu çalışma iyi sonuçlar vermiş olmasına rağmen havzanın genişliği göz önüne alındığında, daha fazla istasyona ihtiyaç olduğu söylenebilir.

Ayrıca model sonuçlarına göre havzanın mevcut su kaynaklarının, hem tarımsal sulama hem de içme suyu temini açısından yüksek baskı altında olduğu belirlenmiştir. Model sonuçları, su kaynaklarının etkin ve sürdürülebilir bir şekilde yönetilmesi için bölgesel planlama ve politika geliştirilmesi gerektiğini ortaya koymuştur.

Tarımsal faaliyetlerin yoğun olduğu bölgelerde, koruma tarımı tekniklerinin uygulanması ve bitki örtüsünün artırılması sağlanmalıdır. Su kaynaklarının verimli kullanımı için modern sulama tekniklerinin teşvik edilmesi gereklidir. Ayrıca, yeraltı suyu rezervlerinin korunması amacıyla su çekim sınırlarının belirlenmesi ve yerel halkın bilinçlendirilmesi önem arz etmektedir. Yağış rejimindeki değişikliklere bağlı olarak ortaya çıkan riskler, iklim değişikliği senaryoları dikkate

alınarak yeniden değerlendirilmelidir. Bölgesel uyum stratejileri geliştirilerek su yönetiminde iklim değişikliği etkileri minimize edilmelidir. Havza genelinde sürekli veri toplama ve izleme çalışmaları yapılmalıdır. Daha yüksek doğruluk sağlayan meteorolojik ve hidrolojik veri setleri, model sonuçlarının güvenilirliğini artıracaktır.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

Çalışmada kullanılan verilerin temin edilmesini sağlayan Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü ile Meteoroloji Genel Müdürlüğü'ne teşekkür ederiz.

We would like to thank the General Directorate of State Hydraulic Works and the General Directorate of Meteorology for providing the data used in the study.

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)

***Zeliha SELEK*:** Modelin oluşturulması, sonuçların analizi ve yorumlanmasında katkıları olmuştur.

She contributed to the creation of the model, analysis and interpretation of the results.

***Cihangir ARSLAN*:** Modellemeyi yapmış, sonuçlarını analiz etmiş ve makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

He created the model, 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] Arnold, J. G., Srinivasan, R., Muttiah, R. S., & Williams, J. R. (1998). Large area hydrologic modeling and assessment part I: Model development. Journal of the American Water Resources Association, 34(1), 73–89.

[2] Gassman, P. W., Reyes, M. R., Green, C. H., & Arnold, J. G. (2007). The Soil and Water Assessment Tool: Historical development, applications, and future research directions. Transactions of the ASABE, 50(4), 1211–1250.

[3] Neitsch, S. L., Arnold, J. G., Kiniry, J. R., & Williams, J. R. (2011). Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation. Texas Water Resources Institute.

[4] Arnold, J. G., & Fohrer, N. (2005). SWAT2000: Current capabilities and research opportunities in applied watershed modeling. Hydrological Processes, 19(3), 563–572.

[5] T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü, (2013). Akarçay Havzası Master Plan Çalışmaları Nihai Master Plan Raporu; Üçer Müşavir Mühendislik A.Ş., DSİ Raporu, Ankara, 61-1797.

[6] İnternet: Meteoroloji Genel Müdürlüğü, URL: https://usbs.tarimorman.gov.tr/, Erişim Tarihi:13.01.2025

[7] Korkmaz, M. (2014). Evaluation of SWAT performance for monthly streamflow simulation in the Gediz Basin. Turkish Journal of Water Science and Management, 1(1), 15–25.

[8] Özcan, M., Kocaman, S., & Yavuz, O. (2011). Use of SWAT Model for Hydrological Modeling in Seyhan Basin. International Journal of Water Resources Development, 27(4), 657–673.

[9] Behera, S., & Panda, R. K. (2006). Evaluation of management alternatives for an agricultural watershed in a sub-humid subtropical region using a physical process-based model. Agricultural Ecosystems & Environment, 113(1-4), 62-72.

[10] Abbaspour, K. C., Vaghefi, S., & Srinivasan, R. (2018). A guideline for successful calibration and uncertainty analysis for soil and water assessment: A review of papers from the 2016 International SWAT Conference. Water, 10(1), 6.

[11] İnternet: Amerika Birleşik Devletleri Jeoloji Araştırmaları Kurumu, URL: https://earthexplorer.usgs.gov/, Erişim Tarihi:11.03.2024

[12] İnternet: Avrupa Çevre Ajansı, URL: https://land.copernicus.eu/en/products/corine-land-cover, Erişim Tarihi:21.08.2024

[13] Bossard, M., Feranec, J., Otahel, J., 2000. CORINE land cover technical guide – Addendum 2000. Technical report no 40, European Environmental Agency, Copenhagen.

[14] FAO/UNESCO (1990), Soil Map of the World, Revised Legend. World Soil Resources Report 60, Rome.

[15] FAO, 2015. World Reference Base for Soil Resources. İnternational Soil Classification System for Naming Soils and Creating Lagents for Soil Maps. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome
[16] İnternet: Birleşmiş Milletler Gıda ve Tarım Örgütü, URL: https://www.fao.org/soils-portal/data-hub/soil-maps-and-databases/faounesco-soil-map-of-the-world/en/, Erişim Tarihi:18.06.2024
[17] Willmott, C. J. (1981). On the validation of models. Physical Geography, 2(2), 184-194.
[18] Nash, J. E., & Sutcliffe, J. V. (1970). River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles. Journal of Hydrology, 10(3), 282-290.
[19] Legates, D. R., & McCabe Jr, G. J. (1999). Evaluating the use of goodness-of-fit measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. Water Resources Research, 35(1), 233-241.
[20] Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Bingner, R. L., Harmel, R. D., & Veith, T. L. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. Transactions of the ASABE, 50(3), 885-900.
[21] Gupta, H. V., Kling, H., Yilmaz, K. K., & Martinez, G. F. (2009). Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. Journal of Hydrology, 377(1-2), 80-91.
[22] Abbaspour, K. C., Vejdani, M., & Haghighat, S. (2007). SWAT-CUP calibration and uncertainty programs for SWAT. MODSIM 2007 International Congress on Modelling and Simulation.
[23] Arnold, J. G., & Fohrer, N. (2005). SWAT2000: Current capabilities and research opportunities in applied watershed modeling. Hydrological Processes, 19(3), 563-572.
[24] Song, X., Zhang, J., Zhi, W., & Xie, H. (2015). Parameter sensitivity analysis of SWAT model based on SUFI-2 algorithm. Water Science and Engineering, 8(2), 107-117.
[25] Arnold, J. G., Moriasi, D. N., Gassman, P. W., Abbaspour, K. C., White, M. J., Srinivasan, R., Santhi, C., Harmel, R. D., van Griensven, A., Van Liew, M. W., Kannan, N., & Jha, M. K. (2012). SWAT: Model use, calibration, and validation. Transactions of the ASABE, 55(4), 1491-1508.
[26] Neitsch, S. L., J. G. Arnold, J. R. Kiniry, R. Srinivasan, and J. R. Williams. 2002. Soil and Water Assessment Tool, User Manual, Version 2000. Temple, Tex.: Grassland, Soil and Water Research Laboratory.
[27] Kışlıoğlu, H,E., Kaplan Bekaroglu, ŞŞ., Dadaser-Celik, F., (2024). Güney Marmara Havzası'nda SWAT+ Modeli ile Hidrolojik Modelleme, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 12(3), 531-543.
[28] Probst, E., & Mauser, W. (2022). Ecological sustainability assessment of water distribution for the maintenance of ecosystems, their services, and biodiversity. Ecological Indicators, 142, 109217.

Gazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Dergisi
PART C: TASARIM VE TEKNOLOJİ

Gazi University
Journal of Science
PART C: DESIGN AND TECHNOLOGY

GU J Sci, Part C, 13(2): 692-705 (2025)

Kapalı Alanlarda Hassas UWB Tabanlı Konumlandırma için Uyarlamalı Genişletilmiş Kalman Filtresi

Abdulhamit SEVGİ[1*], Hasan Erdinç KOÇER[2]

[1]*OSTİM Teknik Üniversitesi, Meslek Yüksekokulu, Elektronik ve Otomasyon Bölümü, Ankara, Türkiye*

[2]*Selçuk Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü, Konya, Türkiye*

Article Info

Research article
Received: 08/02/2025
Revision: 08/05/2025
Accepted: 20/05/2025

Keywords

UWB
AEKF
Indoor Positioning
IMU
Global Positioning.

Makale Bilgisi

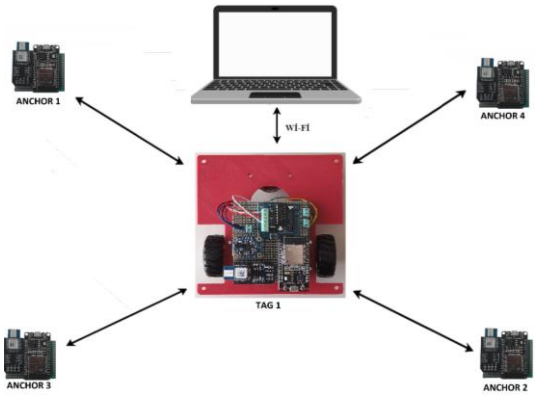
Araştırma makalesi
Başvuru: 08/02/2025
Düzeltme: 08/05/2025
Kabul: 20/05/2025

Anahtar Kelimeler

UWB
AEKF
Kapalı Alan
Konumlandırma
IMU
Küresel Konumlandırma.

Grafik Özet (Graphical Abstract)

Bu çalışma, kapalı alanlarda UWB tabanlı konumlandırmada AEKF algoritması ile ölçüm gürültüsünü azaltarak doğruluğu artırmayı amaçlamaktadır. Sistem kurulumu, veri toplama, trilaterasyon, AEKF uygulaması ve performans değerlendirme adımlarından oluşur. Şekil A süreçleri görsel olarak özetlemektedir. This study aims to improve indoor UWB-based positioning accuracy by reducing measurement noise via the AEKF algorithm. The process includes system setup, data collection, trilateration, AEKF application, and performance evaluation. Figure A visually summarizes the sequential stages of the proposed approach.



***Şekil A:**.Sistem Blok Diyagramı /**Figure A**: System Block Diagram*

Önemli noktalar (Highlights)

- *UWB tabanlı konumlandırmada ölçüm doğruluğunu artırmak için AEKF algoritması geliştirilmiştir. An AEKF algorithm was developed to improve measurement accuracy in UWB-based localization.*
- *AEKF, ölçüm gürültüsü ve çevresel belirsizlikleri dinamik şekilde modelleyerek adaptif filtreleme sağlamaktadır. AEKF provides adaptive filtering by dynamically modeling measurement noise and environmental uncertainties.*
- *Trilaterasyon yöntemi ile AEKF birlikte kullanılarak konum tahmin performansı iyileştirilmiştir. Localization performance is enhanced by combining trilateration with AEKF.*
- *Sistem, mobil robot üzerinde gerçek zamanlı koşullarda test edilmiştir. The system was tested in real-time conditions on a mobile robot.*

***Amaç (Aim):** Bu çalışma, UWB tabanlı sistemlerde Uyarlamalı Genişletilmiş Kalman Filtresi algoritması ile iç mekân konumlandırma doğruluğunu artırmayı amaçlamaktadır. This study aims to enhance indoor positioning accuracy in UWB-based systems using an Adaptive Extended Kalman Filter algorithm.*

***Özgünlük (Originality):** Çalışmanın özgünlüğü, iç mekân senaryolarında Kalman yapısında gürültü kovaryanslarının dinamik olarak uyarlanmasına dayanmaktadır. The originality lies in the dynamic adaptation of noise covariances within the Kalman framework under real-world indoor scenarios.*

***Bulgular (Results):** Deneysel sonuçlar, AEKF'nin EKF ve filtresiz yöntemlere kıyasla konumlandırma hatalarını önemli ölçüde azalttığını göstermektedir. Experimental results show that AEKF significantly reduces localization errors compared to EKF and unfiltered methods.*

***Sonuç (Conclusion):** AEKF, karmaşık iç mekân ortamlarında hassas konumlandırma için güçlü ve uyarlanabilir bir çözüm olduğunu kanıtlamıştır. AEKF has proven to be a robust and adaptable solution for accurate indoor positioning in complex environments.*

*Corresponding author, e-mail: abdulhamit.sevgi@ostimteknik.edu.tr
DOI: 10.29109/gujsc.1636087

GU J Sci, Part C, 13(2): 692-705 (2025)

Gazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Dergisi
PART C: TASARIM VE TEKNOLOJİ

Gazi University
Journal of Science
PART C: DESIGN AND TECHNOLOGY

http://dergipark.gov.tr/gujsc

Kapalı Alanlarda Hassas UWB Tabanlı Konumlandırma için Uyarlamalı Genişletilmiş Kalman Filtresi

Abdulhamit SEVGİ[1*], Hasan Erdinç KOÇER[2]

[1]*OSTİM Teknik Üniversitesi, Meslek Yüksekokulu, Elektronik ve Otomasyon Bölümü, Ankara, Türkiye*

[2]*Selçuk Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü, Konya, Türkiye*

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 08/02/2025
Düzeltme: 08/05/2025
Kabul: 20/05/2025

Anahtar Kelimeler

UWB
AEKF
Kapalı Alan Konumlandırma
IMU
Küresel Konumlandırma.

Öz

Kapalı mekanlarda Küresel Konumlandırma Sistemi (GPS) gibi teknolojilerin yetersizliği, robotik sistemlerin konum belirleme süreçlerinde alternatif yöntemlerin geliştirilmesini gerekli kılmaktadır. Bu alanda, Ultra Geniş Bant (UWB), Wi-Fi Tabanlı Konumlandırma Sistemleri, Bluetooth Düşük Enerji (BLE) işaretçileri, Radyo Frekansı ile Tanımlama (RFID), ultrasonik konumlandırma ve görsel tabanlı konumlandırma gibi teknolojiler kullanılmaktadır. UWB teknolojisi konumlandırma için yaygın olarak kullanılmasına rağmen, çok yollu yayılım, görüş hattı engelleri (NLOS), elektromanyetik girişim ve sensör gürültüsü gibi etkenler nedeniyle konum doğruluğunda dalgalanmalar ve sapmalar meydana gelmektedir. Bu çalışmada, bu sorunları gidermek amacıyla Uyarlamalı Genişletilmiş Kalman Filtresi (AEKF) tabanlı bir yöntem önerilmektedir. Önerilen yöntem, UWB tabanlı konumlandırma sistemlerinde karmaşık sistem gürültüsü ve eksik ölçüm bilgileri durumunda veri bütünlüğünü koruyarak sistemden toplanan UWB ve Ataletsel Ölçüm Birimi (IMU) verilerine AEKF uygulayarak konumlandırma performansını artırmaktadır. Sistemin deneysel çalışmaları bir mobil robot aracılığıyla AEKF, Genişletilmiş Kalman Filtresi (EKF) ve filtresiz UWB ölçümleri olarak yapılmış ve karşılaştırılmıştır. Deneysel sonuçlar, AEKF'nin daha yüksek konumlandırma doğruluğu sağladığını ve gerçek zamanlı çalışabilirlik sunduğunu göstermektedir. Bu bulgular, AEKF'nin etkin bir çözüm sunduğunu ortaya koymaktadır.

Adaptive Extended Kalman Filter for Precise UWB-Based Localization in Indoor Areas

Article Info

Research article
Received: 08/02/2025
Revision: 08/05/2025
Accepted: 20/05/2025

Keywords

UWB
AEKF
Indoor Positioning
IMU
Global Positioning.

Abstract

The inadequacy of technologies such as Global Positioning System (GPS) in indoor spaces necessitates the development of alternative methods in the location determination processes of robotic systems. In this field, technologies such as Ultra Wide Band (UWB), Wi-Fi Based Positioning Systems, Bluetooth Low Energy (BLE) beacons, Radio Frequency Identification (RFID), ultrasonic positioning and visual-based positioning are used. Although UWB technology is widely used for positioning, fluctuations and deviations in location accuracy occur due to factors such as multipath propagation, line of sight obstacles (NLOS), electromagnetic interference and sensor noise. In this study, an Adaptive Extended Kalman Filter (AEKF) based method is proposed to eliminate these problems. The proposed method increases the positioning performance by applying AEKF to UWB and Inertial Measurement Unit (IMU) data collected from the system while preserving data integrity in case of complex system noise and incomplete measurement information in UWB-based positioning systems. Experimental studies of the system were conducted and compared as AEKF, Extended Kalman Filter (EKF) and filterless UWB measurements via a mobile robot. Experimental results show that AEKF provides higher positioning accuracy and offers real-time operability. These findings reveal that AEKF offers an effective solution.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

İç mekân konumlandırma teknolojileri, son yıllarda artan endüstriyel ve ticari uygulamalar doğrultusunda büyük bir önem kazanmıştır. Küresel Navigasyon Uydu Sistemleri (GNSS), açık hava ortamlarında yüksek doğrulukla konum belirleme imkânı sağlarken, kapalı alanlarda GNSS sinyallerinin zayıflaması veya tamamen kaybolması nedeniyle iç mekân konumlandırma sistemleri geliştirilmiştir [1]. Alışveriş merkezleri, havaalanları, depolar, fabrikalar, sağlık tesisleri ve

*Corresponding author, e-mail: abdulhamit.sevgi@ostimteknik.edu.tr
DOI: 10.29109/gujsc.1636087

akıllı binalar gibi kapalı alanlarda, hassas konumlandırma ihtiyacı giderek artmaktadır. Bu ihtiyacı karşılamak için çeşitli teknolojik yaklaşımlar benimsenmiştir. Bu yöntemler arasında kızılötesi (IR) sensörler, optik tabanlı sinyal iletimi kullanarak konum belirleme sağlayan bir teknoloji olarak öne çıkmaktadır [2]. Kızılötesi sinyallerin engellerden geçememesi nedeniyle görüş hattı (LOS) gereksinimi vardır, bu da kullanım alanlarını sınırlayabilmektedir [3]. Ultrasonik sensörler, ses dalgaları kullanarak mesafe ölçümü yapabilen bir başka yöntemdir. Ancak, ses dalgalarının hava koşullarından ve çevresel gürültülerden etkilenmesi nedeniyle doğruluk seviyeleri değişkenlik gösterebilmektedir [4-6]. Radyo frekansı tabanlı yöntemler arasında RFID sistemleri, aktif ve pasif etiketler aracılığıyla nesnelerin ve bireylerin konumlarını belirlemek için kullanılmaktadır. RFID sistemleri, düşük maliyetli ve enerji verimli olmalarına rağmen, sınırlı menzil ve çok yollu yayılım etkileri nedeniyle konumlandırma hassasiyeti bakımından kısıtlamalara sahiptir [7-9]. BLE teknolojisi, düşük güç tüketimi ile kısa mesafelerde veri iletimi sağlayan bir kablosuz haberleşme yöntemidir. BLE tabanlı işaretçiler, sinyal gücü baz alınarak mesafe tahmini yapabilmekte ve iç mekanlarda konumlandırma sağlayabilmektedir [10,11]. Ancak, radyo sinyallerinin çevresel faktörlerden etkilenmesi nedeniyle, doğruluk zaman zaman değişebilmektedir. Wi-Fi tabanlı konumlandırma sistemleri, erişim noktalarına dayalı olarak konum belirlemektedir. Wi-Fi sinyallerinin güçlü ve yaygın olması avantaj sağlarken, ağ trafiği, elektromanyetik girişimler ve çok yollu yayılım etkileri nedeniyle konum doğruluğu değişkenlik gösterebilmektedir [12-14]. ZigBee tabanlı konumlandırma, düşük güç tüketimiyle sensör ağları oluşturarak nesnelerin yerlerini belirlemeyi amaçlayan bir yöntemdir [15]. Ancak, ZigBee sinyallerinin sınırlı menzili ve ağ altyapısının karmaşıklığı, geniş ölçekli iç mekân konumlandırma sistemlerinde kullanımını zorlaştırmaktadır.

Bu geleneksel yöntemler, çevresel etmenlerden kaynaklanan parazitler, çok yollu yayılım etkileri ve sinyal kayıpları nedeniyle yeterli hassasiyeti sağlayamamaktadır. Bu nedenle, UWB teknolojisi, düşük güç tüketimi, yüksek doğruluk, güçlü penetrasyon kabiliyeti ve düşük maliyetli donanım gereksinimleri sayesinde iç mekân konumlandırma sistemlerinde (IPS), öne çıkan bir alternatif olarak değerlendirilmiştir. UWB teknolojisi, kısa süreli ve geniş bantlı radyo dalgaları kullanarak yüksek hızda veri iletimi ve düşük güç tüketimi ile iç mekanlarda etkin konumlandırma sağlamaktadır. Özellikle Wi-Fi ve Bluetooth teknolojileri ile karşılaştırıldığında, UWB sinyalleri çevresel engelleri daha iyi aşabilmekte ve düşük sinyal girişimi ile yüksek doğrulukta mesafe ölçümü yapabilmektedir. Bu avantajları sayesinde, UWB teknolojisi sadece iç mekân konumlandırma alanında değil, aynı zamanda kablosuz algılayıcı ağları ve nesnelerin interneti (IoT) uygulamalarında da yaygın olarak kullanılmaktadır [16-20].

UWB tabanlı IPS, temel olarak iki ana ölçüm yöntemi kullanmaktadır. Bunlardan biri, İki Yönlü Mesafe Ölçümü (TWR) yöntemidir. TWR yöntemi, bir sabit referans noktası (çapa) ile hareketli bir cihaz (etiket) arasındaki sinyalin iletim süresini hesaplayarak mesafeyi belirler. TWR, çift yönlü sinyal alışverişi gerektirdiğinden, her bir cihaz için ek iletişim yükü oluşturmaktadır. Diğer yöntem ise Varış Zaman Farkı (TDOA) yöntemidir. TDOA yöntemi, birden fazla UWB anteninden gelen sinyallerin varış zaman farklarını hesaplayarak konum belirlemektedir. TDOA'nın en büyük avantajı, TWR yöntemine kıyasla daha az iletişim yüküne sahip olması ve çok sayıda cihazın aynı anda konumlandırılabilmesine olanak tanımasıdır [16-23]. Bu ölçüm yöntemleri, temel olarak etiket ile çapa arasındaki mesafenin belirlenmesine dayanır. Mesafe hesaplamalarının ardından, laterasyon veya trilaterasyon yöntemleri kullanılarak nesnenin konumu tahmin edilir. İç mekân konumlandırma sistemlerinde mesafe ölçümü için dört temel yöntem bulunmaktadır: Varış Zamanı (TOA), TDOA, Alınan Sinyal Gücü (RSS) ve Varış Açısı (AOA). Her bir yöntem, ölçüm prensipleri ve performans kriterleri açısından farklı avantajlar ve dezavantajlara sahiptir [16-18].

Bir IPS, daha yüksek doğruluk ve güvenilirlik sağlamak amacıyla tek bir yöntem kullanabileceği gibi hibrit bir yaklaşım da benimseyebilir. TOA ve TDOA yöntemleri, sinyalin iletilmesi ve alınması arasındaki zaman farkına dayalı olarak mesafeyi belirlediğinden, UWB teknolojisinin sunduğu yüksek zaman çözünürlüğü avantajından faydalanarak hassas konum tahmini yapılmasını sağlar. Bu nedenle, TOA ve TDOA, genellikle mesafe tahmini için en sık kullanılan yöntemler arasında yer almaktadır. Ancak, UWB konumlandırma sistemlerinde doğruluğu etkileyen çeşitli faktörler bulunmaktadır. NLOS koşulları, sinyalin doğrudan hareketli cihaza ulaşmasını engelleyerek ölçüm hatalarına neden olmaktadır. Ayrıca, çok yollu yayılım etkisi, sinyalin farklı yüzeylerden yansıyıp birden fazla rotadan ulaşmasına sebep olarak hatalı mesafe ölçümlerine yol açmaktadır. Bu tür hata kaynakları, iç mekân konumlandırma sistemlerinin güvenilirliğini ve

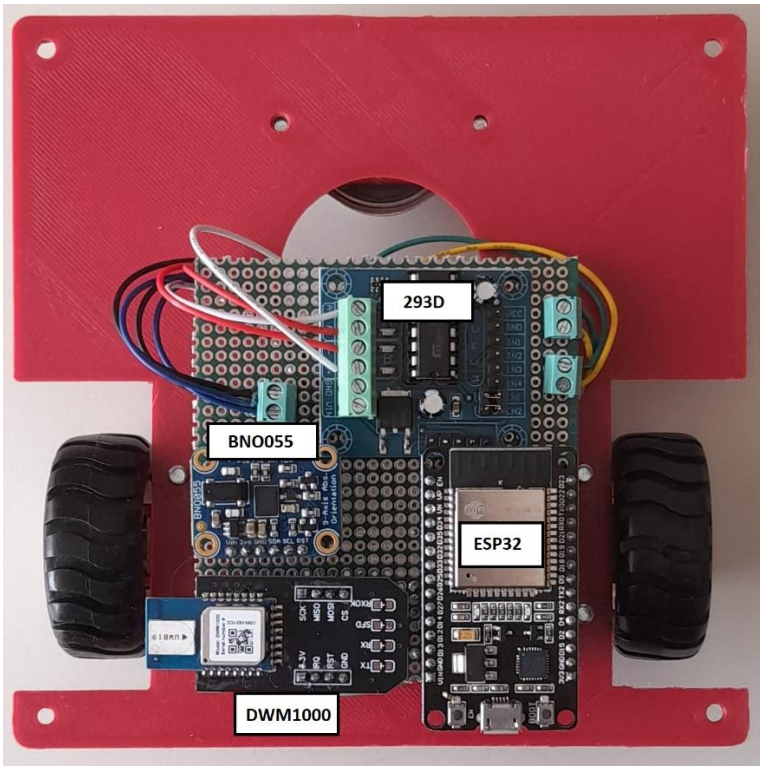
doğruluğunu doğrudan etkilemektedir. UWB tabanlı konumlandırma sistemlerinde karşılaşılan temel hata türleri arasında sistematik hatalar (bias), aykırı değerler (outliers) ve zamanlama hataları bulunmaktadır. Sistematik hatalar, UWB antenlerinin yönelimi, elektromanyetik özellikleri ve cihazların fiziksel yapısı nedeniyle ölçümlerde meydana gelen sapmalardır. Aykırı değerler ise çevresel etmenler ve radyo frekansı girişimleri nedeniyle hatalı ölçümlerin ortaya çıkmasına sebep olmaktadır. Zamanlama hataları ise UWB sinyallerinin gönderilme ve alınma zamanlarındaki küçük belirsizlikler nedeniyle mesafe ölçümlerinin doğruluğunu olumsuz yönde etkilemektedir [16-23]. Bu hataların giderilmesi için farklı istatistiksel ve makine öğrenimi tabanlı yöntemler geliştirilmiştir. Sinir ağları kullanılarak sistematik hatalar modellenebilir ve düzeltilerek daha yüksek doğruluk elde edilebilir [24-25]. Bunun yanı sıra, Kalman Filtresi (KF) ve M-estimation gibi teknikler, aykırı değerleri filtreleyerek konumlandırma doğruluğunu artırmaktadır. Özellikle KF, zaman serisi verilerini kullanarak gürültüyü ve ölçüm hatalarını azaltmada etkili bir yöntemdir. KF, her güncellemede önceki tahmini ve mevcut ölçüm verilerini kullanarak en olası konum bilgisini hesaplamaktadır. Bunun yanında, M-estimation yöntemi, aykırı ölçümleri tespit edip etkilerini en aza indirerek konumlandırma doğruluğunu artırmaktadır [16,18,23,26,27].

Bu çalışmada, TWR tabanlı UWB konumlandırma sistemlerinin doğruluğunu artırmaya yönelik yeni bir yöntem önerilmektedir. Önerilen yaklaşımda, geliştirilen AEKF karmaşık sistem gürültüsü ve eksik ölçüm bilgileri durumunda veri bütünlüğünü koruyarak filtreleme performansını artırmaktadır. Önerilen yöntem, hesaplama kaynakları kısıtlı olan küçük ölçekli mobil robotlarda gerçek zamanlı olarak test edilmiştir.

2. MATERYAL VE METOD (MATERIALS AND METHODS)

2.1. Sistem Bileşenleri (System Components)

Bu çalışmanın hareketli ve sabit deneyleri için geliştirilen robotun üç tekerleği vardır, arkadaki iki tekerlek aktif tahrik tekerlekleri ve öndeki döner tekerlek ise yardımcı tekerlektir. Robot 140X140 En X Boy olacak şekilde tasarlanmış ve 3 boyutlu yazıcıda üretilmiştir. Şekil 1'de üretilen mobil robot görülmektedir.



Şekil 1. Üretilen Mobil Robot (The Manufactured Mobile Robot.)

Sistem içerisinde robotun hareketi ve sensörlerle iletişimin gerçekleştirilmesi için ESP32 wroom denetleyici kartı kullanılmaktadır. Bu cihazlar, düşük güçlü kablosuz ağlarda çalışmaya izin veren Wi-Fi ve BLE iletişim protokolünü kullanır. Robot üzerinde 1 adet DWM1000 UWB modülü, 1 adet

BNO055 IMU, 1 adet 293D motor sürücü ve 2 adet N20 enkoderli motor kullanılmıştır. Sabit çapalar ise 1 adet ESP32 ve DWM1000 UWB modülünden oluşmaktadır. Robot üzerindeki ESP32 topladığı verileri Wi-Fi yoluyla anlık olarak filtrelemenin yapıldığı bilgisayara göndermektedir.

2.2. Uçuş Süresine Dayalı Mesafe Ölçüm Yöntemi (Distance Measurement Method Based on Flight Time)

Kablosuz konumlandırma sistemlerinde, nesnelerin veya cihazların birbiriyle olan mesafesini belirlemek için çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Bu yöntemlerden biri de Uçuş Süresi (ToF) dayalı ölçüm tekniğidir. ToF bir sinyalin kaynaktan hedefe ulaştığı sürenin ölçülmesi prensibine dayanır. Bazı kaynaklarda bunlar, ToF Tabanlı Konumlandırma Teknikleri veya Zamana Dayalı Konumlandırma Yöntemleri (Time-Based Positioning Methods) olarak da geçebilir. ToF tabanlı konumlandırma yöntemleri Tek Yönlü Mesafe Ölçümü (OWR), TWR olarak sınıflandırılabilir [16].

OWR yöntemi, iki düğüm çapa ve etiket arasında tek yönlü bir sinyal iletimi gerçekleştirerek mesafe ölçümü yapar. Bu yöntem, sinyalin iletim süresi ile mesafeyi belirler ve aşağıdaki adımları takip eder: Çapa, bir zaman damgası içeren sinyali etiket cihazına gönderir. Etiket, sinyali aldıktan sonra sinyalin varış zamanını kaydeder. Mesafe, sinyalin yayılma süresi (T_f) ile ışık hızının çarpılmasıyla hesaplanır:

$$d = c \cdot T_f \tag{1}$$

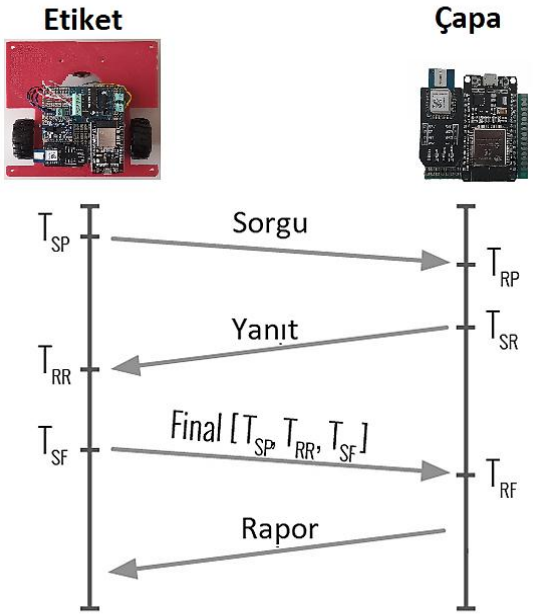
Burada:
d: İki cihaz arasındaki mesafe (metre cinsinden),
c : Işık hızı (yaklaşık 3.0×10^8 m/s),
T_f : Sinyalin uçuş süreci (saniye cinsinden).

OWR yöntemi, düşük iletişim yükü ve hızlı ölçüm yapabilme avantajlarına sahip olup, özellikle gerçek zamanlı uygulamalarda tercih edilebilmektedir. Ancak, bu yöntemin hassas ölçümler yapabilmesi için çapa ve etiket arasında yüksek doğrulukta saat senkronizasyonu gerekmektedir. Küçük zaman farkları dahi büyük mesafe hatalarına neden olabileceğinden, frekans sapmaları ölçüm doğruluğunu düşürebilmektedir. Ayrıca, iç mekân gibi çok yollu yayılımın söz konusu olduğu ortamlarda sinyal yansımaları nedeniyle ölçüm doğruluğu olumsuz etkilenebilmektedir [16]. TWR, OWR yönteminden farklı olarak iki cihaz arasında çift yönlü sinyal değişimi gerçekleştirerek mesafe hesaplamaya dayanmaktadır. TWR yönteminde, çapa cihazı içerisinde zaman damgası bulunan bir sinyal gönderir ve etiket, bu sinyali aldıktan sonra belirli bir bekleme süresinin ardından çapaya bir yanıt gönderir. Çapa, sinyalin gidiş-geliş süresini ölçerek mesafe hesaplamasını gerçekleştirir. Tek yönlü sinyal yayılım süresi:

$$T_f = \frac{2T_{\text{round}} - T_{\text{reply}}}{2} \tag{2}$$

Burada:
T_{round} : Çapanın sinyali gönderme ve tekrar alma arasındaki toplam süre,
T_{reply} : Etiketin yanıt vermek için geçirdiği süre,
T_f : Sinyalin tek yönlü uçuş süreci.

Mesafe hesaplaması denklem 1'deki gibi yapılır. TWR yöntemi, saat senkronizasyonu gerektirmemesi açısından OWR yöntemine göre önemli bir avantaja sahiptir ve gidiş-dönüş sinyal süresi kullanılarak ölçüm doğruluğu artırılmaktadır. Şekil 2'de TWR mesafe ölçüm şeması verilmektedir.



Şekil 2. TWR Mesafe Ölçüm Şeması (TWR Distance Measurement Diagram)

Mesafe ölçümü, üç mesajın değişimiyle gerçekleştirilir. Etiket, bilinen bir Çapa'ya Poll mesajı göndererek süreci başlatır. Çapa, mesajın alım zamanını kaydeder ve belirlenen zamanda Yanıt mesajı ile geri döner. Etiket, Yanıt mesajını aldığında ilgili zaman damgasını kaydederek Son mesajı oluşturur ve Çapa'ya iletir. Çapa, Son mesajın alım zamanına ve içerdiği zaman bilgilerine dayanarak ToF hesaplar ve mesafeyi belirler. İsteğe bağlı olarak, bu mesafe bilgisi bir Rapor mesajı ile

etikete veya diğer UWB cihazlarına gönderilebilir. Bununla birlikte, çift yönlü mesaj alışverişi gerektirdiğinden, ağ üzerindeki bant genişliği tüketimini artırmakta ve özellikle yoğun iletişim gerektiren uygulamalarda ek yük oluşturmaktadır. Ayrıca, iletişim sürecinde oluşabilecek saat kaymaları ve frekans sapmaları ölçüm doğruluğunu etkileyebilmektedir [16,20].

2.3. Trilaterasyon Yöntemi (Trilateration Method)

Her bir çapa nokta, sabit konum bilgisine sahip olmakla birlikte etiket ile olan mesafe ölçümleri d_i ile temsil edilir. Her bir çapa için etiketin konumuyla olan ilişki, Öklidyen uzaklık kavramına dayalı olarak şu küre (2B uygulamada daire) denklemi ile ifade edilir:

$$(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 = d_i^2 \tag{3}$$

Burada $(x_i - y_i)$ çapanın bilinen koordinatları, d_i ise ölçülen mesafedir. Çapa 0 referans alınarak diğer çapalarla karşılaştırma yapıldığında, iki denklemin farkı alınır; bu, kare terimlerin birbirini götürmesiyle lineer bir denklem sistemine dönüşür. Özellikle, çapa 0 ve i'nci çapa için fark alınması sonucunda elde edilen denklem,

$$(x_i - x_0)x + (y_i - y_0)y = \frac{1}{2}\left[d_0^2 - d_i^2 + \left(x_i^2 - x_0^2\right) + \left(y_i^2 - y_0^2\right)\right] \tag{4}$$

şeklinde ifade edilir. Bu denklem, her bir $i(i = 1, \dots, N-1)$ için geçerli olup, elde edilen N 1 denklem, matris gösterimi kullanılarak

$$\mathrm{Ap} = \mathrm{b} \tag{5}$$

haline getirilir. Burada, etiketin konum vektörü $\mathrm{p} = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}$ iken, A matrisi, her satunda $[x_i \; -x_0 \; y_i - y_0]$ bilegenlerini içerit b vektörü ise,

$$b_i = \frac{1}{2}\left[d_0^2 - d_i^2 + \left(x_i^2 - x_0^2\right) + \left(y_i^2 - y_0^2\right)\right] \tag{6}$$

İfadesiyle tanımlanır. En küçük kareler yaklaşımına göre, sistemin çözümü

$$\mathrm{p} = (\mathrm{A}^T\mathrm{A})^{-1}\mathrm{A}^T\mathrm{b} \tag{7}$$

olarak elde edilir. Bu formül, çapaların düzenine bağlı olarak sabit olan $\mathrm{A}^T\mathrm{A}$ matrisinin tersinin yalnızca bir kez hesaplanması avantajını da sunar. Sonuç olarak, trilaterasyon yöntemi, ölçüm verileri ve çapa koordinatları arasındaki ilişkiyi lineerleştirerek etiketin konumunun en küçük kareler yöntemi ile belirlenmesine olanak tanır [17,18].

2.4. AEKF

Geleneksel Genişletilmiş Kalman Filtresi (EKF), doğrusal olmayan sistemlerin durum tahmini için kullanılan yaygın bir yaklaşımdır. Ancak, sabit sistem gürültüsü (Q) ve ölçüm gürültüsü (R) varsayımları, çevresel değişkenlikler ve sensör hataları nedeniyle filtrenin performansını olumsuz etkileyebilir. Bu nedenle AEKF, gürültü kovaryans matrislerini (Q ve R) zamanla dinamik olarak güncelleyerek filtreleme performansını iyileştirir. EKF, doğrusal olmayan sistemlerde durum tahminleri için öngörü ve güncelleme adımlarını gerçekleştirirken, süreç gürültüsü Q ve ölçüm gürültüsü R kovaryans matrislerini sabit kabul eder. Ancak, gerçek uygulamalarda sensör belirsizlikleri, çevresel değişkenlikler ve model hataları nedeniyle bu matrislerin uyarlanması gerekebilir. Bu amaçla AEKF, Q ve R'yi zaman içinde dinamik olarak güncelleyerek filtre performansını iyileştirir.

Sistem modelinde, durum vektörü x_k örneğin $\mathrm{x}_k = \begin{bmatrix} x_k \\ y_k \\ \dot{x}_k \\ \dot{y}_k \end{bmatrix}$ olarak tanımlanabilir. Durum geçişi, IMU'dan elde edilen ivme ölçümleri $\mathrm{u}_k = \begin{bmatrix} a_{x,k} \\ a_{y,k} \end{bmatrix}$ kullanılarak,

$$\mathrm{x}_{k+1} = f(\mathrm{x}_k, \mathrm{u}_k) + \mathrm{w}_k \tag{8}$$

şeklinde modellenir, Burada $f(\cdot)$ fonksiyonu, klasik hareket denklemleri kullanılarak; örneğin

$$f(\mathrm{x}_k, \mathrm{u}_k) = \begin{bmatrix} x_k + \dot{x}_k\Delta t + \frac{1}{2}a_{x,k}\Delta t^2 \\ y_k + \dot{y}_k\Delta t + \frac{1}{2}a_{y,k}\Delta t^2 \\ \dot{x}_k + a_{x,k}\Delta t \\ \dot{y}_k + a_{y,k}\Delta t \end{bmatrix} \tag{9}$$

ifadesi ile tanımlanır. Ölçüm modeli ise, UWB tabanlı mesafe ölçümleri ile çapaların bilinen konumlan arasındaki öklidyen uzaklıklar şeklinde,

$$z_{i,k} = h_i(\mathrm{x}_k) + v_{i,k} = \sqrt{(x_k - x_i)^2 + (y_k - y_i)^2} + v_{i,k} \tag{10}$$

olarak ifade edilir. EKF algoritmasında, öncelikle öngörü adımında durum tahmini

$$\hat{\mathrm{x}}_{k|k-1} = f(\hat{\mathrm{x}}_{k-1|k-1}, \mathrm{u}_{k-1}) \quad (11)$$

ve hata kovaryansı

$$\mathrm{P}_{k|k-1} = \mathrm{F}_{k-1}\mathrm{P}_{k-1|k-1}\mathrm{F}_{k-1}^{T} + \mathrm{Q}_{k-1} \quad (12)$$

hesaplanır. Ölçüm güncelleme adımında ise, önlem (innovation)

$$\tilde{\mathrm{y}}_k = \mathrm{z}_k - h(\hat{\mathrm{x}}_{k|k-1}) \quad (13)$$

ölçüm önlem kovaryansı

$$\mathrm{S}_k = \mathrm{H}_k\mathrm{P}_{k|k-1}\mathrm{H}_k^{T} + \mathrm{R}_k \quad (14)$$

Kalman kazancı

$$\mathrm{K}_k = \mathrm{P}_{k|k-1}\mathrm{H}_k^{T}\mathrm{S}_k^{-1} \quad (15)$$

durum güncellemesi

$$\hat{\mathrm{x}}_{k|k} = \hat{\mathrm{x}}_{k|k-1} + \mathrm{K}_k\tilde{\mathrm{y}}_k \quad (16)$$

ve hata kovaryans güncellemesi

$$\mathrm{P}_{k|k} = (\mathrm{I} - \mathrm{K}_k\mathrm{H}_k)\mathrm{P}_{k|k-1} \quad (17)$$

hesaplanır. AEKF, bu temel EKF adımlarına ek olarak, gürültü kovaryans matrislerini adaptif olarak günceller. Ölçüm gürültüsü kovaryansı, önlem vektörünün gözlemlenen kovaryansı ile modelden beklenen kovaryans arasındaki fark kullanılarak,

$$\mathrm{R}_k = \alpha_R\mathrm{R}_{k-1} + (1-\alpha_R)\left[\tilde{\mathrm{y}}_k\tilde{\mathrm{y}}_k^{T} - \mathrm{H}_k\mathrm{P}_{k|k-1}\mathrm{H}_k^{T}\right] \quad (18)$$

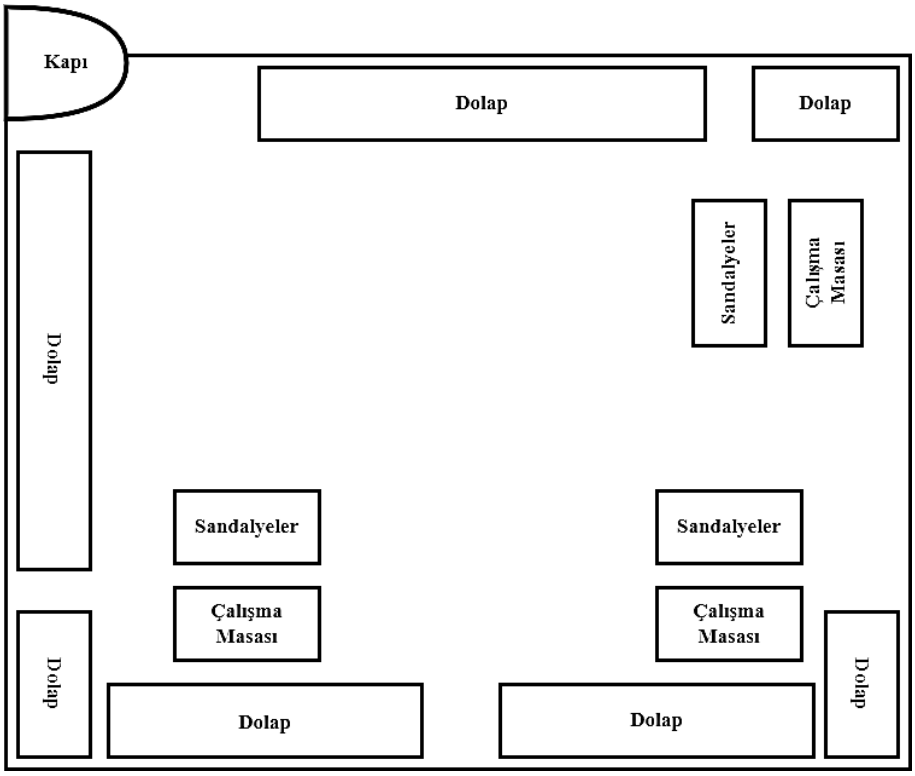
şeklinde uyarlanır. Benzer şekilde, süreç gürültüsü kovaryansı, Kalman kazancı ile elde edilen hata üzerinden

$$\mathrm{Q}_k = \alpha_Q\mathrm{Q}_{k-1} + \left(1-\alpha_Q\right)\left[\mathrm{K}_k\tilde{\mathrm{y}}_k\tilde{\mathrm{y}}_k^{T}\mathrm{K}_k^{T}\right] \quad (19)$$

formülüyle güncellenir. Burada α_R ve α_Q uyarlamanın yumuşatılması için kullanılan katsayılardır. Böylece AEKF, gelen ölçüm verilerine ve sistemdeki model belirsizliklerine karşı daha esnek bir yapı sunarak, etiketin konumunun daha doğru ve stabil tahmin edilmesini sağlar. Sonuç olarak hem trilaterasyon yöntemi hem de AEKF algoritması, UWB tabanlı konum belirlemede birbirini tamamlayan yaklaşımlar olarak kullanılmaktadır. Trilaterasyon, çapaların sabit konum bilgileri ve mesafe ölçümleri kullanılarak etiketin konumunu doğrudan en küçük kareler yöntemiyle hesap ederken, AEKF ise dinamik sistem modelini ve ölçüm gürültülerini dikkate alarak, öngörü ve güncelleme adımlarıyla birlikte adaptif gürültü kovaryans uyarlamaları yapar. Bu iki yöntem, birlikte kullanıldığında özellikle hareketli etiket senaryolarında sistemin hem doğruluğunu hem de stabilitesini artırmaktadır [28-29].

3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR (EXPERIMENTAL STUDIES)

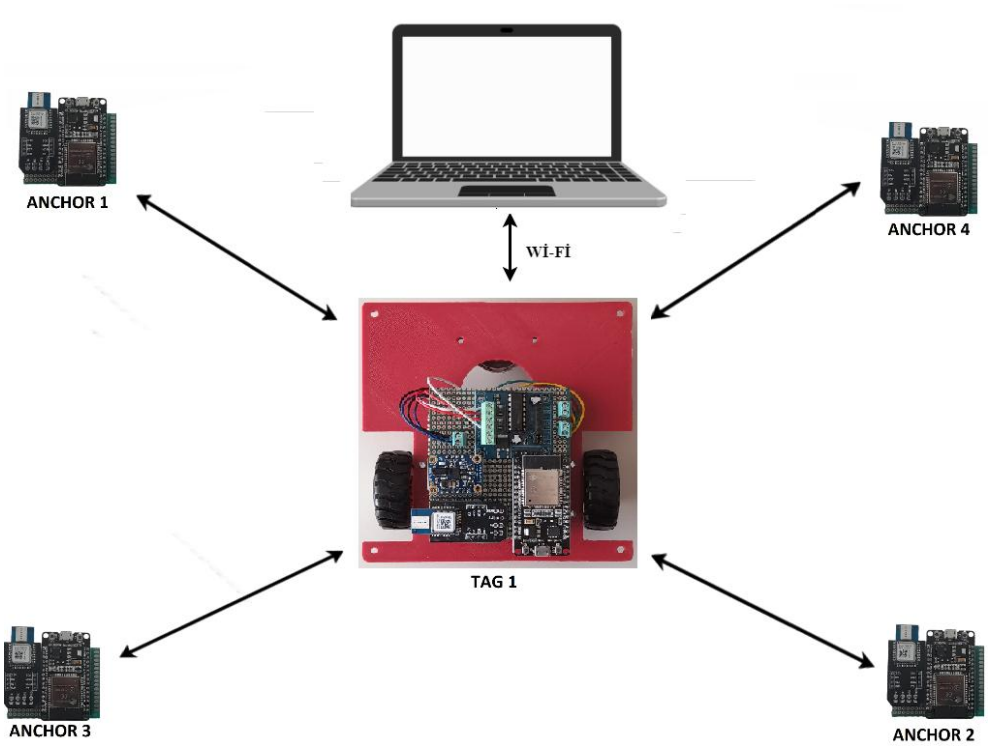
Bu çalışmada, Şekil 3'te verilen çok sayıda eşya bulunan bir ofis ortamında, UWB tabanlı konum belirleme sisteminin performansı sabit noktalar ve hareketli robot olmak üzere iki farklı senaryo ile deneysel olarak incelenmiştir. Ofis ortamı duvarlarla çevrili ve mobilyalarla döşenmiş kapalı bir alanıdır. Ortam, klasik iç mekân özelliklerini taşıyan bir ofis olup; masa, sandalye, dolap, bilgisayar gibi elektromanyetik olarak yansıtıcı ve sinyal yolunu etkileyici birçok unsur barındırmaktadır. Alanın fiziksel sınırları beton duvarlarla çevrilidir ve tavan mevcuttur. Çapalar, bu duvarlarla çevrili alanın köşe noktalarına sabitlenmiştir. Bu deney senaryoları hem filtresiz hem de AEKF filtresi uygulanarak tekrarlanmıştır. Ofis ortamının karmaşıklığı ve multipath (çok yollu yayılım) etkilerinin gözlemlenebileceği gerçek koşullar göz önünde bulundurularak, deneylerde ofisin köşe noktalarına sırasıyla A_1 (0, 0), A_2 (480, 640), A_3 (0, 640) ve A_4 (480, 0) koordinatlarına yerleştirilen dört sabit çapa kullanılmıştır.



Şekil 3. Ofis Ortamı Krokisi (Office Environment Layout)

Mobil robota monte edilen etiket, UWB modülleri aracılığıyla mesafe ölçümleri ve entegre IMU sensöründen alınan hareket verilerini ESP32 mikrodenetleyicisi üzerinde işleyip, Wi-Fi bağlantısı üzerinden merkezi bir bilgisayara ileterek, trilaterasyon ve AEKF algoritmalarının uygulanmasına olanak sağlamıştır. Ölçümler sırasında, UWB modülü tarafından gerçekleştirilen mesafe ölçümleri ve etiket üzerinde yer alan IMU verileri kaydedilmiş; böylece sinyal uçuş süresi, ölçüm gürültüleri ve çevresel faktörlerin sistem performansı üzerindeki etkileri analiz edilmiştir. Sabit noktalar senaryosunda robot belirlenen 15 farklı sabit noktaya bırakılmış ve sistemin statik koşullar altındaki doğruluğu ve kararlılığı değerlendirilmiştir. Ayrıca, ölçüm gürültülerini azaltmak ve konum tahmin doğruluğunu artırmak amacıyla AEKF yöntemi uygulanmıştır.

Doğrusal hareketli robot senaryosunda, mobil robota monte edilen etiket, başlangıç ve varış noktaları arasında doğrusal bir yol izleyerek hareket etmiştir. Bu senaryoda, sistemin sabit yön ve hız altında konum tahmin performansı değerlendirilmiştir. Böylece hem statik hem de dinamik durumlarda, sistemin konum belirlemedeki doğruluğu karşılaştırılmıştır. Sistemin blok diyagramı, UWB modülleri, IMU sensörleri, ESP32 mikrodenetleyicisi ve Wi-Fi haberleşme altyapısı arasındaki veri akışını ayrıntılı biçimde ortaya koyarak, sistem bileşenleri arasındaki etkileşimi ve gerçek zamanlı konum filtrelemesi sürecini gözler önüne sermiştir. Sistemin temel blok diyagramı Şekil 4'te verilmektedir.

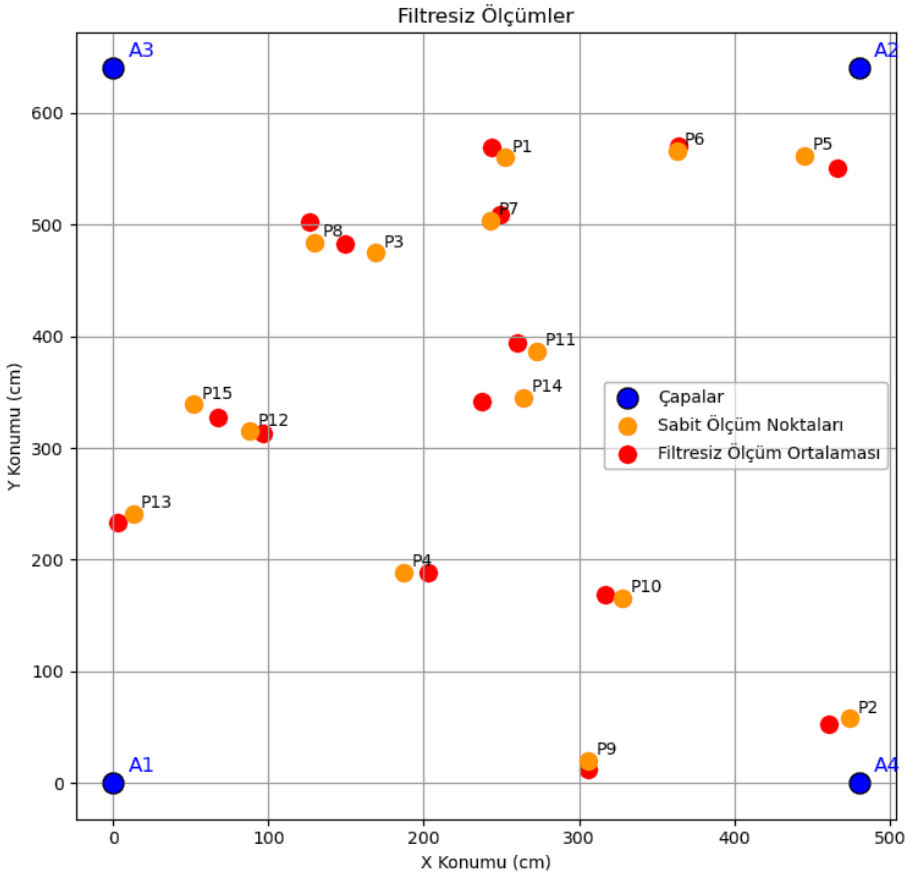


Şekil 4. Sistemin Blok Diyagramı (System Block Diagram)

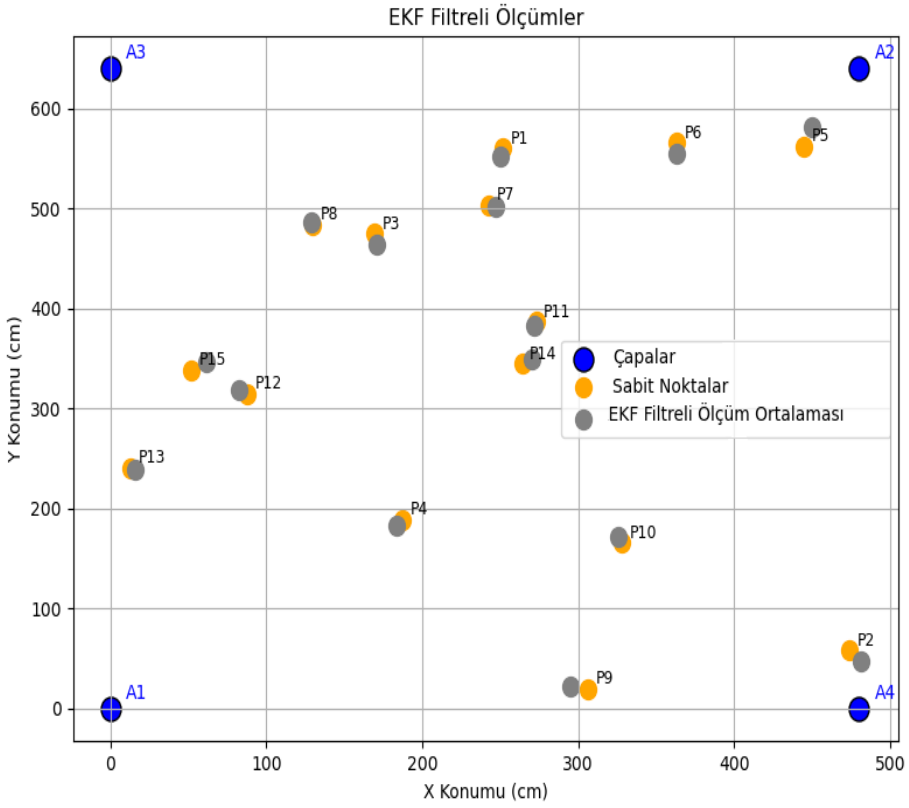
4. BULGULAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

Deneysel çalışmalar, sistemin gerçek dünya koşullarında performansını kapsamlı olarak değerlendirmek amacıyla, çok sayıda eşya bulunan ofis ortamında gerçekleştirilen sabit noktalar ve hareketli robot deney senaryoları çerçevesinde yürütülmüştür. Deneylerde, ofisin köşe noktalarına yerleştirilen dört sabit çapa A_1 (0, 0), A_2 (480, 640), A_3 (0, 640) ve A_4 (480, 0) referans olarak kullanılmış; mobil robota monte edilen etiket ise, UWB modülleri aracılığıyla alınan mesafe ölçümleri ile entegre IMU verilerini ESP32 mikrodenetleyicisi üzerinden Wi-Fi bağlantısı ile merkezi bilgisayara ileterek, konum belirleme algoritmalarının (trilaterasyon ve AEKF) uygulanmasına olanak sağlamıştır. Elde edilen veriler, sistemin hem statik hem de dinamik koşullar altında yüksek doğruluk ve stabiliteyle çalıştığını ortaya koymaktadır.

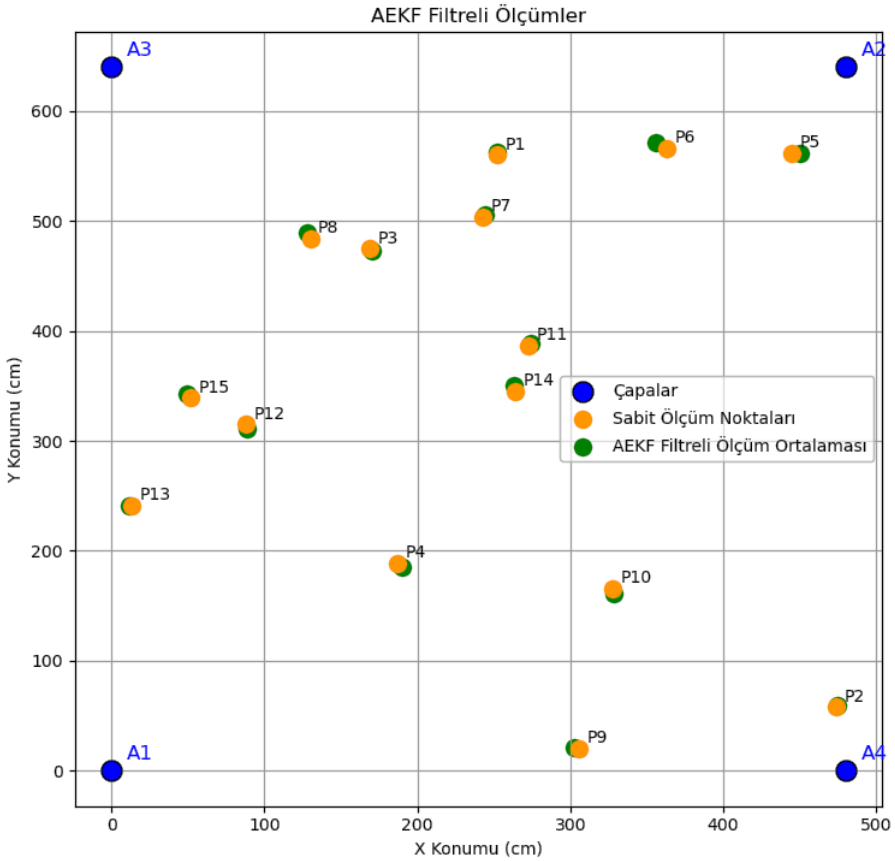
Sabit noktalar üzerinde yapılan ölçümler sonucunda, UWB modüllerinden alınan mesafe verileri kullanılarak hesaplanan konum tahminlerinde, klasik trilaterasyon yöntemine kıyasla AEKF algoritmasının adaptif güncelleme mekanizması sayesinde ölçüm hatalarının belirgin şekilde minimize edildiği gözlemlenmiştir. Statik koşullarda, hareket kaynaklı ek gürültüler ortadan kalktığı için daha tutarlı ölçümler elde edilmiştir. Ancak, sabit noktalarda multipath etkileri ve sinyal yansımalarından kaynaklanan hataların daha belirgin hale gelebildiği tespit edilmiştir. Bu durum, sistemin çevresel belirsizliklere rağmen sabit noktalarda yüksek konum doğruluğu sağlayabildiğini, ancak sinyal yansımalarına karşı uygun filtreleme ve hata düzeltme yöntemlerinin gerekliliğini ortaya koymaktadır. Şekil 5, Şekil 6 ve Şekil 7'de; sabit noktalarda yapılan filtresiz, EKF filtreli ve AEKF filtreli ölçümlerin 50 adet ölçüm ortalamasına göre konumlandırma hataları görsel olarak verilmektedir. Şekil 6'da EKF'li sabit nokta ölçüm ortalamaları, Şekil 7'de AEKF'li sabit nokta ölçüm ortalaması verilmektedir



Şekil 5. Filtresiz Sabit Noktalar Deney Sonuçları (Fixed-Point Experimental Results without Filtering)



Şekil 6. EKF'li Sabit Noktalar Deney Sonuçları (Fixed-Point Experimental Results with EKF)

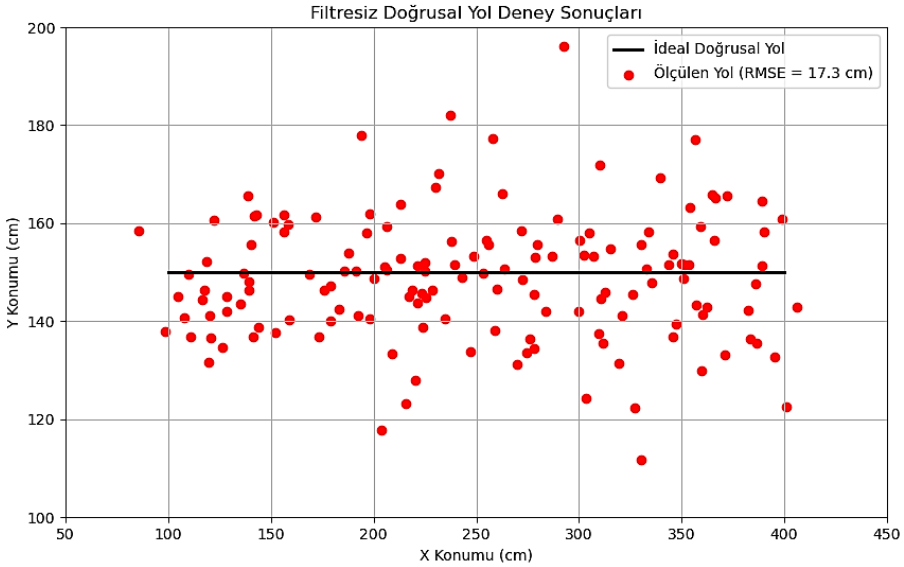


Şekil 7. AEKF'li Sabit Noktalar Deney Sonuçları (Fixed-Point Experimental Results with AEKF)

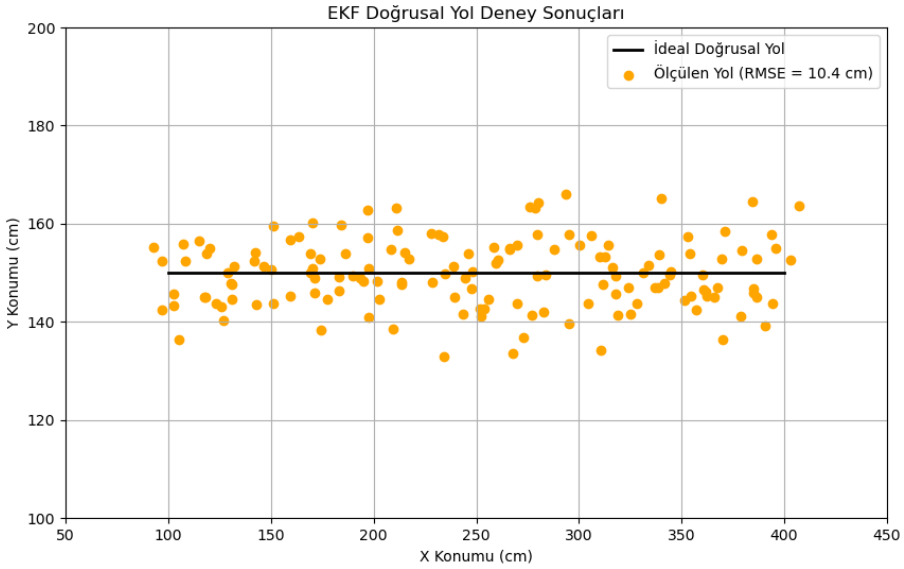
Şekil 5, Şekil 6 ve Şekil 7 karşılaştırıldığında AEKF'nin filtresiz ve EKF filtreli UWB ölçümlerine göre başarımı şekilde net bir şekilde görülmektedir. Tablo 1'de yapılan sabit nokta deneyindeki 15 noktadan alınan 50 ölçüm verisinin ortalama hataları verilmektedir. Doğrusal hareket senaryosunda filtresiz UWB ölçüm grafiği ve sonuçları Şekil 8'de verilmektedir. Doğrusal hareket senaryosunda EKF filtreli UWB ölçüm grafiği ve sonuçları Şekil 9'da verilmektedir.

Tablo 1. Ortalama Hata Deney Sonuçları (cm) (Experimental Results of Mean Localization Error (cm))

Nokta No	Filtresiz	EKF Filtreli	AEKF Filtreli
P1	11,64	8,04	0,46
P2	17,37	11,87	0,74
P3	19,10	7,55	4,78
P4	16,87	7,33	3,20
P5	28,10	10,18	2,35
P6	3,87	5,71	4,69
P7	11,70	4,79	3,16
P8	17,91	3,29	1,13
P9	6,88	5,49	2,82
P10	11,93	6,21	4,27
P11	14,93	4,13	1,73
P12	7,59	7,09	3,68
P13	13,35	3,96	1,46
P14	28,62	8,03	2,43
P15	21,16	7,61	0,89
Ortalama Hata	15,40	6,75	2,52

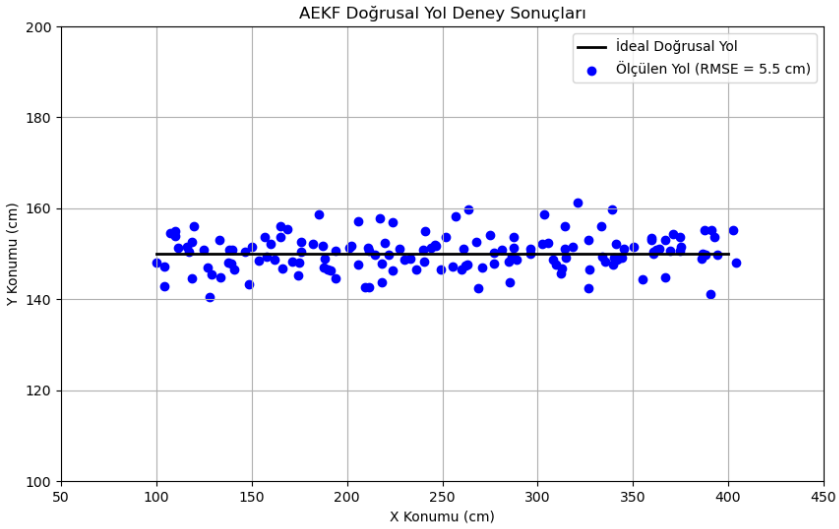


Şekil 8. Filtresiz Doğrusal Yol Deney Sonuçları (Experimental Results of Linear Path without Filtering)



Şekil 9. EKF'li Doğrusal Yol Deney Sonuçları (Experimental Results of Linear Path Using the EKF)

Özellikle, doğrusal hareket senaryosunda etiketin sabit yön ve hız altında gerçekleştirdiği hareketler sonucunda, UWB modüllerinden alınan mesafe ölçümleri ile hesaplanan konum verilerinde, klasik trilaterasyon yöntemine ve EKF filtresi sonuçlarına kıyasla AEKF algoritmasının adaptif güncelleme mekanizması sayesinde ölçüm hatalarının belirgin şekilde minimize edildiği gözlemlenmiştir. Bu durum, sistemin sinyal yansımaları ve multipath etkileri gibi çevresel belirsizliklere rağmen, konum tahmininde yüksek performans sergilediğini göstermektedir (Şekil 10).



Şekil 10. AEKF'li Doğrusal Yol Deney Sonuçları. (Experimental Results of Linear Path Using the AEKF)

5. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışma kapalı ve karmaşık iç mekân koşullarında kullanılan UWB tabanlı konumlandırma sistemlerinde AEKF kullanımını ele alarak, sistemin konumlama doğruluğunu artırmaya yönelik bir yaklaşım ortaya koymuştur. Gerçek ofis ortamında gerçekleştirilen deneyler hem statik hem de dinamik hareket senaryolarında sistemin yüksek düzeyde doğruluk ve kararlılık sağladığını göstermiştir. Özellikle çok yollu yayılım, görüş hattı dışı durumlar ve ortam gürültüsü gibi zorluklar altında, AEKF algoritması ölçüm gürültüsünü dinamik olarak modellemesiyle sistemin çevresel değişkenlere uyum sağlayabildiği görülmüştür. Aynı deney düzeneğinde çalışmaya EKF'de entegre edilmiş ve her iki yaklaşım karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Yapılan analizler, AEKF'nin, özellikle ölçüm belirsizliğinin zamana bağlı değiştiği koşullarda EKF'ye kıyasla konum hatasının daha düşük olduğunu göstermiş ve daha hızlı yakınsadığını ortaya koymuştur. Bununla birlikte deneysel çalışmalar, uyarlamalı filtre yapısının sağladığı avantajların, başlangıç parametrelerinin uygun şekilde seçilmesine bağlı olduğu ortaya koymuştur. Filtrenin başlatıldığı ilk adımlarda kullanılan durum vektörü, hata kovaryans matrisi (P_0) ve süreç/ölçüm gürültüsü kovaryansları (Q, R) algoritmanın yakınsama davranışını önemli ölçüde etkilediği gözlemlenmiştir. Uygun başlangıç koşulları altında AEKF hızlı ve kararlı şekilde yakınsarken, aşırı küçük veya büyük başlangıç kovaryansları, filtrede geç yakınsama, osilasyon ya da lokal minimumlara sapma gibi istenmeyen sonuçlara yol açtığı gözlemlenmiştir. Bu bulgu, AEKF'nin esnekliğinin yanında hassasiyetini de vurgulamakta ve filtre tasarımında başlangıç koşullarına yönelik dikkatli parametre seçiminin önemini ortaya koymaktadır. Sonuç olarak, deneysel bulgular; AEKF algoritmasının, UWB tabanlı konumlandırma sistemlerinin doğruluğunu artırmak için etkili bir araç olduğunu ve özellikle gerçekçi, gürültülü ve değişken iç mekân koşullarında klasik filtresiz UWB ve EKF yöntemlerine kıyasla daha istikrarlı sonuçlar verdiği görülmektedir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

Bu çalışma ilk yazarın doktora tezinin sonuçlarını içermektedir.

This study includes the results of the first author's PhD dissertation.

ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

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

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

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

Yazarlar çalışmaya eşit oranda katkı sağlamıştır.

The authors have contributed equally to the work.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

There is no conflict of interest in this study.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

[1] Sesyuk, S., Ioannou, S., & Raspopoulos, M. (2022). A survey of 3D indoor localization systems and technologies. *Sensors, 22*, 9380. https://doi.org/10.3390/s22239380

[2] Arai, T., Yoshizawa, T., Aoki, T., Zempo, K., & Okada, Y. (2019). Evaluation of indoor positioning system based on attachable infrared beacons in metal shelf environment. *2019 IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE)*, 1–4. https://doi.org/10.1109/ICCE.2019.8662007

[3] Yue, L., Lei, H., & Qunli, X. (2021). Line-of-sight rates extraction of roll-pitch seeker under anti-infrared decoy state. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, *32*(1), 178–196. https://doi.org/10.23919/JSEE.2021.000016

[4] Wang, J., Sun, S., Ning, Y., Zhang, M., & Pang, W. (2021). Ultrasonic TDoA indoor localization based on piezoelectric micromachined ultrasonic transducers. *2021 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS)*, 1–3. https://doi.org/10.1109/IUS52206.2021.9593813

[5] Wang, J., Sun, S., Ning, Y., Zhang, M., & Pang, W. (2022). An ultra-low power, small size and high precision indoor localization system based on MEMS ultrasonic transducer chips. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, *69*(4), 1469–1477. https://doi.org/10.1109/TUFFC.2022.3148314

[6] Chen, X., & Gao, Z. (2017). Indoor ultrasonic positioning system of mobile robot based on TDOA ranging and improved trilateral algorithm. *2017 2nd International Conference on Image, Vision and Computing (ICIVC)*, 923–927. https://doi.org/10.1109/ICIVC.2017.7984689

[7] Sasikala, M., Athena, J., & Rini, A. S. (2021). Received signal strength based indoor positioning with RFID. *2021 IEEE International Conference on RFID Technology and Applications (RFID-TA)*, 260–263. https://doi.org/10.1109/RFID-TA53372.2021.9617439

[8] Vena, A., Illanes, I., Alidieres, L., Sorli, B., & Perea, F. (2021). RFID based indoor localization system to analyze visitor behavior in a museum. *2021 IEEE International Conference on RFID Technology and Applications (RFID-TA)*, 183–186. https://doi.org/10.1109/RFID-TA53372.2021.9617265

[9] López, Y., de Cos Gómez, M. E., & Las-Heras Andrés, F. (2017). A received signal strength RFID-based indoor location system. *Sensors and Actuators A: Physical*, *255*, 118–133.

[10] Milano, F., D'Errico, R., Monti, A., & Di Benedetto, M. G. (2024). BLE-based indoor localization: Analysis of some solutions for performance improvement. *Sensors*, *24*(2).

[11] Sophia, S., Shankar, B. M., Akshya, K., Arunachalam, A. C., Avanthika, V. T. Y., & Deepak, S. (2021). Bluetooth low energy based indoor positioning system using ESP32. *2021 Third International Conference on Inventive Research in Computing Applications (ICIRCA)*, 1698–1702. https://doi.org/10.1109/ICIRCA51532.2021.9544975

[12] Yu, Y., Zhang, Y., Chen, L., & Chen, R. (2023). Intelligent fusion structure for Wi-Fi/BLE/QR/MEMS sensor-based indoor localization. *Remote Sensing*, *15*(5), 1202.

[13] Zhang, X., Sun, W., Zheng, J., Lin, A., Liu, J., & Ge, S. S. (2024). Wi-Fi-based indoor localization with interval random analysis and improved particle swarm optimization. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, *23*(10), 9120–9134. https://doi.org/10.1109/TMC.2024.3359669

[14] Caso, G., De Nardis, L., Lemic, F., Handziski, V., Wolisz, A., & De Benedetto, M. G. (2020). ViFi: Virtual fingerprinting WiFi-based indoor positioning via multi-wall multi-floor propagation model. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, *19*(6), 1478–1491. https://doi.org/10.1109/TMC.2019.2908865

[15] Fahama, H. S., Ansari-Asl, K., Kavian, Y. S., & Soorki, M. N. (2023). An experimental comparison of RSSI-based indoor localization techniques using ZigBee technology. *IEEE Access*, *11*, 87985–87996. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3305396

[16] Minh, T. L., & Xuan, D. T. (2021). Applying Kalman filter to UWB positioning

with DS-TWR method in LOS/NLOS scenarios. *2021 International Symposium on Electrical and Electronics Engineering (ISEE)*, 95–99. https://doi.org/10.1109/ISEE51682.2021.9418707

[17] Leng, J., Ma, G., Zhu, J., & Ma, H. (2021). Improved TDOA two-stage UWB localization algorithm for indoor mobile robot. *2021 IEEE International Conference on Recent Advances in Systems Science and Engineering (RASSE)*, 1–5. https://doi.org/10.1109/RASSE53195.2021.9686768

[18] Wang, Q., Li, Z., Zhang, H., Yang, Y., & Meng, X. (2023). An indoor UWB NLOS correction positioning method based on anchor LOS/NLOS map. *IEEE Sensors Journal, 23*(24), 30739–30750. https://doi.org/10.1109/JSEN.2023.3328715

[19] Lin, K.-H., Chen, H.-M., Li, G.-J., & Huang, S.-S. (2020). Analysis and reduction of the localization error of the UWB indoor positioning system. *2020 IEEE International Conference on Consumer Electronics - Taiwan (ICCE-Taiwan)*, 1–2. https://doi.org/10.1109/ICCE-Taiwan49838.2020.9258017

[20] Santoro, L., Nardello, M., Brunelli, D., & Fontanelli, D. (2023). UWB-based indoor positioning system with infinite scalability. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 72*, Article 1005711. https://doi.org/10.1109/TIM.2023.3282299

[21] Van Herbruggen, B., Fontaine, J., & De Poorter, E. (2021). Anchor pair selection for error correction in time difference of arrival (TDOA) ultra wideband (UWB) positioning systems. *Proceedings of the International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation*, 1–8.

[22] Elsanhoury, M., Abotaleb, M., Elnainay, M., Badawy, M., & Hamouda, W. (2022). Precision positioning for smart logistics using ultra-wideband technology-based indoor navigation: A review. *IEEE Access, 10*, 44413–44445.

[23] Jun, C., & Shibiao, H. (2018). Comparison and analysis of the error of multiple transceiver mode of TOA based on Kalman filter in IR-UWB system. *2018 IEEE International Conference of Safety Produce Informatization (IICSPI)*, 71–75. https://doi.org/10.1109/IICSPI.2018.8690338

[24] Nguyen, D. T. A., Kim, K. S., Jeong, H. J., & Kim, H. (2020). Convolutional neural network-based UWB system localization. *2020 International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC)*, 488–490. https://doi.org/10.1109/ICTC49870.2020.9289326

[25] Eang, C., & Lee, S. (2024). An integration of deep neural network-based extended Kalman filter (DNN-EKF) method in ultra-wideband (UWB) localization for distance loss optimization. *Sensors, 24*(23), 7643. https://doi.org/10.3390/s24237643

[26] Zhang, C., Bao, X., Wei, Q., Ma, Q., Yang, Y., & Wang, Q. (2016). A Kalman filter for UWB positioning in LOS/NLOS scenarios. *2016 Fourth International Conference on Ubiquitous Positioning, Indoor Navigation and Location Based Services (UPINLBS)*, 73–78. https://doi.org/10.1109/UPINLBS.2016.7809953

[27] Zhong, S., Zhang, K., Zhu, G., & Liu, S. (2018). UWB-inertial fusion location algorithm based on Kalman filtering. *2018 15th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision (ICARCV)*, 574–578. https://doi.org/10.1109/ICARCV.2018.8581294

[28] Trifunović, M., Papp, I., & Bašičević, I. (2024). Use of extended Kalman filter in an UWB based indoor positioning system. *2024 Zooming Innovation in Consumer Technologies Conference (ZINC)*, 204–208. https://doi.org/10.1109/ZINC61849.2024.10579430

[29] Zhang, F., Yang, L., Liu, Y., Ding, Y., Yang, S.-H., & Li, H. (2022). Design and implementation of real-time localization system (RTLS) based on UWB and TDoA algorithm. *Sensors, 22*(12), 4353. https://doi.org/10.3390/s22124353

Gazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Dergisi
PART C: TASARIM VE TEKNOLOJİ

Gazi University
Journal of Science
PART C: DESIGN AND TECHNOLOGY

GU J Sci, Part C, 13(2): 706-717 (2025)

Havzaların Sismik Tepkisinin Modifiye Ricker Dalgacığı ile Nümerik Analizi

Hidayet Kemal UYAR[1*], Sadık ÖZTOPRAK[1]

[1]*İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye*

Article Info

Research article
Received: 18/05/2025
Revision: 01/06/2025
Accepted: 02/06/2025

Keywords

Basin effect
Spectral aggravation
Two-dimensional site response
Ricker wavelet
Finite difference method

Makale Bilgisi

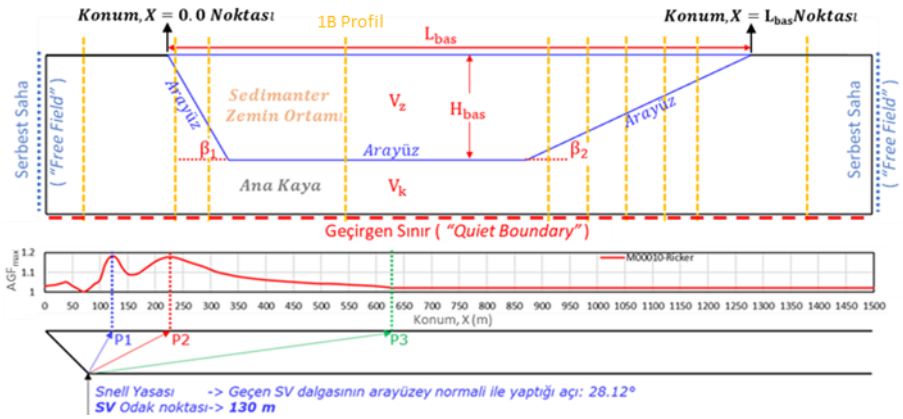
Araştırma makalesi
Başvuru: 18/05/2025
Düzeltme: 01/06/2025
Kabul: 02/06/2025

Anahtar Kelimeler

Havza etkisi
Spektral şiddetlendirme
İki boyutlu zemin tepkisi
Ricker dalgacığı
Sonlu farklar yöntemi

Grafik Özet (Graphical/Tabular Abstract)

Sonlu farklar yöntemi ile bir ve iki boyutlu modellerde gerçekleştirilen analizler sonucunda tepki spektrumundaki havza etkisi, havza yüzeyi boyunca tespit edilmiştir. Sonuçlara göre, havza etkisini yüzey boyunca kenar için üç farklı noktadaki şiddetlendirme katsayısı (AGF) ile idealize etmek mümkündür. / As a result of analyses conducted using the finite difference method in one- and two-dimensional models, the basin effect in the response spectrum was identified along the basin surface. According to the results, it is possible to idealize the basin effect along the surface by the aggravation factors (AGF) at three different points per basin edge.



***Şekil A**: Şiddetlendirmenin tespit edilmesi /**Figure A:**.Determination of the aggravation factor*

Önemli noktalar (Highlights)

- *İlksel analizler için sentetik dalga formlarının kullanımı son derece pratik ve isabetlidir. / The use of synthetic waveforms for preliminary analyses is highly practical and accurate.*
- *Havza etkisini yüzey boyunca her kenar için üçer nokta ile basitleştirmek mümkündür. / It is possible to simplify the basin effect along the surface by using three points for each edge.*
- *Düşük periyotlardaki şiddetlendirme havza kenarında baskınken, yüksek periyotlarda havza ortasında etkisini göstermektedir. / While aggravation at low periods is dominant at the basin edges, it's more effective in the basin center at higher periods.*

***Amaç (Aim):** Bu çalışmanın amacı havza yapılarının yüzeyindeki sahalarda, tepki spektrumunun havza etkisinden kaynaklı değişiminin incelenmesidir. / The aim of this study is to investigate the change in the response spectrum caused by the basin effect in the surface sites of basin structures.*

***Özgünlük (Originality):** Hakim frekansa sahip olmayan Ricker dalgacığının doğrusal elastik havza analizlerinde gerçek depremler yerine kullanılabileceği, zamandan ve işlem hacminden tasarruf edilebileceği ortaya konmuştur. / It has been demonstrated that a Ricker wavelet with no dominant frequency can be used instead of real earthquakes in linear elastic basin analyses, thereby saving time and computational effort.*

***Bulgular (Results):** Kısa peryiotlarda kenar etkisinin baskın olduğu, daha uzun periyotlardaki şiddetlendirmenin ise havzanın orta bölgelerine yayıldığı, en yüksek şiddetlendirmenin tespit edildiği iki boyutlu salınım periyodunun ise bir boyutlu salınım periyodu ile ilişki olduğu tespit edilmiştir. / It was determined that edge effects dominate at short periods, while amplification at longer periods spreads toward the central areas of the basin. Additionally, the two-dimensional fundamental period, at which the highest amplification is observed, is related to the one-dimensional fundamental period.*

***Sonuç (Conclusion):** Kullanılan yöntem, havza etkisinin anlaşılmasında ve bu etkilerin tasarım spektrumlarına yansıtılmasında daha ileri analizler için bir çerçeve oluşturmuştur. / The method used has established a framework for better understanding the basin effect and reflecting these effects in design spectra for further analyses.*

*Corresponding author, e-mail: h.kemaluyar@gmail.com
DOI: 10.29109/gujsc.1701728

GU J Sci, Part C, 13(2): 706-717 (2025)

Gazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Dergisi
PART C: TASARIM VE TEKNOLOJİ

Gazi University
Journal of Science
PART C: DESIGN AND TECHNOLOGY

http://dergipark.gov.tr/gujsc

Havzaların Sismik Tepkisinin Modifiye Ricker Dalgacığı ile Nümerik Analizi

Hidayet Kemal UYAR[1*], Sadık ÖZTOPRAK[1]

[1] *İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye*

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 18/05/2025
Düzeltme: 01/06/2025
Kabul: 02/06/2025

Anahtar Kelimeler

Havza etkisi
Spektral şiddetlendirme
İki boyutlu zemin tepkisi
Ricker dalgacığı
Sonlu farklar yöntemi

Öz

Bu çalışma, sedimanter havzaların sismik tepkisinin doğrusal elastik koşullar altında parametrik olarak incelenmesini amaçlamaktadır. Bu amaçla, frekans içeriği kontrollü ve genlik spektrumu 0–10 Hz arasında yatay genliğe sahip modifiye bir Ricker dalgacığı kullanılmıştır. Söz konusu dalga formu, farklı merkez frekansa ve genliğe sahip 18 adet Ricker bileşeninin süperpozisyonu ile oluşturulmuş, böylece periyot bağımlılığını minimize eden bir sentetik yer hareketi elde edilmiştir. Çalışmada kullanılan tüm zeminler doğrusal elastik kabul edilerek, şiddetlendirme faktörünün değişimindeki etkenler hem daha yalın şekilde tespit edilmiş hem de doğrusal olmayan davranışın sebep olabileceği muhtemel aşırı sönümlemeler bertaraf edilmiştir. 29 adet ölçeklenmiş gerçek deprem kaydının referans model üzerinde uygulanmasıyla modifiye Ricker dalgası ile gözlemlenen şiddetlendirme davranışı karşılaştırılmış, doğrusal elastik dinamik analizlerde depremin ivme genliğinin, şiddetlendirme üzerinde etkili olmadığı, sentetik dalga formu girdisinin ise son derece kullanışlı bir araç olduğu gözlemlenmiştir. FLAC sonlu farklar yazılımında gerçekleştirilen parametrik çalışmalar sonucunda, havza genişliği, kenar eğimi, zemin rijitliği ve derinlik gibi parametrelerin şiddetlendirme üzerindeki etkisi ayrı ayrı değerlendirilmiştir. Özellikle kısa periyotlarda kenar etkisinin baskın olduğu, daha uzun periyotlardaki şiddetlendirmenin ise havzanın orta bölgelerine yayıldığı, en yüksek şiddetlendirmenin tespit edildiği iki boyutlu salınım periyodunun ise bir boyutlu salınım periyodu ile ilişki olduğu ortaya koyulmuştur. Çalışmada kullanılan yöntem ve analizler belirli bir sahanın sismik tepkisini doğru şekilde simüle etmek adına ilksel bir yaklaşım sunmakla birlikte havzaların sismik tepkisinin anlaşılmasında ve bu etkilerin tasarım spektrumlarına yansıtılmasında daha ileri analizler için bir çerçeve oluşturmuştur.

Numerical Analysis of the Seismic Response of Basins Using a Modified Ricker Wavelet

Article Info

Research article
Received: 18/05/2025
Revision: 01/06/2025
Accepted: 02/06/2025

Keywords

Basin effect
Spectral aggravation
Two-dimensional site response
Ricker wavelet
Finite difference method

Abstract

This study aims to investigate the seismic response of sedimentary basins under linear elastic conditions through a parametric approach. For this purpose, a modified Ricker wavelet with controlled frequency content and a flat amplitude spectrum in the 0–10 Hz range is used. The proposed wavelet is constructed by superimposing 18 Ricker components with varying central frequencies and amplitudes, resulting in a synthetic ground motion that minimizes period dependency. All soils used in the study are assumed to behave linearly elastic, which not only allows for a more straightforward identification of the factors influencing the aggravation factor but also eliminates possible over-damping effects that may arise from nonlinear behavior. The aggravation behavior observed with the modified Ricker wavelet is compared against that produced by applying 29 scaled earthquake records to a reference model. It is observed that, in linear elastic dynamic analyses, the amplitude of the input earthquake does not significantly influence the aggravation, whereas the synthetic wavelet serves as a highly useful input form. As a result of the parametric studies performed using the FLAC finite difference software, the effects of parameters such as basin width, rock interface slope, soil stiffness, and depth on aggravation have been individually evaluated. It has been revealed that edge effects dominate in short periods, while aggravation at longer periods tends to spread toward the central regions of the basin. The two-dimensional oscillation period at which maximum aggravation is observed has been shown to correlate with the one-dimensional resonance period. While the methods and analyses presented in this study offer a preliminary framework for accurately simulating the seismic response of a given site, they also provide a foundation for more advanced studies aimed at understanding basin effects and reflecting them in design spectra.

*Corresponding author, e-mail: h.kemaluyar@gmail.com
DOI: 10.29109/gujsc.1701728

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Zemin koşullarının kuvvetli yer hareketi üzerindeki etkileri, deprem mühendisliğinde sıklıkla zemin tepkisi olarak isimlendirilen ve hakkındaki çalışmaların uzun süredir devam ettiği bir araştırma konusudur. Özel durumlar dışındaki pratik uygulamarda ve küresel ölçekte geçerliliği bulunan deprem yönetmeliklerinde zemin tepkisinin çoğunlukla bir boyutlu (1B) olarak dikkate alınmasına karşın özellikle sedimanter havzalar gibi yatay ve düşey düzensizliğe sahip heterojen ortamlarda 1B yaklaşımların yetersizliği çok sayıda çalışma ile gösterilmiştir.

Sedimanter havzalar, düşük kayma dalgası hızına sahip tortul zeminlerin jeolojik süreç içerisinde yer kabuğundaki çöküntü alanlarına birikmesiyle oluşan geniş yer şekilleridir. Çoğunlukla tektonik sebeplerle meydana gelen bu yapılarda özellikle normal faylanma durumunda çok keskin kayma dalgası hızı geçişleri ve empedans kontrastı gözlemlenebilmektedir. Bu karmaşık jeolojik yapılanma, deprem esnasında zemin-kaya arayüzeyinin geometrisi ve malzeme özelliklerinin de etkisiyle sismik dalgalarda hem frekans içeriği hem de genlik bakımdan 1B yaklaşımlar ile açıklanamayan, günümüzde basen (havza) etkisi olarak isimlendirilen başkalaşımlara sebep olmaktadır. Bard ve Bouchon [1], havza etkisinin en erken kuramsal açıklamalarından birini sunarak, iki boyutlu rezonansın önemini ortaya koymuşlar, ardından gelen çalışmalar sedimanter havzalarda oluşan yer hareketlerinin hem şiddetinin hem de süresinin önemli ölçüde arttığını göstermiştir [2][3].

Havza etkisinin kuvvetli yer hareketi üzerindeki sonuçlarını eğimli kaya-zemin arayüzeyinin sebep olduğu cisim dalgalarının odaklanması (kenar etkisi) ve yüzey dalgalarının üretilmesi olarak başlıca iki olguya dayandırmak mümkündür. Kenar etkisi, düşey veya açılı bir şekilde gelen dalgaların havzanın arayüzeyinde yansıyarak yüzeydeki bazı noktalarda odaklanmasına olarak açıklanırken [2], yüzey dalgaları ise sedimanter havzanın içinde üretildiklerinde uzun süreli ve düşük frekanslı büyütmelere neden olabilmektedir. Komatitsch & Tromp [4] ve Moschetti vd. [5], bu dalgaların özellikle geniş ve yumuşak zeminli havzalarda etkili olduğunu vurgulamış, Zhang & Papageorgiou [6] ve Kawase [7] Kobe depremi esnasında yıkımın yoğun olduğu bölgelerde oluşan hasarı havza ortasına doğru yatay ilerleyen yüzey dalgaları ile cisim dalgalarının girişime uğraması sonucunda yüzey hareketinin şiddetinin artması ile açıklamıştır.

Havza etkisinin ilk olarak çalışılmaya başladığı 1980'li yılların ardından araştırmalar artmaya devam etmiş, yazılım ve bilgisayar teknolojilerinin gelişmesiyle birlikte çeşitli 2B ve 3B nümerik modeller, konunun anlaşılabilmesi için şüphesiz çok değerli "dijital laboratuvar" ortamı sunmaya başlamışlardır. Hasal & Iyisan [8] 1B analizler ile kıyasla 2B analizlerin, havza kenarlarının etkilerini, dalga yansıma ve kırılmalarını, rezonans bölgelerini daha gerçekçi şekilde yansıttığını göstermişler, Amini vd. [9] Kanada'daki Kitimat vadisinde 2B analizlerin saha verileriyle büyük ölçüde örtüştüğünü bildirmiş, Makra vd. [10] Samos Adası'nda meydana gelen depremde Bornova havzasındaki büyütme etkilerini nümerik modelleme ile doğrulamış, Rodriguez Plata & Özcebe [11], Norcia Havzası'nda 2B modellerin 1B analizlere kıyasla daha büyük büyütmeleri ve farklı frekans davranışlarını ortaya koyduğunu raporlamıştır. [5] tarafından yapılan çalışmalarda, 3B dalga yayılımı analizleri ile derin alüvonel dolgularda yüzey dalgası enerjisinin yoğunlaştığı ve 1B tahminlere göre oldukça yüksek büyütmeler gözlemlendiğini bildirilmiştir.

Nümerik simülasyonların isabetinin, oluşturulan modelin gerçeğe yakınlığıyla doğru orantılı olduğuna şüphe olmamasına karşın model bileşenlerindeki rassal ve/veya aleotorik bilinmezler çoğu zaman havza gibi çok geniş ölçekli bir yapıyı tam isabetle modellemeye izin vermemektedir. Bunun yanında, basitleştirilmiş-idealize edilmiş dahi olsa 2B ve 3B yaklaşımların günümüzde pratiğe ve yönetmeliklere dahil edilmesi hususunda çoğu araştırmacı hemfikir olmaktadır. Makra vd. [12] Euroseistest isimli araştırma sahasında gözlemsel veriler ve nümerik analizler ile gerçekleştirdiği çalışmada 2B modellemedeki zemin tabakalanması, arayüzey dışındaki kayaç özelliği, arayüzey geometrisi gibi değişkenlerin analiz üzerindeki etkilerini değerlendirmiş ve yüzeye yakın zemin tabakalanması ile yanal kayaç eğiminin etkisine dikkat çekmiş; basitleştirilmiş 2B nümerik analizlerin gerçek davranışı anlamada kullanışlı bir araç olduğunu ortaya koymuştur. Simülasyona dayalı çalışmaların birçoğunda zemin davranışı doğrusal olarak ele alınmış olsa da günümüzde doğrusal olmayan davranışın dikkate alındığı havza etkisi analizlerinin sayısı çoğalmaya devam etmektedir. Bonilla vd. [13] Grenoble Havzası'nda hem 1B hem de 2B doğrusal olmayan analizleri karşılaştırmış ve zeminde modül azalımının yüzey büyütmesini azalttığını, ayrıca rezonans frekanslarında kaymalara neden olduğunu belirtmiş, Zhang & Zhao [14], doğrusal olmayan zemin davranışının spektral büyütmeleri azalttığını

belirtmiş, Khanbabazadeh et al. [15] ve Ozaslan & Iyisan [16] 2B doğrusal olmayan analizlerde, zemin rijitliğinin azalmasının rezonans frekansını düşürdüğünü ve büyütmeleri sınırlandırdığını raporlamış, [11] büyütme analizlerinde doğrusal olmayan davranışın ihmal edilmesinin, 2B rezonans etkilerinin olduğundan fazla tahmin edilmesine neden olabileceğini, dolayısıyla malzeme davranışlarının titizlikle kalibre edilmesi gerektiğini vurgulamış, Chen vd. [17] 3B analizlerde doğrusal olmayan malzeme davranışının özellikle düşük frekanslı yer hareketlerinde büyütmeyi sınırlayıcı rol oynadığını ortaya koymuştur.

Depreme dayanıklı yapı tasarımı amacı ile gerçekleştirilen dinamik analizlerde girdisi yapılan sismik dalgalar, analizlerin doğruluğunu ve uygulanabilirliğini doğrudan etkilemektedir. Özellikle doğrusal olmayan zemin davranışı ile birlikte değerlendirildiğinde deprem dalgalarının niteliği, davranışı çok çeşitli şekilde değiştirebilmektedir. Kullanılan kayıtlar genel olarak gerçek deprem kayıtları ve sentetik dalga formları olarak ikiye ayrılmaktadır. Gerçek deprem kayıtları, özellikle sismotektonik ve jeolojik şartları bilinen belirli bir saha üzerinde yapılacak tasarıma yönelik çalışmalarda kullanışlıdır. Gabor Darbesi ve Ricker Dalgacığı gibi sentetik dalga formları ise kontrol edilebilir frekans içeriği ve genlik gibi parametrelere sahip olması bakımından parametrik çalışmalar için idealdir. Güncel yönetmeliklere havza etkisinin dahil edilmesi gerektiğini savunan araştırmacılardan Riga vd. [18] çeşitli geometrilere sahip havzaların tepkisini Gabor Darbesi kullanarak elastik davranış çerçevesinde değerlendirmiş, bu analizlerden elde edilen büyütme fonksiyonlarını gerçek deprem kayıtlarını evriştirmek (yüzeye transfer etmek) amacıyla kullanmıştır. [16] ise TBDY'de ZD ve ZE olarak nitelendirilen sembolik zemin ortamları için 11 depremden oluşan 2 adet gerçek ivme kayıt seti ile çalışmış, setlerden birini 0.2 g diğerini ise 0.4 g PGA değerine ölçekleyerek daha dar kapsamlı ancak bu kapsamı daha isabetli simüle etmeye yönelik doğrusal olmayan analizler gerçekleştirmiştir.

Bu çalışmada, havza etkisinin çok boyutlu nümerik analizlerle parametrik olarak incelenebilmesi amacıyla 0-10 hz arasında yatay Fourier genlik spektrumuna sahip Ricker Dalgacığı Modifiye elde edilmiş, ardından 2B sonlu farklar yöntemi ile doğrusal elastik şartlar altında nümerik analizler gerçekleştirilmiştir. Elde edilen dalga sayesinde analizlerde girdisi yapılan dinamik yüklemenin hakim frekansının sonuçlara etkisinin ortadan kaldırılması hedeflenmiş, sonuçlar gerçek deprem kayıtlarının kullanılması durumu ile kıyaslanmıştır. Daha sonra elde edilen sentetik dalga formu kullanılarak benzer şartlar altında çeşitli geometri ve parametrik özelliklere sahip modeller üzerinde havza genişliği, arayüzey eğimi, havza içerisindeki sedimanter zeminin kayma dalgası hızı ve hakim salınım periyodu gibi değişkenlerin havza yüzeyindeki tepki spektrumlarına olan etkileri ve bu etkilerin mekansal değişimi incelenmiştir.

2. RICKER DALGACIĞI (RICKER WAVELET)

İlk olarak Ricker [19] tarafından tanıtılan Ricker Dalgacığı (Meksika şapkası) joefiziksel yer titreşimlerini modellemek için yaygın olarak kullanılan, sıfır fazlı ve bant sınırlı sentetik bir dalga formudur. Deprem mühendisliği dışında da bir çok kullanım alanı bulan bu ivme dalgası matematiksel olarak Gauss fonksiyonunun ikinci dereceden türevi olarak aşağıdaki gibi ifade edilir;

$$a(t) = (1 - 2\pi^2 f_0^2 t^2)e^{-\pi^2 f_0^2 t^2} \quad (2.1)$$

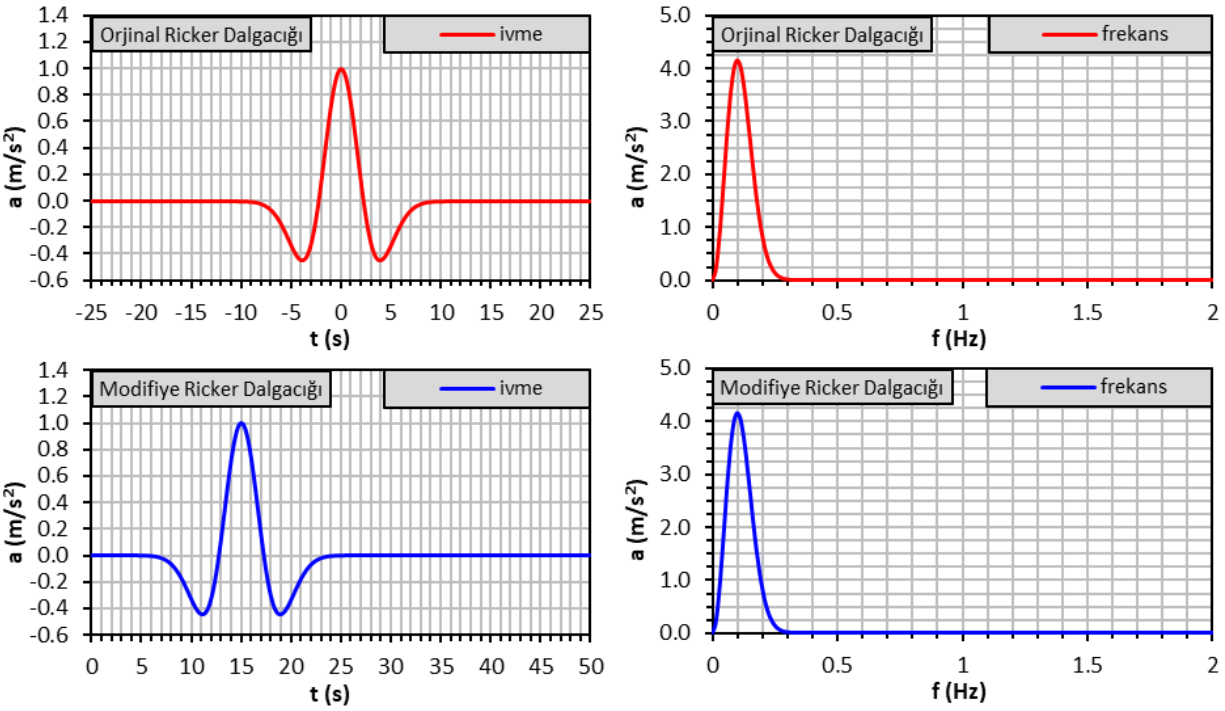
Burada; f_0 hakim frekans, t mevcut zamanı, $a(t)$ ise t anındaki belirtmektedir. Orijinal Ricker denklemi, zaman ortamında en büyük genlik değerini t=0 anında alan, simetrik tepe merkezli bir darbeyi temsil etmektedir [20]. Frekans spektrumu, hakim frekans parametresine bağlı olarak değiştiğinden, zemin ortamlarının farklı frekans içeriğine sahip dalgalara verdiği tepkiyi değerlendirmede kullanışlıdır. Bu çalışmada ise orijinal denklem, tercih edilen bir merkezi t_0 anında, tercih edilen en büyük genliği sağlayacak şekilde aşağıdaki gibi modifiye edilmiştir.

$$a(t) = A_0(1 - 2\pi^2 f_0^2 (t - t_0)^2)e^{-\pi^2 f_0^2 (t-t_0)^2} \quad (2.2)$$

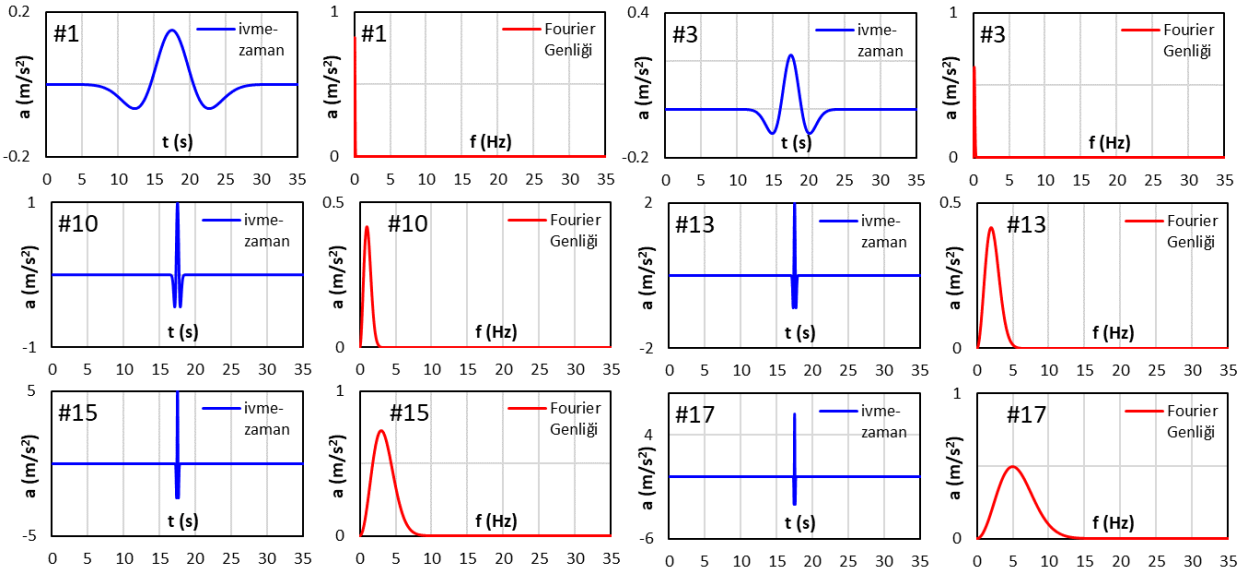
Burada; A_0 tercih edilen en büyük genlik, t_0 merkezi zamanı ifade etmektedir. Genişletilen denklem aracılığıyla dalga formu üzerindeki hakimiyet arttırılmış, doğrudan analiz girdisi olarak kullanılması kolaylaştırılmıştır. 0.1 Hz hakim frekans değerine sahip Ricker dalgacığı ve 15 s merkezi süre eklenmiş asimetrik Ricker dalgacığına ait ivme ve frekans içeriği Şekil 1'de paylaşılmıştır. Bu kullanım esnasında dikkat edilmesi gereken husus, dalganın en az iki adet hakim periyot süresince etki ettirilmesi, havza analizlerinde ise yüzey ve cisim dalgalarının yayılımını ve yansımasını gözlemleyebilmek adına bu sürenin daha da uzatılmasıdır. Her iki şekilde de dalga formlarının fourier genlik spektrumu aşağıdaki fonksiyon ile hesaplanır;

$$|A(f)| = A_0 \cdot \frac{2}{\pi} \cdot \frac{f^2}{f_0^2} \cdot e^{-\frac{f^2}{f_0^2}} \quad (2.3)$$

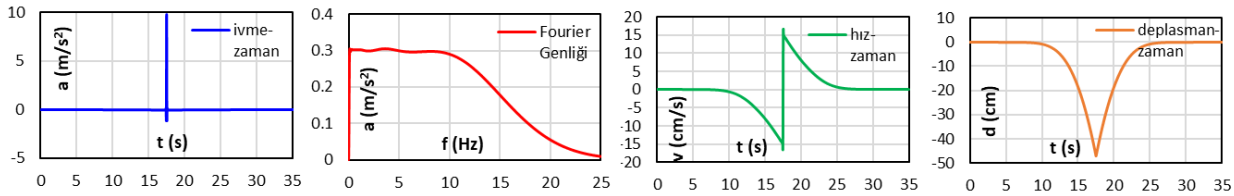
Burada; A_0 orijinal denklemde 1 değerini almakla birlikte tercih edilen en büyük genlik, f ise spektrum frekansını ifade etmektedir. Şekil 1'de görüleceği üzere, ricker dalgacığının genlik spektrumu fo frekansında yumuşak geçişli bir pik değere ulaşmaktayken, bu çalışmada ilaveten elde edilmek istenen dalga formu yatay bir spektruma sahip olmalıdır. Bu amaçla 18 adet farklı f_0 ve A_0 çifti iteratif bir deneme yöntemiyle tespit edilmiş ve ilgili değerlere sahip modifiye ricker dalgacıkları süperpoze edilmiştir. Bu işlem esnasında, fourier dönüşümü karmaşık sayı ürettiğinden, önce yatay fourier spektrumunu elde edilip ardından bu spektrumu, kendisini oluşturan ivme bileşenlerine ayırmak mümkün olmamış, bunun yerine ivme değerleri süperpoze edilmiş, ardından oluşan girişim dalgasının fourier genlik spektrumunun istenilen değerlere uygunluğu kontrol edilmiştir. Girişim sonrası elde edilen dalga ise 1g (9.81 m/s^2) PGA değerine sahip olacak şekilde ölçeklendirilmiş ve nihai dalga formu elde edilmiştir. Kullanılan parametre takımlarının listesi Tablo 1'de, bileşen olarak kullanılan ivme kayıtlarının bazıları Şekil 2'de, oluşturulan nihai dalga formuna ait zaman serileri ve frekans içeriği Şekil 3'te görülmektedir.



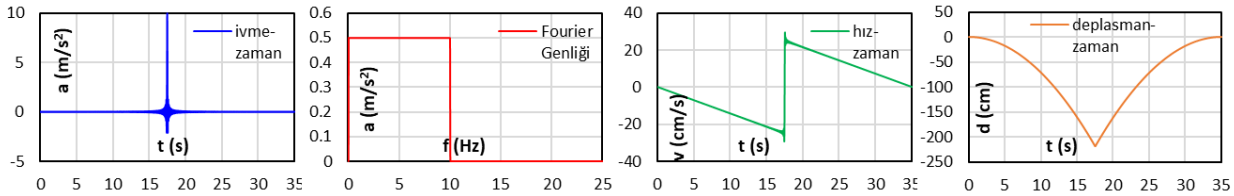
Şekil 1. Orijinal ve modifiye Ricker dalgacığı ivme kayıtları ve Fourier genlik spektrumları (Original and modified Ricker wavelet acceleration records and Fourier amplitude spectra)



Şekil 2. Nihai dalga formunu oluşturan bileşenlerin bazılarına ait ivme ve frekans grafikleri (Acceleration and frequency plots of certain components that compose the final waveform)



Şekil 3. Analizlerde kullanılmak üzere oluşturulan nihai modifiye ricker dalgacığına ait ivme, frekans, hız ve deplasman grafikleri (Acceleration, frequency, velocity, and displacement graphs of the final modified Ricker wavelet generated for use in the analyses)



Şekil 4. Elde edilen nihai Ricker dalgacığı yerine kullanılabilecek bant sınırlı delta fonksiyonu (Band-limited delta function that can be used instead of the generated final Ricker wavelet)

Table 1. Kullanılan Ricker dalgacığı parametreleri (Parameters of the Ricker wavelets used)

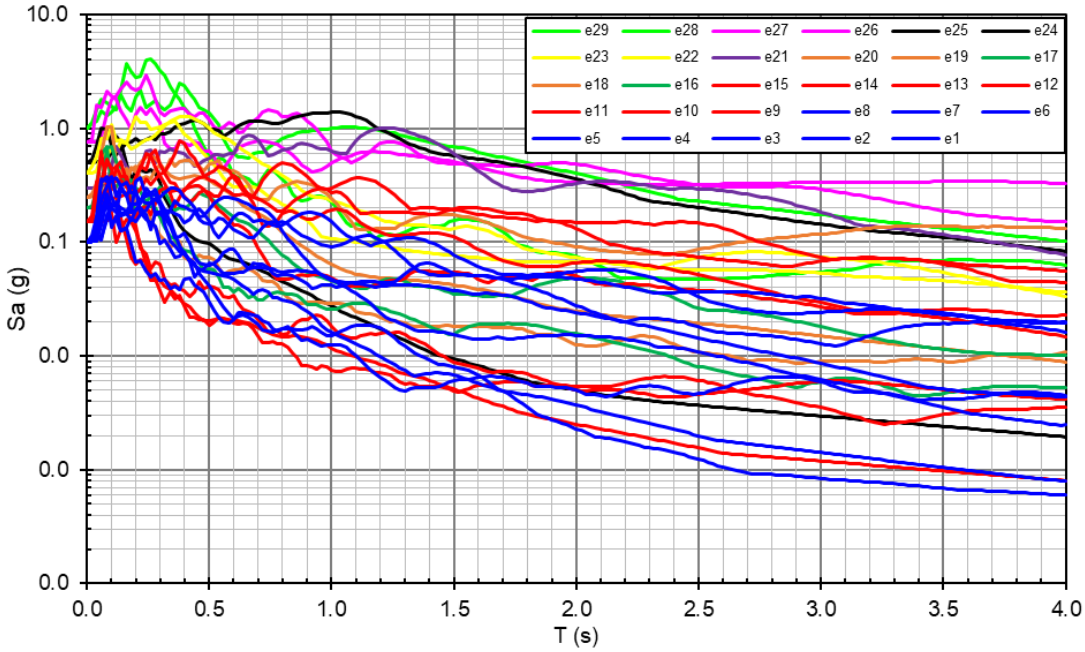
#	f_0 (Hz)	A_0 (-)	t_0 (s)
1	0.075	0.15	17.5
2	0.1	0.15	17.5
3	0.15	0.225	17.5
4	0.2	0.2	17.5
5	0.25	0.25	17.5
6	0.3	0.3	17.5
7	0.4	0.4	17.5
8	0.5	0.75	17.5
9	0.75	1.25	17.5
10	1	1	17.5
11	1.25	1.25	17.5
12	1.5	1.5	17.5
13	2	2	17.5
14	2.5	1.25	17.5
15	3	5.25	17.5
16	4	4	17.5
17	5	6	17.5
18	10	55	17.5

0-10 Hz arasında yatay fourier genlik spektrumuna sahip olan ve 18 farklı ricker bileşeninden oluşan nihai dalga formu, frekans, ivme genliği ve kullanım amacı olarak bant limitli Delta Fonksiyonu'na son derece benzemektedir. Fakat delta fonksiyonu teorik olarak sonsuz frekans içeriğine, genliğe ve süreye sahip bir fonksiyondur ve herhangi bir analizde kullanılması mümkün değildir. Bant limitli delta fonksiyonu ise frekans bakımından, analizlerde kullanılmak istenilen ideal içeriğe sahip olmasına karşın fiziksel dünyada karşılaşılması mümkün olmayan teorik bir fonksiyondur ve frekans odağının dışında gerçekçi zemin hareketini simüle etme niteliği yoktur (Şekil 4). Daha gerçekçi ve doğada rastlanması mümkün olan ricker içeriklerinden oluşan modifiye ricker dalgacığı ise dilendiğinde kendisini oluşturan gerçekçi bileşenlerine ayrılıp hakim salınım frekansının zemin ve havza tepkisi üzerindeki etkisinin araştırılmasına müsaade etmektedir.

3.DEPREM KAYITLARI (EARTHQUAKE RECORDS)

Bu çalışma kapsamında havzaların sismik tepkisini hızlı ve kontrollü biçimde inceleyebilmek amacıyla üretilen, farklı ricker dalgacığı bileşenlerinin süperpozisyonu ile elde edilen modifiye ricker dalga formunun performansının değerlendirilmesi amacıyla havza analizlerinde kullanılmak üzere 29 adet gerçek deprem kaydı seçilmiş ve ölçeklendirilmiştir. Yapılacak olan analizler belirli bir konumu veya saha koşulunu temsil etmeyeceği, geniş ölçekli parametrik çalışmaların bir kapsamı olacağından, deprem seçimi esnasında çeşitliliğe önem verilmiş, mühendislik kayası (Vs30>760 m/s) şartlarında kaydedilmiş, en küçük ölçek katsayısı ile kullanılabilecek kayıtlara yer verilmiştir.

Seçilen kayıtlar, ölçeklendirilmeden önce kendilerine en yakın olan 0.1, 0.15, 0.2, 0.25, 0.3, 0.4, 0.5, 0.75, 1.0 olmak üzere 9 farklı PGA değerine ölçeklendirilmiş, bu sayede mümkün olduğunca gerçekçi ve çeşitli deprem senaryoları elde edilmiştir (Tablo 2). Basit ölçeklendirme yöntemi tercih edildiğinden, kayıtların frekans içeriği değiştirilmemiş ve aynı PGA değerine sahip olsalar dahi spektral ivme değerlerinde mümkün olduğunca saçılıma izin verilmiş, hakim frekans etkisi minimize edilmeye çalışılmıştır (Şekil 5).



Şekil 5. Ölçeklendirilen deprem kayıtlarının %5 sönüm oranlı tepki spektrumları (5% damped response spectra of the scaled earthquake records)

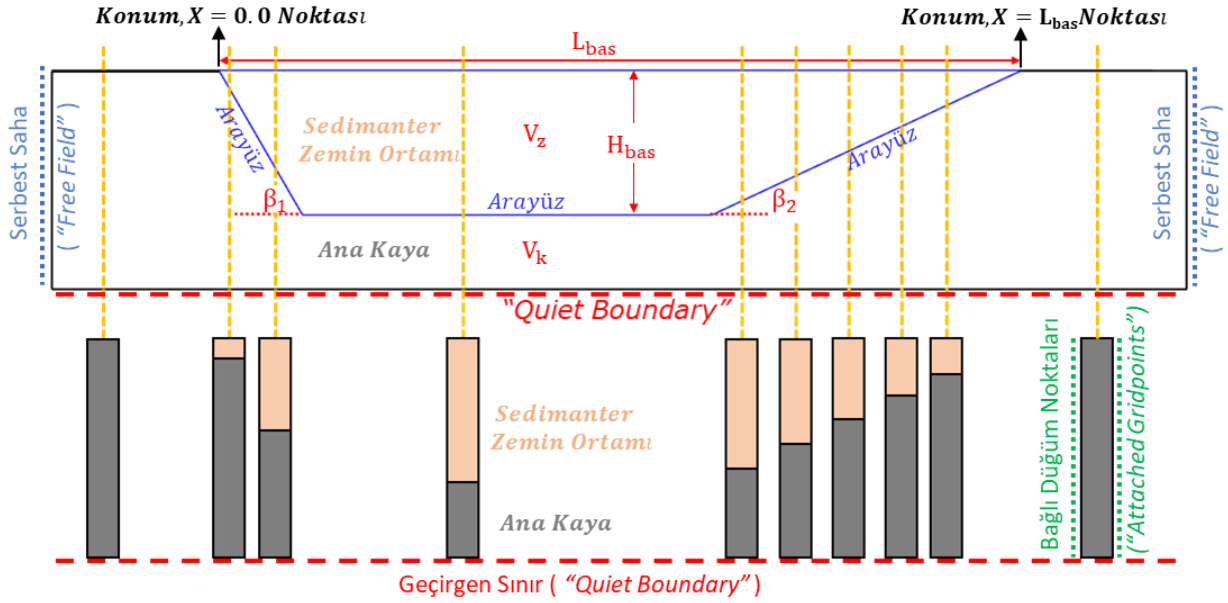
Tablo 2. Seçilen deprem kayıtları ve ölçeklendirildikten sonraki PGA değerleri (Selected earthquake records and PGA values after scaling)

Kod	rsn (#)	İsim	Yıl	Rjb (km)	Büyüklük	Mekanizma	Ölçek	PGA (g)
e1	23	"San Francisco"	1957	9.7	5.28	Ters	1.166	0.1
e2	146	"Coyote Lake"	1979	21.5	6.61	Ters	1.063	
e3	680	"Whittier Narrows-01"	1987	1.8	7.35	Ters	0.895	
e4	797	"Loma Prieta"	1989	6.8	5.99	Ters Oblik	1.268	
e5	1011	"Northridge-01"	1994	8.8	6.93	Ters Oblik	0.968	
e6	1347	"Chi-Chi_ Taiwan"	1999	74.0	6.93	Ters Oblik	1.057	
e7	1649	"Sierra Madre"	1991	2.2	7.28	Doğrultu Atım	1.021	
e8	5655	"Iwate_ Japan"	2008	4.9	6.69	Ters	0.841	
e9	1091	"Northridge-01"	1994	23.1	6.69	Ters	0.993	0.15
e10	1165	"Kocaeli_ Turkey"	1999	0.9	6.90	Doğrultu Atım	0.908	
e11	1257	"Chi-Chi_ Taiwan"	1999	7.6	7.51	Doğrultu Atım	1.089	
e12	3954	"Tottori_ Japan"	2000	3.6	7.51	Doğrultu Atım	0.946	
e13	4167	"Niigata_ Japan"	2004	53.3	7.62	Ters Oblik	1.048	
e14	5650	"Iwate_ Japan"	2008	57.7	7.62	Ters Oblik	1.111	
e15	8171	"Anza-02"	2001	37.6	5.61	Ters	0.996	
e16	3925	"Tottori_ Japan"	2000	3.2	6.93	Ters Oblik	1.083	0.2
e17	5685	"Iwate_ Japan"	2008	15.2	6.61	Doğrultu Atım	1.084	
e18	1161	"Kocaeli_ Turkey"	1999	15.6	6.61	Doğrultu Atım	0.959	0.25
e19	4083	"Parkfield-02_ CA"	2004	4.7	6.00	Doğrultu Atım	1.019	
e20	5680	"Iwate_ Japan"	2008	37.5	6.90	Ters	1.099	
e21	1108	"Kobe_ Japan"	1995	16.3	6.90	Ters	1.088	0.3
e22	765	"Loma Prieta"	1989	99.0	6.90	Ters	0.963	0.4
e23	1050	"Northridge-01"	1994	64.3	6.90	Ters	0.962	
e24	3548	"Loma Prieta"	1989	68.0	6.90	Ters	1.129	0.5
e25	9071	"14151344"	2005	82.9	6.90	Ters	1.023	
e26	143	"Tabas_ Iran"	1978	40.4	6.90	Ters	0.878	0.75
e27	879	"Landers"	1992	57.2	6.90	Ters	1.034	
e28	77	"San Fernando"	1971	4.2	7.14	Doğrultu Atım	0.820	1
e29	8165	"Duzce_ Turkey"	1999	12.8	5.20	Doğrultu Atım	0.970	

4. ANALİZ MODELİ VE YÖNTEMİ (ANALYSIS MODEL AND METHODOLOGY)

Havza yapıları, kuvvetli yer hareketi üzerinde genlik, frekans içeriği, süre gibi temel unsurların tamamında etkiye sebep olur. Depreme dayanıklı yapı tasarımında ise bu etkileri doğru tanımlayacak tasarım parametresinin seçimi hem güvenlik hem verimlilik açısından önemlidir. Bu çalışmada, yüzeyde 2B analiz ile elde edilen spektral ivmenin (Sa,2B) 1B analiz ile elde edilen spektral ivmeye (Sa,1B) oranı ile ifade edilen şiddetlendirme (aggravation) faktörü AGF üzerinde araştırmalar gerçekleştirilmiştir. AGF, ilk olarak ortaya koyulduğu [3] çalışmasında olduğu gibi herhangi bir periyotta elde edilen maksimum şiddetlendirme olarak tanımlanmasının yanında periyoda bağlı da sıkça ifade edilmiştir [5][18]. Bu çalışmada, dünya çapında geçerli yönetmelik spektrumlarında sıkça referans olarak kullanılan 0.2 s ve 1.0 s periyotlarındaki şiddetlendirme faktörleri AGF(0.2) ve AGF(1.0) üzerinde özellikle durulmuştur; bu sayede idealize tasarım spektrumlarının yalnızca bu iki katsayı kullanılarak güncellenmesi mümkün olabilecektir.

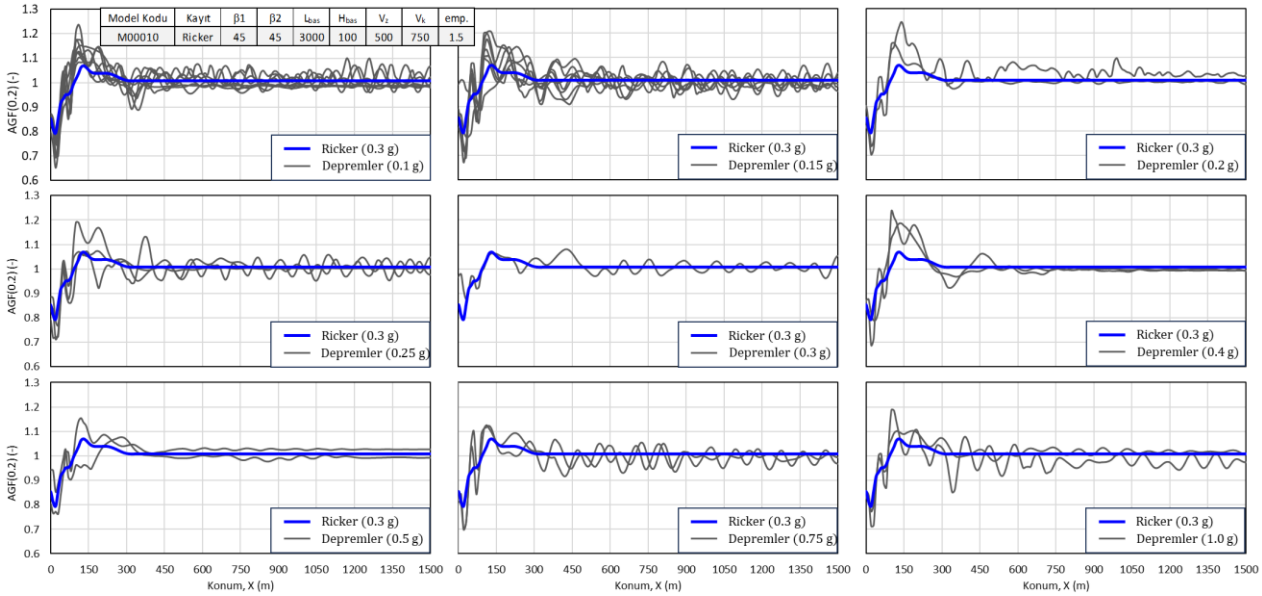
Dinamik analizler FLAC v8.1 [21] sonlu farklar yazılımında gerçekleştirilmiştir. Yazılımın kendi programlama dili olan FISH aracılığı ile esnek değişken girdisine imkan tanıyan, çoklu parametrik analiz için kolaylaştırıcı bir kod hazırlanmıştır. Bu çalışmaya konu olan model değişkenleri Şekil 6'da görselleştirilmiştir. Burada; L_{bas} havzanın yüzey genişliğini, H_{bas} havza derinliğini, β_1 ve β_2 kaya arayüzey eğimlerini, V_z sedimanter zeminin kayma dalgası hızını, V_k ise anakayanın kayma dalgası hızını ifade etmektedir. 2B modellerin düşey sınırlarında Cundall vd. [22] tarafından geliştirilen serbest saha ("free field") sönümleyici elemanlar kullanılırken 1B modellerdeki düğüm noktaları kendilerine karşılık gelen kenardaki düğüm noktaları ile "attach" komutu ile bağlanmış, bu sayede 1B yaklaşıma uygun bir zemin kolonu oluşturulmuştur. Yatay sınırlarda ise Lysmer & Kuhlemeyer [23] tarafından geliştirilen geçirgen ("quiet") sönümleyici elemanlar kullanılmıştır. Yine aynı çalışmada önerilen düğüm noktaları arası izin verilebilir mesafelere dikkat edilerek sonlu farklar ağı hazırlanmış, buna göre her tabaka için dalga boyu içerisine 10 adet düğüm noktası yerleştirilmiştir (f: 25 Hz, Vs: 250 m/s çifti için 1.0 m aralığa denk gelmektedir). 2B modellerin yüzeylerinde her 10 m aralıklarla okuma alınırken, her okuma noktasına ait 1B model hazırlanmış ve analiz tekrar edilmiştir. Analizlerde yalnızca trapez kesitli havza geometrisinden kaynaklı havza etkisini yalın bir şekilde tespit edebilmek, plasitsite ve aşırı sönümden kaynaklı etkileri gözardı edebilmek amacıyla homojen 2 farklı jeolojik birim (zemin ve kaya) kullanılmış, bünye modeli olarak doğrusal elastik model tercih edilmiştir. Daha önceki bölümlerde bahsedildiği gibi doğrusal olmayan davranışın havza etkisi üzerindeki çoğunlukla azaltıcı etkisi bu sayede ihmal edilmiş, sönümsüz ortamda havza etkilerinin üst limit değerlerinin elde edilmesi hedeflenmiştir; bundan kaynaklı muhtemel aşırı büyütmeler 1B ve 2B modellerin ikisinde de olacağından AGF(T) değerlendirmelerinde bir engel oluşturması beklenmemektedir.



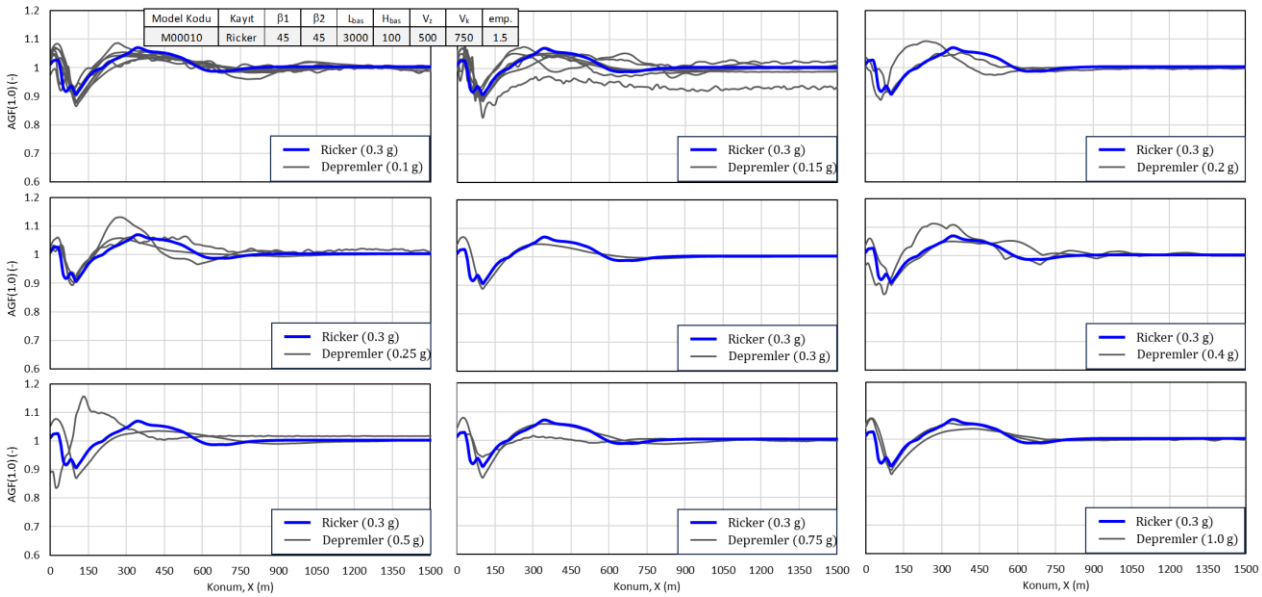
Şekil 6. Trapez kesitli sedimanter bir havzada 2B (üst) ve 1B (alt) modellerin şematik tanıtımı (Schematic representation of 2D (top) and 1D (bottom) models in a trapezoidal cross-section sedimentary basin

5.NÜMERİK ANALİZLER (NUMERICAL ANALYSES)

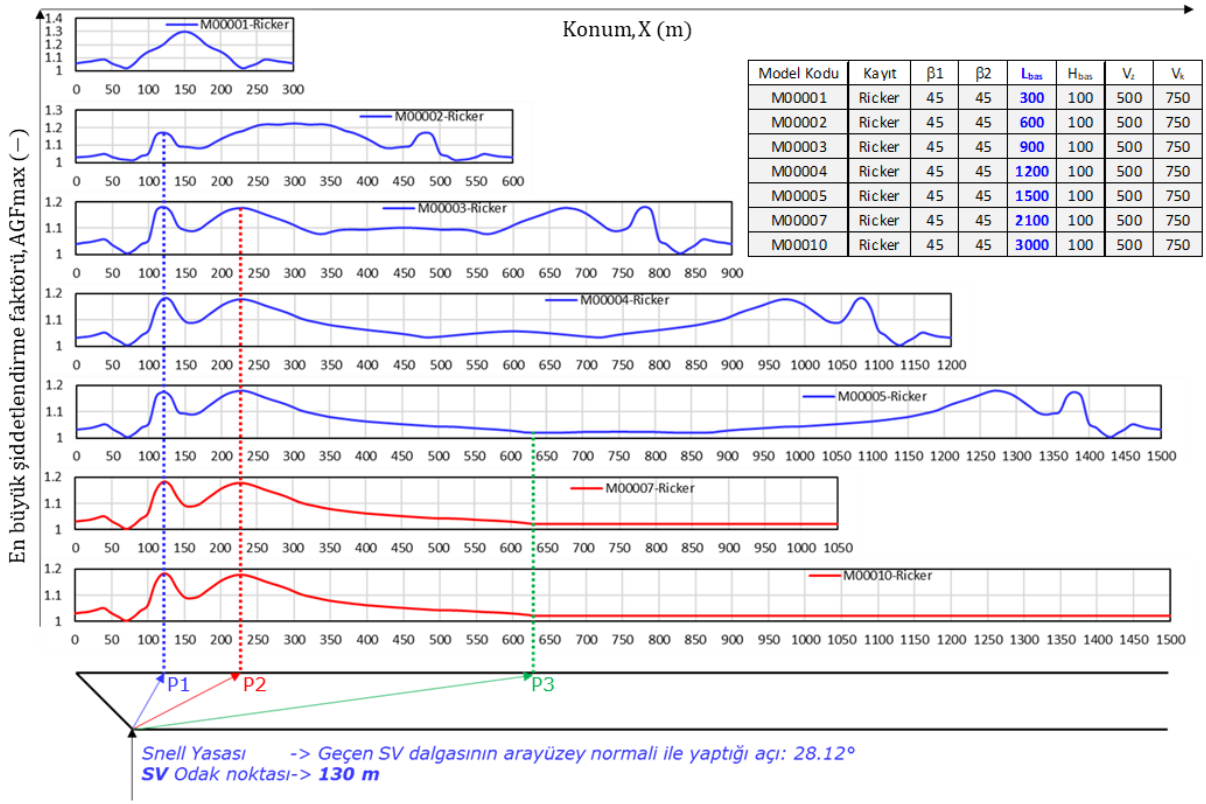
Kullanılan modifiye ricker dalgacığının AGF(T) bakımından yeterliliğini tespit etmek amacıyla detayları Şekil 6'da paylaşılan model üzerinde hem gerçek kayıtlarla hem de Türkiye'de sıkça tasarım ivmesi olarak kullanılan temsili 0.3 g değerine ölçeklenmiş sentetik dalga formu ile doğrusal elastik dinamik analizler gerçekleştirilmiştir. Analiz sonuçlarına göre AGF(0.2) (Şekil 7) ve AGF(1.0) (Şekil 8) değerlerinin havza yüzeyindeki mekansal değişimi her PGA değeri için gerçek deprem kayıtları ve sentetik kayıt için son derece benzer olduğu anlaşılmıştır. Bu, doğrusal elastik şartlar altında ivme kaydının, frekans içeriğinin ve genlik şiddetinin AGF(T) değerleri üzerinde kritik bir rol oynamadığını, bu şartlar altında yapılacak olan nümerik çalışmalarda verimliliği arttırmak amacıyla bu çalışmada olduğu gibi temsili bir PGA değerine ölçeklendirilmiş ve geniş frekans aralığında yatay genliğe sahip sentetik dalga formlarının kullanılmasının, AGF(T) değerlerinin genel dağılımını ve şiddetini tespit etmek amacıyla kullanışlı bir araç olduğunu göstermektedir.



Şekil 7. Modifiye Ricker dalgacığı ve gerçek deprem kayıtları ile elde edilen AGF(0.2) dağılımı
(Distribution of AGF(0.2) obtained with the modified Ricker wavelet and real earthquake records)



Şekil 8. Modifiye Ricker dalgacığı ve gerçek deprem kayıtları ile elde edilen AGF(1.0) dağılım
(Distribution of AGF(1.0) obtained with the modified Ricker wavelet and real earthquake records)



Model Kodu	Kayıt	β1	β2	L_{bas}	H_{bas}	V_z	V_k
M00001	Ricker	45	45	300	100	500	750
M00002	Ricker	45	45	600	100	500	750
M00003	Ricker	45	45	900	100	500	750
M00004	Ricker	45	45	1200	100	500	750
M00005	Ricker	45	45	1500	100	500	750
M00007	Ricker	45	45	2100	100	500	750
M00010	Ricker	45	45	3000	100	500	750

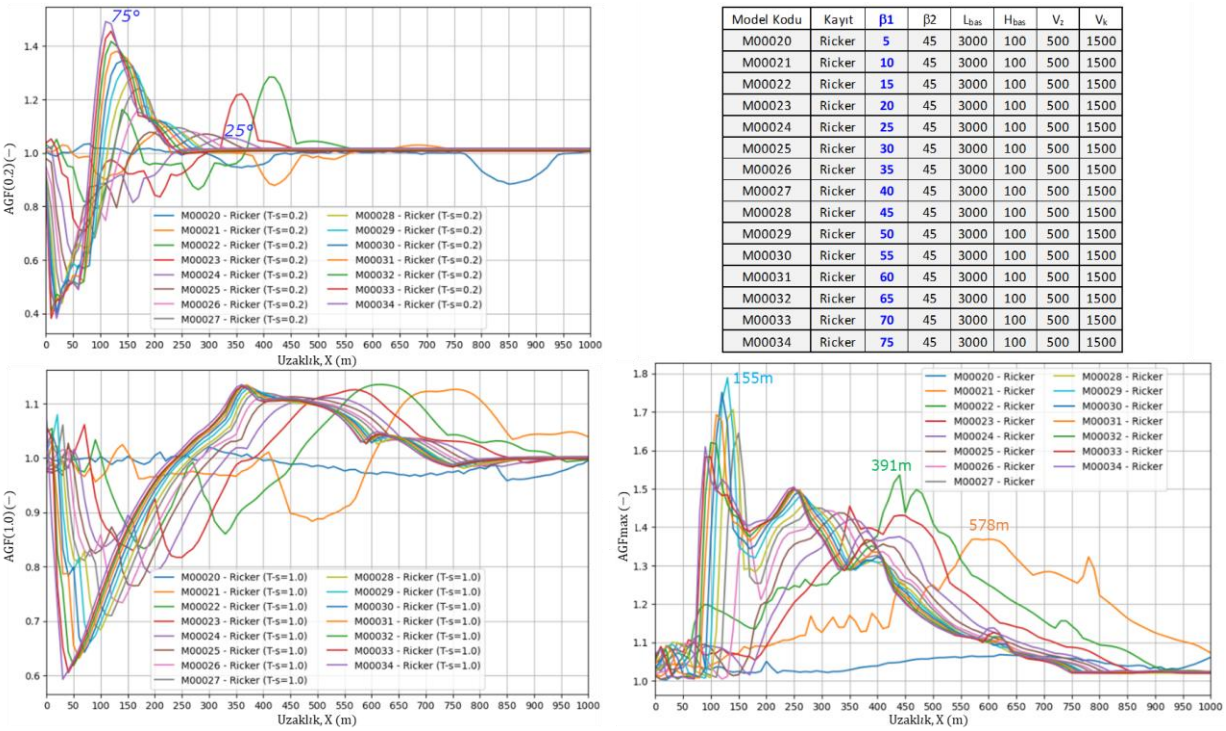
Şekil 9. Farklı genişlikteki havzalarda elde edilen AGFmax dağılımı (Distribution of AGFmax obtained in basins of different widths)

Modifiye ricker dalgacığının doğrusal elastik analizlerde havza tepkisini AGF(T) kapsamında yeterli şekilde ifade edebildiğinin anlaşılmasının ardından AGF(T) üzerinde daha kapsamlı analizler yapılmıştır. Şekil 9' da havza yüzeyi uzunluğu L_{bas}, değişimi ile birlikte, bütün periyotlar içerisinde elde edilen AGF(T)'lerin zarfı olarak en büyük AGF'yi ifade eden AGFmax dağılımında gözlemlenen değişim özetlenmiştir. Burada, M00007 ve M00010 modelleri havza ortasına kadar, diğer modeller tam ölçekte olarak gösterilmiş, bütün modeller tam ölçekte analiz edilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde, havzanın her iki kenarında Snell Yasası ile açıklanan kırılımdan kaynaklı olarak P1 ve P2 noktalarında cisim dalgalarının odaklanması açık şekilde gözlemlenmiştir. Bunun yanında yine her iki kenar için de kenar etkisinin sönümlendiği, bu model için 650 m değerini alan bir P3 noktası mevcuttur. 2 x P3=1300 değerinden daha düşük genişliğe sahip olan modellerde, karşılıklı iki kenar etkisinin girişimi sonucu havza ortasında AGmax değeri gözlemlenirken, 1260' dan daha geniş havzalarda P3'ten sonra bir AG değeri gözlemlenmemiştir.

Şekil 10' da AGF(0.2), AGF(1.0) ve AGFmax değerlerinin arayüzey açısı β_1'e bağlı olarak yüzeydeki dağılımı özetlenmiştir. Buna göre, AGF(0.2) yüksek eğimde en büyük değeri almakta, 20° eğime kadar düzenli olarak değeri azalmakta ve etki alanı genişlemektedir. Burada etki alanı arayüzey genişliğinden dolayı artmaktayken, P1 noktası için çizilen açının değeri küçülmektedir; yani açı yataya yaklaştıkça daha az ilave alan etkilenmektedir. Benzer patern AGF(1.0) için de sözkonusudur. Model için hesaplanan i_c =20°' ye denk gelen eğim her iki AGF(T) için de öneme sahip görülmektedir. AGF(0.2) değerinde gözlemlenen patern bu eğimden daha yatay eğimler için geçerli olmazken, AGF(1.0) için ise bu eğimden daha yatay eğimlerde etki alanı artışı artmaktadır. AGFmax panelinde bazı eğim değerleri için Snell yasası ile hesaplanan kırılma açısının havzanın alt köşesinden yüzeye uzatılması ile analiz öncesinde tahmin edilen P1 odak noktası değerleri grafik alanında işlenmiştir. Buna göre hesaplanan ve öngörülen değerler 50° için 25m, 15° derece için 50m farklı, 10° için ise analiz sonucuyla aynı değerde tespit edilmiştir.

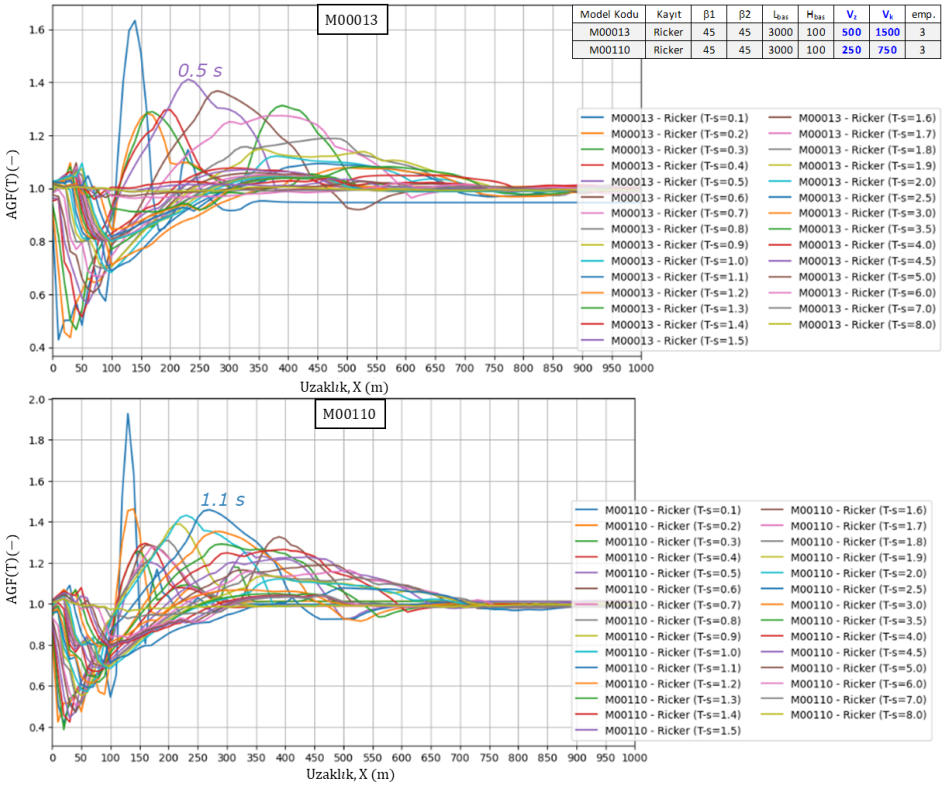
Şekil 11'de zemin-kaya empedansı 3 olan, havza içi sedimanın kayma dalgası hızının ise 500 m/s ve 250 m/s olarak farklılık gösterdiği iki model üzerinde 0.1 s ve 8.0 saniye arasındaki periyotlarda gözlemlenen AGF(T) değerlerinin yüzeydeki dağılımları sunulmuştur. M00013 modelinde zeminin 1B hakim salınım periyodu 0.8 s, M00110 modelinde ise 1.6 s'dir. Buna karşın, çoğunlukla en büyük AGF(T)'nin saptandığı kısa periyot değerleri hariç en büyük şiddetlendirmenin tespit edildiği

değerler sırasıyla 0.5 s ve 1.1 s olarak elde edilmiştir. Bu durum, 2B salınım periyodunun etkisini açığa çıkarmakta ve 1B salınım periyodu ile ilişkili olduğunu ortaya koymaktadır. 1B salınım periyodu büyüdükçe 2B şiddetlendirme periyodu da büyümüş, geometrik şartlar aynı olmasına rağmen bu çalışmada P2 noktası olarak isimlendirilen uzun periyotlardaki şiddetlendirmenin en büyük olduğu okuma noktası ise büyüyen periyot ile birlikte havza kenarından uzaklaşmıştır.



Model Kodu	Kayıt	β1	β2	L_{bas}	H_{bas}	V_z	V_k
M00020	Ricker	5	45	3000	100	500	1500
M00021	Ricker	10	45	3000	100	500	1500
M00022	Ricker	15	45	3000	100	500	1500
M00023	Ricker	20	45	3000	100	500	1500
M00024	Ricker	25	45	3000	100	500	1500
M00025	Ricker	30	45	3000	100	500	1500
M00026	Ricker	35	45	3000	100	500	1500
M00027	Ricker	40	45	3000	100	500	1500
M00028	Ricker	45	45	3000	100	500	1500
M00029	Ricker	50	45	3000	100	500	1500
M00030	Ricker	55	45	3000	100	500	1500
M00031	Ricker	60	45	3000	100	500	1500
M00032	Ricker	65	45	3000	100	500	1500
M00033	Ricker	70	45	3000	100	500	1500
M00034	Ricker	75	45	3000	100	500	1500

Şekil 10. Kaya arayüzeyi açısının AGF(0.2), AGF(1.0) ve AGFmax üzerindeki etkisi (The effect of bedrock interface angle on AGF(0.2), AGF(1.0), and AGFmax)



Model Kodu	Kayıt	β1	β2	L_{bas}	H_{bas}	V_z	V_k	emp.
M00013	Ricker	45	45	3000	100	500	1500	3
M00110	Ricker	45	45	3000	100	250	750	3

Şekil 11. Farklı 1B hakim periyoda sahip sedimanter zeminler için AGF(T) dağılımı (Distribution of AGF(T) for sedimentary soils with different dominant 1D periods)

6. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışma kapsamında, sedimanter havzaların çok boyutlu sismik tepkisinin parametrik olarak incelenebilmesi amacıyla, düzenlenmiş bir modifiye Ricker dalgacığı üretilmiş ve bu dalga formu doğrusal elastik analizlerde gerçek deprem kayıtlarıyla karşılaştırmalı olarak kullanılmıştır. 0–10 Hz arasında yatay Fourier genlik spektrumuna sahip olup, çoklu bileşenlerin süperpozisyonu ile oluşturulmuş ve frekans içeriği bakımından sahada karşılaşılabilecek baskın periyodu olmayan bir yer hareketini temsil edebilecek şekilde tasarlanmıştır. Gerçek deprem kayıtları ile kıyaslamalar sonucunda bu dalga formunun, havzaların periyoda bağlı şiddetlendirme faktörü AGF(T) dağılımını anlamada kullanışlı bir araç olduğu sonucuna varılmıştır. Bu şekilde gerçekleştirilen analizlerin, belirli bir sahanın özellikle yüksek genliğe sahip yer hareketi etkisi altında doğrusal olmayan zemin davranışını isabetle simüle edebilmesi mümkün olmamasına karşın, havzaların genel davranışının incelenmesi ve tasarım spektrumlarına etkisinin ifade edilmesi kapsamında yapılacak olan ilksel analizler için son derece yeterli olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Yapılan parametrik analizler sonucunda, havza genişliği (L), arayüzey eğimi (β), zemin rijitliği (Vs) ve rezonans periyodu gibi parametrelerin şiddetlendirme üzerindeki etkileri detaylı biçimde ortaya konmuştur. Snell yasası ile yaklaşık olarak öngörülebilen uzaklıktaki bir P1 noktasında kısa periyotlarda (0.0-0.2) şiddetlendirmenin bir lokal maksimuma ulaştığı, ardından daha uzun periyotların sebep olduğu daha uzaktaki bir P2 noktasında ikincil bir lokal maksimumun oluştuğu tespit edilmiştir. Yeterince geniş havzalarda ise bir P3 noktasında şiddetlendirme 1.0 değerine ulaşmaktadır. Bu durum, trapez kesitli havza yüzeyindeki şiddetlendirmenin, her kenar için 3 farklı kırılma noktasına sahip çok kırıklı bir eğri ile idealize edilmesinin mümkün olduğu fikrini ortaya çıkarmaktadır.

Elde edilen sonuçlar trapez kesitli havzalarda zemin-kaya arayüzeyi eğiminin, yüzeyde tespit edilen şiddetlendirme üzerinde son derece etkili olduğunu göstermiştir. Eğim yataylaştıkça AGF(0.2) değeri küçülmüş, etki alanı genişlemiştir; dik bir arayüzey eğimine sahip havzalarda kenar etkisinin daha belirgin noktalarda daha yoğun odaklandığı anlaşılmıştır. Uzun periyot (1.0 s) bölgesindeki şiddetlendirme ise arayüzey eğiminden mertebe olarak etkilenmemesine karşın etkili olduğu bölge arayüzey eğiminin yataylaşmasıyla birlikte havza ortalarına doğru ilerlemiştir.

Sonuç olarak, modifiye Ricker dalgacığıyla gerçekleştirilen bu parametrik çalışmanın bulguları, tasarım spektrumlarına dahil edilmesi gereken 2B düzeltme katsayılarının belirlenmesinde kullanışlı bir yöntem önermektedir. Gerçek deprem kayıtlarının karmaşık frekans içeriklerinden arındırılmış bu tür kontrollü analizlerin, şiddetlendirme faktörlerinin fiziksel kökenlerini ayırt edebilme kapasitesi açısından literatüre önemli katkı sunduğu değerlendirilmektedir. Ayrıca, bu çalışma, gelecekte yapılacak doğrusal olmayan analizler için de referans niteliğinde bir çerçeve sunmaktadır.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

Çalışma boyunca TÜBİTAK 121M760 numaralı proje kapsamında sağlanan desteklerinden dolayı Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu'na teşekkürlerimizi sunarız.

We would like to express our gratitude to The Scientific and Technological Research Council of Turkey (TÜBİTAK) for the support provided throughout the study under project number 121M760.

ETİK STANDARTLARI 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 çalışmaya 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. Y. Bard, M. Bouchon, The two-dimensional resonance of sediment-filled valleys. Bulletin of the Seismological Society of America, 75: 2 (1985) 519–541.
[2] A. S. Papageorgiou, J. Kim, Oblique incidence of SV-waves on sediment-filled valleys:

Implications for seismic zonation. In Proceedings of the Fourth International Conference on Seismic Zonation (Vol. 3), Stanford, CA (1991) 545–552.

[3] F. J. Chávez-García, E. Faccioli, Complex site effects and building codes: Making the leap. Journal of Seismology, 4: 1 (2000) 23–40.

[4] D. Komatitsch, Q. Liu, J. Tromp, P. Süss, C. Stidham, J. H. Shaw, Simulations of ground motion in the Los Angeles basin based upon the spectral-element method. Bulletin of the Seismological Society of America, 94: 1 (2004) 187–206.

[5] M. P. Moschetti, D. Churchwell, E. M. Thompson, J. M. Rekoske, E. Wolin, O. S. Boyd, Seismic wave propagation and basin amplification in the Wasatch Front, Utah. Seismological Research Letters, 92: 6 (2021) 3626–3641.

[6] B. Zhang, A. S. Papageorgiou, Simulation of the response of the Marina District Basin, San Francisco, California, to the 1989 Loma Prieta earthquake. Bulletin of the Seismological Society of America, 86: 5 (1996) 1382–1400.

[7] H. Kawase, The cause of the damage belt in Kobe: 'The basin-edge effect,' constructive interference of the direct S-wave with the basin-induced diffracted Rayleigh waves. Seismological Research Letters, 67: 5 (1996) 25–34.

[8] M. E. Hasal, R. Iyisan, A numerical study on comparison of 1D and 2D seismic responses of a basin in Turkey. American Journal of Civil Engineering, 2: 5 (2014) 123–133.

[9] Amini, D., Maghoul, P., Perret, D., & Gatmiri, B. (2022). Two-dimensional basin-scale seismic site effects in the Kitimat Valley, British Columbia, Canada: A practical example of using a fast hybrid FE/BE method. Engineering Geology, 311, 106872.

[10] Makra, K., Rovithis, E., Riga, E., Raptakis, D., & Pitilakis, K. (2021). Amplification features and observed damages in İzmir (Turkey) due to 2020 Samos (Aegean Sea) earthquake: identifying basin effects and design requirements. Bulletin of Earthquake Engineering, 19(12), 4773–4804.

[11] R. Rodriguez-Plata, A. G. Özcebe, C. Smerzini, C. G. Lai, Aggravation factors for 2D site effects in sedimentary basins: The case of Norcia, central Italy. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 149 (2021) 106854.

[12] K. Makra, F. J. Chávez-García, D. Raptakis, K. Pitilakis, Parametric analysis of the seismic response of a 2D sedimentary valley: Implications for code implementations of complex site effects. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 25: 4 (2005) 303–315.

[13] L. F. Bonilla, R. J. Archuleta, D. Lavallée, Hysteretic and dilatant behavior of cohesionless soils and their effects on nonlinear site response: Field data observations and modeling. Bulletin of the Seismological Society of America, 95: 6 (2005) 2373–2395.

[14] J. Zhang, C. Zhao, Response spectral amplification ratios from 1-D and 2-D nonlinear soil site models. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 28: 10 (2008) 728–740.

[15] H. Khanbabazadeh, R. Iyisan, A numerical study on the 2D behavior of single and layered clayey basins. Bulletin of Earthquake Engineering, 12: 4 (2016) 1515–1539.

[16] B. Ozaslan, R. Iyisan, Gemlik Havzası'nda 2B doğrusal olmayan analizlerle tasarım spektrumunun değerlendirilmesi. Proceedings of the 2022 Türkiye Deprem Mühendisliği Konferansı (2022).

[17] Chen, W., Liu, Y., & Zhang, J. (2023). Nonlinear seismic response and amplification effect of 3D sedimentary basin based on bounding surface constitutive model. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 158, 107292.

[18] E. Riga, K. Makra, K. Pitilakis, Aggravation factors for seismic response of sedimentary basins: A code-oriented parametric study. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 90 (2016) 242–264.

[19] N. Ricker, The form and laws of propagation of seismic wavelets. Geophysics, 18: 1 (1953) 10–40.

[20] Aki, K., & Richards, P. G. (2002). Quantitative Seismology (2nd ed.). University Science Books.

[21] Itasca Consulting Group, Inc. (2019). FLAC — Fast Lagrangian Analysis of Continua, Version 8.1. Minneapolis, MN: Itasca.

[22] Cundall, P. A., Hart, R. D., & Lemos, J. V. (1980). NESSI: A continuum code for nonlinear geomechanical modeling. In Proceedings of the International Symposium on Numerical Models in Geomechanics (NUMOG) (pp. 163–172). Zurich, Switzerland.

[23] J. Lysmer, R. L. Kuhlemeyer, Finite dynamic model for infinite media. Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE, 95: EM4 (1969) 859–877.

Gazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Dergisi
PART C: TASARIM VE TEKNOLOJİ

Gazi University
Journal of Science
PART C: DESIGN AND TECHNOLOGY

GU J Sci, Part C, 13(2): 718-731 (2025)

Basitleştirilmiş Bölünmüş Kaynaklı Evirici İçin Model Öngörülü Kontrol Yöntemi

Ali Şükrü EYÜBOĞLU[1*], Naki GÜLER[2*]

[1] *Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Teknoloji Fakültesi - Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye*

[2] *Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye*

Article Info

Research article
Received: 17/01/2025
Revision: 03/05/2025
Accepted: 04/05/2025

Keywords

Model Predictive Control
Simplified SSI
PI control
PR control

Makale Bilgisi

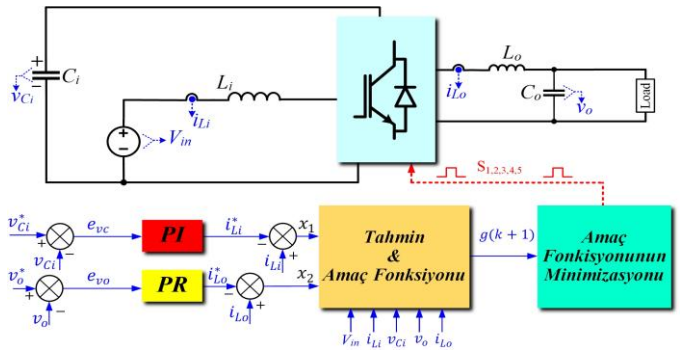
Araştırma makalesi
Başvuru: 17/01/2025
Düzeltme: 03/05/2025
Kabul: 04/05/2025

Anahtar Kelimeler

Model Öngörülü Kontrol
Basitleştirilimiş BKE
PI kontrol
PR kontrol

Graphical/Tabular Abstract (Grafik Özet)

Bu makale, basitleştirilmiş BKE için MÖK yöntemini sunmaktadır. İlk olarak basitleştirilmiş BKE devre topolojisi sunulmuştur. Sonrasında, basitleştirilmiş BKE giriş ve çıkış bobin akımlarını kontrol edilebilmesi için MÖK yönteminde amaç fonksiyonu tanımlanılmıştır. Amaç fonksiyonundaki referans değerlerini üretmek için DA-AA kısımlarında PI-PR kontrolcü kullanılmıştır. Kontrol algoritmasının etkinliği simülayon çalışmaları ile araştırılmıştır. / This paper presents the MPC method for a simplified SSI. Firstly, the simplified SSI circuit topology is presented. Then, the objective function is defined in the MPC method to control the input and output coil currents of the simplified SSI. A PI-PR controller is used in the DA-AA sections to generate the reference values in the objective function. The effectiveness of the control algorithm was investigated by simulation studies.



Şekil A: *Önerilen Kontrol Yönteminin Blok Şeması /* ***Figure A****: Block Diagram of the Proposed Control Method*

Highlights (Önemli noktalar)

- *MÖK amaç fonksiyonundaki referanslar PI-PR kontrolcüler tarafından üretildi. / The references in the MPC objective function were generated by PI-PR controllers.*
- *Doğrusal ve doğrusal olmayan yük durumunda çıkış gerilimi başarılı şekilde regüle edildi. /Output voltage successfully regulated under linear and nonlinear load conditions.*
- *Çıkış gerilimindeki THB uluslararası standartlarca tanımlanmış sınırlar içindedir. /THD in output voltage is within the specified limits desired by the international standards.*

Aim (Amaç): *Ana hedef, Basitleştirilmiş BKE devresindeki çıkış geriliminin regülasyonu olarak ifade edilebilir. / The main objective can be expressed as the regulation of the output voltage in the Simplified SSI circuit.*

Originality (Özgünlük): *Basitleştirilmiş BKE için MÖK yöntemi uygularken referans değerleri için PI ve PR kontrolcülerin entegre edilerek uygulanması literature katkı sağlanılmıştır. / While implementing the MPC method for the Simplified SSI, the application of PI and PR controllers for the reference values has been integrated and the literature has been contributed.*

Results (Bulgular): *Doğrusal ve doğrusal olmayan yük altında kararlı durum sonuçları ve dinamik yanıt sonuçları algoritmanın düşük THB değerlerinde istenilen bir şekilde çalıştığını göstermektedir. / Steady-state results under linear and nonlinear load and dynamic response results show that the algorithm works as desired at low THD values.*

Conclusion (Sonuç): *Algoritmanın performasının incelenmesi için THB ve dinamik yanıtlar üzerine simülasyon çalışmaları yapılmıştır. Sonuçlar önerilen kontrol algoritmasının hem doğrusal hem de doğrusal olmayan yük koşulları altında evirici gerilimini düşük THB ve hızlı dinamik yanıt ile düzenleyebildiğini göstermektedir. / Simulation studies on THD and dynamic responses are performed to investigate the performance of the algorithm. The results show that the proposed control algorithm can regulate the inverter voltage under both linear and nonlinear load conditions with low THD and fast dynamic response.*

*Corresponding author, e-mail: gulern@gazi.edu.tr
DOI: 10.29109/gujsc.1622225

GU J Sci, Part C, 13(2): 718-731 (2025)

Gazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Dergisi
PART C: TASARIM VE TEKNOLOJİ

Gazi University
Journal of Science
PART C: DESIGN AND TECHNOLOGY

http://dergipark.gov.tr/gujsc

Basitleştirilmiş Bölünmüş Kaynaklı Evirici İçin Model Öngörülü Kontrol Yöntemi

Ali Şükrü EYÜBOĞLU[1*], Naki GÜLER[2*]

[1] *Gazi University, Graduate School of Natural and Applied Sciences, Department of Electrical-Electronics Engineering, Ankara, Türkiye*

[2] *Gazi University, Faculty of Technology, Department of Electrical-Electronics Engineering, Ankara, Turkey*

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 17/01/2025
Düzeltme: 03/05/2025
Kabul: 04/05/2025

Anahtar Kelimeler

Model Öngörülü Kontrol
Basitleştirilimiş BKE
PI kontrol
PR kontrol

Öz

Bu makalede, basitleştirilmiş Bölünmüş Kaynaklı Evirici (BKE) için Model Öngörülü Kontrol (MÖK) yöntemi sunulmuştur. Basitleştirilmiş BKE, geleneksel BKE topolojilerinin giriş kısımda bulunan diyot ve anahtarlama elemanlarının çıkarılıp, H köprüsüne ilave bir anahtarın eklenmesiyle oluşmuştur. Geleneksel BKE topolojileriyle karşılaştırıldığında, basitleştirilmiş BKE daha az anahtarlama elemanı ve çift yönlü güç akış kabiliyeti gibi avantajlara sahiptir. Önerilen model öngörülü kontrol yöntemi, giriş ve çıkış akımlarını kontrol ederek eviricinin kararlı çalışmasını sağlayacak şekilde yapılandırılmıştır. Giriş ve çıkış bobin akımlarının referans değerleri, sırasıyla PI ve PR kontrolcüler ile üretilmiştir. PI kontrolcüye DA bara gerilim hatası uygulanırken, PR kontrolcüye AA taraf gerilim hatası uygulanmıştır. MÖK yöntemi, PI ve PR kontrolcü çıkışında elde edilen akım referansları ile tahmin edilen değer arasındaki hatayı minimize etmektedir. Böylece, dört kontrol değişkenine sahip basitleştirilmiş BKE eviricinin kontrolü sağlanmıştır. Önerilen kontrolcünün performansı MATLAB/Simulink platformunda gerçekleştirilen simülasyon çalışmalarıyla incelenmiştir. Farklı çalışma koşulları altında elde edilen kararlı durum ve dinamik yanıt sonuçları, önerilen yönteminin dört değişkenin eş zamanlı olarak başarılı bir şekilde kontrol edildiğini göstermektedir. Bununla birlikte çıkış gerilimi %2.34 gibi düşük bir toplam harmonik bozulmaya sahiptir.

Model Predictive Control Method for Simplified Split Source Inverter

Article Info

Research article
Received: 17/01/2025
Revision: 03/05/2025
Accepted: 04/05/2025

Keywords

Model Predictive Control
Simplified SSI
PI control
PR control

Abstract

In this paper, a Model Predictive Control (MPC) method for a simplified Split Source Inverter (SSI) is presented. The simplified SSI is structured by eliminating the diode and switches on the input side and adding an additional switch to the H-bridge of conventional SSI topologies. Compared to conventional SSI topologies, the simplified SSI has fewer switches and bidirectional power flow capability advantages. The proposed model predictive control method is configured to ensure stable operation of the inverter by controlling the input and output currents. The reference values of the input and output inductor currents are generated by PI and PR controllers, respectively. While the DC bus voltage error is applied to the PI controller, the AC side voltage error is applied to the PR controller. The proposed MPC method minimizes the error between the current references obtained by the PI and PR controllers and their predicted values. Thus, controlling the simplified BKE inverter that has four control variables is achieved. The performance of the proposed controller is investigated by simulation studies performed on the MATLAB/Simulink platform. The steady-state and dynamic response results obtained under different operating conditions show that the proposed MPC method successfully controls the four variables simultaneously. In addition, the output voltage has a low total harmonic distortion of 2.34%.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Güneş panelleri ve rüzgâr türbinleri gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının 2040 yılına kadar toplam enerji üretiminin %35'ini karşılaması öngörülmektedir [1]. Özellikle güneş panelleri ve depolama birimlerinin birer doğru gerilim kaynağı olması DA/AA (Doğru Akım/Alternatif Akım) dönüşüm sağlayan eviricilerin yaygın olarak kullanılmasına yol açmaktadır. Geleneksel DA/AA

*Corresponding author, e-mail: gulern@gazi.edu.tr
DOI: 10.29109/gujsc.1622225

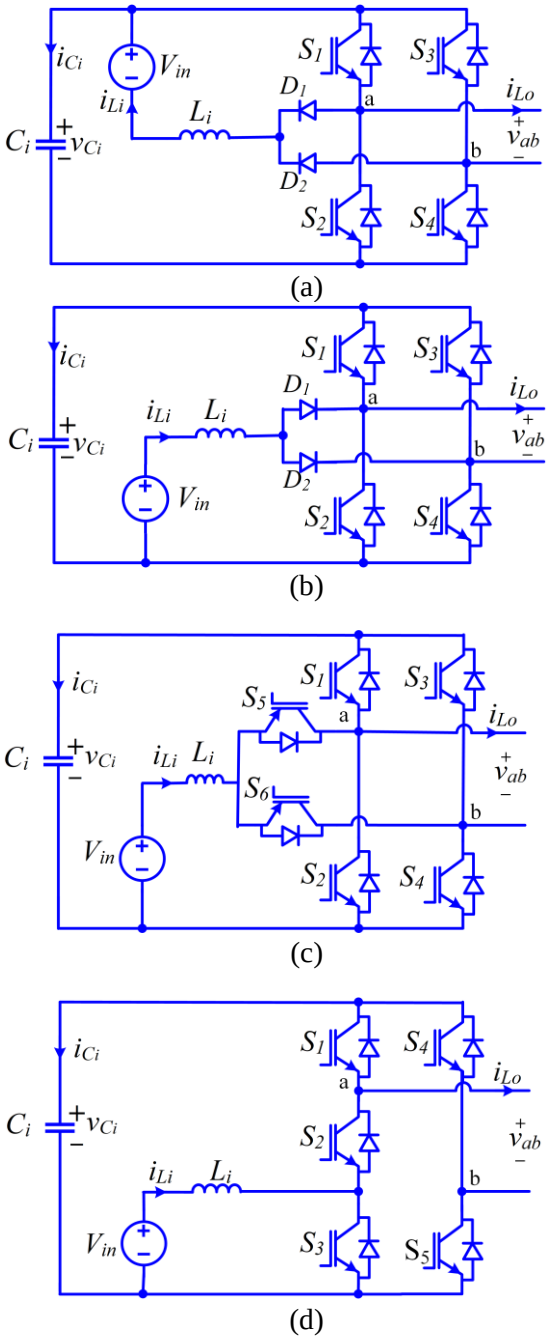
güç dönüştürücü sistemleri iki aşamalı topolojilerden oluşmaktadır. Kaynak doğru gerilim seviyesinin, çıkışta istenen alternatif gerilimin tepe değerinden daha düşük olması durumunda, ilk aşamada bir DA/DA dönüştürücü konumlandırılarak gerilim yükseltilmektedir. DA/DA dönüştürücünün çıkışındaki gerilim, DA/AA evirici aracılığıyla alternatif gerilime dönüştürülür [2]. Güç dönüşümü iki aşamalı olarak gerçekleştirildiğinden, bu tip uygulamalar iki aşamalı eviriciler olarak da adlandırılmaktadır. Ancak bu geleneksel dönüştürücüler düşük verimlilik gibi bir dezavantaja sahiptir ve güç kaybı her iki aşamada da meydana gelmektedir [3]. Gerilim kazancı, evirici anahtarları ile kontrol edilebildiğinden ek anahtar ihtiyacı ortadan kalkmaktadır. Güncel çalışmalarda maliyet, boyut ve verimlilik açısından avantaj sağladığından tek aşamalı dönüştürücü topolojilerine olan ilgi artmaktadır [4,5]. Tek aşamalı dönüştürücüler temel olarak DA gerilim kontrolünün sağlanması ve çıkış tarafında düşük toplam harmonik bozulmaya (THB) sahip sinüzoidal gerilimin elde edilmesi fonksiyonlarını gerçekleştirmelidir [6]. Z-Kaynaklı eviriciler, literatürdeki yaygın olarak çalışılan topolojilerin başında yer almaktadır. Giriş aşamasına ek devre bileşenleri eklenmesiyle oluşan topoloji, giriş gerilimini artırma/azaltma kabiliyetine sahiptir. Z-Kaynaklı eviricilerin yüksek başlangıç akımı ve çift yönlü güç akışına uygun olmama gibi dezavantajları bulunmaktadır [7]. Bununla birlikte, DA bara gerilimi de uygulama açısından dezavantajlar oluşturmaktadır.

Bölünmüş kaynaklı eviriciler (BKE) de son yıllarda ilgi çeken tek aşamalı yükselten güç dönüştürücüleri arasındadır [8-12]. Tek aşamalı diğer dönüştürücülere göre, DA bara geriliminin ve DA giriş akımının sürekli yapıda olması, daha az sayıda pasif bileşen barındırması gibi önemli avantajları bulunmaktadır. Bununla birlikte, yeterli bir ölü zaman süresinin üretilmesi ihtiyacı ve farklı anahtarlarda arasındaki eşit olmayan akım dağılımı gibi dezavantajları bulunmaktadır [9]. Bölünmüş kaynaklı evirici, klasik evirici topolojilerine göre ekstra bobin ve kondansatör gerektirir [13]. Ayrıca, faz kolları ile DA kaynak arası bağlantı diyotlar veya anahtarlar ile sağlanabilmektedir. Bu duruma ait daha detaylı karşılaştırma yapabilmek adına literatürde mevcut BKE modelleri Şekil 1'de verilmiştir. Şekil 1(a)'da görüldüğü üzere, yükselten çalışmayı sağlayan bobin, kaynağın negatif terminali ile iki adet diyot üzerinden H-köprüsüne bağlanmıştır [8]. Aynı topoloji yapısında bobin, Şekil 1(b)'deki gibi kaynağın pozitif terminaline de bağlanabilmektedir [9]. Her iki topoloji için giriş kısmında bulunan diyotların yüksek frekanslı komütasyonu sebebiyle kayıplar artmaktadır. Dolayısıyla, verimin azalmasına sebep olmaktadır. Şekil 1(c)'de ise giriş kısmında bulunan diyotların yerine anahtarlama elemanları MOSFET kullanılarak bir topoloji oluşturulmuştur [10]. Bu düzenleme ile diyotlardaki yüksek frekanslı komütasyonlardan kaynaklanan kayıplar azaltılmış ve çift yönlü güç akış imkânı sağlanmıştır. Ancak, bu durum ilave anahtarlama elemanı ve sürücü ihtiyacı doğurmuş ve kontrol karmaşıklığını arttırmıştır. Bu BKE topolojilerinin anahtarlama frekansı geleneksel sinüzoidal darbe genişlik modülasyonu (DGM) ile üretildiğinde, istenmeyen düşük frekans salınımlarına sebep olmaktadır [11]. Bu salınımları giderebilmek için hibrit yarı-sinüzoidal ve sabit darbe genişlik modülasyonu uygulanmaktadır [10]. Diğer bir BKE topolojisi ise Şekil 1(d)'de görülen basitleştirilmiş BKE yapısıdır. Şekilden görüldüğü üzere, giriş kısmındaki diyot ve MOSFET'lerin çıkarılıp, H-köprüsüne anahtar eklenmesi ile elde edilmiştir. Basitleştirilmiş BKE topolojisinde, anahtarlama sinyalleri 180^0 faz farkı olan iki sinüzoidal dalganın darbe genişlik modülasyonuna tabi tutulmasıyla üretilmektedir. Özetlenen bu BKE eviricilerin karşılaştırması Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. BKE Topolojilerinin Karşılaştırması
(Comparison of SSI Topologies)

	BKE-1,2	BKE-3	Basitleştirilmiş BKE
Anahtarlar	4	6	5
Diyotlar	2	0	0
Bobin	1	1	1
Kondansatör	1	1	1
Çift Yönlü Akış	Hayır	Evet	Evet
Gerilim Kazancı	m/(1-m)	m/(1-m)	2m/(1-m)

Tabloda görüldüğü üzere, BKE-1 ve BKE-2 topolojileri diyotlar içerdiğinden çift yönlü güç akışına uygun değildir. BKE-3 topolojisinde diyot yerine anahtarlar kullanılarak çift yönlü güç akışı sağlanabilmektedir [3,10,11]. Ancak, 6 yarı iletken anahtar kullanılması bir uygulama ve kontrol zorluğu olarak ortaya çıkmaktadır. Basitleştirilmiş BKE topolojisi de çift yönlü güç akışı özelliğine sahiptir. Aynı zamanda, BKE-3 topolojisine göre daha az yarı iletken anahtar içerdiğinden daha basit bir devre yapısına sahiptir. Bu özellikleri nedeniyle, bu çalışmada basitleştirilmiş BKE topolojisi tercih edilmiştir.



Şekil 1. BKE Topolojilerine ait devre şemaları (a) BKE-1 Topolojisi [8], (b) BKE-2 Topolojisi [9], (c) BKE-3 Topolojisi [10], (d) Basitleştirilmiş BKE Topolojisi (Circuit diagrams of SSI Topologies (a) SSI-1 Topology [8], (b) SSI-2 Topology [9], (c) SSI-3 Topology [10], (d) Simplified SSI Topology)

Evirici topolojilerinin düzenli bir şekilde çalışması ve istenilen referans gerilimi veya akımı sağlayabilmesi için kontrol yapıları gerekmektedir. Evirici kontrolünde, hızlı dinamik tepki, düşük THB ve sıfır kararlı durum hatası temel performans kriterleri olarak ifade edilebilir [14]. Geleneksel eviricilerdeki bu gereksinimlere ek olarak, BKE topolojilerinde DA kısım parametrelerinin de kontrol edilmesi gerekmektedir. Dolayısıyla, hem DA taraf hem de AA taraf kontrollerinin eş zamanlı olarak gerçekleştirilmesi BKE modellerinin düzenli çalışması için bir zorunluluktur. [15]'te tek aşamalı BKE topolojisinin kontrolü geleneksel kontrolcüler olan Oransal İntegral (PI) ve Oransal Rezonans (PR) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Kontrol stratejisinde DA bağlantı noktası gerilimi iki kademeli PI denetleyici ile kontrol edilmek üzere yapılandırılmıştır. AA taraf gerilim kontrolü, modülasyon sinyali üreten PR denetleyici tarafından gerçekleştirilmiştir. Geleneksel kontrol yapıları, gelişmiş kontrolcülere göre daha az hesaplama yükü gerektirdiğinden birçok çalışmada tercih edilmektedir. Bununla birlikte, hızlı ve ucuz mikrodenetleyicilerin yaygınlaşması, Kayan Kipli Kontrol (KKK) ve Model Öngörülü Kontrol (MÖK) gibi gelişmiş kontrol yöntemlerinin uygulanmasını mümkün kılmıştır [16]. KKK yöntemi güç dönüştürücülerin kontrol etmekte yaygın olarak kullanılmaktadır. KKK yöntemi hızlı dinamik tepki, parametre değişimlerine karşı duyarsızlık ve kolay uygulama gibi avantajlara sahip iken pratikte istenmeyen çatırdama sorunları bir dezavantaj olarak ortaya çıkmaktadır. [16]'da sunulan çalışmada BKE için çok amaçlı maliyet fonksiyonuna dayalı sonlu kontrol set KKK yöntemi önerilmiştir. Çok amaçlı maliyet fonksiyonu ile birden çok kontrol parametresi eşzamanlı değerlendirilerek sistemin kararlı çalışması sağlanmıştır. Anahtarlama sinyallerinin üretilmesi için karmaşık bir modülasyon şemasına olan ihtiyaç sonlu kontrol seti özelliğiyle ortadan kaldırılmıştır. Modülasyon yöntemi kullanılmaması sebebiyle anahtarlama frekansı değişken yapıdadır.

Model öngörülü kontrol yöntemi, sistemlerin matematiksel modeline dayalı olarak kontrol değişkeninin sonraki örneklemedeki değerini tahmin etmeye dayalı gelişmiş bir kontrol stratejisidir [17]. Klasik kontrol metotlarında hata fonksiyonu ölçülen değer ile referans değer arasındaki fark olarak tanımlanırken, MÖK yönteminde hata fonksiyonu, tahmin edilen değer ile referans değerin karşılaştırılması sonucu elde edilir [18]. Kontrol değişkeninin tahmini, dönüştürücünün her bir anahtarlama durumundaki devre modeline bağlı olarak gerçekleştirilir. Bir veya birden çok kontrol parametresi aynı anahtarlama durumu için tahmin edilebilmektedir. Hesaplanan bu değer ile referans değer karşılaştırılarak hata sinyali üretilir. MÖK yönteminde, güç dönüştürücülerinin akım, gerilim ve anahtarlama frekansı gibi farklı türde hataları tek bir fonksiyon içerisinde birleştirilerek maliyet fonksiyonu olarak adlandırılan toplam hata fonksiyonu oluşturulmaktadır. Bu durum, birden çok kontrol parametresinin eş zamanlı değerlendirilmesine olanak sağladığından MÖK'ün

önemli bir avantajı olarak ön plana çıkmaktadır [19]. Ancak, fazla anahtar sayısına sahip güç dönüştürücülerinde olası anahtar durumu artacağından hesaplama yükü artmaktadır. Bu durum, MÖK yönteminin uzun yıllar güç elektroniği alanında kullanımını kısıtlamıştır. Günümüzde, mikrodenetleyici teknolojilerindeki gelişmeler MÖK yönteminin daha hızlı uygulanmasına olanak sağlamış ve güç elektroniği alanındaki kullanımını artırmıştır. Diğer taraftan, tahmin algoritmasının sistemin matematiksel modeline dayalı olması kontrol performansını sistem parametrelerine duyarlı hale getirmektedir. Özellikle, güç dönüştürücüsünde yer alan bobin ve kondansatör gibi devre elemanlarının, tolerans ve yaşlanma gibi etkilerden kaynaklı değişimlerinin kontrolcü performansında sapmalara yol açtığı bilinmektedir [20]. Ancak, bu etkilerin sınırlı olduğu birçok çalışmada yapılan parametre değişimlerine duyarlılık testleriyle açıklığa kavuşturulmuştur [21-24].

Bu çalışmada, bir fazlı basitleştirilmiş BKE topolojisinin kontrolü için MÖK tekniği önerilmiştir. Basitleştirilmiş BKE topolojisinin AA ve DA kısımlarında giriş akımı, DA bara gerilimi, çıkış akımı ve çıkış gerilimi olmak üzere kontrol edilmesi gereken dört kontrol değişkeni bulunmaktadır. Gerilimlerin kontrolü için PI ve PR yöntemleriyle akım referansları üretilmiştir. Evirici giriş ve çıkış akımlarının kontrolü ise eş zamanlı olarak MÖK yöntemiyle sağlanmıştır. Böylece eviricinin tüm değişkenlerinin kontrolü gerçekleştirilmiştir. Önerilen yöntemin performansı simülasyon çalışmalarıyla incelenmiştir.

2. BÖLÜNMÜŞ KAYNAKLI EVİRİCİ ÇALIŞMA PRENSİBİ VE MATEMATİKSEL MODELLEME (SPLIT SOURCE INVERTER OPERATING PRINCIPLE AND MATHEMATICAL MODELING)

Basitleştirilmiş bir fazlı BKE modeli Şekil 2'de görülmektedir. Topoloji, H köprüsünde bulunan paralel kollardan birine ekstra bir anahtarlama elemanı eklenmesiyle oluşmaktadır. DA kısmında bulunan bobin ilave edilen anahtarlama elemanı yoluyla şarj olur iken, DA bara kondansatörü üzerinden deşarj olmaktadır. Devre, bobin şarj olurken evirici olarak, deşarj olurken ise yükselten dönüştürücü olarak çalışmaktadır. Bu durumlar göz önünde bulundurulduğunda, altı olası anahtarlama durumu oluşmaktadır. Her bir anahtarlama durumunda oluşan devre modelleri Şekil 3'te gösterilmiştir. İlave edilen anahtarlama elemanının (S_3) kapalı olduğu dört durumda *Li* bobini şarj olmaktadır. Söz konusu dört durumda eviricinin çıkış geriliminin değeri v_{Ci}, -v_{Ci} ve 0 olarak üç farklı değer almaktadır. S_3 anahtarının açık olduğu diğer iki durumda L_i bobini C_i kondansatörü üzerinden deşarj olmaktadır ve evirici çıkış gerilimi v_{Ci} ve 0 değerlerini almaktadır. Basitleştirilmiş BKE topolojisinde yer alan devre bileşenleri, anma güç seviyesine göre belirlenmiştir. Giriş tarafında bulunan bobin (Li) bileşeni Denklem (1)'deki eşitlik kullanılarak hesaplanmıştır [25].

$$L_i = \frac{V_{in}D}{\Delta I_L f_s} \tag{1}$$

burada, ΔI_L bobin akımı üzerindeki salınımını ifade etmektedir. Salınım oranı %30 seçilerek giriş bobin akımındaki salınım değeri 1.08A olarak hesaplanmaktadır. D terimi, bobin sarjının görev döngüsünü ifade etmektedir ve sistemin çalışma parametrelerine bağlı olarak D=0,55 hesaplanmıştır. V_{in} giriş gerilimini, f_s ise anahtarlama frekansını ifade etmektedir ve simülasyon ortamındaki testlerde ortalama anahtarlama frekansı 12kHz olarak ölçülmüştür. Bu ölçümler ve seçimler doğrultusunda giriş bobin akımı Denklem (1) kullanılarak 2.5mH hesaplanılmıştır. Çıkış kısmında bulunan bobin endüktansı (L_o), Denklem (2) ve kondansatör kapasitesi (C_o) Denklem (3)'te bulunan eşitlikler kullanılarak hesaplanmıştır [25].

$$L_o = \frac{V_o}{4\Delta I_{Lo} f_s} \tag{2}$$

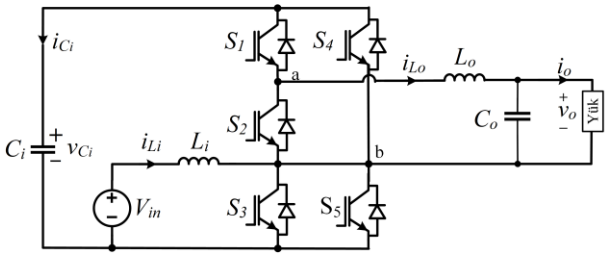
Eşitlikte yer alan ΔI_{Lo} terimi; çıkış tarafındaki bobin akımı üzerindeki salınımını ifade etmektedir. Salınım oranı %35 seçilerek çıkış bobin akımındaki salınım değeri 1.5A olarak hesaplanmaktadır. V_o çıkış geriliminin etkin değerini, f_s ise anahtarlama frekansını ifade etmektedir. Bu ölçümler ve seçimler doğrultusunda giriş bobin akımı Denklem (2) kullanılarak 1.5mH hesaplanılmıştır.

Filtre parametreleri hesaplanırken yapılan kabullerden dolayı rezonans durumu kontrol edilerek parametreler doğrulanmalıdır. Rezonans frekansı (fr) ile anahtarlama frekansı arasındaki oran 1/10 veya daha küçük seçilmesi uygundur.

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_o C_o}} \tag{3}$$

Eşitlikte yer alan rezonans frekansı anahtarlama frekansının 1/10 katından daha küçük bir değer olarak 920 Hz seçilmiştir. Sonuç olarak C_o çıkış kondansatör bileşenin değeri 20µF hesaplanmıştır.

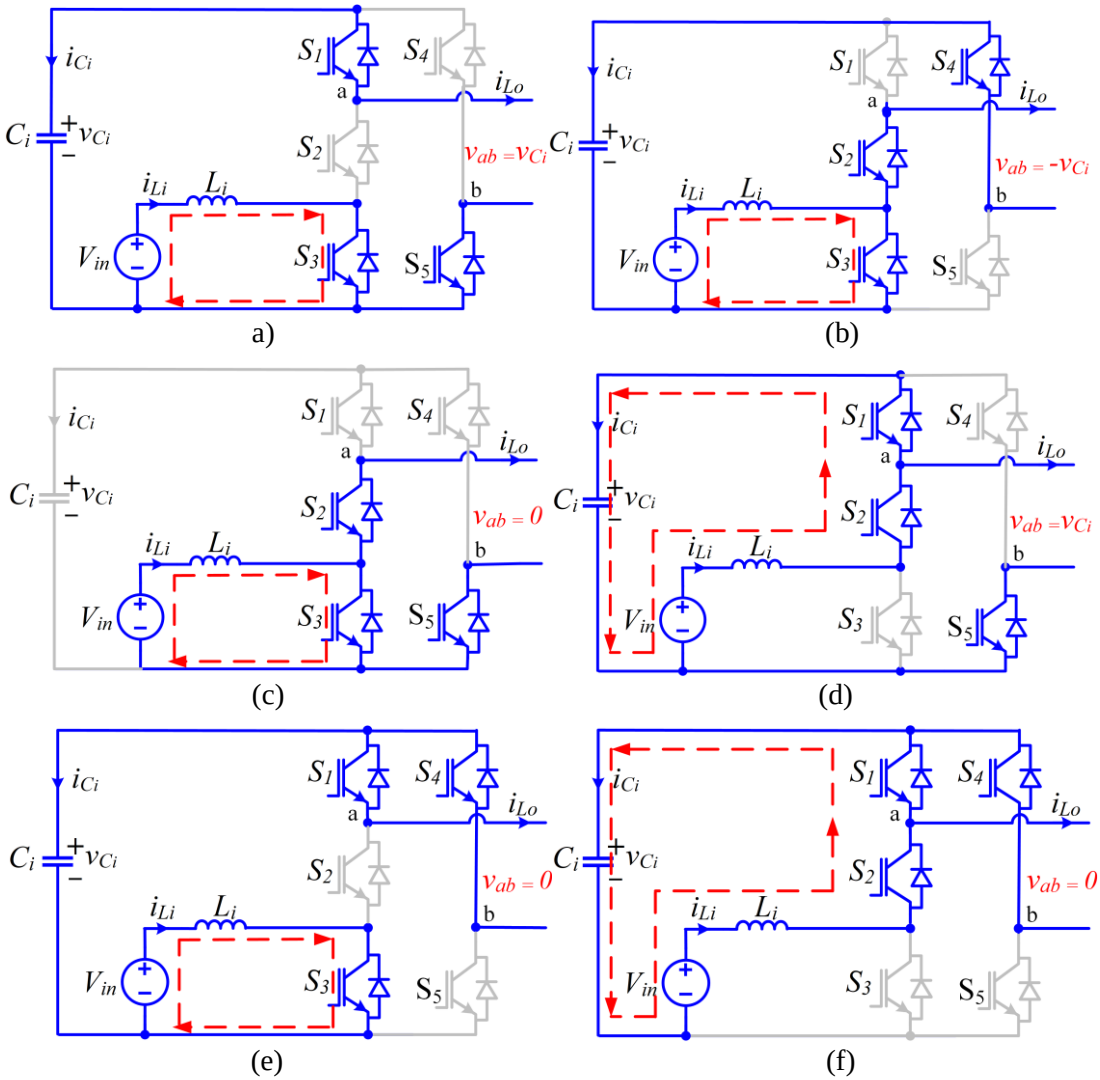
Her bir anahtarlama durumu için bobin üzerindeki gerilim (V_{Li}), DA-bara kondansatörü üzerinden geçen akım (i_{Ci}) ve evirici çıkış gerilimi (v_{ab}) Tablo 2'de gösterilmiştir.



Şekil 2. Basitleştirilmiş bir fazlı BKE (Simplified single-phase SSI)

Tablo 2. Anahtar durumlarına göre V_{Li}, i_{Ci}, v_{ab}. (V_{Li}, i_{Ci}, v_{ab} according to switching states)

No	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	V_{Li}	i_{Ci}	v_{ab}
1	1	0	1	0	1	V_{in}	$-i_{Lo}$	v_{Ci}
2	0	1	1	1	0	V_{in}	i_{Lo}	$-v_{Ci}$
3	0	1	1	0	1	V_{in}	*0*	*0*
4	1	1	0	0	1	V_{in} $-V_{Ci}$	$-i_{Lo}$	v_{Ci}
5	1	0	1	1	0	V_{in}	*0*	*0*
6	1	1	0	1	0	V_{in} $-V_{Ci}$	$-i_{Li}$	*0*



Şekil 3. Anahtar durumlarına göre devre modelleri (a) 1. durum, (b) 2. durum (c) 3. durum (d) 4. durum (e) 5. durum (f) 6. Durum (Circuit models according to switch states (a) 1st state, (b) 2nd state (c) 3rd state (d) 4th state (e) 5th state (f) 6th state)

Eviricinin DA tarafındaki çalışmasını tanımlayan diferansiyel denklemler Kirchhoff'un Akım ve Gerilim kanunu ile aşağıdaki şekilde tanımlanabilir:

$$L_i \frac{di_{Li}(t)}{dt} = V_{in} - (S_1S_2S_5 - S_1S_2S_4)V_{ci} \quad (4)$$

$$C_i \frac{dv_{Ci}(t)}{dt} = S_1S_2S_4 i_{Li} + (S_2S_3S_4 - S_1S_3S_5 - S_1S_2S_5)i_{Lo} \quad (5)$$

Eviricinin AA tarafındaki çalışmasını tanımlayan diferansiyel denklemler Kirchhoff'un Akım ve Gerilim kanununa göre aşağıdaki şekilde tanımlanabilir:

$$L_o \frac{\mathrm{d}i_{\mathrm{Lo}}(t)}{\mathrm{d}t} = v_{ab} - v_o \quad (6)$$

$$C_o \frac{\mathrm{d}V_{\mathrm{o}}(t)}{\mathrm{d}t} = i_{Lo} - i_o \quad (7)$$

Tablo 2'de anahtar durumlarına göre verilen evirici çıkış gerilimi aşağıdaki fonksiyon ile tanımlanabilir:

$$v_{ab} = (S_1S_3S_5 - S_2S_3S_4 + S_1S_2S_5)\, v_{ci} \quad (8)$$

Eviricinin çıkış tarafındaki AA gerilimin tepe değeri, DA kısmındaki giriş gerilimi ve DA bara gerilimi arasındaki ilişki aşağıdaki şekilde tanımlanabilir:

$$v_o = V_o \sin(\omega t) \quad (9)$$

$$\frac{V_0}{V_{in}} = \frac{2m}{1-m}, \quad V_{Ci} = \frac{V_{in}}{1-D} \quad (10)$$

Yukarıdaki denklemlerde *m* modülasyon indeksini, V_{Ci} DA taraftaki kondansatör geriliminin ortalama değerini, V_o çıkış geriliminin tepe değerini ifade etmektedir. *D* ise bobin şarjı için anahtarlama oranını belirtmektedir. [11]'de belirtildiği üzere, minimum şarj oranı (D_{min}) Denklem (11) ile ifade edilebilir.

$$D_{min} = \frac{1}{2}(m+1) \quad (11)$$

Denklem (10)'deki D yerine Denklem (11)'deki D_{min} ifadesi konulursa,

$$V_{Ci} = \frac{2V_{in}}{1-m} \quad (12)$$

elde edilir. Modülasyon indeksi ise Denklem (10)'daki ilk eşitlik kullanılarak aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$m = \frac{V_o}{2V_{in}+V_o} \quad (13)$$

m, Denklem (12)'deki yerine konulursa, DA taraf kondansatör gerilimi Denklem (14)'teki gibi yazılabilir.

$$V_{Ci} = 2V_{in} + V_o \quad (14)$$

Denklem (14)'teki eşitlikten görüldüğü üzere DA bara gerilimi giriş gerilimi ve referans çıkış gerilimine göre belirlenmelidir.

3. REFERANS SİNYALLERİNİN ÜRETİLMESİ VE ÖNERİLEN MODEL ÖNGÖRÜLÜ KONTROL YÖNTEMİ (GENERATION OF REFERENCE SIGNALS AND PROPOSED MODEL PREDICTIVE CONTROL METHOD)

Basitleştirilmiş BKE eviricinin kararlı bir şekilde çalışması için DA (V_{Ci}, i_{Li}) ve AA (V_o, i_{Lo}) taraftaki değişkenlerinin referans değerlerine regüle edilmesi gerekmektedir [26]. Evirici gerilim kaynağı olarak da düşünülebilecek DA bara kondansatörü, giriş kaynağı tarafından şarj edilmektedir. Dolayısıyla, V_{Ci} geriliminin kontrolü eviricinin kararlı çalışması açısından büyük öneme sahiptir. DA bara gerilimine ait hata fonksiyonu Denklem (15)'teki gibi yazılabilir.

$$e_{vc} = V_{ci}^* - V_{ci} \quad (15)$$

burada, V_{ci}^* DA bara kondansatör geriliminin referansını, e_{vc} ise gerilim hatasını ifade etmektedir. Referans gerilim değeri Denklem (14) kullanılarak aşağıdaki gibi elde edilebilir.

$$V_{ci}^* = 2V_{in} + V_o^* \quad (16)$$

burada, V_o^* çıkış geriliminin referans tepe değeridir. Bu değerin kontrolcü girişinde seçilebilecek tek sabit parametre olduğu belirtilebilir. Kondansatör şarj durumu giriş kaynağından çekilecek akım seviyesine bağlı olduğundan, BKE modellerinde giriş kaynağına bağlı DA taraf bobin akımının (i_{Li}) kontrolü bir zorunluluk olarak ortaya çıkmaktadır. Referans akım değeri (i_{Li}^*), DA bara kondansatör gerilimine bağlı olarak belirlenmelidir. Denklem (15)'teki gerilim hatası PI kontrolcüye uygulandığında, i_{Li}^* Denklem (17)'deki gibi elde edilir [26].

$$i_{Li}^* = K_p e_{vc} + K_i \int e_{vc} \quad (17)$$

burada, K_p ve K_i sırasıyla oransal ve integral kazançlarını ifade eden sabit katsayılardır. Literatürde Ziegler–Nichols Yöntemi gibi PI parametrelerinin ayarlanması için çeşitli metotlar bulunmaktadır. Ancak, bu makalede farklı kontrol yöntemleri içeren ardışık bir kontrol yapısı uygulandığından, PI parametrelerinin doğrudan hesaplanması mümkün olmamıştır. Bu nedenle deneysel adımlar uygulanarak parametreler belirlenmiştir. K_p değeri kararlı durumda sistemin tepki süresi yani salınım durumu üzerinde etkiliyken, Ki değeri sıfır kalıcı hata oluşturulması açısından etkilidir. İlk olarak K_i=0 değerinde K_p değerini arttırarak sistemin salınım durumu incelenmiştir. K_i değeri ise sistemin kalıcı durum hatasını en aza indirgeyen değer elde edilene kadar adım adım artırılarak belirlenmiştir.

BKE çıkış geriliminin regülasyonu diğer bir kontrol amacı olarak belirtilmişti. Çıkış gerilimi hatası (e_{vo}) Denklem (18)'deki gibi yazılabilir.

$$e_{vo} = v_o^* - v_o \quad (18)$$

burada, v_o^* çıkış geriliminin referansını ifade etmektedir. Çıkış tarafındaki bobin akımının referansı (i_{Lo}^*) PR kontrolcü kullanılarak elde edilebilir. PR kontrolcü kararlı durumda alternatif akım tarafında sıfır hatayı garanti eder [27]. PR kontrolcü transfer fonksiyonu Denklem (19)'daki gibi yazılabilir.

$$G_{PR}(\mathrm{s}) = K_{pr} + \frac{2K_r\omega_c s}{s^2+2\omega_c s+\omega^2} \quad (19)$$

burada, ω_c kesim frekansını, ω rezonans frekansını, Kpr ve Kr sırasıyla oransal ve rezonans kazançlarını ifade etmektedir. PI kontrolde olduğu gibi ardışık kontrol uygulanması sebebiyle PR kontrol parametrelerinin doğrudan hesaplanması mümkün olmamıştır. PR kontrol parametreleri belirlenmesinde kararlı durum sonuçlarında; K_{pr} sistemin tepki süresini yani salınım değerini etkilemektedir, K_r kalıcı durum hatasının sıfıra indirgenmesinde kullanılan kazanç olarak dikkate alınmıştır. Öncelikle, K_{pr} küçük adım aralıklarıyla artırılarak sistemin genel yanıt süresi kontrol edilmiştir. K_r değeri hedeflenen rezonans frekanstaki kazancı artırmaktadır ve o frekansta hatayı sıfıra götürmektedir. K_r de aynı şekilde adım arttırılmış ve hatanın en aza ulaştığı değer tespit edilmiştir.

AA ve DA taraf gerilim kontrolcüleri kullanılarak giriş ve çıkış tarafındaki bobin akımlarının referansları üretilmiştir. Bobin akımlarının kontrolü ise MÖK kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Model öngörülü kontrol yönteminin tasarımı, sistem modelinin oluşturulması, tahmin fonksiyonlarının oluşturulması ve minimizasyon olmak üzere üç aşamada gerçekleştirilir. Sistemin diferansiyel denklemleri Bölüm 2'de sunulmuştu. Denklem (4)-(6)'daki eşitliklere, Denklem (20)'deki Forward-Euler metodu uygulanırsa Denklem (21) ve (22)'deki tahmin fonksiyonları elde edilir.

$$\frac{d_i}{d_t} \approx \frac{i_{(k+1)}-i_{(k)}}{T_s} \quad (20)$$

$$i_{Li}(\mathrm{k}+1) = \frac{T_s}{L_i}[V_{in(k)} - (S_1S_2S_5 + S_1S_2S_4)v_{ci}] + i_{Li}(\mathrm{k}) \quad (21)$$

$$i_{Lo}(\mathrm{k}+1) = \frac{T_s}{L_o}[(S_1S_3S_5 - S_2S_3S_4 + S_1S_2S_5)v_{ci} - v_o] + i_{Lo}(\mathrm{k}) \quad (22)$$

burada, $i_{Li}(\mathrm{k}+1)$ ve $i_{Lo}(\mathrm{k}+1)$ sırasıyla, giriş ve çıkış akımlarının bir sonraki örnekleme zamanı için tahmin edilen değerlerini ifade etmektedir. T_s ise örnekleme zamanıdır.

Model Öngörülü Kontrol yönteminin amacı tahmin ve referans değerleri arasında hatayı minimize etmektedir. MÖK yönteminde maliyet fonksiyonu olarak adlandırılan hata fonksiyonları, referans akım değerleri ile Denklem (21) ve (22)'deki bobin akımlarının $(k+1)$ anı için tahmin edilen değerleri arasındaki hata olarak tanımlanabilir. Denklem (23) ve (24)'te görüldüğü üzere, giriş akımı ve çıkış akımının hataları olmak üzere iki ayrı maliyet fonksiyonu bulunmaktadır.

$$g_{iLi}(\mathrm{k}+1) = |i^*_{Li}(k) - i_{Li}(\mathrm{k}+1)| \quad (23)$$

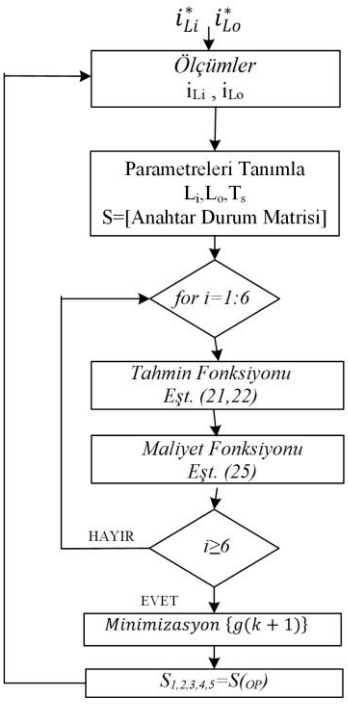
$$g_{iLo}(\mathrm{k}+1) = |i^*_{Lo}(k) - i_{Lo}(\mathrm{k}+1)| \quad (24)$$

Bu iki hata fonksiyonunun eş zamanlı olarak kontrol edilmesi için hatalar, Denklem (25)'teki toplam maliyet fonksiyonunda birleştirilir.

$$g(\mathrm{k}+1) = g_{iLo}(\mathrm{k}+1) + \lambda g_{iLi}(\mathrm{k}+1) \quad (25)$$

Farklı kontrol değişkeni hataları bir toplam fonksiyonunda birleştirildiğinden, denklemde λ ile gösterilen ağırlıklandırma faktörü kullanılmaktadır. Kontrol sisteminin performansı, maliyet fonksiyonları arasında oransal ağırlıklandırma yapan λ'nın değerine bağlıdır. λ değeri Denklem (25)'teki toplam maliyet fonksiyonundaki g_{iLi} maliyet fonksiyonun etkisini belirlemektedir. λ'nın artması g_{iLi} fonksiyonun kontrol sistemin performansına etkisini oransal olarak arttırmaktadır. Dolayısıyla, kontrolcünün i_{Li}'nin regülasyonuna hangi oranda önem vereceği ağırlıklandırma farktörüyle orantılı olarak değişmektedir.

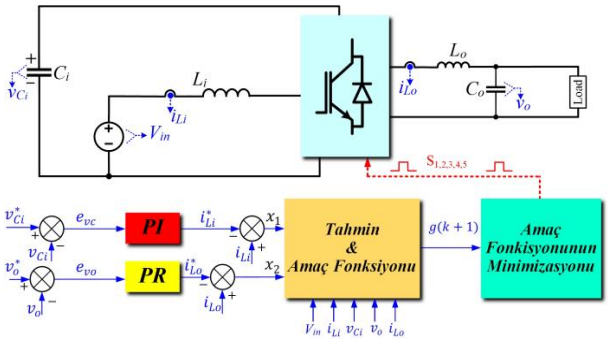
Önerilen model öngörülü kontrol yönteminin akış diyagramı Şekil 4' te gösterilmiştir. Algoritma referans akım değerlerinin girişi ve ölçümler ile başlamaktadır. Sonrasında sabit sistem parametreleri tanımlanmaktır. Denklem (21) ve (22)'deki tahmin fonksiyonları ve Denklem (25)'teki toplam maliyet fonksiyonu tüm anahtarlama durumları için hesaplanmaktadır. Altı anahtar durumu için elde edilen toplam maliyet fonksiyonları arasından minimum değere sahip olana göre en iyi anahtarlama durumu belirlenmektedir.



Şekil 4. Model Öngörülü Kontrol Algoritmasının Akış Diyagramı (Flowchart of Model Predictive Control Algorithm.)

4. SİMÜLASYON SONUÇLARI (SIMULATION RESULTS)

Önerilen kontrol algoritmasının performansının incelenmesi için MATLAB/Simulink ortamında modelleme ve benzetim çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Benzetimi yapılan modelin blok şeması Şekil 5'te, benzetim parametreleri ise Tablo 3'te gösterilmiştir. Şekilden görüldüğü üzere, DA kısmında bulunan bobin akımının referans değeri (i_{Li}^*), DA bara kondansatörünün gerilim değeri (v_{ci}) ile referans değeri (v_{ci}^*) arasındaki hatanın (e_{vc}) PI kontrolcüye uygulanmasıyla elde edilmektedir. AA kısmında bulunan bobin akımının referans değeri ise çıkış gerilimi (v_o) ve referans değeri (v_o^*) arasındaki hatanın (e_{vo}) PR kontrolcüye uygulanmasıyla elde edilmektedir. MÖK yöntemi, DA ve AA taraf akımlarının kontrolünü sağlamaktadır. Kontrolcü performansı, kararlı durum ve giriş gerilimi, referans gerilimi ve yük değişimi koşulları altında incelenmiştir.

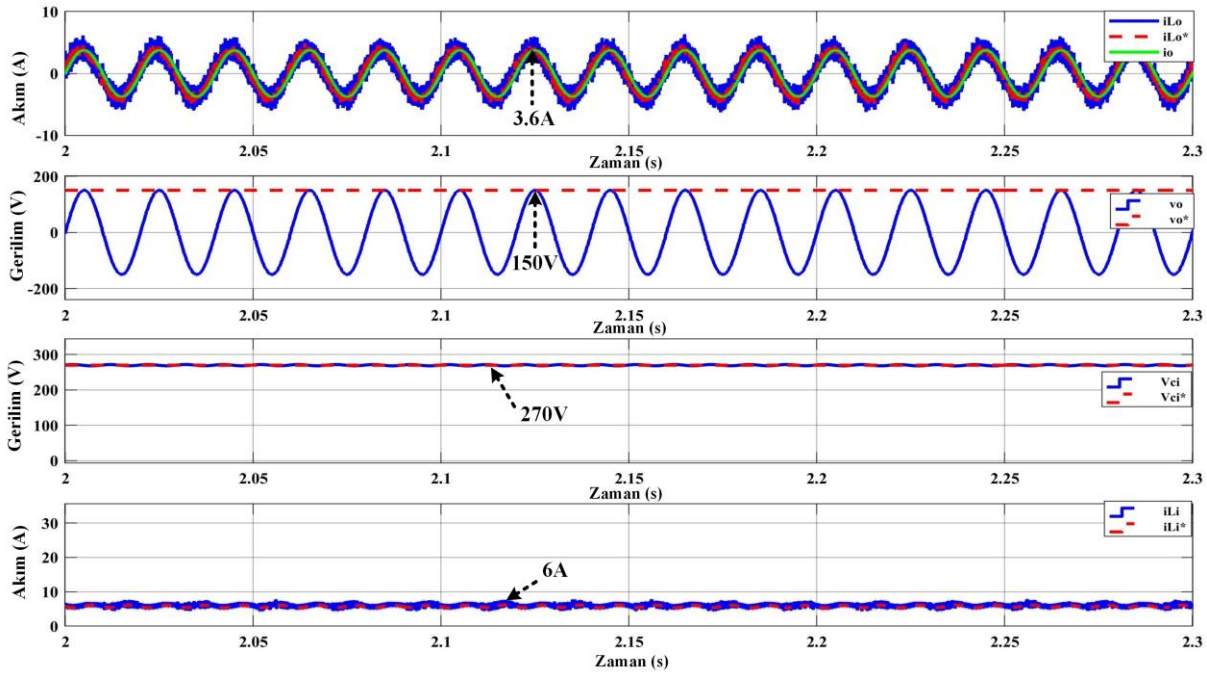


Şekil 5. Önerilen Kontrol Yönteminin Blok Şeması (Block Diagram of the Proposed Control Method.)

Tablo 3. *BKE ve Kontrol Parametreleri (SSI and Control Parameters)*

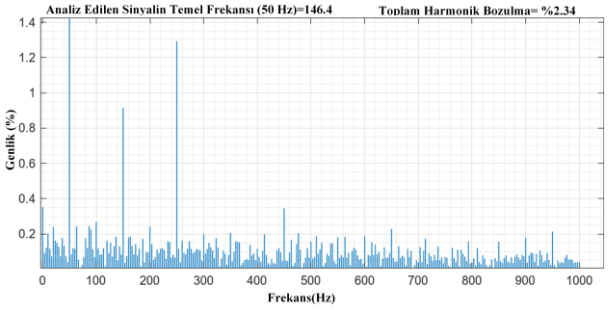
Parametreler	**Değerleri**
DA giriş gerilimi (V_{in})	60V-75V
DA referans gerilimi (V_{ref})	150V
DA taraf kondansatör kapasitansı (C_i)	1000µF
DA taraf bobin endüktansı (L_i)	2.5mH
AA taraf kondansatör kapasitansı (C_o)	20µF
AA taraf bobin endüktansı (L_o)	1.5mH
Yük Direnci	40 Ω-20 Ω
PR kontrolcü parametreleri (K_{pr}, K_r)	0.25, 1000
PI kontrolcü parametreleri (K_p, K_i)	0.2, 10
Örnekleme süresi (Ts)	20µs
Ortalama anahtarlama frekansı (f_S)	12kHz
Ağırlıklandırma faktörü (λ)	1

Şekil 6'da, referans gerilimin tepe değeri 150V, giriş gerilimi 60V ve yük direnci 40Ω iken elde edilen simülasyon sonuçları görülmektedir. Önerilen MÖK yönteminin, evirici çıkış akımını (i_{Lo}), PR kontrolcü tarafından üretilen referansına göre başarılı bir şekilde kontrol ettiği şekilde görülmektedir. Ayrıca, çıkış geriliminin genliği ise referans tepe değeri olan 150V seviyesindedir. Bu durum, AA taraf kontrolünün başarılı bir şekilde gerçekleştirildiğini göstermektedir. DA tarafta ise, DA bara kondansatör geriliminin Denklem (14)'e göre referans değeri olan 270V'a regüle edildiği görülmektedir. Bununla birlikte, PI kontrolcü tarafından üretilen referans akım takibinin önerilen MÖK yöntemiyle başarılı bir şekilde sağlandığı yine Şekil 6'daki sonuçlarda görülmektedir.



Şekil 6. Kararlı durum sonuçları. (Steady state results.)

Bu durum, eviricinin dört değişkeninin de önerilen yöntem ile kararlı durumda başarılı bir şekilde kontrol edildiğini ispatlamaktadır. Eviriciler için diğer bir performans göstergesi olan THB sonucu Şekil 7'de verilmiştir. Üçüncü harmonik değeri (h3) %0.91, beşinci harmonik değeri (h5) %1.29, yedinci harmonik değeri (h7) %0.2, dokuzuncu harmonik değeri (h9) %0.34 olarak ölçülmüştür. Çıkış gerilimindeki THB %2.34 olarak ölçülmüştür. Bu değer uluslararası standartlarda tanımlanan THB seviyesinin altındadır [28].

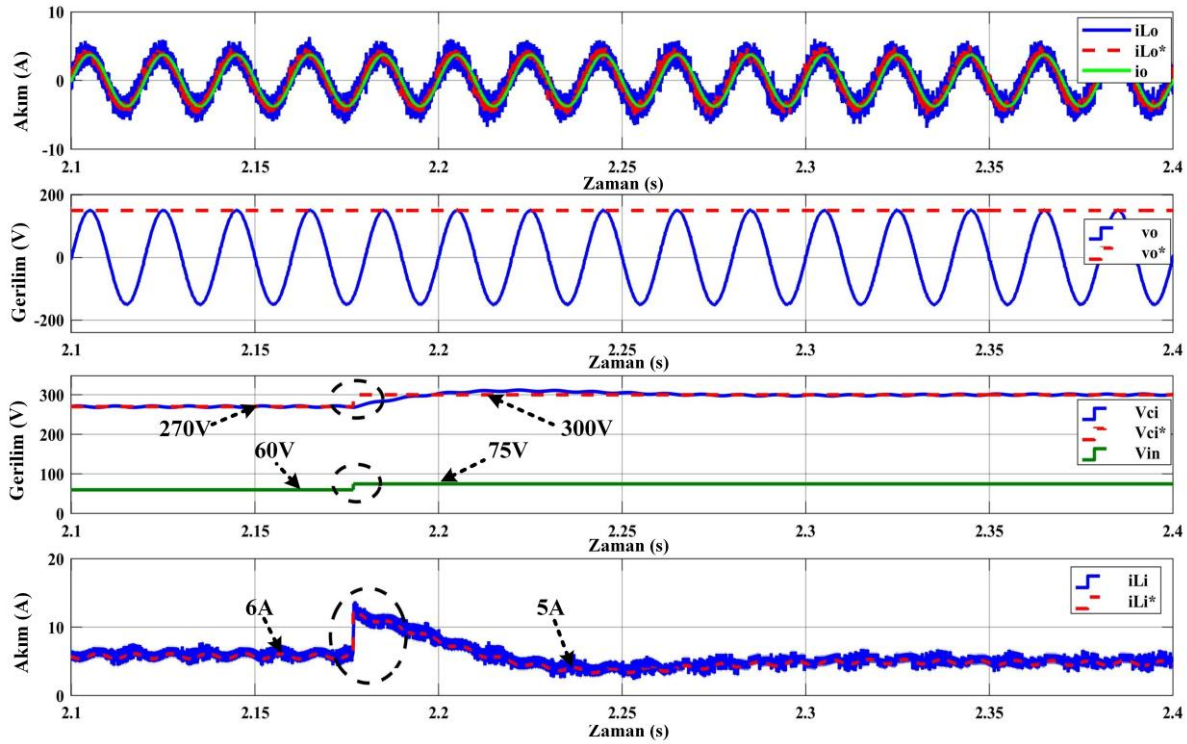


Şekil 7. Çıkış geriliminin THB sonuçları. (THD results of the output voltage.)

Kontrol algoritmalarının kararlı durum tepkilerinin yanı sıra, güç dönüştürücüsünün giriş veya çıkış tarafındaki değişimlere karşı verdiği dinamik cevaplar önemli bir performans göstergesidir. Önerilen kontrol yapısının dinamik performansı, giriş gerilimi, referans gerilim ve yükteki ani değişimler altında test edilmiştir.

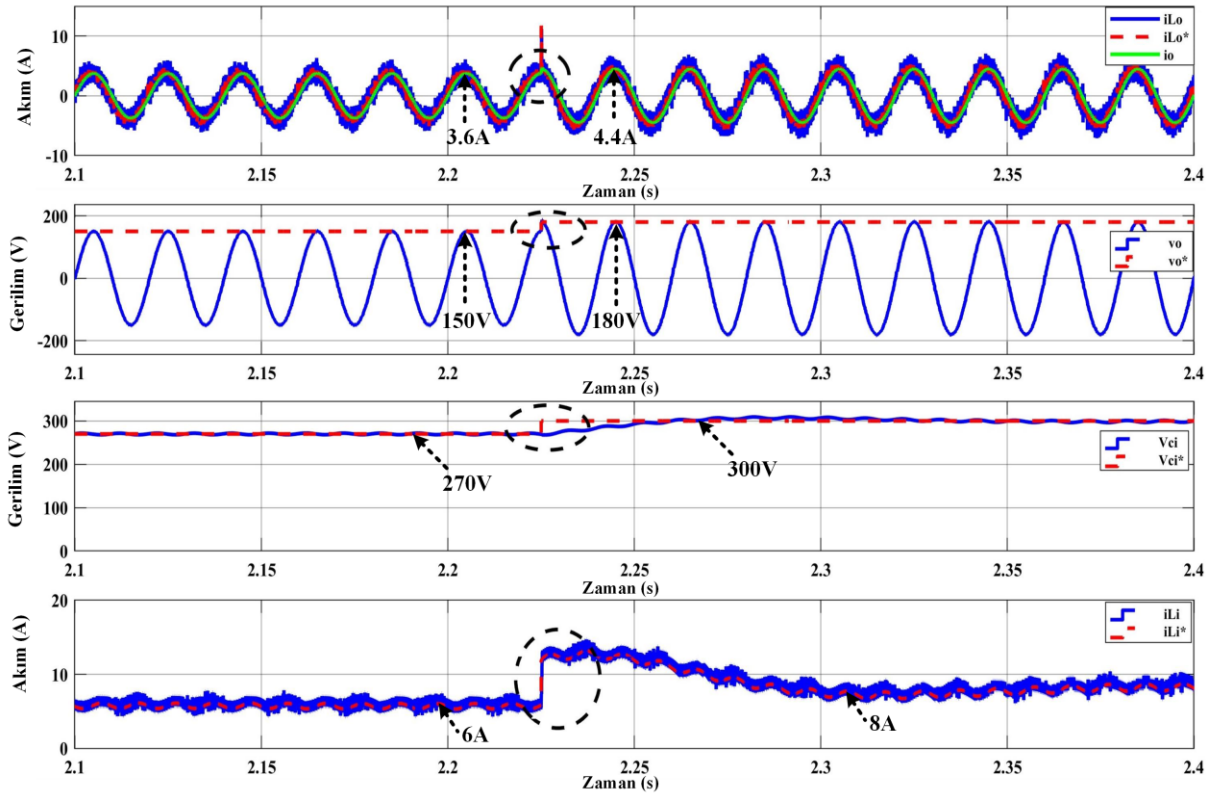
Eviricinin giriş gerilimin 60V'dan 75V'a yükseltildiği durumda elde edilen sonuçlar Şekil 8'de verilmiştir. Çıkış gerilimi ve çıkış akımında değişim olmadığı şekilde görülmektedir. Bu durum, kontrolcünün girişte olan değişiklikleri çıkış tarafına yansıtmadan başarılı bir kontrol sergilediğini göstermektedir. DA taraf değişkenlerinde ise kondansatör geriliminin referans değerinin (V_{ci}^{*}) 270V'tan 300V'a yükseldiği ve kondansatör geriliminin (V_{Ci}) 0.1 saniyeden daha kısa bir zamanda yeni referans değerine regüle edildiği görülmektedir. DA taraf bobin referans akımının (i_{Li}^{*}) ortalama değerinin 6A'den 5A seviyesine azaldığı görülmektedir. Geçiş süresinin ise yine 0.1 saniyeden daha kısa olduğu gözlenmiştir. Bu simülasyon sonuçları önerilen kontrol yönteminin farklı giriş gerilimi değerlerinde çalışabilir olduğunu göstermiştir.

Önerilen kontrol yönteminin dinamik performansı, eviricinin referans gerilim genliğinin 150V'dan 180V'a değiştirilmesi ile test edilmiştir. Elde edilen simülasyon sonuçları Şekil 9'da verilmiştir. Referans değerin değiştirilmesiyle birlikte, çıkış geriliminin tepe değerinin 180V'a yükseldiği şekilde görülmektedir. Bununla birlikte, PR kontrolcü çıkış akımının referans değerini 3.6A'den 4.4A'e yükseltmiştir. MÖK yönteminin akım takibini başarı bir şekilde gerçekleştirdiği şekilde görülmektedir. Çıkış geriliminin referansının artmasıyla Denklem (14)'teki eşitliğe göre V_{ci}^{*} değeri 300V'a yükselmiştir. Şekilde görüldüğü üzere, DA bara kondansatör gerilimi 0.1 saniyeden kısa bir sürede yeni referansına başarıyla regüle edilmiştir.



Şekil 8. Giriş geriliminin 60V'dan 75V'a yükseltildiği duruma ait dinamik cevaplar. (Dynamic responses when the input voltage is increased from 60V to 75V.)

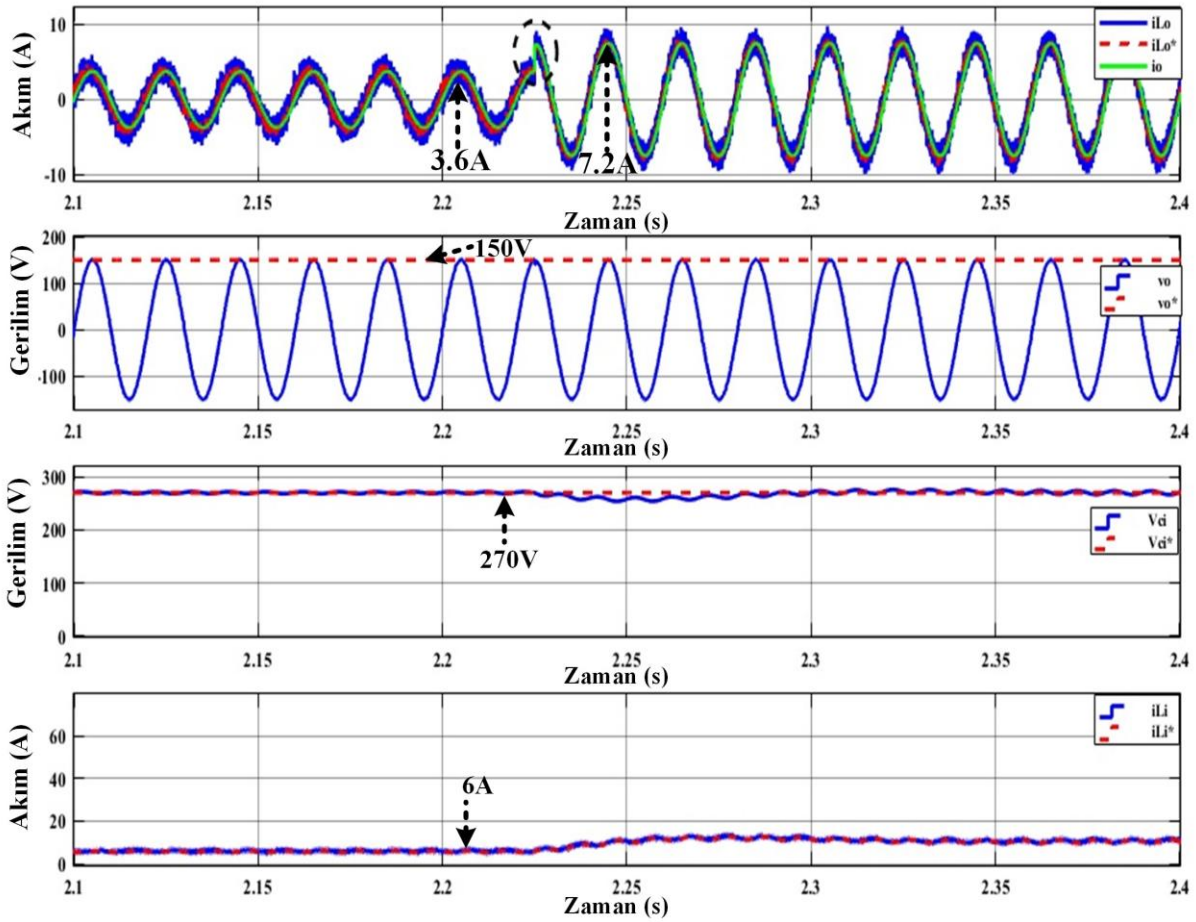
Bununla birlikte güç dengesini korumak için PI kontrolcü ile elde edilen bobin referans akımının ani olarak yükseldiği ve geçiş süresinden sonra 8A ortalama akım seviyesine arttığı görülmektedir. Geçiş süresince dahi akım kontrolünün başarılı bir şekilde gerçekleştiği, MÖK yönteminin üstün dinamik cevabının bir göstergesi olarak kabul edilebilir. Bu test sonucunda, önerilen kontrol yapısının farklı çıkış gerilim seviyesinde çalışabileceği gözlemlenmiştir.



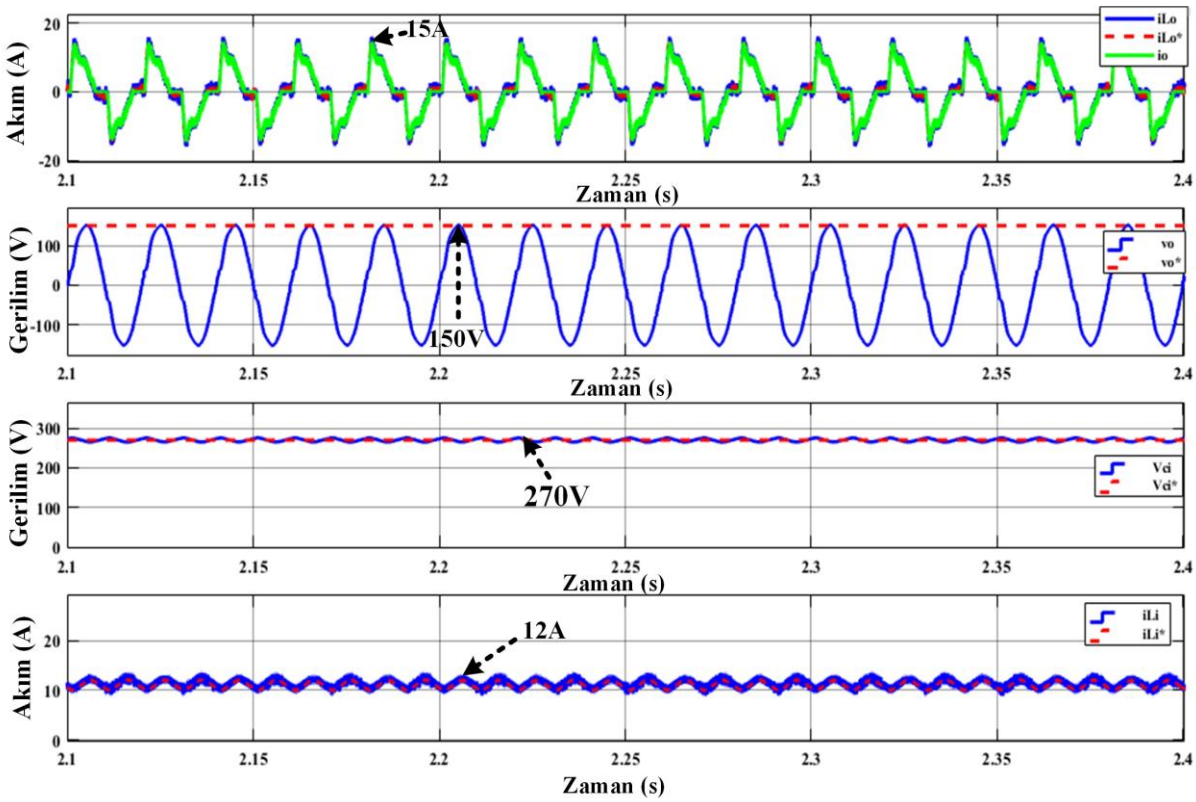
Şekil 9. Referans gerilim genliğinin 150V'tan 180V'a yükseltildiği duruma ait dinamik cevaplar. (Dynamic responses when the reference voltage amplitude is increased from 150V to 180V.)

Önerilen kontrol yönteminin dinamik performansının yük değişimleri altında test edilmesi için yük direncinin 40Ω'dan 20Ω'a düşürülmüş ve elde edilen sonuçlar Şekil 10'da verilmiştir. Yük direncinin azalmasıyla çıkış gücünü karşılamak için çıkış akımının referansı PR kontrolcü tarafından 2 katına çıkarılmıştır. Bu durumda çıkış akım kontrolünün MÖK yöntemi tarafından başarılı bir şekilde gerçekleştirildiği şekilde görülmektedir. Çıkış geriliminin ise bu değişimden neredeyse hiçbir değişim olmadan 150V tepe değerde sürdürüldüğü yine şekilde gösterilmektedir. Güç artışından kaynaklı DA taraf değişkenleri de bu durumdan etkilenmektedir. DA bara kondansatör geriliminin geçiş anında bir miktar azaldığı ancak giriş akımının artırılmasıyla tekrar referansına regüle edildiği şekilde görülmektedir. Elde edilen sonuçlar, önerilen kontrol yapısının yük değişimlerine karşı çıkış gerilimi sabit tutma kabiliyetinin oldukça yüksek olduğunu göstermiştir.

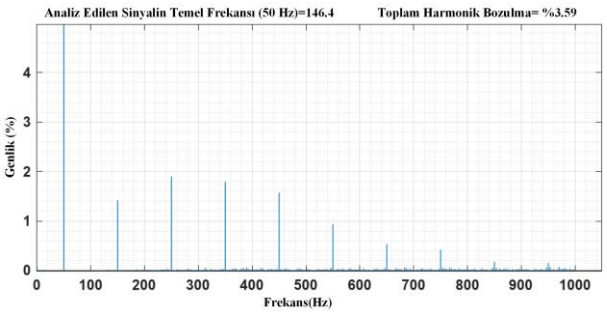
Tasarlanan kontrol sistemin performansının incelenmesi için ayrıca doğrusal olmayan yük durumunda kararlı durum sonuçları incelenmiştir. Şekil 11'de sisteme ait kararlı durum sonuçları gösterilmektedir. Doğrusal olmayan yük durumunda şekilden anlaşılacağı üzere çıkış gerilimi sinüzoidal formda iken çıkış akımı yüksek harmonik bozulmalar içermektedir. Sistem istenilen 150V çıkış gerilimi değerine sahip olmuştur. Doğrusal olmayan durumdaki çıkış gerilimine ait THB Şekil 12'de gösterilmektedir. Üçüncü harmonik bileşeni %1.42, beşinci harmonik bileşeni %1.9, yedinci harmonik bileşeni %1.8, dokuzuncu harmonik bileşeni ise %1.57 olarak ölçülmüştür. Çıkış gerilimindeki THB %3.59 olarak ölçülmüştür. Bu değer uluslararası standartlarda tanımlanan THB seviyesinin altındadır [28].



Şekil 10. Yük direncinin 40 Ω'dan 20 Ω'a azaltıldığı duruma ait dinamik cevaplar. (Dynamic responses for the case where the load resistance is reduced from 40 Ω to 20 Ω.)



Şekil 11. Doğrusal olmayan yük durumunda kararlı durum sonuçları. (Steady state results under nonlinear load.)



Şekil 12. Doğrusal olmayan yük durumda çıkış geriliminin THB sonuçları. (THB results of the output voltage under nonlinear load condition.)

Literatürde mevcut BKE topolojileri ve kullanılan kontrol yöntemleri ile basitleştirilmiş BKE ve önerilen yöntemin karışlaştırması Tablo 4'te verilmiştir. Topoloji yapısı açısından Basitleştirilmiş BKE'de 2 diyot yerine 1 adet anahtar eklenmesi komponent sayısını azaltan bir avantaj olarak belirtilebilir. Kontrol yöntemleri açısından incelendiğinde, [15] ve [26] modülasyon içeren kontrol yapılarından meydana gelmektedir. Bu durum, karmaşık modülasyon işlemlerinden kaynaklı bir uygulama zorluğu olarak belirtilebilir. Ancak, modülasyondan kaynaklı sabit anahtarlama frekansı kullanımı bu çalışmalar için bir avantaj olarak görülebilir. Sonlu kontrol seti kullanan kontrol yapıları içeren [16], [25] ve önerilen yöntemde, anahtarlama frekansı değişkendir. Değişken anahtarlama frekansı özellikle THB açısından etki gösterebilecek bir unsur olup, incelenen tüm çalışmalarda standartlara uygun değerler elde edildiği görülmüştür. Dinamik cevaplar açısından giriş-çıkış değişimlerine karşı sağlamlık testleri [26] hariç diğer tüm makalelerde gerçekleştirilmiş ve kontrolcülerin etkinlikleri ispatlanmıştır. Kontrol algoritmalarının ihtiyaç duyduğu değişken sayısının bir göstergesi olan sensör sayıları açısından, [15] diğer çalışmalara göre avantaja sahip olsa da sonlu kontrol setli yapılarda, önerilen yöntem en az sensöre ihtiyaç duymaktadır. Bu karşılaştırmanın bir sonucu olarak, literatürde mevcut çalışmalarla benzer testler gerçekleştirildiği ve yazarların bilgisi dahilinde önerilen kontrol yapısının Basitleştirilmiş BKE modeli için ilk defa uygulanarak standartlara uygun sonuçlar elde edildiği görülmüştür.

Tablo 4. Gelişmiş BKE ve Önerilen Kontrol Yönteminin 4 Kontrol Yöntemi ile Karşılaştırması. (Comparison of Advanced SSI and Proposed Control Method with 4 Control Methods.)

Tanım	[15]	[16]	[25]	[26]	Önerilen
Topoloji	1 Fazlı BKE	1 Fazlı BKE	1 Fazlı BKE	1 Fazlı BKE	1 Fazlı Basitleştirilmiş BKE
Anahtar Sayısı	4	4	4	4	5
Bobin Sayısı	2	2	2	3	2
Kondasatör Sayısı	2	2	2	3	2
Diyot Sayısı	2	2	2	2	0
Kontrol Yöntemi	PI-PR	Sonlu Kontrol Setli KKK	Enerji Fonksiyon Tabanlı MÖK	PI-PR	MÖK
Modülasyon	Var	Yok	Yok	Var	Yok
Giriş-Çıkış Değişimlerine karşı sağlamlık	Sağlam	Sağlam	Sağlam	Belirtimemiştir	Sağlam
THB	%1.21	%1.25	%1.3	Belirtimemiştir	%2.34
Sensör Sayısı	3	5	6	4	4

5. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışmada, Basitleştirilmiş Bölünmüş Kaynaklı Eviricinin çıkış geriliminin kontrolü için MÖK yöntemi tabanlı bir kontrol yapısı önerilmiştir. BKE yapısının kararlı çalışması, giriş ve çıkış taraflarında bulunan dört değişkeninin kontrolüne dayanmaktadır. Bu makalede önerilen kontrol yapısında, giriş ve çıkış akımının referansı PI ve PR kontrolcüler aracılığıyla üretilmiştir. Akım kontrolleri ise MÖK yöntemiyle sağlanmıştır. Önerilen kontrolcünün performansı simülasyon çalışmalarıyla incelenmiştir. Kararlı durumda, çıkış gerilim kontrolü %2.34 gibi düşük bir toplam harmonik bozulma ile gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, önerilen kontrol yapısının dinamik performansı, giriş gerilimi, referans gerilim ve yük değişimleri altında test edilmiştir. Özellikle yük değişimi altında oldukça iyi bir dinamik performans sergileyen kontrolcü, tüm değişimler altında eviricinin kararlı çalışmasını sağlamıştır.

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)

***Ali Şükrü EYÜBOĞLU*:** Önerilen yöntemin tasarımı ve simülasyon çalışmalarını gerçekleştirmiştir. Sonuçları analiz etmiş ve maklenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

He designed the proposed method and performed the simulation studies. He also analyzed the results and carried out writing the article.

***Naki GÜLER*:** Simülasyon çalışmaları ve teorik aşamalarda katkı sağlamıştır. Sonuçları analiz etmiş ve maklenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

He contributed to simulation studies and theoretical parts. He also analyzed the results and carried out writing the article.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

There is no conflict of interest in this study.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

[1] N. Sukesh, M. Pahlevaninezhad and P. K. Jain, "Analysis and Implementation of a Single-Stage Flyback PV Microinverter With Soft Switching," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 61, no. 4, pp. 1819-1833, April 2014, doi: 10.1109/TIE.2013.2263778.

[2] U. Polat, E. Sonuç and D. Yildirim, "Current Control of Grid-Connected Simplified Split-Source Converters (S3I) for Single Phase Photovoltaic Microinverter Application," 2023 10th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ICEEE), Istanbul, Turkiye, 2023, pp. 391-396, doi: 10.1109/ICEEE59925.2023.00077.

[3] Y. Elthokaby, I. Abdelsalam, N. Abdel-Rahim, I. Mohamed, "Standalone PV-based single-phase split-source inverter using model-predictive control, " Alexandria Engineering Journal, Vol. 62, 2023, p: 357-367, doi.org/10.1016/j.aej.2022.07.035.

[4] A. Stone, M. Rasheduzzaman and P. Fajri, "A Review of Single-Phase Single-Stage DC/AC Boost Inverter Topologies and Their Controllers," 2018 IEEE Conference on Technologies for Sustainability (SusTech), Long Beach, CA, USA, 2018, pp. 1-8, doi: 10.1109/SusTech.2018.8671380.

[5] S.D.S. Nunna, A.Ketha, S.S.G.Padamat, K.Rambabu, U.A.Kshirsagar, A.Tiruoathi, "A single-phase simplified DC-AC converter using DClink capacitors and an H-bridge, " Bullettion of Electrical Engineering and Informatics, vol.10, no.6, pp. 2964-2971, Dec.2021, doi:10.11591/eei.v10i6.2788.

[6] Y.A.Elthokaby, I. Abdelsalam, N. Abdel-Rahim, I. M. Abdealqawee "Model-predictive control based on Harris Hawks optimization for split-source inverter. " Bullettion of Electrical Engineering and Informatics, vol. 11, no. 4, pp. 2348~2358, Aug 2022, doi: 10.11591/eei.v11i4.3823.

[7] O. Ellabban and H. Abu-Rub, "Z-Source Inverter: Topology Improvements Review," in IEEE Industrial Electronics Magazine, vol. 10, no. 1, pp. 6-24, March 2016, doi: 10.1109/MIE.2015.2475475.

[8] A. Nahavandi, M. Roostaee and M. R. Azizi, "Single stage DC-AC boost converter," 2016 7th Power Electronics and Drive Systems Technologies Conference (PEDSTC), Tehran, Iran, 2016, pp. 362-366, doi: 10.1109/PEDSTC.2016.7556888.

[9] A. Abdelhakim, P. Mattavelli, P. Davari and F. Blaabjerg, "Performance Evaluation of the Single-Phase Split-Source Inverter Using an Alternative DC–AC Configuration," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 65, no. 1, pp. 363-373, Jan. 2018, doi: 10.1109/TIE.2017.2714122.

[10] S. S. Lee and Y. E. Heng, "Improved Single-Phase Split-Source Inverter With Hybrid Quasi-Sinusoidal and Constant PWM," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 64, no. 3, pp. 2024-2031, March 2017, doi: 10.1109/TIE.2016.2624724.

[11] S. S. Lee, A. S. T. Tan, D. Ishak, and R. Mohd-Mokhtar, "Single-Phase Simplified Split-Source Inverter (S3 I) for Boost DC–AC Power Conversion," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 66, no. 10, pp. 7643-7652, Oct. 2019, doi: 10.1109/TIE.2018.2886801.

[12] C. Yin, W. Ding, L. Ming and P. C. Loh, "Single-Stage Active Split-Source Inverter With High DC-Link Voltage Utilization," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 36, no. 6, pp. 6699-6711, June 2021, doi: 10.1109/TPEL.2020.3038688.

[13] H. Ribeiro, A. Pinto and B. Borges, "Single-stage DC-AC converter for photovoltaic systems," 2010 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, Atlanta, GA, USA, 2010, pp. 604-610, doi: 10.1109/ECCE.2010.5617957.

[14] N. Altin, S. Ozdemir, H. Komurcugil and I. Sefa, "Sliding-Mode Control in Natural Frame With Reduced Number of Sensors for Three-

Phase Grid-Tied LCL-Interfaced Inverters," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 66, no. 4, pp. 2903-2913, April 2019, doi: 10.1109/TIE.2018.2847675.

[15] N. Güler, "Proportional Resonant and Proportional Integral Based Control Strategy for Single Phase Split Source Inverters," 2020 9th International Conference on Renewable Energy Research and Application (ICRERA), Glasgow, UK, 2020, pp. 510-514, doi: 10.1109/ICRERA49962.2020.9242690.

[16] N. Güler, "Multi-objective cost function based finite control set-sliding mode control strategy for single-phase split source inverters," Control Engineering Practice, vol.122, 2022

[17] B. Wang et al., "Event-Triggered Model Predictive Control for Power Converters," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 68, no. 1, pp. 715-720, Jan. 2021, doi: 10.1109/TIE.2019.2962489.

[18] N. Güler And S. Biricik, "Fotovoltaik Sistemler için Üç Fazlı Evirici Tasarımı ve Kontrolü," Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi, vol.9, no.1, pp.453-466, 2021

[19] N. Guler, S. Biricik, S. Bayhan and H. Komurcugil, "Model Predictive Control of DC–DC SEPIC Converters With Autotuning Weighting Factor," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 68, no. 10, pp. 9433-9443, Oct. 2021, doi: 10.1109/TIE.2020.3026301.

[20] N. Muhammad, W. Shireen ve A. Hussain. "Model-Free Predictive Control and Its Applications " Energies 2022, 15(14), no. 14: 5131.

[21] M. Aly, E. M. Ahmed and M. Shoyama, "An improved model predictive controller for highly reliable grid connected photovoltaic multilevel inverters," 2017 IEEE International Telecommunications Energy Conference (INTELEC), Broadbeach, QLD, Australia, 2017, pp. 450-455, doi: 10.1109/INTLEC.2017.8214177.

[22] X. Li et al., "Model-Predictive Control With Parameter Identification for Multi-Dual-Active-Bridge Converters Achieving Accurate Power Balancing," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 38, no. 9, pp. 10880-10894, Sept. 2023, doi: 10.1109/TPEL.2023.3290671.

[23] Zhang, Y., Liu, X., Li, B., Liu, J.: Robust predictive current control of PWM rectifier under unbalanced and distorted network. IET Power Electronics 14(4), 797–806 (2021),

[24] Yaramasu, M. Rivera, B. Wu and J. Rodriguez, "Model Predictive Current Control of Two-Level Four-Leg Inverters—Part I: Concept, Algorithm, and Simulation Analysis," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 28, no. 7, pp. 3459-3468, July 2013, doi: 10.1109/TPEL.2012.2227509.

[25] P. M. Kishore, A. Sabnaveesu and R. Bhimasingu, "High Gain Switched Inductor Split Source Inverter for Solar Energy Applications," 2020 IEEE 9th Power India International Conference (PIICON), Sonepat, India, 2020, pp. 1-6, doi: 10.1109/PIICON49524.2020.9113024.

[26] N. Guler and H. Komurcugil, "Energy Function Based Finite Control Set Predictive Control Strategy for Single-Phase Split Source Inverters," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 69, no. 6, pp. 5669-5679, June 2022, doi: 10.1109/TIE.2021.3090715.

[27] C. Yin, Z. Xin, L. Ming and P. C. Loh, "Two Degrees of Freedom Power Decoupling Method for Single-Phase Split-Source Inverter," 2019 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), Anaheim, CA, USA, 2019, pp. 290-296, doi: 10.1109/APEC.2019.8722288.

[28] F. Bagheri, H. Komurcugil, O. Kukrer, N. Guler and S. Bayhan, "Multi-Input Multi-Output-Based Sliding-Mode Controller for Single-Phase Quasi-Z-Source Inverters," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 67, no. 8, pp. 6439-6449, Aug. 2020, doi: 10.1109/TIE.2019.2938494.

[29] S. Shelar, D. Bankar ve S. Bakre, "IEEE 519 Güç Sistemi Harmonikleri Standardının revizyonlarının gözden geçirilmesi (1981 ila 2022)," 2024 21. Uluslararası Harmonikler ve Güç Kalitesi Konferansı (ICHQP), Chengdu, Çin, 2024, s. 415-420, doi: 10.1109/ICHQP61174.2024.10768696.

Gazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Dergisi
PART C: TASARIM VE TEKNOLOJİ

Gazi University
Journal of Science
PART C: DESIGN AND TECHNOLOGY

GU J Sci, Part C, 13(2): 732-745 (2025)

Yapısal Bazı Ahşap Türü Malzemede Koruma Amaçlı Yüzeysel Yakmanın (Karbonlaştırmanın) Ahşap Özelliklerine Etkisinin Deneysel Olarak İncelenmesi

Cengiz KÖROĞLU[1*] Mustafa ALTUNOK[2]

[1]*Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Ağaç İşleri Endüstri Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye*

[2]*KTO Karatay Üniversitesi Güzel Sanatlar Fakültesi Endüstriyel Tasarım Bölümü, Konya, Türkiye*

Makale Bilgisi

Research article
Received: 30/12/2025
Revision: 11/03/2025
Accepted: 22/03/2025

Anahtar Kelimeler

Ahşap koruma teknikleri, karbonlaştırma, yüzeysel yakma, higroskopi, fiziksel özellikler.

Article Info

Araştırma makalesi
Başvuru: 30/12/2025
Düzeltme: 11/03/2025
Kabul: 22/03/2025

Keywords

Wood preservation techniques carbonization surface burning hygroscopy physical properties

Grafik Özet (Graphical/Tabular Abstract)

Bu çalışmada, Yapısal Bazı Ahşap Türü Malzemede Koruma Amaçlı Yüzeysel Yakmanın (Karbonlaştırmanın) Ahşap Özelliklerine Etkisinin Deneysel Olarak İncelenmesi çalışılmıştır. / In this study, Experimental Investigation of the Effect of Surface Burning (Carbonization) on Wood Properties of Some Structural Wood Type Materials for Conservation Purposes was studied.



Şekil A: *Karbonlaştırma işlemi ve katen yağı uygulama süreç grafiği /* ***Figure A:*** *Process graph of carbonization process and application of catena oil*

Önemli noktalar (***Highlights***)

- *Beş ahşap türünün tüm yüzeylerine karbonlaştırma daha sonra keten yağı uygulama işlemi sürecidir. / It is the process of carbonizing and then applying linseed oil to all surfaces of five wood species.*
- *Karbonlaştırma işlemi uygulanmuş örneklere ait fiziksel özellik değişimlerinin belirlenmesi. / Determination of physical property changes of carbonization treated samples.*
- *Ahşap malzemenin higroskopikliğinin karbonlaştırma işlemi ile azaltılması. / Reduction of hygroscopicity of wood material by carbonization process.*

Amaç (Aim): *Bu çalışmada, beş ahşap türüne uygulanan karbonlaştırma işleminin, ahşap higroskopisinin işlemsiz örneklere göre azalıp azalmayacağının, boyutlarının kararlı hale gelip gelmeyeceğinin, karbonlaştırmadan sonra keten yağı uygulanmış örneklerin, sadece karbonlaştırma işlemi uygulanmış örneklere göre ahşap higroskopisine ve boyutsal değişimine ilave etkisinin belirlenmesi amaçlanmıştır. / In this study, it was aimed to determine whether the carbonization process applied to five wood species will reduce the hygroscopicity of wood compared to untreated samples, whether the dimensions will stabilize, and the additional effect of flax oil treated samples after carbonization on wood hygroscopicity and dimensional change compared to samples treated with carbonization only.*

Özgünlük (Originality): *Karbonlaştırma ve daha sonra keten yağı uygulama işlemi ile ahşabın higroskopisinin azaltılması ve nem alış-verişine bağlı diğer fiziksel değişimlere sebep olan interaktif etkiler karşısında ahşabı koruma. / Reducing the hygroscopicity of wood by carbonization and subsequent application of linseed oil, and protecting wood against interactive effects that cause other physical changes due to moisture exchange.*

Bulgular (Results): *Bu çalışmada, karbonlaştırma işlemi; kontrol örneklerine göre denge rutubetini %12 den %8 e, su emme oranını %4 den %2 ye indirmiştir. Karbonlaştırma sonrası keten yağı uygulama işlemi ise; karbonlaştırılmış örneklere göre denge rutubetini %8 den %6 ya, su emme oranını %2 den %1,5 e düşürdüğü tespit edilmiştir. / In this study, carbonization reduced the equilibrium moisture content from 12% to 8% and the water absorption rate from 4% to 2% compared to the control samples. Flax oil application after carbonization decreased the equilibrium moisture content from 8% to 6% and water absorption rate from 2% to 1.5% compared to carbonized samples.*

Sonuç (Conclusion): *Hem karbonlaştırma ve hem de karbonlaştırma+keten yağı uygulaması ahşap higroskopisini azalttığı belirlenmiştir. Böylece, daha ekonomik, uzmanlık ve fazla ekipman gerektirmeyen ayrıca kimyasal koruyucuların çevreye verdiği zararlar göz önüne alındığında, ahşabın bu yöntem ile de korunabileceğinin mümkün olduğu sonucuna varılmıştır. / Both carbonization and carbonization + linseed oil application were found to reduce wood hygroscopy. Thus, it was concluded that it is possible to protect wood with this method, which is more economical, does not require expertise and much equipment, and considering the environmental damage caused by chemical preservatives.*

*Corresponding author, e-mail: 23833801013@gazi.edu.tr
DOI: 10.29109/gujsc.1609989

GU J Sci, Part C, 13(2): 732-745 (2025)

Gazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Dergisi
PART C: TASARIM VE TEKNOLOJİ

Gazi University
Journal of Science
PART C: DESIGN AND TECHNOLOGY

http://dergipark.gov.tr/gujsc

Yapısal Bazı Ahşap Türü Malzemede Koruma Amaçlı Yüzeysel Yakmanın (Karbonlaştırmanın) Ahşap Özelliklerine Etkisinin Deneysel Olarak İncelenmesi

Cengiz KÖROĞLU[1] Mustafa ALTUNOK[2]

[1]*Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Ağaç İşleri Endüstri Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye*

[2]*KTO Karatay Üniversitesi Güzel Sanatlar Fakültesi Endüstriyel Tasarım Bölümü, Konya, Türkiye*

Makale Bilgisi

Research article
Received: 30/12/2025
Revision: 11/03/2025
Accepted: 22/03/2025

Anahtar Kelimeler

Ahşap koruma teknikleri, karbonlaştırma, yüzeysel yakma, higroskopi, fiziksel özellikler.

Öz

Bu çalışmada, sapsız meşe (*Quercus petrea L*), ladin (Picea) toros sediri (*Cedrus libani*), Sarıçam (*Pinus sylvestris*), karaçam (*Pinus nigra*), ağaç türlerinden elde edilen örneklere ‘‘yüzeysel karbonlaştırma’’ ve ‘‘yüzeysel karbonlaştırma+keten yağı’’ uygulama işlemi yapılmış ve bunlara, ilgili standartlara göre bazı fiziksel testler uygulanmıştır. Sonuçta beş ahşap türünde sadece karbonlaştırma işlemi ortalama olarak yoğunluğu %5,7 rutubet dengesini %32,75 su emme miktarını %32,93 ve boyutsal değişimi (çalışma) oranını %13,91 azalttığı tespit edilmiştir. Karbonlaştırma işleminin üzerine ilaveten, keten yağı uygulamasının ise karbonlaştırılmış örneklere göre koruyuculuk özelliğini daha da artırmış; yoğunluğu %9,83 oranında yükseltmiş, rutubet dengesini %49,65 su emme oranını %66,53 boyutsal değişimi (çalışma) oranını %35,78 daha da azaltarak kararlı hale geldiği belirlenmiştir. Bu çalışmadaki bulgular esas alındığında, karbonlaştırma tekniğinin endüstriyel alanda kullanılacak doğal ahşabın fiziksel ve mekanik özelliklerini higroskopik şartlar karşısında yeterince koruması nedeni ile etkili bir ahşap koruma tekniği olarak uygulanabileceği önerilebilir.

Experimental Investigation of the Effect of Superficial Burning (Carbonization) on Wood Properties for Preservation Purposes in Some Structural Wood Type Materials

Article Info

Araştırma makalesi
Başvuru: 30/12/2025
Düzeltme: 11/03/2025
Kabul: 22/03/2025

Keywords

Wood preservation techniques, carbonization, surface burning, hygroscopy, physical properties.

Abstract

In this study, “surface carbonization” and “surface carbonization + linseed oil” were applied to samples obtained from sessile oak (Quercus petrea L), spruce (Picea), taurus cedar (Cedrus libani), yellow pine (Pinus sylvestris), larch (Pinus nigra) wood species and some physical tests were applied to them according to the relevant standards. As a result, it was found that carbonization alone reduced the density by 5.7%, moisture balance by 32.75%, water absorption by 32.93% and dimensional change (working) by 13.91% on average in five wood species. The application of flax oil in addition to carbonization further enhanced the protective properties compared to carbonized samples; it increased density by 9.83%, increased moisture balance by 49.65%, reduced water absorption by 66.53%, further reduced dimensional change (run) by 35.78% and stabilized it. Based on the findings of this study, it can be suggested that carbonization technique can be applied as an effective wood preservation technique since it sufficiently protects the physical and mechanical properties of natural wood to be used in the industrial field against hygroscopic conditions.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Ahşap malzemenin insanlık tarihinin başlangıcından beri kadim bir yapı malzemesi olarak kullanıldığı bilinmektedir. Sürdürülebilir, doğal ve organik bir malzeme olan ahşabın bu kullanım sürecinde higroskopik bir özelliğe sahip olduğu çok erken dönemde anlaşılmış ve kullanıldığı yerlerde bir koruyucu tedbir alınması gerekliliği de bir o kadar erken belirlenmiştir. Ahşap

*Corresponding author, e-mail: 23833801013@gazi.edu.tr
DOI: 10.29109/gujsc.1609989

malzemenin higroskopiklik nedeni ile bulunduğu çevrenin iklim koşullarına uyum sağlamaya çalışması ile; havanın nemini alarak boyutlarında değişim meydana gelmesi (şişme), geometrik şeklinin deformasyona uğraması (çarpılma-oluklanma-eğilme vb) , nem alma ve kuruma döngü sürecinde iç ve dış çatlakların meydana gelmesi gibi olguların ortaya çıktığı tespit edilmiştir. Bu noktadan hareket ile ahşap malzemeden üretilen tüm sistemlerin ve objelerin imalattan sonra mutlaka bir koruyucu ile korunması gerekliliği hipotezi önem kazanmıştır.

Tarihin ilk çağlarından bu yana ahşap malzemede uygulanan koruyucu işlemler; eritilmiş mum ile kaplama, kızgın bitkisel yağ sürme, katman yapıcı örtücü boyalar ile boyama, katman yapıcı ama örtücü olmayan şeffaf cila-boya-vernikler gibi kimyasallar ile üst yüzey işlemi uygulama olduğu bilinmektedir. Yakın dönemde de emprenye ve ısıl işlem uygulaması gibi teknikler öne çıkmaktadır. Tüm bu koruyucu uygulama tekniklerinde kullanılan malzeme ve cihazların önemli bir kısmının yüksek maliyetli, uzun uygulama zamanı gerekliliği, kimyasalların çevreye verdikleri zarar, ısıl işlemin pahalı ve karmaşık özel cihazlara ihtiyaç duyulmaktadır. Bu nedenle, bunların tümünden daha ucuz, uygulaması daha kısa süreli ve çevreye çok az zararlı madde atığı kattığı düşünülen yüzeysel yakma (karbonlaştırma) ahşap koruma tekniğini öne çıkartıp üzerinde deneysel ve bilimsel inceleme yapma kurgulanmıştır.

Son zamanlarda akademik çevreler tarafından ahşabı koruma amaçlı araştırmalarda daha çok ısıl işlem uygulamalarının yapıldığı görülmektedir. Bunların arasında koruyucu amaçlı yüzeysel yakmaya (karbonlaştırmaya) yönelik bilimsel çalışma bulunmamaktadır. Ancak, geleneksel ahşap uygulama teknikleri ile ilgili literatür araştırmasında eski bir uzak doğu ve Japon tekniği olarak ortaya çıkmaktadır.

Bazı akademik çalışmalarda ise sadece ‘‘Standart Yangına Maruz Farklı Kesitlerdeki Ahşap Kolonların yangın Dayanımının Deneysel Ve Teorik-Nümerik Saptanması, Kompozit Ahşap Kuleler, 80 Katlı Ahşap Gökdelen Projesi, Ahşap Yapılarda Koruma ve Onarım, Gerçek Yangın Etkisi Altında Ahşap Kolonların Dizaynı’’ gibi çalışmaların yapıldığı görülmektedir. Akademik olarak yapılmış ahşap koruma ile doğrudan ilgili olmayan yukarıdaki münferit çalışmalar ve alandaki eksiklik dikkate alınarak, bu araştırmada ahşabın karbonlaştırma tekniği ile deneylere dayalı bilimsel olarak iklim koşulları karşısında korunup korunamayacağı, ahşabın higroskopik özelliğinin yeteri kadar azaltılıp azaltılamayacağının belirlenmesi amaçlanmıştır.

Yapılan literatür çalışmaları sırasında ahşap ile yanmanın ilişkileri, yanma sürecinin bileşenleri, yapıda kullanılan ahşabın yanma sırasında kısa sürede çökmeden dayanabildiği gibi bilgilere ulaşılmıştır. Bu çalışmaların bir kısma aşağıda verilmiş olup, koruyucu maksatlı yüzeysel yakmaya (karbonlaştırmaya) rastlanılmadığı görülmektedir.

Özüm, 2008 çalışmasında, artı kesitli ahşap kolon kesitinde oluşan kömürleşmenin (karbonlaşmanın) homojen olmadığını yani kesitteki daralmanın tüm yüzeylerde eşit biçimde olmadığını bildirmiştir [1].

Haksever ve Savaş (2005b) araştırmalarında, yangına maruz kalan ahşap yapı elemanlarının deformasyonu ile ahşabın kömürleşmesini belirleyerek bir analitik model geliştirmek için araştırma yapmışlardır [2].

Kılıç, 2010 araştırmasında ahşabın yandığı zaman üst yüzeyinde odun kömürü kabuğu oluştuğunu, bu kabuğun ısı iletim katsayısının çok küçük olduğunu alt kısımdaki bölümlerin buharlaşmasını ve kömürleşmesini engellediğini, fakat yüksek ısılarda kömür kabuğunun da koruma görevini yapamayacağı ve kendisinin de yanacağı bildirilmiştir. Genellikle ahşap kirişlerin ve diğer ahşap yapı malzemelerinin dayanım süresinin 20-30 dakika olduğunu, yanma süresi 20 dakikayı geçince çökmelerin başlayacağını ahşabın diğer bir avantajının da, yandığı zaman sesli mesaj verdiği, iyi yetişmiş bir itfaiyecinin bu sesli mesajdan ahşabın ne zaman çökeceğini anlayabileceği bildirilmiştir[3].

Gün ve Anıktar, 2020 yaptıkları çalışmada; Türkiye’de geleneksel yöntemlerle inşa edilen ahşap yapıların herhangi bir olumsuz çevresel etkisinin olmadığı ifade edilmiştir [4].

Düzenli, 2017 araştırmasında ABD’de yapılaşmada kullanılan malzeme oranında ahşabın %90 seviyelerinde olduğunu bildirmektedir [5].

Flanagan, 2017 tarafından yapılan çalışmada, beton ve çelik yerine ahşap seçilmesi halinde karbon ayak izinin önemli ölçüde azalacağı, 1 m^3 ahşabın yaklaşık 1 ton CO_2 içerdiği, beton ve çelik yerine ahşap kullanılarak CO_2 ayak izinin daha iyileştirilebileceği bildirilmiştir [6].

URL 1’de yer alan metinde, kapalı bir mekânda yangın çıktıktan kısa bir süre sonra sıcaklığın birkaç yüz dereceye ulaştığını, metalin çok iyi bir ısı iletkeni olduğunu yangın sırasında sıcaklığın 500-600 derecelere çıktığında, bütün mekanik dayanım özelliklerini kaybederek çökeceği bildirmiştir. Ancak ahşabın iyi bir ısı iletkeni olmadığını bu nedenle mekanik özelliklerini kaybetmediğini ve yangın esnasında metallere göre daha uzun süre çökmeden dayanabileceği ifade edilmektedir [7].

URL 2’de yer alan metinde ise “Yakisugi” olarak

bilinen "Shou Sugi Ban", Japonya'da yıllardır kullanılan dekoratif bir odun yakma tekniği olduğunu ayrıca geleneksel ahşap koruma yöntemi olarak yakisugi, görünüşüyle estetik bir algı oluşturduğu, bu teknik dokusal bir yüzey oluşturmak için ahşabın kömürleştirilmesinin hedeflendiği bildirilmiştir [8].

Özkan, E., Arpacı, Ş. S., Dizman Tomak, E., Yıldırım, N. 2020. çalışmalarında; genel emprenye maddesi olarak değerlendirilebilecek atık yağ, odunun fiziksel özelliklerini iyileştirebildiği, çevre kirliliği açısından önemli bir sorun olarak görülen atık yağların emprenye endüstrisinde kullanılabilirliği bildirilmiştir [11]. Kasap Okut G. ve Altınok M., çalışmalarında; genel olarak modifikasyon işleminin Retensiyon olayından dolayı modifikasyon çözeltisi katı maddesi tutunma miktarı kadar yoğunluğu artırdığı tespit edilmiştir [12].

Koski A (2008) çalışmasında, yağ ile emprenye edilmiş ahşapta su geçirgenliğinin ve su emme özelliğinin azaldığı bildirilmiştir [13].

2. MATERYAL ve YÖNTEMLER (MATERIALS AND METHODS)

2.1 Materyal (Material)

2.1.1 Ahşap (wood)

Bu çalışmada ağaç işleri endüstrisinde yaygın olarak kullanılan ve yerli üretim olan birinci sınıf Sapsız meşe (*Quercus petrea L*), Ladin (*Pisea*), Toros Sediri (*Cedrus libani*), Sarıçam (*Pinus sylvestris*), Karaçam (*Pinus nigra*) keresteleri rasgele yöntemle Ankara Keresteciler Sitesinden temin edilmiştir.

2.1.2 Keten Yağı (Linseed oil)

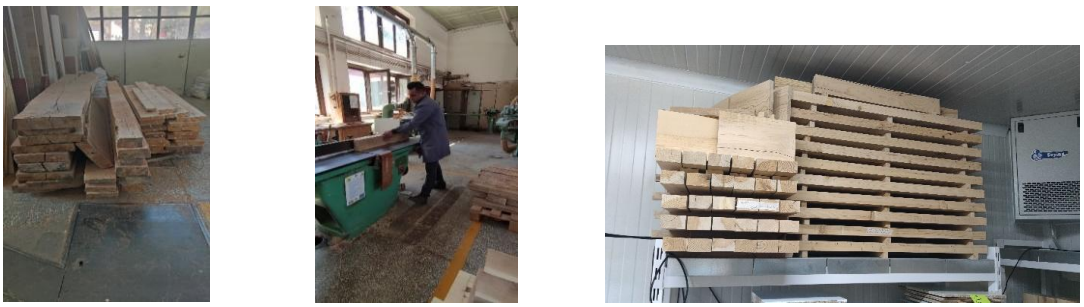
Keten tohumu yağı, keten bitkisinin olgunlaşmış tohumlarından elde edilir. Keten tohumu yağı veya keten yağı olarak da bilinir. Yüzlerce yıldır dış ve iç mekân ahşaplarını korumak için kullanılmıştır. Toksik olmayan ve çevre dostu özellikleri nedeniyle son zamanlarda tekrar popüler hale geldi. Uygulandıktan sonra ahşabın derinliklerine nüfuz eder ve doğal deseni güzel bir şekilde ortaya çıkarır. Ayrıca keten tohumu yağının temel özellikleri; çevre dostu bir üründür, Uygulandığı malzemenin yüzeyine derinlemesine nüfuz eder, aşınmaya ve suya dayanıklı olma eğilimi gösterir, yüzeye satenimsi bir bitiş sağlar, altın-kehribar rengindedir, ahşabın desenlerini şeffaf bir şekilde gösterir. Kolayca kullanabilir ve bakımı yapılabilir. Uygulandıktan sonra birkaç gün içinde doğal olarak buharlaşan kendine özgü bir koku bırakır [9].



Fotoğraf 1. Deney örneklerinde kullanılan keten yağı (Flax oil used in the experimental samples)

2.2 Deney Örneklerinin Hazırlanması (Preparation of test samples)

Piyasadan rasgele yöntemle temin edilen taslak ölçülerdeki beş ayrı türdeki ahşap latalar $20^0 \pm 2^0$C sıcaklık ve %65±%5 koşullardaki iklimlendirme odasında ağırlığı değişmez hale gelinceye kadar bekletilmiştir (kondisyonlanmıştır). Bu işlem sonunda ahşap lataların denge rutubetinin ortalama %11,8 olduğu belirlenmiştir. Daha sonra kondisyonlanmış latalardan standartların ön gördüğü ölçü ve sayıda test ve ölçüm örnekleri Tablo 1'de verildiği gibi hazırlanmıştır.



Fotoğraf 2. Deney örneklerinin hazırlanması ve iklimlendirilmesi(kondisyonlanması) (Preparation and conditioning of test samples)

Tablo 1. Karbonlaştırma ve karbonlaştırma+keten yağı uygulanacak ahşap kullanım şekli ve araştırma test/ölçüm deseni (Use of wood to be treated with carbonization and carbonization+linseed oil and research test/measurement design)

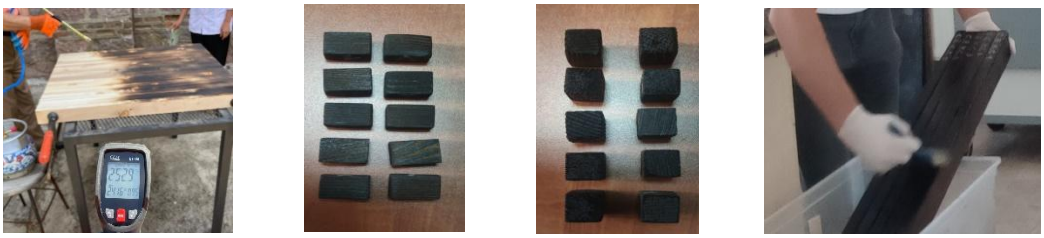
Ahşap örneklerin özellik, ölçü ve sayıları				**Örneklere uygulanan işlem**		
Ahşap türü	**Test / ölçüm**	**Boyutlar (mm)**	**Toplam örnek**	**Kontrol**	**Yüzeysel yakma** (Karbonlaştırma)	**Yüzeysel yakma + keten yağı**
Sedir Sarıçam Meşe Ladin Karaçam	Yoğunluk	20x20x30	30	10	10	10
	Rutubet	20x20x30	30	10	10	10
	Su emme	20x20x30	30	10	10	10
	Boyutsal kararlılık	20x20x30	30	10	10	10
	Ağırlık kaybı	20x20x30	30	10	10	10
	Toplam		**150**	**50**	**50**	**50**
Not: Yukarıda verilen örnek sayısı sadece bir ahşap türü için geçerli olup, 5 ahşap türü için aynı sayıda örnek hazırlanmıştır (150 x 5 = 750 adet).						

2.3 YÖNTEMLER (METHODS)

2.3.1 Yüzeysel yakma (Karbonlaştırma) Yöntemi (Superficial burning (Carbonization) Method)

Tablo 1'de verilen ölçü ve sayıdaki örneklere iki aşamada karbonlaştırma işlemi uygulanmıştır.

Birinci aşama; Hazırlanan deney örnekleri, metal bir tezgâh üzerine birbirlerine bitişik nizamda dizilerek pürmüz yardımı ile 15-20 cm mesafeden yakılarak yüzeye paralel yatay hareketlerle 10 dak/m² hesabı ile eşit ve homojen şekilde yüzeyin tamamen karbonlaştırma işlemi uygulanmıştır (Fotoğraf 3). Karbonlaştırma süreci içerisinde lazer sıcaklık ölçer ile yüzeysel yakma anındaki ahşap yüzeye
yayılan alev sıcaklığı uzaktan 250-300°C aralığında olduğu ölçülmüştür. Bir yüzeydeki yüzeysel yakma (karbonlaştırma) işlemi tamamlandıktan sonra aynı işlem örnek yüzeylerinin tamamı için tekrarlanmıştır.



Fotoğraf 3. Deney örneklerinin karbonlaştırma ve keten yağı uygulama düzeneği (Carbonization and linseed oil application setup of test samples)

İkinci aşama; Karbonlaştırma işleminden sonra soğutulmuş örnek yüzeyleri tel fırça yardımı ile hafif basınç altında liflere paralel yönde fırçalama uygulanarak kömürleşmiş tabaka temizlenmiş ve üstüpü ile tozu alınmıştır. Bu işlem tüm deney örneklerinde uygulanmıştır. Karbonlaştırma işleminden sonra deney örnekleri kodlanmıştır.

2.3.2. Keten yağı uygulaması (linseed oil application)

Karbonlaştırma ve temizleme işlemi tamamlanmış olan her bir ahşap türünde Tablo 1'de verilen sayıdaki örneklere fırça yardımı ile önce liflere paralel sonra dik ve en son tekrar liflere paralel keten yağı her bir kat uygulamada metre kareye 200gr esasına göre tüm yüzeylere sürülmüş, örnekler 2 saat süre ile kurutulmuştur. Daha sonra 2. kat yağ sürme işlemleri, 1. Katta uygulanan yöntemlerin tekrarı yapılmıştır. Bu işlem tüm örnekler ve tüm yüzeyler için tekrarlanmıştır.

2.3.3. Deneysel Yöntemler (Experimental Methods)

Bu çalışmada irdelenen beş ahşap türünün Tablo 2'de verilen fiziksel özellikleri karşılarında yer alan standartlara göre belirlenmiştir.

Tablo 2. Beş ahşap türünün irdelenen özellikleri (Examined properties of five wood species)

Fiziksel Özellikler	
Yoğunluk Tayini	TS ISO 13061
Rutubet Tayini	TS ISO 13061-1
Su Emme Miktarı	TS EN 4084
Boyutsal Değişim	TS EN 4084
Ağırlık Kaybı	-
Retensiyon Miktarı	-

2.3.3.1 Yoğunluk Tayini (Density Determination)
Hava kurusu yoğunluk tayininde, TS ISO 13061 esaslarına göre 20x20x30 mm boyutlarındaki örnekler kullanılmıştır. Örneklerin hava kurusu yoğunlukları TS ISO 13061'e uyularak belirlenmiştir. Buna göre; deney örnekleri 20°C±2°C sıcaklık ve %65±%5 bağıl nem şartlarında bekletilerek değişmez ağırlığa ulaştıktan sonra, 0,01g duyarlıklı analitik terazide tartılmıştır. Boyutları ise; ±0,01mm duyarlıklı kumpas ile ölçülerek hacimleri belirlendikten sonra hava kurusu haldeki ağırlık (M_{12}) ve hacim (V_{12}) değerine göre hava kurusu yoğunluk (δ_{12});

$\delta_{12} = M_{12} / V_{12}$ g/cm^3, eşitliğinden hesaplanmıştır. Burada;
M12 = Örnek ağırlığı (g)
V12 = Örnek hacmi (cm^3)

2.3.3.2 Rutubet Tayini (Moisture Determination)
Rutubet miktarının belirlenmesi sürecinde TS ISO 13061-1 standardında belirtilen esaslar dikkate alınarak, iklimlendirilmiş beş ahşap türünden 20x20x30 mm ölçülerinde beş ahşap türünde numuneler hazırlanmıştır. Kontrol ve yüzeyleri karbonlaştırılmış numuneler 0,01g hassasiyetle tartılarak ilk ağırlıkları belirlenmiştir (M_R). Tartıldıktan sonra etüve konularak sıcaklığı 103ºC±2ºC'ye çıkarılarak örnekler değişmez ağırlığa gelinceye kadar bekletilerek tam kuru hale getirilmiştir. Etüvden çıkartılan örnekler içerisinde P_2O_5 olan desikatöre alınarak soğumaları sağlanmıştır. Bu durumda ±0,01g duyarlı analitik terazide tekrar tartılarak son ağırlık (M_0) belirlenmiş ve değerler aşağıdaki denklemde yerlerine konularak rutubet oranı hesaplanmıştır.

$r = \left[\frac{MR - M0}{M0}\right] x100$, eşitliğine göre hesaplanmıştır. Burada;

r: Rutubet miktarı (%)
MR: Rutubeti "r" olan (ilk) odunun ağırlığı (g)
M0: Numunenin tam kuru (son) ağırlığı (g)

2.3.3.3 Su Emme Miktarı (Water Absorption Amount)
TS EN 4084 esasları doğrultusunda iklimlendirilmiş beş ahşap türünden deney örnekleri 20x20x30 mm ölçülerinde hazırlanmıştır. Her bir deney örneğinin ağırlıkları ±0,01 duyarlıklı analitik terazide tartılarak belirlenmiştir. Deney numuneleri 20ºC±2ºC sıcaklıkta su içerisine yüzeyden 25 mm içeride olacak biçimde batırılmıştır. 72 saat süre ile suda bekletilmiş ve daha sonra örneklerin üstübü ile fazla suyu kurulanmıştır. Kurulama işleminden sonra örnekler inin ±0,01 hassasiyetli analitik terazide tartılmıştır. Belirlenen veriler kullanılarak su emme oranı aşağıdaki eşitlik ile hesaplanmıştır.

$SE = \left[\frac{M2-M1}{M1} x\ 100\right]$, eşitliğine göre hesaplanmıştır. Burada;
SE: Su emme oranı (%)
M1: Suda bekletme öncesi ağırlık (g)
M2: Suda bekletme sonrası ağırlık (g)

2.3.3.4 Boyutsal Değişim Belirleme (Dimensional Change Identification)
Boyutsal değişim belirleme TS EN 4084 standardında belirtilen esaslar dikkate alınarak, iklimlendirilmiş beş ahşap türünden 20x20x30 mm ölçülerinde örnekler hazırlanmıştır. Hazırlanan bu örnekler 0,01 hassasiyetli analitik terazide tartıldıktan sonra 0,01 hassasiyetli dijital kumpas ile boyutları ölçülmüştür. Daha sonra 103ºC±2ºC'ye sahip etüvde örneklerin ağırlıkları değişmez hale gelinceye kadar bekletilmiştir. Etüvden çıkartılan örnekler, içerisinde P_2O_5 olan desikatöre alınarak soğumaları sağlanmıştır. Bu durumda ±0,01g duyarlı analitik terazide tekrar tartılarak ağırlıkları ve 0,01 hassasiyetli kumpas ile boyutları belirlenmiştir. Tam kuru halde ölçümleri yapılan örnekler 20ºC±2ºC sıcaklıkta su içerisine yüzeyden 25 mm içeride olacak şekilde daldırılmış, değişmez ağırlığa gelinceye kadar su içerisinde bekletilmiştir. Örnekler tam doygun hale geldikten sonra su kabından çıkartılmış, üstübü ile fazla suyu kurulanmıştır. Kurulama işlemi sonunda deney örneklerinin boyutları 0,01 hassasiyetli dijital kumpas ile ağırlıkları 0,01 hassasiyetli analitik terazide tekrar belirlenmiştir. Yapılan ölçümler sonrasında elde edilen veriler aşağıdaki denklemde yerlerine konularak boyutsal değişim miktarı hesaplanmıştır.

$\alpha = \frac{Lmax - Lmin}{Lmax} x100$, eşitliğine göre hesaplanmıştır. Burada;
α = Radyal ve Teğet yönde boyutsal artış yüzdesi (%)
L_{max} = Tam yaş hal ölçüsü (mm) Burada
L_{min} = Tam kuru hal ölçüsü (mm)

2.3.3.5 Ağırlık Kaybı Belirleme (Weight Loss Determination)

Yüzeyleri karbonlaştırılmış ve karbonlaştırılmadan sonra keten yağı uygulanmış 20x20x30 mm ölçülerinde beş ahşap türünde numunelerin ağırlıkları ±0,01 duyarlıklı analitik terazide tartılmıştır. Ağırlık kaybı belirlemede hiçbir işlem uygulanmayan örnekler A düzeyi, sadece karbonlaştırılmış örnekler B düzeyi ve karbonlaştırıldıktan sonra keten yağı uygulanan örnekler C düzeyi olarak kodlanmıştır. Bu kodlamaya uygun olarak ağırlıkları belirlenen örneklerin değişim miktarı aşağıdaki denkleme göre hesaplanmıştır.

$a = A1 - A2$, eşitliğine göre hesaplanmıştır. Burada;

a : Ağırlık farkı (değişim miktarı)
A1: İklimlendirilmiş karbonlaştırma işlemi öncesi numune ağırlığı
A2: Karbonlaştırma işlemi sonrası numune ağırlığı

2.3.3.6 Retensiyon Oranı Tayini (Retention Rate Determination)

20x20x30 mm boyutlarında hazırlanan deney örneklerinin yüzeyleri karbonlaştırılmış, daha sonra 20^0C sıcaklık ve %65 nispi nem şartlarında iklimlendirilmiş örneklere fırça ile iki kat keten yağı sürüldükten sonraki ve önceki ağırlıklar 0,01 hassasiyetle tartılarak belirlenmiştir. Bu değerler aşağıdaki denklemde yerlerine konularak (keten yağı uygulanmış örneklerin ağırlığı sadece karbonlaştırılmış örneklerin ağırlığına oranlanarak) % miktar olarak belirlenmiştir.

$R = \left[\frac{T2 - T1}{T1} \right] x100$, eşitliği göre hesaplanmıştır. Burada;

T_1 = keten yağı uygulama öncesi örnek ağırlığı [g]
T_2 = keten yağı uygulama sonrası örnek ağırlığı [g]

2.3.4. İstatistiksel Analiz (Statistical Analysis)

Beş ahşap türünde, yüzeysel yakma (karbonlaştırma) ve keten yağı uygulama işleminin ahşap malzemelerde bazı fiziksel özellikler üzerindeki etkisini tespit etmek amacıyla $p \leq 0,05$ önem düzeyinde çoklu varyans analizi yapılmıştır. Ağaç türü, karbonlaştırma ve karbonlaştırma+keten yağı sürme işlem çeşidinin test edilmiş özellikler üzerindeki etkisi anlamlı bulunması halinde bunların homojenlik gruplarının belirlenmesi için Duncan testi uygulanmıştır.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA (FINDINGS AND DISCUSSION)

Beş ahşap türünden örneklere karbonlaştırma işlemi uygulanması sonunda elde edilen bazı fiziksel özellik sonuçları aşağıda verilmiştir.

3.1. Yoğunluk değişimi (Change of specific gravity)

Bu araştırmada yoğunluk değişimi yüzeysel yakma nedeniyle azalarak gerçekleşmiştir. Beş ahşap türünden örneklerin, karbonlaştırma işlemden sonraki yoğunluk değerlerine ilişkin ortalamalar, ahşap türü, karbonlaştırma ve keten yağı uygulama işlemi ikili etkileşimine ait ortalamalar ve bu ortalamalara ait homojenlik grupları Tablo 3' de verilmiştir. Bu ahşap türleri, karbonlaştırma, karbonlaştırma+keten yağı uygulama işlemi ve bunların ikili etkileşimine ait yoğunluk varyans analizi Tablo 4' de verilmiştir.

Tablo 3. Ahşap türü ve işlem bakımından yoğunluk (g/cm^3) karşılaştırmaları ve homojenlik grupları
(Density (g/cm3) comparisons and homogeneity groups by wood type and treatment)

Ahşap Türü	Ort.	HG.	İşlem	Ort.	HG
Meşe	0.85	A	**Karb.+Keten yağı**	0.59	A
Sarıçam	0.53	B	**Kontrol**	0.58	A
Sedir	0.51	BC	**Karbonlaştırma**	0.55	B
Karaçam	0.49	C			
Ladin	0.48	C	**LSD** = 0,02520 **α**= 0.050		
LSD = 0,03254 **α**= 0.050					

Ahşap x İşlem	Ort.	HG	Ahşap x İşlem	Ort.	HG
Meşe Kontrol	0.87	A	**Karaçam Karb.+Keten yağı**	0.51	CDEF
Meşe Karbonlaştırma	0.84	A	**Karaçam Kontrol**	0.50	DEFG
Meşe Karb.+Keten yağı	0.83	A	**Sedir Karb.+Keten yağı**	0.49	EFG
Sedir Kontrol	0.58	B	**Sedir Karbonlaştırma**	0.47	EFG
Sarıçam Karb.+Keten yağı	0.56	BC	**Karaçam Karbonlaştırma**	0.47	EFG
Ladin Karb.+Keten yağı	0.55	BCD	**Ladin Kontrol**	0.45	FG
Sarıçam Kontrol	0.52	CDE	**Ladin Karbonlaştırma**	0.45	G
Sarıçam Karbonlaştırma	0.51	CDE	**LSD** = 0,05636 **α**= 0.050		

Tablo 4. Yoğunluğa ilişkin varyans analizi (Analysis of variance for density)

Kaynaklar	SD	Kareler toplamı	Ortalama kareler	F-Değeri	p≤0,05
Ahşap Türü	4	1.435	0.359	197.6338	0.0000
İşlem	2	0.021	0.010	5.6680	0.0056
Ahşap x İşlem	8	0.056	0.007	3.8502	0.0010
Hata	60	0.109	0.002		
Toplam	74	1.620			

Tablo 3'de ahşap türü bakımından; en yüksek yoğunluk meşede, daha sonra sırasıyla sarıçam, sedir, karaçam, ladinde bulunmuştur. Yoğunluk bakımından meşenin yüksek olması diğer ağaç türlerine göre daha sık dokulu ve hücre çeperi maddesi fazla olmasından kaynaklandığı söylenebilir. İşlem bakımından; en yüksek karbonlaştırma+keten yağı uygulama, daha sonra sırasıyla kontrol ve karbonlaştırma işlemli örneklerde bulunmuştur. Karbonlaştırma işlemi deney örneklerinin yüzeyini yakması nedeniyle, yoğunluğu azalttığı, karbonlaştırılmış örneklere keten yağı uygulanması ile de yoğunlukların tekrar bir miktar arttığı, bu artış meşe hariç diğer ahşap türlerinde kontrol örneklerinin de üzerine çıktığı görülmektedir. Meşede geçitlerdeki tüllenme nedeni ile de keten yağının yeteri kadar bünyeye emprenye olamamasından kaynaklanmış olabilir. Bu sonuç; meşede tül teşekkülü ve keten yağının emilimini engelleme bakımından ORS, Y.; KESKIN, H. Ağaç malzeme kitabında yapısal özellikler bahsinde belirtilmiştir [10]. Ayrıca, emprenye maddelerinin yoğunluğu artırması bakımından önceki çalışmaların sonuçları ile örtüşmektedir [11, 12].

Aynı zamanda bu iki faktörün ikili etkileşiminde; en yüksek yoğunluk meşe-kontrol örneklerinde, daha sonra sırasıyla meşe karbonlaştırma ve meşe karbonlaştırma+keten yağı uygulanmış işlemli örneklerde bulunmuştur. Kontrol örneklerindeki yoğunluklara göre her bir ahşap türünün yoğunluğu karbonlaştırma işlemi görmüş örneklerde azaldığı ve keten yağı uygulama işleminden sonra yoğunluğun tekrar bir miktar arttığı tespit edilmiştir. Bunun nedeni, karbonlaştırma işlemi sırasında ahşap dokunun yanarak madde kaybına uğramasından ve keten yağı uygulandıktan sonra yağın ahşap dokuya nüfuz etmesi sonucu ağırlığın tekrar artmasından kaynaklandığı söylenebilir. Tablo 4'deki varyans analizinde ise, ahşap türü, işlem çeşidi ve bunların ikili etkileşimlerinin anlamlı olduğu görülmüştür. Yoğunluk değişimine en yüksek ahşap türü, daha sonra sırasıyla işlem ve ikili etkileşimin katkıda bulunduğu tespit edilmiştir.

3.2. Denge Rutubeti Değişimi (Equilibrium Moisture Change)

Rutubet değişimi kontrol örneklerine göre karbonlaştırma ve keten yağı uygulama işlemlerine bağlı olarak azalarak gerçekleşmiştir. Beş ahşap türünden örneklerin kontrol ve karbonlaştırma, karbonlaştırma+keten yağı uygulama işlemden sonraki rutubet değerlerine ilişkin sonuçların ortalamaları, ahşap türü ve karbonlaştırma, karbonlaştırma+keten yağı uygulama işlemi ikili etkileşimine ait ortalamalar ve bu ortalamalara ait homojenlik grupları Tablo 5' de verilmiştir.

Tablo.5. Ahşap türü ve işlem bakımından rutubet (%) karşılaştırmaları ve homojenlik grupları (Moisture (%) comparisons and homogeneity groups by wood type and treatment)

Ahşap Türü	Ort.	HG.	İşlem	Ort.	HG
Meşe	9.09	A	**Kontrol**	12.06	A
Sarıçam	9.02	AB	**Karbonlaştırma**	8.11	B
Sedir	8.71	BC	**Karb.+Keten yağı**	6.07	C
Ladin	8.48	C			
Karaçam	8.43	C	**LSD** = 0,2508 **α**= 0.050		
LSD = 0,3237 **α**= 0.050					

Ahşap x İşlem	Ort.	HG	Ahşap x İşlem	Ort.	HG
Meşe Kontrol	12.17	A	**Sedir Karbonlaştırma**	7.93	BC
Karaçam Kontrol	12.14	A	**Karaçam Karbonlaştırma**	7.63	C
Sarıçam Kontrol	12.08	A	**Meşe Karb.+keten yağı**	6.67	D
Sedir Kontrol	12.01	A	**Sarıçam Karb.+Keten yağı**	6.58	D
Ladin Kontrol	11.92	A	**Sedir Karb.+keten yağı**	6.19	D
Meşe Karbonlaştırma	8.44	B	**Karaçam Karb.+Keten yağı**	5.52	E
Sarıçam Karbonlaştırma	8.40	B	**Ladin Karb.+keten yağı**	5.39	E
Ladin Karbonlaştırma	8.15	BC	**LSD** = 0,5608 **α**= 0.050		

Bu ahşap türleri, karbonlaştırma, karbonlaştırma+keten yağı uygulama işlemi ve bunların ikili etkileşimine ait rutubet miktarı varyans analizi Tablo 6' da verilmiştir.

Tablo 6. Rutubete ilişkin varyans analizi (Analysis of variance related to moisture)

Kaynaklar	SD	Kareler toplamı	Ortalama kareler	F-Değeri	p≤0,05
Ahşap Türü	4	5.446	1.361	6.8718	0.0001
İşlem	2	463.498	231.749	1169.7166	0.0000
Ahşap x İşlem	8	4.008	0.501	2.5286	0.0193
Hata	60	11.887	0.198		
Toplam	74	484.839			

Tablo 5'de ahşap türü bakımından; en yüksek denge rutubeti meşede ve daha sonra sırasıyla sarıçam, sedir, ladin ve karaçamda bulunmuştur. Meşede rutubetin yüksek olmasının nedeni; tüllenme nedeniyle iklimlendirme sürecinde diğer türlere hemen uyum sağlayamamasından kaynaklanmış olabilir. İşlem bakımından; en yüksek kontrol, daha sonra sırasıyla karbonlaştırma ve karbonlaştırma+keten yağı uygulama işleminde bulunmuştur. Kontrol örneklerindeki rutubete göre her bir ahşap türünün rutubeti karbonlaştırma işlemi görmüş örneklerde azaldığı ve karbonlaştırma + keten yağı işlemi uygulandığında rutubetin daha da azaldığı tespit edilmiştir. Bunun nedeni, karbonlaştırma işlemi sırasında ahşabın bünyesinde bulunan suyun buharlaşması ve karbonlaşma ile ahşabın higroskopik özelliğini zayıflamasından kaynaklandığı söylenebilir. Keten yağı uygulaması ile de örnek yüzeylerindeki yağsı tabakanın tekrar rutubet almayı engellediği görülmektedir. Bu sonuç; ORS, Y.; KESKIN, H. Ağaç malzeme kitabında emprenye bahsinde belirtilmiştir [10].

Tablo 6'daki varyans analizinde ise, ahşap türü, işlem çeşidi ve bunların ikili etkileşimlerinin anlamlı olduğu görülmüştür. Rutubet değişimine (azalmasına) en büyük işlem çeşidi, daha sonra sırasıyla ahşap türü ve ikili etkileşimin katkıda bulunduğu tespit edilmiştir.

3.3. Su emme miktarı değişimi (Change in water absorption amount)

Su emme miktarı değişimi; karbonlaşma işlemi ve keten yağı uygulamasına bağlı olarak azalarak gerçekleşmiştir. Beş ahşap türünden örneklerin kontrol ve karbonlaştırma, karbonlaştırma+keten yağı uygulama işlemden sonraki su emme değerlerine ilişkin sonuçların ortalamaları, ahşap türü ve karbonlaştırma, karbonlaştırma+keten yağı uygulama işlemi ikili etkileşimine ait ortalamalar ve bu ortalamalara ait homojenlik grupları Tablo 7' de verilmiştir.

Tablo.7. Ahşap türü ve işlem bakımından su emme miktarı karşılaştırmaları ve homojenlik grupları (Water absorption comparisons and homogeneity groups in terms of wood type and treatment)

Ahşap Türü	Ort.	HG	İşlem	Ort.	HG
Ladin	4.37	A	**Kontrol**	4.62	A
Sedir	2.99	B	**Karbonlaştırma**	3.15	B
Meşe	2.95	BC	**Karb.+Keten yağı**	1.52	C
Sarıçam	2.89	BC			
Karaçam	2.28	C	**LSD** = 0,5350 **α**= 0.050		
LSD = 0,6906 **α**= 0.050					

Ahşap x İşlem	Ort.	HG	Ahşap x İşlem	Ort.	HG
Ladin Kontrol	6.14	A	**Meşe Karb.**	2.51	DE
Ladin Karbonlaştırma	5.33	AB	**Karaçam Karb.**	2.29	DEF
Meşe Kontrol	4.76	B	**Sarıçam Karb.+Keten yağı**	1.68	EF
Sedir Kontrol	4.40	BC	**Ladin Karb.+keten yağı**	1.65	EF
Sarıçam Kontrol	4.40	BC	**Meşe Karb.+keten yağı**	1.60	EF
Karaçam Kontrol	3.39	CD	**Sedir Karb.+keten yağı**	1.51	EF
Sedir Karbonlaştırma	3.06	D	**Karaçam Karb.+Keten yağı**	1.16	F
Sarıçam Karbonlaştırma	2.58	DE	**LSD** = 1,196 **α**= 0.050		

Bu ahşap türleri, karbonlaştırma işlemi, karbonlaştırma+keten yağı uygulama işlemi ve bunların ikili etkileşimine ait su emme miktarları varyans analizi Tablo 8' de verilmiştir.

Tablo 8. Su emme miktarlarına ilişkin varyans analizi (Analysis of variance for water absorption)

Kaynaklar	SD	Kareler toplamı	Ortalama kareler	F-Değeri	p≤0,05
Ahşap Türü	4	35.530	8.883	9.8634	0.0000
İşlem	2	120.246	60.123	66.7619	0.0000
Ahşap x İşlem	8	16.192	2.024	2.2475	0.0359
Hata	60	54.034	0.901		
Toplam	74	226.002			

Tablo 7'de ahşap türü bakımından; en yüksek su emme oranı Ladinde ve daha sonra sırasıyla Sedir, Meşe, Sarıçam, Karaçam'da görülmüştür. Su emme oranının ladinde en yüksek çıkması yoğunluğun diğer ahşap türlerinden düşük olması ve iç boşluğunun diğerlerinden fazla olmasından kaynaklanmış olabilir. İşlem bakımından; en yüksek kontrol örneklerinde, daha sonra sırasıyla karbonlaştırma ve karbonlaştırma+keten yağı uygulama işleminde bulunmuştur. Aynı zamanda bu iki faktörün ikili etkileşiminde en yüksek su emme oranı Ladin-kontrol daha sonra Ladin karbonlaştırma örneklerinde bulunmuştur. Kontrol örneklerindeki su emme miktarına göre Ladin karbonlaştırma işlemli örnekler hariç diğer ahşap türlerinin su emme özelliği karbonlaştırma işlemi görmüş örneklerde azaldığı ve karbonlaştırma+keten yağı işlemi uygulanmış örneklerde su emme özelliğinin daha da azaldığı tespit edilmiştir. Bunun nedeni, karbonlaştırma işleminin ahşabın higroskopik özelliğini azaltmasından ve karbonlaştırma işleminden sonra keten yağı uygulamasında yüzeyde bir yağsı tabaka oluşmasından ahşabın su molekülleri ile bağ kuramamasından kaynaklanmış olabilir. Bu sonuç; ORS, Y.; KESKIN, H. Ağaç malzeme kitabı rutubet bahsinde belirtilmiştir [10].

Tablo 8'daki varyans analizinde ise, ahşap türü, işlem çeşidi ve bunların ikili etkileşimlerinin anlamlı olduğu görülmüştür. Su emme değişimine (azalmasına) en büyük oranda işlem çeşidinin, daha sonra sırasıyla ahşap türü ve ikili etkileşimin katkıda bulunduğu tespit edilmiştir.

3.4. Ağırlık değişimi (Weight change)

Ağırlık değişimi; karbonlaşma işlemi ve keten yağı uygulamasına bağlı olarak azalarak gerçekleşmiştir. Beş ahşap türünden örneklerin kontrol ve karbonlaştırma, karbonlaştırma+keten yağı uygulama işleminden sonraki ağırlık değişimine ilişkin sonuçların ortalamaları, ahşap ve karbonlaştırma, karbonlaştırma+keten yağı uygulama işlemi ikili etkileşimine ait ortalamalar ve bu ortalamalara ait homojenlik grupları Tablo 9' da verilmiştir.

Tablo.9. Ahşap türü ve işlem bakımından ağırlık değişimi (g) değerleri karşılaştırmaları ve homojenlik grupları (Comparisons of weight change (g) values and homogeneity groups in terms of wood species and treatment)

Ahşap Türü	Ort.	HG.	İşlem	Ort.	HG
Meşe	9.97	A	**Kontrol**	7.12	A
Sarıçam	5.80	B	**Krb.+Keten yağı**	6.67	B
Karaçam	5.74	B	**Karbonlaştırma**	5.88	C
Sedir	5.67	B			
Ladin	5.60	B	**LSD** = 0,3497 **α**= 0.050		
LSD = 0,4514 **α**= 0.050					

Ahşap türlerine, karbonlaştırma işlemine, karbonlaştırma + keten yağı uygulama işlemine ait ağırlık değişimi varyans analizi Tablo 10' da verilmiştir.

Tablo 10. Ağırlık değişimi değerlerine ilişkin varyans analizi (Analysis of variance for weight change values)

Kaynaklar	SD	Kareler toplamı	Ortalama kareler	F-Değeri	p≤0,05
Ahşap Türü	4	218.539	54.635	141.7383	0.0000
İşlem	2	19.497	9.749	25.2905	0.0000
Ahşap x İşlem	8	2.193	0.274	0.7113	
Hata	60	23.128	0.385		
Toplam	74	263.357			

Tablo 9'da ahşap türü bakımında; en yüksek ağırlık değişim miktarı meşede, daha sonra sırasıyla Sarıçam, karaçam, sedir ve ladinde bulunmuştur. Meşede yüksek çıkmasının nedeni yoğunluğun diğerlerinden fazla olması, diğer ahşap türlerinin yoğunluklarının birbirlerinden farklı olmasına rağmen ağırlık değişimi aynı grupta yer almıştır. İşlem bakımından; en yüksek kontrol örneklerinde, daha sonra sırasıyla karbonlaştırma+keten yağı uygulama ve karbonlaştırma işlemde bulunmuştur. Karbonlaştırma işlemi ahşapta yüzeysel yakma nedeniyle ağırlığı azaltmıştır, bunun yanında keten yağı uygulaması örneklerde tekrar ağırlık artışına neden olmuştur. Bu sonuç; Kasap Okut G. ve Altınok M., çalışmalarının aynı ahşap türlerinin toprak altındaki çürümeden kaynaklanan sonuçları ile örtüşmektedir [12].

Tablo 10'daki ağırlık değişimi varyans analizinde, ahşap türü ve işlem çeşidi faktörleri anlamlı, ama bunların ikili etkileşimlerinin anlamlı olmadığı görülmüştür. Ağırlık değişimine (kaybına) en büyük ahşap türü, daha sonra işlem çeşidinin katkıda bulunduğu tespit edilmiştir.

3.5. Boyutsal değişim (Dimensional change)

Boyutsal değişimi; karbonlaşma işlemi ve keten yağı uygulamasına bağlı olarak, azalarak gerçekleşmiştir. Beş ahşap türünden örneklerin kontrol, karbonlaştırma ve karbonlaştırma+keten yağı uygulama işlemden sonraki boyutsal değişimlerine ilişkin sonuçların ortalamaları ve bu ortalamalara ait homojenlik grupları Tablo 11' de verilmiştir.

Tablo.11. Ahşap türü ve işlem bakımından boyutsal değişim (%) karşılaştırmaları ve homojenlik grupları (Dimensional change (%) comparisons and homogeneity groups by wood type and treatment)

Ahşap Türü	Ort.	HG.	İşlem	Ort.	HG
Ladin	6.98	A	**Kontrol**	7.18	A
Meşe	6.84	A	**Karbonlaştırma**	6.11	B
Sarıçam	6.77	A	**Karb.+Keten yağı**	4.65	C
Karaçam	6.25	B			
Sedir	4.06	C	**LSD** = 0,5144 **α**= 0.050		
LSD = 0,6640 **α**= 0.050					

Ahşap türlerinin, karbonlaştırma işleminin, karbonlaştırma+keten yağı uygulama işleminin boyutsal değişim oranları varyans analizi Tablo 11' da verilmiştir.

Tablo 12. Boyutsal değişime (kararlılık) ilişkin varyans analizi (Analysis of variance for dimensional change (stability))

Kaynaklar	SD	Kareler toplamı	Ortalama kareler	F- Değeri	p≤0,05
Ahşap Türü	4	98.881	24.720	29.6842	0.0000
İşlem	2	80.621	40.311	48.4052	0.0000
Ahşap x İşlem	8	7.304	0.913	1.0963	**0.3785**
Hata	60	49.966	0.833		
Toplam	74	236.772			

Tablo 11'de ahşap türü bakımında; en yüksek boyut değişimi oranı ladin, daha sonra sırasıyla meşe, sarıçam, karaçam ve sedirde bulunmuştur. Boyutsal değişim oranının ladinde en yüksek çıkması yoğunluğun diğer ahşap türlerinden düşük olması ve iç boşluğunun diğerlerinden fazla olmasından kaynaklanmış olabilir. İşlem bakımından; en yüksek kontrol örneklerinde, daha sonra sırasıyla karbonlaştırma ve karbonlaştırma+keten yağı uygulama işlemde bulunmuştur. Bunun nedeni, karbonlaştırma işlemi ahşabın higroskopik özelliğini azaltmasından, karbonlaştırma işlem görmüş örneklerin doğal hallerindeki kadar rutubet absorbe edememesinden ve bunun da boyutların değişim oranını azaltmasından kaynaklandığı söylenebilir. Bu sonuç; Koski A. (2008) çalışmasının yağ ile emprenye edilmiş ahşapta su emme oranının azalmasından kaynaklanan boyutsal değişim sonucu ile örtüşmektedir [13].

Tablo 12'deki boyut değişim varyans analizinde, ahşap türü ve işlem çeşidi faktörleri anlamlı, ama bunların ikili etkileşimlerinin anlamlı olmadığı görülmüştür. Boyutsal değişime (kararlılığa) en büyük işlem çeşidinin, daha sonra ahşap türünün katkıda bulunduğu tespit edilmiştir.

3.6. Retensiyon miktarının belirlenmesi (Determination of the amount of retention)

Karbonlaşma işleminden sonra keten yağı uygulamasına bağlı olarak, örneklerin ağırlıkları Retensiyon miktarı oranında artarak gerçekleşmiştir. Ahşap türlerindeki Retensiyon oranlarına ilişkin değerler Tablo 13' de verilmiştir.

Tablo 13. *Ahşap türlerine göre Retensiyon miktarları (%)(Retention amounts according to wood species (%))*

Ahşap türü	Retensiyon miktarı (%)
Meşe	2,39
Sarıçam	13,43
Karaçam	5,05
Sedir	9,61
Ladin	22,18

Deney örnek yüzeyleri yakıldıktan (karbonlaştırmadan) sonra keten yağı uygulaması yapılmış olup, her bir ahşap türünün yapısal özelliğine göre keten yağını absorbe etme veya keten yağının ahşap yüzeye nüfuz etme miktarı ağırlık bakımından "Retensiyon" oranı olarak belirlenmiştir. Bu durumda en yüksek Retensiyon oranı ladinde %22,18 olarak bulunmuş olup, ladinin hücre lümenlerinin geniş olmasından ve buna bağlı olarak daha çok keten yağı absorbe etmesinden kaynaklandığı söylenebilir. En düşük %2,39 oranında meşede belirlenmiştir. Bunun nedeni ise; meşenin lümen boşlukları dar hücre çeperleri kalın ve hücre geçitlerinde tüllenme olması ile daha az keten yağı tutunduğu tespit edilmiştir.

4. **SONUÇ VE ÖNERİLER** (CONCLUSIONS AND RECOMMENDATIONS)

Karbonlaştırma işlemi ve karbonlaştırma sonrası keten yağı uygulamasından sonraki örneklerin fiziksel özelliklerindeki değişimler incelendiğinde; tüm fiziksel özellik değerlerinin kendi kontrol örneklerinin değerlerine göre azalarak değiştiği görülmektedir (Tablo 14).

Tablo 14. Ahşap türlerinde karbonlaştırma ve karb.+keten yağı uygulama işlemine göre fiziksel özellik değişimleri (Physical property changes in wood species according to carbonization and carb.+linseed oil application process)

Fiziksel Özellikler	Ahşap	Kont-rol	Karbon-laştırma	Değişim - % (Karb./Kont.)	Karb.+Keten yağı	Değişim - % (Karb.+Ket./Kont.)
Yoğunluk	Meşe	0,87	0.84	-2.52	0.83	-3.90
	Sarıçam	0.52	0.51	-0.76	0.56	+7.69
	Karaçam	0.50	0.47	-5.57	0.51	+1.59
	Sedir	0.58	0.47	-17.86	0.49	-15.46
	Ladin	0.45	0.45	-1.74	0.55	+20.52
Rutubet	Meşe	12.16	8.44	-30.63	6.67	-45.11
	Sarıçam	12.08	8.40	-30.45	6.58	-45.50
	Karaçam	12.14	7.63	-37.08	5.52	-54.48
	Sedir	12.01	7.93	-33.98	6.19	-48.43
	Ladin	11.92	8.15	-31.63	5.39	-54.71
Su emme	Meşe	4.76	2.51	-47.29	1.60	-66.40
	Sarıçam	4.40	2.58	-41.28	1.68	-61.85
	Karaçam	3.39	2.29	-32.37	1.16	-65.68
	Sedir	4.40	3.06	-30.41	1.51	-65.59
	Ladin	6.14	5.33	-13.28	1.65	-73.15
Ağırlık kaybı	Meşe	10.68	9.02	-15.49	10.21	-4.38
	Sarıçam	6.33	4.96	-21.67	6.13	-3.13
	Karaçam	6.43	5.09	-20.75	5.69	-11.38
	Sedir	6.27	5.13	-18.19	5.62	-10.42
	Ladin	5.89	5.22	-11.33	5.69	-3.39
Boyutsal kararlılık	Meşe	8.36	6.87	-17.83	5.29	-36.74
	Sarıçam	7.73	7.16	-7.34	5.43	-29.69
	Karaçam	6.14	5.28	-13.99	4.34	-29.38
	Sedir	4.93	4.64	-5.96	2.61	-47.10
	Ladin	8.74	6.60	-24.41	5.59	-36.01

Yoğunluk değişimi bakımından, karbonlaştırma işlemi tüm ahşap türlerinde yoğunluğu %0,76 ile %17,86 arasında azalttığı tespit edilmiştir. Karbonlaştırma sürecinde en yüksek yoğunluk değişimi Sedirde çıkmasının nedeni aromatik kokuyu veren ekstraktif maddelerin buharlaşarak katı madde kaybından kaynaklandığı söylenebilir. Karbonlaştırma sonrası keten yağı uygulaması sürecinde Meşe ve Sedir hariç diğer ahşap türlerinde yoğunluk değişimi kontrol örneklerine göre bir miktar artarak gerçekleşmiştir. Karbonlaştırma+keten yağı uygulama işlemi Sarıçam, Karaçam ve Ladinde %1,5-%20,52 oranları arasında yoğunluğu tekrar artırdığı tespit edilmiştir. Bu ahşap türleri yapısal olarak basit geçitli ve sıvı geçirgen olduklarından keten yağının etkisi, yoğunluğu olumlu etkilemiştir.

*Rutubet değişimi bakımından***,** karbonlaştırma işlemi tüm ahşap türlerinde rutubet değişimini %30,45-%37,08 arasında azalttığı tespit edilmiştir. Karbonlaştırma sürecinde en yüksek rutubet değişimi Karaçamda en düşük ise Sarıçamda olduğu tespit edilmiştir. Karbonlaştırma+keten yağı uygulama işlemi sürecinde bu rutubet değişiminin (azalmanın) kontrol örneklerine göre daha da yüksek düzeyde gerçekleştiği belirlenmiştir. Bunun nedeni; karbonlaştırma sonrası keten yağı özelliğinin ahşap içerisine nüfuz etmesi ve yüzeyde oluşturduğu satenimsi tabaka sayesinde ahşap ile rutubet çapraz bağı kurulmasına engel olmuştur. Bu durumda karbonlaştırma ve keten yağı uygulanmış örneklerde ahşabın mevcut hidroksil gruplarının azaldığı ve buna bağlı olarak daha az su absorbe ettiği söylenebilir.

Su emme oranı bakımından, karbonlaştırma işlemi tüm ahşap türlerinde rutubet değişimini %13,28-%47,29 arasında azalttığı tespit edilmiştir. Karbonlaştırma sürecinde en yüksek su emme oranı Meşede en düşük ise Ladinde olduğu tespit edilmiştir. Yoğunluğu düşük olan Ladinde birim hacim içerisindeki hücre çeperi miktarı daha az olduğu ve karbonlaştırma yüzeyin daha da derinliklerine ilerlediği için su emme oranı değişimi düşük çıkmış olabilir. Karbonlaştırma+keten yağı uygulama işlemi sürecinde su emme oranı değişimi (azalması) kontrol örneklerine göre daha da yüksek oranda gerçekleştiği belirlenmiştir. Bunun nedeni; hem karbonlaştırmanın hem de buna ilaveten keten

yağının ahşap içerisine nüfuz etmesi ve yüzeyde oluşturduğu satenimsi tabaka sayesinde ahşap ile su arasında çapraz bağı kurulmasına engel olmuştur. Bu durumda karbonlaştırma ve keten yağı uygulanmış örneklerde ahşabın mevcut hidroksil gruplarının azaldığı ve buna bağlı olarak daha az su absorbe ettiği söylenebilir.

Ağırlık değişimi bakımından, karbonlaştırma işlemi tüm ahşap türlerinde ağırlık değişimini %11,33-%21,67 arasında azalttığı tespit edilmiştir. Karbonlaştırma sürecinde en yüksek ağırlık değişimi (azalması) Sarıçamda (%21,67) en düşük ise Ladinde olduğu tespit edilmiştir. Sarıçamda değişim oranının yüksek olmasının nedeni ekstraktif maddeler ve reçinenin 250-300°C karbonlaştırma sıcaklığı ile buharlaşmanın daha yüksek oranda ağırlık kaybına neden olduğu söylenebilir. Karbonlaştırma ve keten yağı uygulanmış örneklerde kontrol örneklerine göre ağırlık kaybı değişimi %3,13-%11,38 arasında olduğu tespit edilmiştir. Sadece karbonlaştırma uygulanmış örneklere göre ağırlık kaybı oranın azaldığı görülmektedir. Sarıçamda sadece karbonlaştırma örneklerinde ağırlık değişimi en yüksek oranda olmasına rağmen, keten yağı uygulanmış örneklerde yağ moleküllerinin hücre çeperlerine daha fazla oranda tutunmasından (Retensiyon oranı %13-14) olmasından kaynaklandığı söylenebilir.

Boyutsal değişim bakımından, karbonlaştırma işlemi tüm ahşap türlerinde boyutsal değişim (kararlılığı) oranı %5,96 - %24,41 arasında azalttığı tespit edilmiştir. Karbonlaştırma sürecinde en yüksek boyutsal değişim oranı Ladin ve Meşede en düşük ise Sedir ve Sarıçamda olduğu tespit edilmiştir. Meşede boyutsal değişimin yüksek çıkma nedeni yayvan yapraklı ahşap türlerinde çalışma oranın yüksek olmasından kaynaklanmıştır. Sedir ve Sarıçamda boyutsal değişimin düşük çıkmasının nedeni ise yoğunluğun düşük ve homojen ve reçineli bir yapıya sahip olmalarından kaynaklanmıştır. Karbonlaştırma+keten yağı uygulama işlemi sürecinde boyutsal değişim oranı %29,38-%47,10 gerçekleşmiştir. Bir başka ifade ile boyutsal değişim azalmış kararlılık artmıştır. Bunun nedeni; karbonlaştırmanın karalılığı artırmasının üzerine ilaveten keten yağı uygulamasının ahşap örneklerin yüzeylerinde oluşturduğu yağsı katmanın su ile ilişkiyi iyice azaltmasından dolayı boyutsal kararlılığı artırmıştır.

Sonuç olarak, beş ahşap türü örneklere uygulanmış olan karbonlaştırma işlemi ahşap malzemenin fiziksel özelliklerinden yoğunluğu, denge rutubetini, su emme miktarını, azaltmaktadır. Karbonlaştırma sürecinde kontrol örneklerine göre ağırlık kaybının meydana geldiği, ancak karbonlaştırmadan sonra uygulanan keten yağının ağırlığı tekrar artırdığı, boyutsal değişimi azalttığı ve ahşabın boyutlarını daha kararlı hale getirdiği tespit edilmiştir.

Beş ahşap türünde karbonlaştırma ortalama olarak yoğunluğu %5,7 rutubet dengesini %32,75 su emme oranını %32,93 boyutsal değişim (çalışma) oranını %13,91 azalttığı tespit edilmiştir. Karbonlaştırma işleminin üzerine ilaveten keten yağı uygulamasının koruyuculuk özelliğini daha da artırıp ortalama olarak yoğunluğu %9,83 rutubet dengesini %49,65 su emme %66,53 boyutsal değişim (çalışma) oranı %35,78 daha da azaltarak gerçekleştiği belirlenmiştir. Buna göre yüzeyi karbonlaştırılmış ve keten yağı uygulanmış ahşabın iklim şartlarına maruz kalınan kullanımlarına daha da kararlı hale geldiği söylenebilir.

Bu durumda; ahşabı karbonlaştırma yöntemi diğer bilinen koruma yöntemleri kadar etkili olduğu belirlenmiştir. Karbonlaştırmadan sonra ilaveten keten yağı uygulamasının sadece karbonlaştırma uygulanmış örneklere göre koruyuculuk özelliğini daha da artırdığı, ahşap hikroskopisini ve çalışma oranını ileri düzeyde azalttığı tespit edilmiştir. Kimyasal özellikli ahşap koruyucuların çevreye verdiği sürekli zarara göre karbonlaştırma kısa süreli bir işlem olup daha ekolojik özellikte bir koruyucu olduğu söylenebilir. Karbonlaştırma işlemi, kimyasal koruyuculara göre daha ekonomik ve daha az ekipman ile uzmanlık gerektirmeden yapılabilecek bir işlem olarak uygulanabileceği önerilebilir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

Bu araştırma Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından FYL-2024-9446 nolu proje kapsamında desteklenmiştir. / This research was supported by Gazi University Scientific Research Projects Unit under project number FYL-2024-9446.

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 pproval or legal-specific permission.

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

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

She conducted the experiments, analyzed the results, and completed the writing process of the article.

Mustafa ALTUNOK: Deneylerin yapımına, sonuçların analizine ve makalenin yazımına katkıda bulunmuştur

He contributed to the conduct of experiments, analysis of results, and writing of the article.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

There is no conflict of interest in this study.

KAYNAKLAR (REFERENSES)

[1] Özüm E, 2008, Standart Yangına Maruz Farklı Kesitlerdeki Ahşap Kolonların yangın Dayanımının Deneysel Ve Teorik- Nümerik Saptanması, Namık Kemal Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi

[2] Haksever A, Savaş S (2005b). Gerçek Yangın Etkisi Altında Ahşap Kolonların Dizaynı. İMO Teknik Dergi, 2005:3713-3738.

[3] Kılıç A. 2010) Yanan Binalarda Çökme Tehlikeleri Ateşi Tutan Eller - Ateş Kahramanları).

[4] Gün B, Anıktar S, 2020, Çevre ve Şehircilik Uygulamalarında Betonarme-Ahşap Yapı Karşılaştırması, İstanbul Sabahattin Zaim Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi,(3): 19-25.

[5] Düzenli, 2017, Realizm - Ütopizm Kıskacında Şehir Ve İstanbul: Ev Ve Şehir Vakfı, Deprem Çalışma Grubu Ve Yeni Şehirler Projesi Üzerine. İdeal Kent, 599.

[6] Flanagan, 2017, Kompozit Ahşap Kuleler, 80 Katlı Ahşap Gökdelen Projesi. Ahşap Yapılarda Koruma ve Onarım Sempozyumu 5 (s. 179-192). İstanbul.

[7] Ahşap Yapıların Yangın Riski, Mimarlık Akademisi Dergisi 2018,URL1: https://www.mimarlikakademisi.com/post/ah%C5%9Fap-yap%C4%B1larda-yang%C4%B1n-riski Son Erişim Tarihi: 13.03.2024.

[8] Shou Sugi Ban (Yakisugi) Nedir?, URL 2: https://movemimarlik.com.tr/tr/shou-sugi-ban-yakisugi-nedir-2142). Son Erişim Tarihi: 13.03.2024.

[9] https://www.turito.com/blog/chemistry/linseed-Oil

[10] ORS, Y.; KESKIN, H. Agac malzeme bilgisi. Atlas yayin dagitim. Ankara, 2001, 183.

[11] Özkan, E., Arpacı, S. S., Dizman Tomak, E., Yıldırım, N. (2020). Atık yağ ile emprenye işleminin ahşap malzemenin fiziksel özelliklerine etkisi. Ağaç Ve Orman, 1(1), 36-41.

[12] Kasap Okut G. ve Altınok M., "Doğal ahşap taneni ile modifiye edilmiş bazı ağaç türlerinde çürümeye karşı direncin incelenmesi", Politeknik Dergisi, 23(2): 343-350, (2020).

[13] Koski A (2008) Applicability of Crude Tall Oil for Wood Protection. PhD Thesis, University of Oulu

[14] TS ISO 13061-TS ISO 13061-: Odunun fiziksel ve mekanik özellikleri –Kusursuz küçük ahşap numunelerin deney yöntemleri-Bölüm1: Fiziksel ve mekanik deneyler için nem muhtevasının belirlenmesi/Physical and mechanical properties of wood - Test methods for small clear wood specimens-Part 1: Determination of moisture content for physical and mechanical tests, Türk standartları Enstitüsü, 2.12.2021, ANKARA

[15] TS EN 4084: Wood- Determination of Radial and Tangential Swelling, 20 1983, Türk Standartları. ANKARA

Gazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Dergisi
PART C: TASARIM VE TEKNOLOJİ

Gazi University
Journal of Science
PART C: DESIGN AND TECHNOLOGY

GU J Sci, Part C, 13(2): 746-762 (2025)

Kamu Sağlığı ve Çevresel Sürdürülebilirlik için YOLOv5 Tabanlı Sigara Tespiti ve Sesli Uyarı Sistemi

Nur Kuban TORUN[1*] Oğuzhan TATLI[1] Merve ÖNALAN[1]

[1]*Bilecik Seyh Edebali University, Department of Management Information System, Bilecik, Turkey*

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru:15/01/2025
Düzeltme: 22/02/2025
Kabul: 17/03/2025

Anahtar Kelimeler

Sağlık ve Kaliteli Yaşam
Derin Öğrenme
Görüntü İşleme
Sigara Tespiti
Sesli Uyarı

Article Info

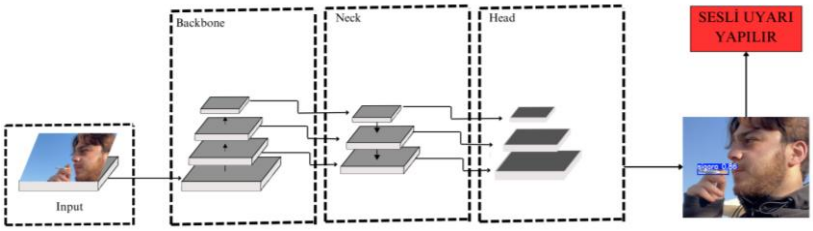
Research article
Received: 15/01/2025
Revision: 22/02/2025
Accepted: 17/03/2025

Keywords

Good Health and Well-Being
Deep Learning
Image Processing
Cigarette Detection
Sound Alert

Grafik Özet (Graphical/Tabular Abstract)

Bu çalışma, YOLOv5 modeliyle kapalı ve yasaklı alanlarda sigara içen bireyleri gerçek zamanlı tespit eden ve sesli uyarı mekanizmasıyla caydırıcılığı artırmayı hedefleyen bir sistem sunmaktadır. Şekilde, görüntülerin işlenip sigara içme davranışı tespit edildiğinde sesli uyarı veren düşük maliyetli ve gerçek zamanlı sistemin çalışma süreci gösterilmektedir. / This study presents a system that detects individuals smoking in enclosed and restricted areas in real time using the YOLOv5 model and enhances deterrence through a voice alert mechanism. The figure illustrates the operational process of the low-cost and real-time system, which processes images and issues a voice alert upon detecting smoking behavior.



Şekil A: *Sistemin Çalışma Süreci /* ***Figure A:*** *System Operation Process*

Önemli noktalar (Highlights)

- *Gerçek zamanlı sigara algılama gerçekleştirilmiştir. Real-time cigarette detection has been implemented.*
- *YOLOv5 modeliyle yüksek doğruluk oranı sağlanmıştır. A high accuracy rate has been achieved using the YOLOv5 model.*
- *Tespit sonrası otomatik sesli uyarı sistemi entegre edilmiştir. An automatic voice alert system has been integrated after detection.*
- *Düşük maliyetli bir donanım altyapısı ile çalışmaktadır. It operates with a low-cost hardware infrastructure.*

Amaç (Aim): *Pasif içiciliği azaltmak ve yasaklı alan ihlallerini en aza indirmek amacıyla YOLOv5 tabanlı otomatik tespit ve uyarı sistemi geliştirilmiştir. / An automatic detection and alert system based on YOLOv5 has been developed to reduce passive smoking and minimize violations in restricted areas.*

Özgünlük (Originality): *Sistem. YOLOv5 algoritmasıyla sigara içme davranışını gerçek zamanlı tespit eder ve sesli uyarılarla caydırıcı bir etki yaratır. Yasaklı alanlarda sigara içme davranışını engellemeyi amaçlar ve topluma sağlıklı yaşam bilinci kazandırır. / An automatic detection and alert system based on YOLOv5 has been developed to reduce passive smoking and minimize violations in restricted areas.*

Bulgular (Results)): *YOLOv5 modeli, %82 doğrulukla sigarayı tespit etmiş ve sesli uyarı sistemi başarıyla çalışmıştır. Yüksek FPS değerleri sunan YOLOv5s modeli tercih edilmiştir. Sigara tespiti için recall 0.734, precision 0.906, mAP@0.5 0.825 ve F1 Skoru 0.811 olarak hesaplanmıştır. / The YOLOv5 model detected cigarettes with 82% accuracy, and the voice alert system functioned successfully. The YOLOv5s model, which offers high FPS values, was preferred. For cigarette detection, recall was calculated as 0.734, precision as 0.906, mAP@0.5 as 0.825, and the F1 Score as 0.811.*

Sonuç (Conclusion): *Çalışma sigara tespitinde etkin ve düşük maliyetli bir çözüm sunmaktadır. Model, yasaklı alanlarda pasif içiciliği önlemek ve caydırıcılığı artırmak için kullanılabilir. / The study presents an effective and low-cost solution for cigarette detection. The model can be used to prevent passive smoking and enhance deterrence in restricted areas.*

*Corresponding author, e-mail: nurkuban.akdemir@bilecik.edu.tr
DOI:10.29109/gujsc.1620772

GU J Sci, Part C, 13(2): 746-762 (2025)

Gazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Dergisi
PART C: TASARIM VE TEKNOLOJİ

Gazi University
Journal of Science
PART C: DESIGN AND TECHNOLOGY

http://dergipark.gov.tr/gujsc

Kamu Sağlığı ve Çevresel Sürdürülebilirlik için YOLOv5 Tabanlı Sigara Tespiti ve Sesli Uyarı Sistemi

Nur Kuban TORUN[1*] Oğuzhan TATLI[1] Merve ÖNALAN[1]

[1]*Bilecik Seyh Edebali University, Department of Management Information System, Bilecik, Turkey*

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru:15/01/2025
Düzeltme: 22/02/2025
Kabul: 17/03/2025

Anahtar Kelimeler

Sağlık ve Kaliteli Yaşam
Derin Öğrenme
Görüntü İşleme
Sigara Tespiti
Sesli Uyarı

Öz

Sigara kullanımı, dünya genelinde çok sayıda sağlık sorununa yol açarak her yıl milyonlarca insanın ölümüne neden olmaktadır. Sigara dumanına maruz kalma, yalnızca kullanıcıyı değil, çevresindeki bireyleri de olumsuz etkileyerek pasif içicilik riskini artırmaktadır. Bu nedenle, sigaranın bireysel ve toplumsal zararlarını azaltmaya yönelik geliştirilen "dumansız hava sahası" uygulamaları, halk sağlığını korumada kritik bir rol üstlenmektedir. Bu çalışmada, YOLOv5 tabanlı bir nesne tespit modeli kullanılarak sigara içme davranışının gerçek zamanlı tespit edilmesi hedeflenmiştir. Modelin eğitimi için farklı ışık, açı ve arka plan koşullarında çekilen 3.912 görüntüden oluşan bir veri seti oluşturulmuş, veri artırma teknikleri uygulanarak görüntü sayısı 10.176'ya çıkarılmıştır. Veriler, Roboflow platformunda etiketlenmiş ve model eğitimi Google Colab Pro ortamında Ultralytics HUB kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Eğitim sürecinde YOLOv5s modeli, %90.6 kesinlik (Precision), %73.4 duyarlılık (Recall) ve 0.825 mAP@0.5 değerlerine ulaşarak yüksek doğruluk oranı sergilemiştir. Tespit edilen sigara içme eylemi, önceden tanımlanmış bir güven eşiği aşıldığında sesli bir uyarı mekanizmasıyla kullanıcıya bildirilmiştir. Bu amaçla, Pygame kütüphanesi kullanılarak daha önce kaydedilmiş bir ses dosyası otomatik olarak çalınmıştır.Bu sistem, sigara kullanımının yasak olduğu alanlarda bireylerin yasağa uyum sağlamalarını teşvik ederek pasif içicilik riskinin azaltılmasına katkıda bulunmaktadır. Gerçek zamanlı tespit ve otomatik uyarı mekanizması, sigara içmenin denetlenmesi gereken ortamlar için yenilikçi bir çözüm sunmaktadır. Bu çalışma, "Sağlıklı ve Kaliteli Yaşam" hedefine katkıda bulunarak insan sağlığını ve hava kalitesini koruma noktasında literatüre önemli bir katkı sağlamaktadır.

YOLOv5-Based Cigarette Detection and Audible Warning System for Public Health and Environmental Sustainability

Article Info

Research article
Received: 15/01/2025
Revision: 22/02/2025
Accepted: 17/03/2025

Keywords

Good Health and Well-Being
Deep Learning
Image Processing
Cigarette Detection
Sound Alert

Abstract

Smoking causes numerous health problems worldwide, leading to the deaths of millions of people each year. Exposure to cigarette smoke negatively affects not only the smoker but also those around them, increasing the risk of passive smoking. Therefore, "smoke-free zone" implementations, developed to reduce the individual and societal harms of smoking, play a critical role in protecting public health. This study aims to detect smoking behavior in real time using an object detection model based on YOLOv5. A dataset consisting of 3,912 images captured under different lighting, angle, and background conditions was created for model training, and data augmentation techniques were applied to increase the number of images to 10,176. The data was labeled using the Roboflow platform, and the model training was conducted in the Google Colab Pro environment utilizing Ultralytics HUB. During the training process, the YOLOv5s model achieved high accuracy with a precision of 90.6%, a recall of 73.4%, and an mAP@0.5 score of 0.825. When the detected smoking action exceeded a predefined confidence threshold, a voice alert mechanism notified the user. For this purpose, a pre-recorded audio file was automatically played using the Pygame library. This system contributes to reducing the risk of passive smoking by encouraging individuals to comply with smoking bans in designated areas. The real-time detection and automatic warning mechanism offer an innovative solution for environments where smoking needs to be monitored. This study contributes significantly to the literature by supporting the "Good Health and Well-being" goal, helping to protect both human health and air quality.

*Corresponding author, e-mail: nurkuban.akdemir@bilecik.edu.tr
DOI:10.29109/gujsc.1620772

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Sigara kullanımı, dünya genelinde her yıl yaklaşık 8 milyon kişinin hayatını kaybetmesine neden olarak önlenebilir ölüm sebeplerinin başında yer almaktadır. Bu kayıpların 1,2 milyonu, sigara dumanına doğrudan maruz kalmayan ancak pasif içicilik nedeniyle zarar gören bireylerden oluşmaktadır. Sigara dumanı çocukların yarısını ve yetişkinlerin %34'ünü olumsuz etkileyerek, yılda 600 binden fazla kişinin yaşamını yitirmesine yol açmaktadır. Sigaranın zararı yalnızca kullanıcılara değil, çevresindeki insanları ve doğal çevreyi de kapsamaktadır [1]. Artan çevresel atıklar, ormansızlaşma, yangın riskleri ve hava kirliliği, sigara kullanımının doğaya verdiği olumsuz etkilerinden sadece birkaçıdır. Sürdürülebilir kalkınma hedefleri kapsamında, tütün kullanımını azaltmak, bulaşıcı olmayan hastalıkların önlenmesi ve yönetiminde ilerleme sağlamak ve tütün kontrol politikalarının etkinliğini değerlendirmek açısından kritik bir öneme sahiptir [2]. Dumansız hava sahası, tütün ürünlerinin kullanımının yasak olduğu alanları ifade eder ve pasif içiciliğin önlenmesi amacıyla oluşturulmuştur. Bu uygulama, toplum sağlığını korumak ve tütün ürünlerinin zararlarını azaltmak için kritik bir öneme sahiptir. Türkiye'de, 4207 sayılı "Tütün Ürünlerinin Zararlarının Önlenmesi ve Kontrolü Hakkında Kanun" kapsamında, kamuya açık tüm kapalı alanlarda tütün ürünlerinin tüketimi yasaklanmıştır. Bu yasak, ikamete mahsus konutlar hariç olmak üzere, kamu hizmet binaları, eğitim, sağlık, ticaret, sosyal ve kültürel alanlar gibi birçok mekânı kapsamaktadır [3]. Bu düzenlemeler, sigara kullanmayan bireylerin tütün dumanından olumsuz etkilenmesini önlemeyi amaçlamaktadır. Ayrıca, Sağlık Bakanlığı tarafından "Dumansız Hava Sahası Denetim Sistemi" adını taşıyan bir izleme sistemi geliştirilmiştir. GPS teknolojisini kullanan bu sistem, tütün ürünlerinin yasak olduğu alanlardaki denetimlerin etkinliğini artırmayı amaçlamaktadır [4].

Ülke genelinde veya il bazında yapılan ihbar, denetim ve ihlaller manuel değerlendirme süreçlerine dayanmaktadır ve bu durum, sistemin geleneksel gözetim yöntemlerinden tam anlamıyla ayrılmadığını göstermektedir. Son yıllarda, gözetim sistemlerinin gelişimi, kamera ve bilgisayar teknolojisindeki ilerlemelerde hız kazanmıştır. Bu yenilikler, araştırmacıların gözetim süreçlerine bilgisayarla görme, derin öğrenme ve görüntü işleme gibi ileri teknolojileri entegre etme konusundaki ilgisini artırmıştır. Geleneksel gözetim yöntemleri, insan gözüne ve dikkatine dayalı olduğundan hata yapma riski taşır ve geniş ölçekli izleme gerektiren durumlarda yeterince etkili olmayıp belirli nesneleri veya sahneleri algılama konusundaki yetersizlikleri nedeniyle önemli hatalara ve kazalara yol açabilmektedir [5].

Sigara davranışı tespiti genellikle derin öğrenme modellerine dayanarak eğitim ve çıkarım işlemlerini gerçekleştirir, böylece sigara tespitinde manuel iş gücünü etkin bir şekilde azaltır ve tespit doğruluğu ile verimliliğini artırır [6]. Derin öğrenme, yapay sinir ağlarının çok katmanlı yapılarını kullanarak verilerdeki bu özellikleri öğrenme yeteneğine dayanır.

Veri seti, hedefin farklı açılarından görüntülerini ve bu görüntülerdeki hedefin konumunu belirten etiketlerden oluşmaktadır. Bu etiketler, tespit algoritmalarının doğruluğunu doğrudan etkiler. Derin öğrenme modelleri, bu etiketli verilerle eğitim alarak, parametreleri optimize eder ve hedef tespiti için öğrenme sürecini geliştirir. Bu süreç, ağın ağırlıklarını ve aktivasyon fonksiyonlarını ayarlayarak modelin genel doğruluğunu artırır.

Derin öğrenme tabanlı ağlar sayesinde sigara içme tespiti alanında önemli ilerlemeler kaydedilmesine rağmen hâlâ çözülmesi gereken bazı zorluklar mevcuttur [7]. Görüntü tabanlı sigara tespiti, dumanın ve sigaranın tespiti olarak ikiye ayrılabilir. Duman tespiti, sigara içenleri uzun mesafeden tanıyabilir ve genellikle daha etkili olur. Ancak, arka planın aydınlık veya dumanın ince olduğu durumlarda doğruluk düşer. Sigara tespiti, daha yüksek doğrulukla sigara içenleri tespit eder, fakat küçük sigara hedeflerinin tanınması zordur[8]. Bu gibi faktörler, tespit algoritmalarında yanlış tahminlere ve hatalı sonuçlara yol açabilir.

Bir diğer önemli konu ise sigara içme davranışını ayırt etmek için yeterli ve çeşitli özelliklerin tanımlanmasıdır. Ancak bu durum, algoritmanın eğitimi ve sahadaki uygulanabilirliği açısından zorluklar doğurabilir. Hassasiyet gerektiren bu sistemler, yüksek çözünürlüklü sensörler ve kameraların kullanılmasını gerektirdiği gibi maliyetleri de artırmaktadır. Bu kapsamda, sigara içme tespitine yönelik sistemlerin güvenilirliğini ve doğruluğunu artırmak için detaylı iyileştirmelere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu çalışma, dumansız hava sahasında sigara içen bireyleri YOLOv5 modeline

dayalı bir hedef algılama algoritmasıyla tespit etmeyi amaçlamaktadır. Model, eğitim aşamasında geniş bir sigara içme veri setiyle optimize edilmiş olup, Google Colab platformunda eğitilmiştir ve gerçek zamanlı kamera görüntülerinden sigara içme davranışını doğru şekilde tanımlamak için kullanılmıştır. Algoritmanın doğruluğu, çevresel faktörlerden etkilenmeden, yüksek FPS değeriyle en hızlı tespit yapacak şekilde yapılandırılmıştır. Çalışmanın genel akış süreci, tespit edilen sigara içme durumunun belirlenmesi ve ardından sistem tarafından bireylerin sesli uyarılarla engellenmesi dahil olmak üzere Şekil 1'deki gibidir. Bu sistem, yasaklı bölgede sigara içme davranışını engellemeyi, temiz hava sahalarının korunmasını ve pasif içiciliğin önlenmesini hedeflemektedir. Ayrıca bu çalışma Sürdürülebilir Kalkınma Hedeflerinden "Sağlıklı ve Kaliteli Yaşam" hedefini desteklemektedir. Bu doğrultuda, araştırma ekibi tarafından özgün bir veri seti oluşturulmuş ve bu veri seti, verilerin çeşitliliğini artırmak için veri çoğaltma teknikleri kullanılarak genişletilmiştir. Veri çoğaltma işlemleri, Roboflow platformu aracılığıyla gerçekleştirilmiş ve bu süreç, modelin daha yüksek doğruluk ve genelleme kapasitesine ulaşmasını sağlamıştır. Elde edilen veri seti, YOLO ailesinin versiyonlarından biri olan YOLOv5 modeli ile eğitilerek, sigara içme davranışını gerçek zamanlı ve yüksek doğrulukla tespit edebilen bir sistem geliştirilmiştir. Çalışmada YOLOv5'in farklı modelleri (YOLOv5n, YOLOv5s, YOLOv5m, YOLOv5l ve YOLOv5x) karşılaştırılmış ve en iyi sonuç veren model seçilmiştir [9]. Bu karşılaştırma, hem doğruluk hem de hız performansı açısından değerlendirilmiştir ve en iyi model belirlenmiştir. Çalışmada uygulanan algoritma eğitimi ve test sürecinde gerçek dünya koşullarına uygun veri kullanılması, sistemin pratikteki başarısını artırmıştır. Çalışmanın hedefi hem doğru tespit hem de yüksek hız performansı sağlayarak kullanıcı dostu bir sistem geliştirmek ve bu alanda literatüre katkı sunmaktır. Sonuç itibarıyla, geliştirilen sistem, Google Colab platformunun Pro versiyonu ile eğitilerek optimize edilmiş ve uygun işlemci gücüne sahip bir bilgisayar ve kamera ile gerçek dünya koşullarında test edilmiştir. Sistemden elde edilen veriler detaylı bir şekilde analiz edilerek, hem tespit doğruluğu hem de performans açısından değerlendirilmiş ve başarılı bir performans sergilemiştir.

Geliştirilen sistem, yalnızca sigara tespiti ve caydırıcılığı sağlamanın ötesinde, geniş kapsamlı katkılar sunarak kamu sağlığı, çevresel sürdürülebilirlik ve akıllı şehir uygulamaları açısından önemli bir yenilik olarak değerlendirilebilir. Sigara tespitini gerçek zamanlı yapabilmesi sayesinde belirlenen bölgelerde anlık müdahale imkânı sunarak sigara yasağının etkin bir şekilde denetlenmesini mümkün kılmaktadır. Özellikle üniversite kampüsleri, hastaneler, alışveriş merkezleri ve havaalanları gibi kamuya açık alanlarda sigara yasağına bir çözüm olarak uygulanabilmesi sistemin yaygın kullanım potansiyelini artırmaktadır. Otomatik sesli uyarı mekanizması sayesinde bireyler üzerinde caydırıcı bir etki oluşturarak uzun vadede sigara içme alışkanlıklarının azalmasına katkıda bulunabilir. Çevresel sürdürülebilirlik açısından değerlendirildiğinde, sigara içme oranlarını azaltarak sigara izmaritlerinin neden olduğu kirliliği önlemeye yardımcı olabilecek ve böylece çevresel koruma süreçlerine katkı sunabilecektir. Aynı zamanda yapay zekâ destekli bu sistemin akıllı şehir uygulamalarıyla entegre edilmesi, kamuya açık alanlardaki ihlallerin tespitinde kullanılmasıyla hava kalitesini iyileştirme stratejilerine destek olabilecektir. Yapılan analizler, sistemin pratik uygulamalar için uygun olduğunu ve sigara tespiti ile caydırma konusunda etkili bir çözüm sunduğunu göstermektedir. Sistemin yalnızca bireysel sigara içme davranışlarını caydırmakla kalmayıp, toplumsal sağlığı koruma ve çevresel farkındalık oluşturma açısından da önemli bir potansiyele sahip olduğu değerlendirilebilir. Bununla birlikte, bu sistemin geliştirilmesi, sürdürülebilir kalkınma hedeflerine ulaşılmasına katkıda bulunarak, kamu yararına hizmet eden yenilikçi bir teknoloji sunmaktadır. Özellikle, temiz hava sahalarının korunması ve pasif içiciliğin önlenmesi yoluyla toplum sağlığını iyileştirme misyonunu desteklemektedir.

1.1 Literatür Taraması

Bilim ve teknolojinin ilerlemesi, sigara içme davranışının tespit edilmesine yönelik yöntemlerin gelişmesine önemli katkılar sağlamıştır [10]. Geleneksel olarak, sigara tespiti genellikle çeşitli duman dedektörlerinin kullanılmasına dayanmaktadır [11]. Ancak, bu yöntemler çoğu zaman bağlı bulundukları ortam ve sensör hassasiyetine bağlı olarak sınırlı kalabilmektedir. Son yıllarda, bilgisayar görüşü ve derin öğrenme teknikleri, sigara içme davranışının tespitinde çözüm sunabilecek etkili alternatifler olarak dikkat

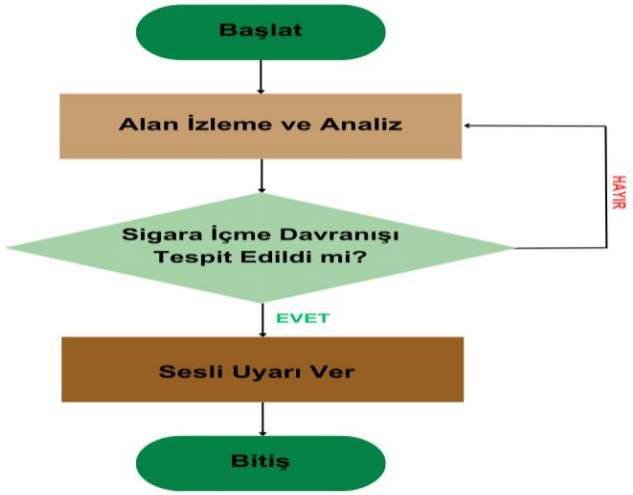
çekmektedir [12]. Görüntü işleme teknolojileri ile orman yangınlarının erken tespiti ve sürüş sırasında sigara içme davranışının belirlenmesi gibi alanlarda çalışmalar bulunmaktadır [13,14,15]. Huang ve Li yaptıkları çalışmada sürüş sırasında sigara içme davranışını tespit edebilmek için derin öğrenme tabanlı bir model geliştirmişlerdir. Bu model, evrişimli sinir ağı (CNN) kullanarak video görüntülerinde şekil, hareket ve renk özelliklerine dayalı duman analizi yapmaktadır [16]. Bu yaklaşım, sigara davranışını daha hassas bir şekilde algılamaya olanak sağlamıştır. Kamuya açık alanlarda sigara içme davranışını tespit etmeye odaklanan bir başka çalışma, Zhang ve ekibi tarafından gerçekleştirilmiştir. Araştırmacılar, sigara içen kişilerin genellikle görüntülerde küçük hedefler olarak görülmesi nedeniyle bu zorluğu aşmak için gerçek zamanlı bir model tasarlamışlardır. Bu model, %86,32 tespit doğruluğu ile sigara içme davranışını başarıyla saptamış ve yangın risklerini azaltmaya yönelik bit katkı sağlamıştır [17].Bu tür çalışmaların ortaya koyduğu ilerlemelere rağmen, küçük hedeflerin tespiti konusundaki sınırlamalar tam anlamıyla giderilememiştir. Wang ve ekibi, küçük hedef tespitindeki zorlukları aşmak için YOLOv8 ağını temel alarak geliştirdikleri ve özel bir katmanla güçlendirdikleri yeni bir sigara içme tespit algoritması olan YOLOv8-MNC'yi önermektedir [7]. Lakatos ve ekibi ise çok modlu bir model tasarlayarak metin ve görüntüler üzerinden sigara içme davranışını tespit etmeyi hedeflemiştir. Youtube videolarından elde edilen kareler ve oluşturulan metin veri kümesiyle eğitilen bu model, görüntü analizinde %74, metin analizinde ise %98 doğruluk oranına ulaşmıştır [18]. Bu çalışma, gizli tütün reklamlarının tespiti için de önemli bir yöntem sunmaktadır. Sigara davranışının gerçek zamanlı olarak algılanmasına yönelik bir diğer çalışma, Jiao ve ekibi tarafından geliştirilen SmokingNet modelidir. GoogleNet tabanlı bu derin öğrenme modeli, özel evrişim katmanları sayesinde daha hızlı ve doğru tespit imkânı sağlamışlardır [19]. Yang vd. sigara tespitinde YOLO-Cigarette adı verilen bir model sunmuş ve bu modelle algılama hassasiyetini önemli ölçülerde artırmıştır [20]. Hernandez vd. ise insan hareketlerini ve YOLOv8 algoritmasını birleştirerek mesafe, açı ve zaman ölçümlerine dayalı bir tespit yöntemi önermiştir [21]. Bu yaklaşımlar, sigara tespitinin gerçek zamanlı uygulamalarda da kullanılabileceğini göstermektedir. Jiang ve ekibi, veri kümesini genişletmek için dikey döndürme gibi veri artırma teknikleri kullanmış ve SE-Net modülüyle özellik çıkarımını iyileştirmiştir. YOLOv5s tabanlı ağ yapısı ile eğitilen model, mAP değerinde %5.3 oranında bir artış sağlayarak etkin bir performans göstermiştir [22]. Bai ve ekibi ise YOLOv4 ile HOG tabanlı insan vücudu çıkarma yöntemlerini birleştirerek tespit doğruluğunu artırmışlardır [23]. Bir başka çalışma, derin öğrenme modelleri kullanılarak sigara içimini gerçek zamanlı tespit eden ve yetkililere bildirim göndermeyi hedefleyen bir sistem geliştirilmesine odaklanmıştır [24]. Sonuç olarak, bilgisayar görüşü ve derin öğrenme teknikleri, sigara içme davranışının tespitinde etkili çözümler sunmaya devam etmektedir. Farklı çalışmalar, hem tespit doğruluğunu hem de gerçek zamanlı çalışma kapasitesini artırmaya yönelik çeşitli yaklaşımlar sunmaktadır.

2. MATERYAL VE METOD (MATERIALS AND METHODS)

Bu araştırmada, nesne tespiti için derin öğrenme tabanlı bir yaklaşım benimsenmiştir. Veri toplama, hazırlama, model seçimi ve eğitimi gibi adımları içeren metodolojik süreç, nesne tespitinde en iyi sonuçları almak için özenle geliştirilmiştir. Bu bölümde çalışmanın gerçekleştirilme süreci detaylı bir şekilde açıklanacaktır.

2.1 Veri Toplama ve Etiketleme (Data collection and labeling)

Projenin temelini oluşturan veri seti, sigara içme davranışını tespit edebilmek için özel olarak oluşturulmuştur. Görseller ve videolardan alınan, saniyede 40 kareye kadar fotoğraflarla veri toplanmıştır. Bu görseller, Ekim, Kasım ve Aralık aylarını kapsayan üç aylık bir dönemde, sokak, kafe ve üniversite kampüsü gibi kontrollü alanlarda çekilmiştir. Veri çeşitliliğini arttırmak amacıyla çekimler sırasında farklı açılar, arka planlar ve değişik ışık koşulları kullanılmış; gece ve gündüz çekimleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, farklı mesafelerden yapılan çekimlerle veri setinin daha kapsayıcı hale getirilmesi sağlanmıştır. Veri toplama sürecinde, kullanılan görsellerin tamamı ilgili kişilerin sözlü rızası alınarak elde edilmiştir. Bu anlamda, herhangi bir mahremiyet ihlali yapılmamasına özen gösterilmiştir. Çalışma kapsamında internet kaynaklarından alınan veri kullanılmamış, tamamen özgün bir veri seti oluşturulmuştur.



Şekil 1. Çalışmanın Akış Şeması (Flowchart of the Study)



Şekil 2. Veri Setinden Örnekler (Examples from the Dataset)

Farklı yaş ve cinsiyet gruplarından bireylerin fotoğrafları kullanılmıştır. Sigara içme eyleminde yaş ve cinsiyet unsurlarına bağlı olarak değişiklik gösterebildiği için veri kümesinde de bir çeşitlilik sağlamıştır. Arka planın kalabalık olması ya da boş olması gibi değişkenlerde göz önünde bulundurularak veriler çeşitlendirilmiştir. Toplanan görseller ve videolar, Roboflow platformu kullanılarak etiketlenmiştir [25]. Etiket olarak "Sigara" ifadesi kullanılmış ve her görselde en az 1 adet sigara bulunmasına dikkat edilmiştir. Veri setinin eğitim, doğrulama ve test oranları: %80 eğitim, %10 doğrulama, %10 test olarak ayrılmıştır. Veri setinin kalitesini ve modelin performansını artırmak amacıyla çeşitli ön işleme adımları uygulanmıştır. Toplam 3912 görüntüden oluşan veri setinde bu adımlar titizlikle gerçekleştirilmiştir. İlk olarak, "Auto-Orient" işlemi uygulanarak görsellerin yanlış yönlendirilmesi önlenmiş ve görüntülerin doğru açıda hizalanması sağlanmıştır. Ardından, "Resize" ile tüm görüntüler modelin giriş boyutuna uygun hale getirilmek üzere yeniden boyutlandırılmıştır. Model performansı üzerinde renk bilgisinin doğrudan bir etkisi olmadığı için görüntüler "Grayscale" ile gri tonlamaya dönüştürülmüş ve bu sayede modelin yapısal özelliklere odaklanması sağlanmıştır. Ayrıca, görsellerin kontrastı "Auto-Adjust Contrast" işlemi ile otomatik olarak ayarlanmış ve böylece daha net görüntüler elde edilmiştir. Bu işlem, modelin algılama yeteneğini artırmada etkili olmuştur. Belirtilen ön işleme adımları sonucunda veri seti, modelin eğitim sürecine daha uygun hale getirilmiş ve analiz kalitesi yükseltilmiştir. Ön işleme teknikleri yalnızca veri setinin iyileştirilmesine yönelik olup, veri sayısında herhangi bir değişiklik yapılmamıştır.

Modelin performansını artırmak ve eğitim sırasında çeşitliliği sağlamak amacıyla, eğitim veri setinde farklı veri artırma teknikleri uygulanmıştır. Bu teknikler, veri setindeki her bir görüntüye çeşitli dönüşüm ve değişimler ekleyerek yeni veriler oluşturmuş, modelin farklı durumlara karşı genelleme yeteneğini artırmıştır. Döndürme işlemleri kapsamında "Flip 90°" tekniği ile görüntüler yatay veya dikey eksende döndürülmüştür. "Rotate" işlemi ile rastgele açılarda çevirerek farklı perspektifler oluşturmuştur. "Crop" yöntemi ile görüntülerin belirli bölgeleri kırpılarak asıl ilgili alanlar daha da belirgin hale getirilmiştir. "Rotation" işlemi ise görselleri farklı açılardan birkaç kez döndürerek eğitimin çeşitliliğini artırmıştır. "Shear", görselleri kaydırma dönüşümü ile farklı açılardan yeniden yapılandırmıştır. "Grayscale" tekniği, görselleri gri tonlarına dönüştürerek renk bilgisinden bağımsız bir analiz sağlamıştır. "Hue" ve "Saturation" yöntemleri, görsellerde renk tonlarını ve doygunluk değerlerini rastgele değiştirerek yeni veri türetmiştir. "Brightness" ve "Exposure" işlemleri, görsellerin parlaklık ve pozlama değerlerini artırıp azaltarak yeni veriler üretmiştir. "Blur" yöntemi, görselleri belirli oranlarda bulanıklaştırarak bulanık verilerle öğrenmeyi sağlamıştır. "Noise" tekniği ise görsellere gündelik hayatta karşılaşılabilecek şekilde parazit ve gürültü ekleyerek çeşitli görüntüler oluşturmuştur. Önerilen bu veri artırma yöntemlerinin uygulanması, modelin yalnızca ideal koşullarda değil farklı açılar, ışıklandırmalar, renk varyasyonları ve görüntü bozulmaları gibi değişken çevresel faktörler altında da yüksek doğrulukta tahmin yapabilmesini sağlamaktadır. Uygulanan veri artırma tekniklerinden elde edilen görüntülerin bir örneği Şekil 3.'te gösterilmiştir. Bu veri artırma tekniklerinden yararlanılarak, toplamda 3912 olan veri sayısı 10,176 olacak şekilde artırılmıştır.

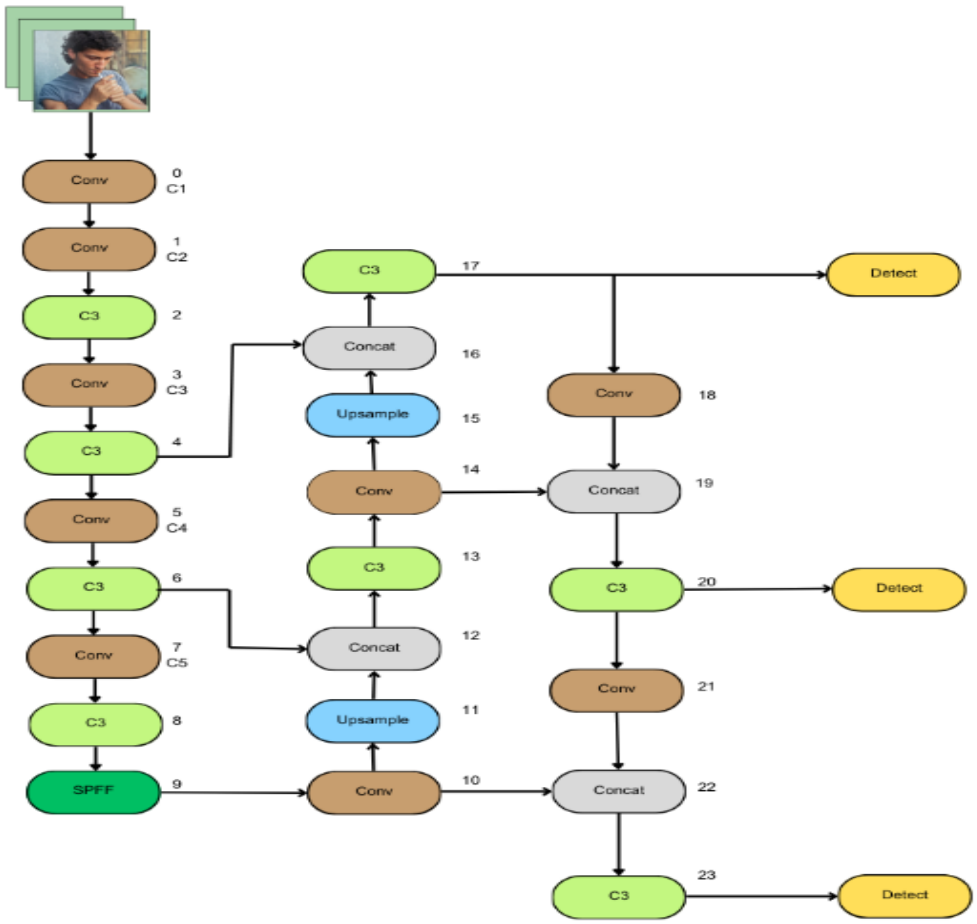
2.2 Model Seçimi ve Eğitimi (Model Selection and Training)

Çalışmada nesne tespiti için güçlü performansıyla öne çıkan YOLOv5 modeli tercih edilmiştir. YOLOv5 algoritmasının yapısı Şekil 4.'te gösterildiği gibidir. Model eğitim sürecinde daha önceden toplanan ve Roboflow platformunda etiketlenen veriler YOLOv5 formatına getirilmiştir. Bu veriler Ultralytics HUB platformuna yüklenerek veri seti ve model eğitimi süreci daha izlenebilir ve kontrol edilebilir hale getirilmiştir. Ultralytics HUB tarafından sağlanan bir API anahtarı oluşturulmuş ve bu anahtar sayesinde Google Colab Pro [26] ortamı kullanılarak API anahtarı ile Ultralytics HUB'a entegre edilmiştir. Bu sayede daha güçlü işlemciler ve GPU desteği ile model eğitimi tamamlanmıştır.
Eğitim süreci boyunca Ultralytics HUB platformunda eğitimin ilerleyişi adım adım takip edilmiş ve doğruluğu gözlemlenmiştir.

Eğitim öncesinde veri seti titizlikle incelenmiş uygun olmayan ve hatalı veriler veri setinden çıkarılmıştır. Veri çeşitliliğini arttırmak amacıyla veri arttırma yöntemleri uygulanmştır. Bu adım modelin farklı koşullarda daha iyi genelleme yapabilmesini sağlamak için önemlidir**.** YOLOv5'in eğitim parametreleri çalışma gereksinimlerine uygun olacak şekilde ayarlanmıştır farklı denemeler sonucunda en uygun çalışan parametre değerleri kullanılmıştır (Tablo 1.)



Şekil 3. Veri Artırma Teknikleriyle Elde Edilen Örnek Görüntüler (Sample Images Obtained Through Data Augmentation Techniques)



Şekil 4. YOLOv5 Algoritması (YOLOv5 Algorithm)

2.3 Değerlendirme Ölçütleri (Evaluation Metrics)

Sistemin performansını ve doğruluğunu değerlendirmek amacıyla, eğitilen model farklı senaryolar altında bir test sürecinden geçmiştir. Sabit ve gerçek zamanlı görüntüler üzerinde gerçekleştirilen test süreci ile modelin başarımı değerlendirilmiştir.

Doğruluk (Accuracy) Doğru tespit edilen nesnelerin toplam tespitlere oranı.

$$accuracy = \frac{TP+TN}{TP+TN+FP+FN} \quad (1)$$

Kesinlik (Precision) Modelin doğru tespit ettiği nesnelerin, tüm pozitif tespitler içindeki oranı.

$$precision = \frac{TP}{TP+FP} \quad (2)$$

Hassasiyet (Recall) Gerçekten var olan nesnelerin ne kadarının tespit edilebildiği.

$$recall = \frac{TP}{TP+FN} \quad (3)$$

Ortalama Ortalama Doğruluk (mAP) Tüm sınıflar için tespit performansının genel ölçüsü.

$$mAP = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} AP_i \quad (4)$$

F1 Skoru bir modelin kesinlik (precision) ve hassasiyet (recall) arasında bir denge kuran ve genel performansını değerlendiren bir ölçüttür.

$$F1\ Skor = 2\ .\ \frac{precision\ .\ recall}{precision+recall} \quad (5)$$

Tablo1. Çalışmada Elde Edilen Skorlarların Karşılaştırması (Comparison of the Scores Obtained in the Study)

MODEL	BATCH	EPOCH	Görüntü Boyutu	Duyarlılık (Recall)	Kesinlik (Precision)	mAP @0.5
YOLOv5n	16	50	640x640	0.674	0.895	0.775
YOLOv5s	16	50	640x640	0.734	0.906	0.825
YOLOv5m	16	50	640x640	0.717	0.901	0.801
YOLOv5l	16	50	640x640	0.733	0.882	0.793
YOLOv5x	16	50	640x640	0.738	0.878	0.811

Tablo 1, YOLOv5 ailesine ait farklı model konfigürasyonlarının belirli bir eğitim parametresi altında gösterdiği performansları karşılaştırmaktadır. Eğitimin 16 batch size ve 50 epoch ile gerçekleştirildiği, giriş görüntü boyutunun ise 640x640 olarak sabit tutulduğu görülmektedir. Değerlendirme metrikleri olarak duyarlılık (recall), kesinlik (precision) ve Ortalama Ortalama Doğruluk (mAP @0.5) kullanılmıştır. Bu metrikler, modelin nesne tespit başarısını farklı açılardan değerlendirmekte olup, recall modelin tespit edebildiği nesnelerin oranını, precision ise doğru tespitlerin genel tahminler içindeki payını göstermektedir. mAP @0.5 değeri ise genel doğruluk açısından önemli bir kıyaslama ölçütü olarak kullanılmaktadır. Tablo incelendiğinde, YOLOv5s modelinin en dengeli performansı sunduğu göze çarpmaktadır. 0.734 recall ve 0.906 precision değerleri ile yüksek doğruluk sağlamasının yanı sıra, 0.825 mAP @0.5 değeriyle en başarılı model olarak öne çıkmaktadır. Bu modelin özellikle yüksek precision değeri, yanlış pozitif oranının düşük olduğunu ve modelin yanlış tespit yapma olasılığının görece düşük kaldığını göstermektedir. Dolayısıyla, YOLOv5s modeli hem nesneleri yakalama kapasitesi hem de doğru tahmin oranı bakımından en iyi dengeyi sunmaktadır. Ayrıca kamera kullanım esnasında en yüksek FPS değeri alınan versiyonlardan biri olduğundan YOLOv5s modeli tercih edilmiştir (FPS değerleri Şekil 6.'da gösterilmiştir). En küçük model olan YOLOv5n, 0.674 recall değeri ile nesne tespitinde daha düşük bir başarı göstermiştir. Precision açısından 0.895 değeriyle rekabetçi olmasına rağmen, mAP @0.5 değeri 0.775 olup, diğer modellere kıyasla daha düşük performans göstermektedir. Bu durum, YOLOv5n'nin daha hafif bir model olması nedeniyle işlem hızının avantajlı olabileceğini, ancak nesne tespitinde bazı kayıplara yol açabileceğini göstermektedir.

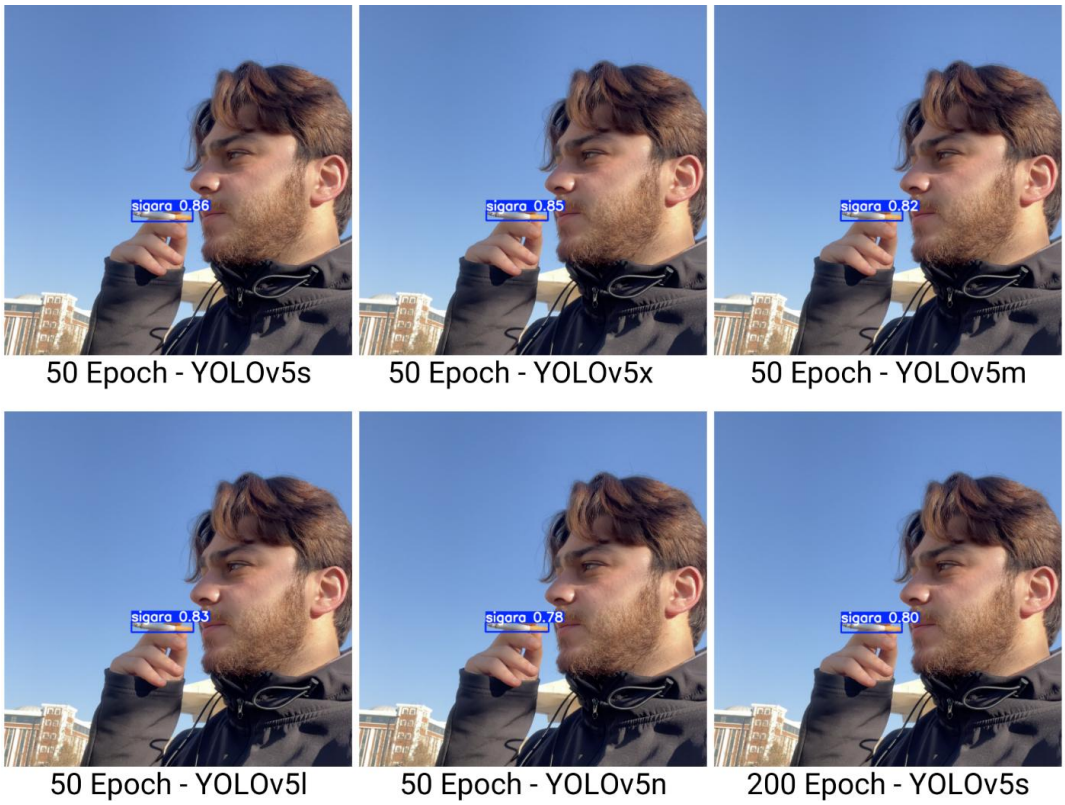
Daha büyük modellerin performansına bakıldığında, YOLOv5m ve YOLOv5l modellerinin recall açısından birbirine yakın olduğu (sırasıyla 0.717 ve 0.733) ancak precision değerlerinin YOLOv5s modelinin gerisinde kaldığı gözlenmektedir. YOLOv5m modeli 0.901 precision ve 0.801 mAP @0.5 değeri sunarken, YOLOv5l modeli 0.882 precision ve 0.793 mAP @0.5 değeriyle daha düşük doğruluk sergilemektedir. Bu durum, model boyutunun artmasının her zaman doğruluk açısından bir avantaj sağlamadığını göstermektedir. Modelin daha büyük olması, daha fazla parametreye sahip olması nedeniyle hesaplama gereksinimlerini artırırken, gerçek dünya uygulamalarında hız ve verimlilik açısından beklenen katkıyı sunmayabilir.

En büyük model olan YOLOv5x, en yüksek recall değerine (0.738) sahip olmasına rağmen, precision (0.878) ve mAP @0.5 (0.811) değerleri açısından beklenen üstünlüğü sağlayamamıştır. Bu modelin en yüksek recall değerine ulaşması, daha fazla nesneyi tespit edebildiğini gösterirken, precision değerinin görece düşük kalması, yanlış pozitif tahminlerin arttığını ve modelin daha fazla hata ürettiğini göstermektedir. Büyük modeller genellikle daha fazla bilgi işleme kapasitesine sahip olsa da, belirli veri setleri ve uygulamalar için her zaman en uygun seçenek olmayabilirler.

Aşırı öğrenme riskini minimize etmek amacıyla, epoch sayısının dikkatlice belirlenmesi önemli bir kriter olmuştur. Modelin doğrulama kaybı incelendiğinde, 50. epoch sonrasında kayıpların önemli ölçüde değişmediği ve doğrulama kaybının sabitlenmeye başladığı gözlemlenmiştir. Bu durum, modelin eğitimiyle ilgili olarak belirli bir noktada durulmasının, daha iyi bir genelleme sağlanmasına olanak tanıyacağını düşündürmüştür. Daha uzun eğitim süreleri, eğitim kaybını daha da düşürebilir; ancak doğrulama kaybındaki değişim durduğunda, modelin aşırı uyum sağlama riski artabilir ve bu da genelleme yeteneğini olumsuz etkileyebilir.

Bu doğrultuda, literatürdeki benzer çalışmalarda da epoch sayısının sınırlandırılması gerektiği ve daha uzun eğitim sürelerinin doğrulama performansını daha fazla iyileştirmediği görülmektedir. Eğitim süresinin uzatılmasının modelin performansına ek bir fayda sağlamayacağına ve gereksiz hesaplama maliyetine yol açabileceğine dair önceki çalışmalar da bu tercihi desteklemektedir [27]. Bu sonuçlar, daha büyük modellerin her zaman en iyi performansı sunmadığını göstermektedir. YOLOv5s modeli, yüksek doğruluk ve verimlilik dengesiyle en avantajlı seçenek olarak öne çıkmaktadır.

Gerçek zamanlı nesne tespiti uygulamalarında hem hızlı hem de yüksek doğruluklu bir model gereksinimi söz konusu olduğunda, YOLOv5s en uygun seçenek olarak değerlendirilebilir. Özellikle, hafif yapısı ve dengeli doğruluk performansı sayesinde hem gömülü sistemler hem de düşük gecikme süresi gerektiren uygulamalarda kullanıma elverişlidir. Daha büyük modeller, teorik olarak daha yüksek doğruluk sunma potansiyeline sahip olsalar da, hesaplama gereksinimleri ve işlem süreleri nedeniyle pratik uygulamalarda her zaman en iyi seçim olmayabilirler.



Şekil 5. YOLOv5 Modellerinin Güven Skoru Karşılaştırması (Comparison of Confidence Scores of YOLOv5 Models)

Sigara içme davranışının tespitinde kullanılan farklı YOLOv5 modellerinin performansını değerlendirmek amacıyla yapılan karşılaştırmalar, model boyutunun ve eğitim süresinin güven skoru üzerindeki etkilerini ortaya koymaktadır. YOLOv5 ailesinin farklı versiyonları (s, x, m, l, n) aynı veri kümesi üzerinde 50 epoch boyunca eğitilmiş ve sonuçlar incelenmiştir. Buna ek olarak, YOLOv5s modeli 200 epoch boyunca eğitilerek daha uzun eğitim süresinin etkisi değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, modelin boyutu ve eğitimi süresi arttıkça tespit doğruluğunun her zaman artmadığını göstermektedir.

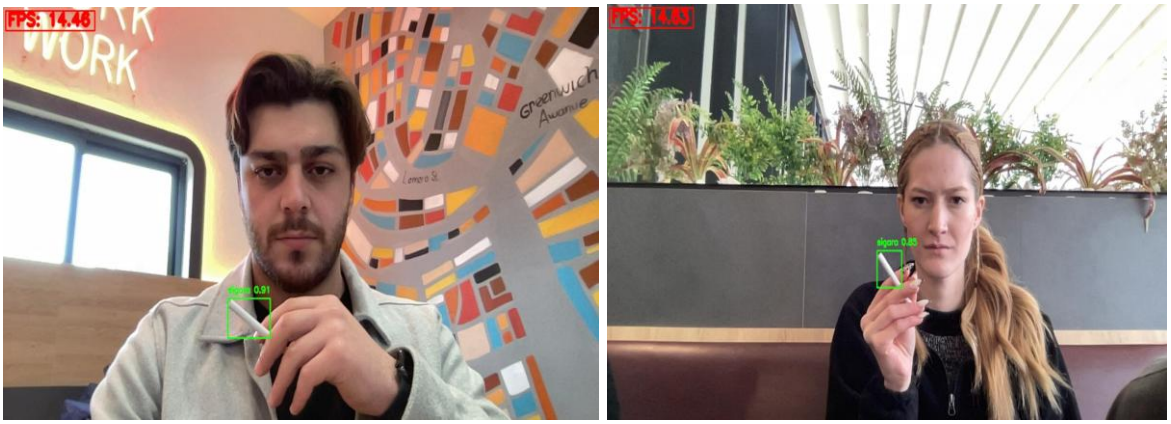
Örneğin, 50 epoch boyunca eğitilen YOLOv5s modeli 0.86 güven skoru ile en yüksek doğruluk oranını elde ederken, daha büyük modeller olan YOLOv5x ve YOLOv5m sırasıyla 0.85 ve 0.82 güven skorlarına ulaşmıştır. Daha küçük boyutlu YOLOv5n modeli ise 0.78 güven skoru ile en düşük doğruluk oranını vermiştir. Bu durum, büyük modellerin daha fazla parametre içermesine rağmen, belirli veri kümelerinde küçük ve optimize modellerin daha iyi genelleme yapabileceğini göstermektedir.

Ayrıca, eğitim süresinin tespit doğruluğu üzerindeki etkisi de analiz edilmiştir. 200 epoch boyunca

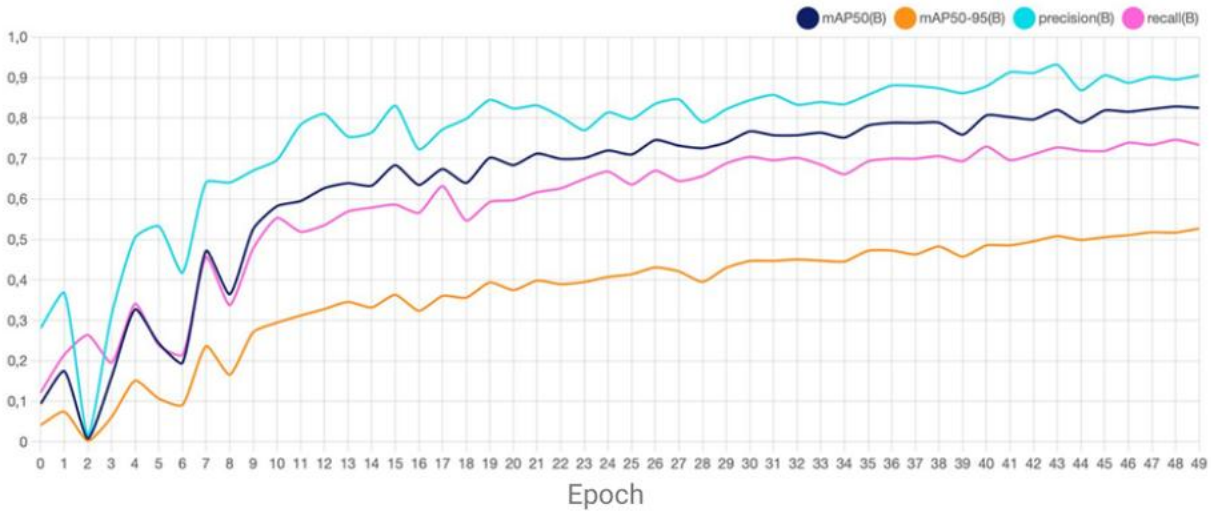
eğitilen YOLOv5s modeli, 50 epoch versiyonuna kıyasla daha düşük bir güven skoru (0.80) üretmiştir. Bu durum, fazla eğitimin modelin aşırı öğrenmesine (overfitting) neden olabileceğini ve genel performansını olumsuz etkileyebileceğini göstermektedir. Sonuçlar değerlendirildiğinde, 50 epoch eğitilmiş YOLOv5s modeli, yüksek güven skoru en verimli seçenek olarak öne çıkmaktadır.

Büyük modellerin doğruluk oranları benzer seviyelerde olsa da, yüksek donanım gereksinimleri nedeniyle gerçek zamanlı uygulamalarda dezavantajlı olabilirler.

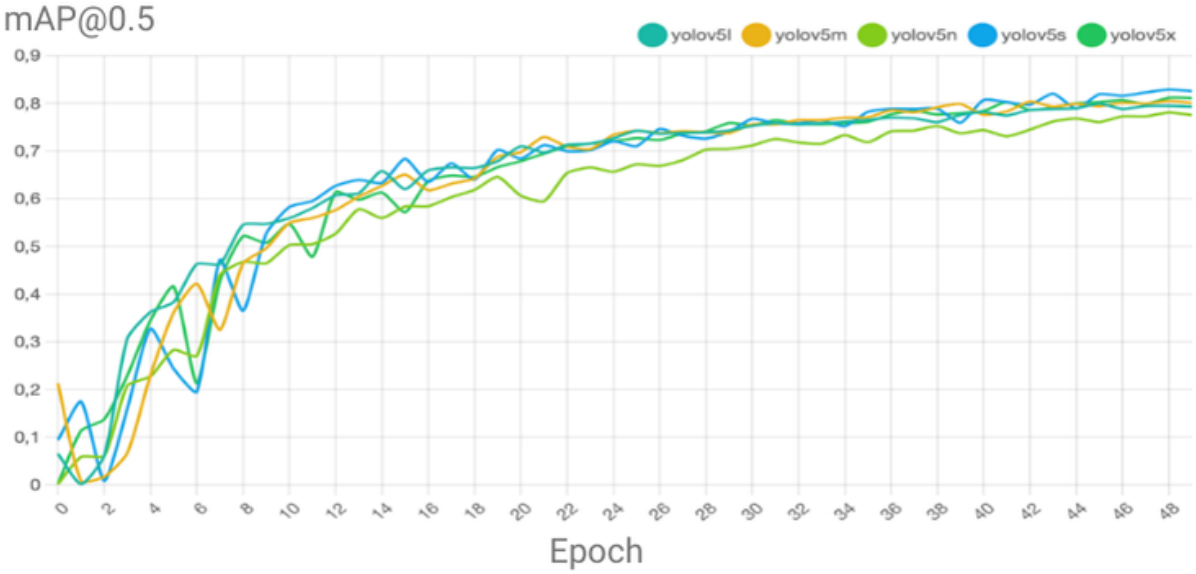
Bununla birlikte, modelin eğitim süresi dikkatli bir şekilde optimize edilmelidir. Bu karşılaştırmaya ilişkin tespit edilen güven skorları Şekil 5.'te gösterilmiştir. YOLOv5s modelinde hesaplanan diğer değerler de grafikler halinde (Şekil 7 veŞekil 8'de) aşağıda verilmiştir.



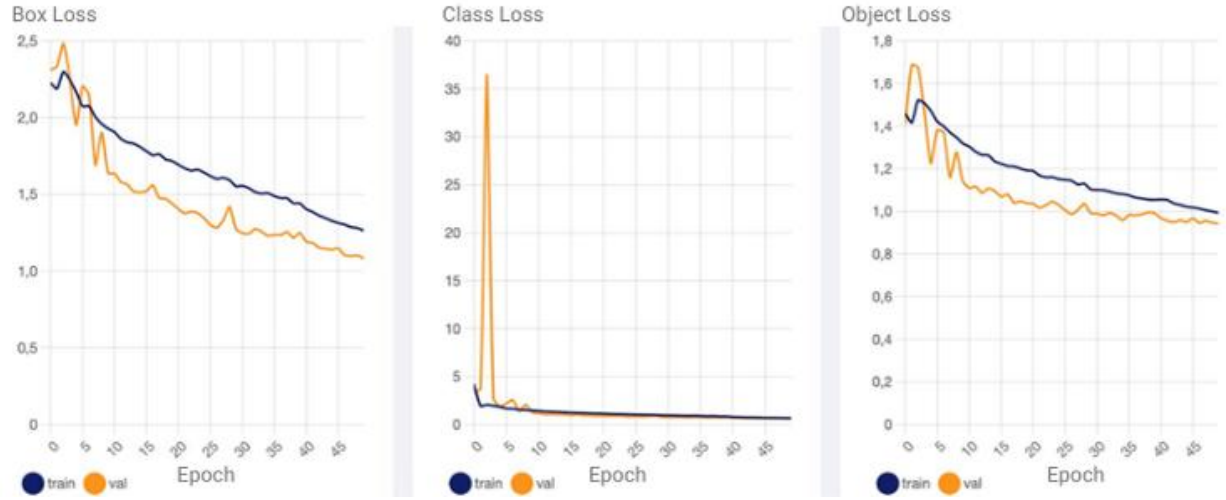
Şekil 6. FPS Değerleri (FPS Values)



Şekil 7. YOLOv5s Modelinin Analiz Grafiği (Analysis Graph of the YOLOv5s Model)



Şekil 8. YOLOv5 Versiyonlarının mAP@0.5 Değerlerinin Karşılaştırması
(Comparison of the mAP@0.5 Values of YOLOv5 Versions)



Şekil 9. Modelin Eğitim Sürecindeki Kayıplarının Grafiği (Graph of the Model's Losses During Training)

Şekil 9'da gösterilen grafik, YOLOv5s modelinin eğitim sürecine ait kayıp (loss) değerlerinin değişimini göstermektedir. Üç farklı kayıp türü analiz edilmiştir:

Box Loss (Kutu Kaybı) Modelin tahmin ettiği nesne kutularının doğru olup olmadığını gösterir. İlk epoch'ta eğitim kaybı yaklaşık 2.5, doğrulama kaybı ise 3.0 seviyesindedir.

İlk 10 epoch içinde eğitim kaybı 1.7 seviyesinde, doğrulama kaybı ise 1.3 seviyesine kadar düşmüştür. Son kısımlarda eğitim kaybı 1.1, doğrulama kaybı ise 0.9 civarına kadar düşmüştür. Eğitim ve doğrulama eğrileri birbirine yakın seyretmektedir, bu da modelin genelleme performansının iyi olduğunu gösterir.

Class Loss (Sınıf Kaybı) Modelin tahmin ettiği sınıf etiketlerinin doğruluğunu yansıtır. Bu değer genelde eğitim başlangıcında yüksektir eğitim ilerledikçe düşmesi beklenir. Düşen değer modelin nesneleri daha doğru sınıflandırdığını gösterir. İlk epoch'ta doğrulama kaybı 14.0, eğitim kaybı 4.0 seviyesindedir. İlk 5 epoch içinde doğrulama kaybı hızlı bir düşüşle 2.0 seviyesine gerilemiştir. Son epoch'ta eğitim kaybı 0.5, doğrulama kaybı ise 0.3 seviyelerine inmiştir.

Object Loss (Nesne Kaybı) Modelin nesneleri tespit etme başarısını gösterir. Düşen değer modelin nesneleri daha doğru sınıflandırdığını gösterir. Eğitim ve doğrulama kayıplarının yakın olması modelin iyi bir eğitim geliştirdiğini ve aşırı öğrenme (overfitting) sorunuyla karşılaşmadığını gösteriyor. Eğitim başlangıcındaki Yüksek kayıplar modelin öğrenme sürecinin henüzbaşında olduğunu ifade eder, bu da normal bir durumdur. İlk epoch'ta eğitim kaybı 1.8, doğrulama kaybı 2.0 seviyesindedir. İlk 10 epoch içinde eğitim kaybı 1.4, doğrulama kaybı ise 1.1 seviyelerinde gerilemiştir. Son epoch'ta eğitim kaybı 1.0, doğrulama kaybı ise 0.9 civarındadır.

Eğitim ve doğrulama eğrileri birbirine paralele ilerlemekte olup, modelin nesne varlık tespitinde istikrarlı bir öğrenme sağladığı görülmektedir. Tüm kayıpların zamanla azaldığı görülmektedir. Doğrulama kayıpları genellikle eğitim kayıplarından daha düşük olup, modelin aşırı öğrenme yaşamadığını göstermektedir. Sınıf kaybı en hızla azalan kayıp türüdür, bu da modelin sınıflandırmayı erken öğrenmeye başladığını göstermektedir.

2.4 Gerçek Zamanlı Görüntü Verisi ile Tespit (Detection with Real-Time Image Data)

Nesne tespiti sadece statik görüntülerle değil projenin de asıl amacı doğrultusunda gerçek zamanlı dinamik görüntüler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla bir kamera aracılığıyla elde edilen sürekli video akışı işlenmek üzere modele aktarılır. Canlı yayın verileriyle tespit modeli gerçek zamanlı olarak test etmek ve gerekli iyileştirmeleri sağlamak için önemlidir. Gerçek zamanlı görüntü verisi elde etmek ve anlık tespitler yapmak amacıyla bir telefon kamerası bilgisayara bağlanarak görüntü kaynağı olarak kullanılmıştır. Telefon kamerasının tercih edilme sebepleri yüksek çözünürlük sunması ve kolay erişilebilir olmasıdır. Telefon kamerasından alınan görüntüler bilgisayar üzerinde çalışan YOLOv5 modeline çerçeve bazlı (kare kare) aktarılmış ve işlenmiştir.

2.5 Kullanılan Kütüphaneler ve Amaçları (Libraries Used and Their Purposes)

Gerçek zamanlı nesne tespiti ve kullanıcıya sesli uyarı mekanizması sağlamak için Python kütüphanelerinden yararlanılmıştır [28]. Her kütüphanenin işlevi ve kod içerisindeki amacı açıklanmıştır.

OpenCV (cv2) dünyanın en büyük bilgisayar görme kütüphanesidir [29]. Bilgisayarlı görme ve görüntü işleme alanında yaygın olarak kullanılan açık kaynaklı bir kütüphanedir. OpenCV'nin temel amacı, kamera aracılığıyla gerçek zamanlı görüntü yakalamak ve bu görüntüler üzerinden işlem yapmaktır. Ultralytics YOLO [30] Ultralytics tarafından geliştirilen YOLO (You Only Look Once) kütüphanesi, derin öğrenme tabanlı nesne tespiti algoritmalarını kolayca kullanıma sunar. YOLO modelleri gerçek zamanlı sistemler için yüksek hız ve hassasiyet sunduğu için tercih edilmiştir. Pygame [31], bu çalışmada nesne tespitine dayalı olarak sesli uyarı mekanizmasını sağlamak için koda dahil edilmiştir. Ses dosyalarının yüklenmesi ve çalması gibi işlevleri üstlenmiştir. Time [32] modülü Python'da zaman ölçümü ve kontrolü yapmak amacıyla kullanılan standart bir kütüphanedir. Bu çalışmada tekrar eden nesne tespitlerinde sesli uyarıların çakışmaması için tercih edilmiştir.

2.6 Uyarı Sistemi (Warning System)

Uyarı sistemi, gerçek zamanlı nesne tespiti sürecine entegre edilerek sigara içme davranışlarının otomatik olarak tespitini ve buna bağlı olarak sesli uyarı verilmesini sağlamaktadır. Sistem, YOLOv5 tabanlı nesne tanıma modeli kullanılarak geliştirilmiştir. Süreç öncelikle input aşamasında bir görüntü kaynağından alınan verinin işlenmesiyle başlamaktadır.
Daha sonra görüntü YOLOv5 mimarisinin üç temel bileşeni olan Backbone, Neck ve Head

katmanlarından geçmektedir. Backbone katmanında görüntünün temel özellikleri (renk, kenar, doku vb.) çıkarılırken, Neck katmanı bu özellik haritalarını farklı ölçeklerde birleştirerek tespit performansını artırmaktadır. Head katmanı ise tespit edilen nesnelerin konum ve sınıf bilgilerinin çıkarıldığı son adımdır. Geliştirilen sistemin çalışma süreci Şekil A.'da gösterildiği gibidir. Model tarafından sigara içme eylemi tespit edildiğinde, sistem belirlenen güven eşiğini aşan nesneler için otomatik bir sesli uyarı mekanizmasını devreye sokmaktadır. Bu sayede, ihlalde bulunan bireylere doğrudan işitsel geri bildirim sağlanarak farkındalık artırılmaya çalışılmaktadır. Sistem, sesli uyarıları tetiklemek için Pygame kütüphanesini kullanmaktadır. Daha önceden hazırlanan ve mp3 formatında kayıtlı sesli uyarı dosyaları, modelin sigara tespitine bağlı olarak otomatik çalmaktadır. Kod yapısı, belirlenen güven eşiği (confidence threshold) aşıldığında ses dosyasını çalıştıracak şekilde tasarlanmıştır. Böylece yanlış pozitif (false positive) sonuçlar en aza indirgenmiş ve yalnızca yüksek doğrulukla tespit edilen durumlarda uyarı mekanizması devreye alınmıştır.

Bu sistem, sigara içmenin yasak olduğu veya denetlenmesi gereken kapalı alanlar ve kamuya açık tüm alanlarda etkili bir şekilde kullanılabilir. Gerçek zamanlı algılama ve sesli uyarı mekanizması sayesinde, dumansız hava sahalarının korunmasına katkı sağlamaktadır. Ayrıca sistemin otomatik çalışması, insan müdahalesi gerektiren geleneksel gözetim yöntemlerine gerek kalmadan hızlı ve etkin bir denetim süreci sunarak güvenlik ve halk sağlığı açısından önemli bir avantaj sağlamaktadır.

2.7 Ablasyon Çalışması: Veri Artırmanın Model Performansına Etkisi (Ablation Study: Effect of Data Augmentation on Model Performance)

Bu çalışma, YOLOv5s modeli kullanılarak sigara tespiti yapan bir nesne tanıma sisteminin performansının, veri artırma teknikleri ile nasıl etkilendiğini analiz etmektedir. Veri artırma tekniklerinin modelin doğruluk ve hata oranlarına etkisini incelemek amacıyla bir ablasyon çalışması gerçekleştirilmiştir. İlk olarak, YOLOv5 ailesine ait n, s, m, l ve x modelleri karşılaştırılmış ve en iyi performansı gösteren YOLOv5s modeli seçilmiştir. Bu seçimin ardından, ablasyon çalışması YOLOv5s modeli üzerinde gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda, ham veri modeli ve veri artırmalı model olarak iki farklı veri setiyle eğitilmiş YOLOv5s modelleri karşılaştırılmıştır. Ham Veri Modeli, herhangi bir veri artırma yöntemi uygulanmadan, yalnızca orijinal veri seti kullanılarak eğitilmiştir. Veri Artırmalı Model ise döndürme, ölçekleme, parlaklık değişimi ve gürültü ekleme gibi veri artırma teknikleri kullanılarak oluşturulan genişletilmiş veri seti ile eğitilmiştir. Bu karşılaştırma, veri artırma tekniklerinin modelin doğruluk seviyesini artırıp artırmadığını ve hata oranlarını düşürüp düşürmediğini belirlemek amacıyla yapılmıştır. Model performansları, ortalama ortalama hassasiyet (mAP), precision-recall analizi ve kayıp (loss) değerleri üzerinden değerlendirilmiştir.

2.7.1 Model Performans Karşılaştırması (Model Performance Comparison)

Tablo 2. Model Performans Metriklerinin Karşılaştırılması (Comparison of Model Performance Metrics)

Model	mAP@50	mAp@50-95
Ham Veri Modeli	%67.4	%42.1
Veri Arttırmalı Model	%84.7	%58.6

Model performansının temel ölçütlerinden biri olan mAP değerleri, veri artırmanın modelin doğruluğunu nasıl etkilediğini göstermek için tablo 2.'de gösterilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, mAP@50 değeri %17.3, mAP@50-95 değeri ise %16.5 artmıştır. Bu durum, veri artırmanın modelin genelleme kabiliyetini artırdığını ve daha doğru tahminlerde bulunmasını sağladığını göstermektedir.

2.7.2 Kesinlik-Duyarlılık Analizi (Precision-Recall Analysis)

Tablo 3. Precision ve Recall Analizi (Precision-Recall Analysis)

Model	Kesinlik (Precision)	Duyarlılık (Recall)
Ham Veri Modeli	%71.2	%63.5
Veri Arttırmalı Model	%82.9	%76.8

Precision ve recall değerleri, modelin doğru pozitifleri ve kaçırılan nesneleri belirlemedeki

etkinliğini göstermektedir. Bu değerler Tablo 3.'de gösterildiği gibidir. Precision değerinde %11.7, recall değerinde ise %13.3'lük bir artış gözlemlenmiştir. Bu bulgular, veri artırma tekniklerinin modelin hem yanlış pozitif oranını azalttığını hem de nesne kaçırma oranını düşürerek daha güvenilir hale getirdiğini ortaya koymaktadır.

2.7.3 Kayıp Değerlerin Karşılaştırılması (Loss Values Comparison)

Tablo 4. Kayıp Değerlerin Karşılaştırılması (Loss Values Comparison)

Model	Kutu Kaybı (Box Loss)	Sınıf Kaybı (Class Loss)	Nesne Kaybı (Object Loss)
Ham Veri Modeli	0.0645	0.0312	0.0921
Veri Arttırmalı Model	0.0482	0.0247	0.0789

Eğitim sürecinde izlenen Box Loss, Class Loss ve Object Loss değerlerinin kıyaslaması Tablo 4. 'de gösterilmiştir. Veri artırmalı modelin Box Loss değeri, ham veri modeline göre %25.2 oranında daha düşük bulunmuştur. Benzer şekilde, Class Loss değeri %20.8 oranında azalmış ve Object Loss değeri de %14.3 oranında düşmüştür. Bu sonuçlar, veri artırma tekniklerinin modelin daha stabil çalışmasına ve hata oranlarının azaltılmasına önemli bir katkı sağladığını ortaya koymaktadır.

2.7.4 Ablasyon Çalışması Sonuçları (Ablation Study Results)

Yapılan ablatif çalışmada, veri artırmanın modelin aşırı öğrenmesini (overfitting) engelleyerek daha stabil bir eğitim süreci sağladığı gözlemlenmiştir. Ham veriyle eğitilen modelin validasyon kaybı, veri artırma yapılan modele göre daha yüksek kalmış ve dolayısıyla test verisi üzerindeki performansı daha düşük olmuştur. Bu durum, veri artırmanın modelin genelleme kabiliyetini artıran bir etken olduğunu ortaya koymaktadır. Veri artırılmış model, eğitim setindeki varyasyonu artırarak modelin genelleştirme gücünü yükseltmiştir. Bu, modelin daha çeşitli örneklerle karşılaşarak daha sağlam bir öğrenme süreci geçirmesine olanak tanımaktadır. Özellikle Class Loss değerlerindeki dalgalanmanın, ham verilerle eğitilen modelde daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. Bu, veri artırmanın modelin daha tutarlı bir şekilde öğrenmesine katkıda bulunduğunu ve modelin hata oranlarını düşürdüğünü göstermektedir.

3. SONUÇLAR (RESULTS)

Bu çalışmada, sigara içme davranışının tespiti için derin öğrenme tabanlı bir nesne tanıma sistemi geliştirilmiştir. YOLOv5 mimarisi kullanılarak gerçek zamanlı nesne tespiti yapılmış ve modelin performansı, veri artırma teknikleri ile optimize edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, YOLOv5s modelinin sigara tespiti için en dengeli performansı sunduğunu göstermiştir. Model, 0.906 precision, 0.734 recall ve 0.825 mAP@0.5 değerleriyle yüksek doğruluk oranlarına ulaşmıştır. Ayrıca, veri artırma tekniklerinin uygulanması, modelin genelleme yeteneğini önemli ölçüde artırmış ve mAP@50 değerinde %17.3, precision değerinde %11.7 ve recall değerinde %13.3'lük bir iyileşme sağlamıştır. Bu bulgular, veri artırmanın modelin farklı çevresel koşullarda daha güvenilir tahminler yapmasına katkıda bulunduğunu ortaya koymaktadır.

Gerçek zamanlı tespit testleri, modelin dinamik görüntüler üzerinde de etkili bir şekilde çalıştığını göstermiştir. Telefon kamerasından alınan canlı video akışı üzerinde yapılan testlerde, model yüksek FPS değerleriyle (saniyede kare sayısı) tutarlı bir performans sergilemiştir. Bu durum, modelin gerçek zamanlı uygulamalarda kullanılabileceğini ve hızlı tepki süreleriyle çalışabileceğini kanıtlamaktadır. Ayrıca, geliştirilen sesli uyarı sistemi, modelin tespit ettiği sigara içme davranışlarına anında müdahale ederek, dumansız hava sahalarının korunmasına katkı sağlamaktadır.

Ablasyon çalışması sonuçları, veri artırma tekniklerinin modelin aşırı öğrenme (overfitting) riskini azalttığını ve eğitim sürecini daha stabil hale getirdiğini göstermiştir. Box Loss, Class Loss ve Object Loss değerlerindeki önemli düşüşler, modelin daha tutarlı bir öğrenme süreci geçirdiğini ve hata oranlarının azaldığını ortaya koymuştur. Özellikle Class Loss değerlerindeki dalgalanmaların azalması, modelin sınıflandırma performansının iyileştiğine işaret etmektedir.

Sonuç olarak, bu çalışma, YOLOv5 tabanlı bir nesne tanıma sisteminin sigara içme davranışının tespitinde etkili bir şekilde kullanılabileceğini göstermektedir. Modelin yüksek doğruluk oranları, gerçek zamanlı performansı ve veri artırma tekniklerinin sağladığı iyileştirmeler, bu tür sistemlerin halk sağlığı ve güvenlik uygulamalarında başarıyla kullanılabileceğini kanıtlamaktadır

4. SONUÇ (CONCLUSION)

Geliştirilen sistem, özellikle üniversite kampüsü, kamuya açık alanlar ve kapalı ortamlar gibi sigara içmenin yasak olduğu ortamlarda kullanılabilir bir performans göstermiştir. Bununla birlikte, sistemin esnek yapısı sayesinde fabrikalar, hastaneler, restoranlar gibi farklı mekanlara da uyarlanabilir olduğu düşünülmektedir. Bu durum, sigara içme davranışının kontrol altına alınması ve farkındalığın artırılması açısından geniş bir uygulama alanı sunmaktadır. Toplum sağlığını destekleyen teknolojik bir çözüm olarak tasarlanmış ve gerçek zamanlı performansıyla öne çıkmıştır. Sistem, sürdürülebilir kalkınma hedeflerinden 3. Hedef olan "Sağlık ve Kaliteli Yaşam" hedefine katkı sağlayabilecek bir adım olarak değerlendirilmiş ve topluma farkındalık yaratma amacıyla uygulanabilir olduğunu göstermiştir. Önerilen sistemin performansını ve uygulanabilirliğini artırmak için gelecekte farklı iyileştirmeler planlanabilir. Öncelikle, modelin doğruluk oranını artırmak amacıyla daha geniş ve çeşitli veri setleriyle eğitilmesi sağlanabilir. Böylece farklı hava koşulları, ışıklandırma ve ortam faktörlerinden bağımsız olarak sistemin güvenilirliği artırılabilir. Bunun yanı sıra, sistemin yalnızca sigara tespitiyle sınırlı kalmayıp duman algılama, sigara içme süresinin takibi gibi ek özellikler içermesi sağlanabilir. Bu sayede, yasaklı alanlardaki sigara içme davranışı daha kapsamlı bir şekilde analiz edilebilir. Ayrıca, sistemin farklı platformlarla entegrasyonu sayesinde daha geniş bir kullanım alanına yayılması hedeflenebilir. Gerçek zamanlı çalışmayı daha verimli hale getirmek için modelin mobil cihazlar ve gömülü sistemler üzerinde optimize edilmesi de önemli bir adımdır. Donanım gereksinimlerini minimize ederek sistemin düşük maliyetli çözümlerle uygulanabilirliği artırılabilir. Tüm bunların yanında sistemin etkisini değerlendirmek adına kullanıcı geri bildirimleri ve davranışsal analizlerle desteklenen kapsamlı saha testleri yapılabilir. Böylece, sigara içme davranışına yönelik farkındalık oluşturma potansiyeli daha iyi anlaşılabilir ve sistemin etkinliği konusunda daha güçlü veriler elde edilebilir. Bu öneriler doğrultusunda geliştirilecek yeni çalışmalar, sistemin daha yaygın kullanımını sağlayarak toplum sağlığına olan katkısını artırabilir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

Bu çalışma, TÜBİTAK 2209-A Üniversite Öğrencileri Araştırma Projeleri Destekleme Programı kapsamında proje numarası 1919B012203674 ile desteklenmeye değer bulunmuştur. TÜBİTAK'ın araştırmamıza sağladığı bu destek, bilimsel çalışma sürecimize katkı sunmuş ve araştırma motivasyonumuzu artırmıştır. Sağladığı değerli katkılar için TÜBİTAK'a teşekkür ederiz.

ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

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

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

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

Yazarlar çalışmaya eşit oranda katkı sağlamıştır.

The authors have contributed equally to the work.

***Nur Kuban* TORUN:** Araştırma probleminin tanımı ve araştırma sürecinin rehberliği, sonuçların değerlendirilmesi ve son düzenlemeleri gerçekleştirmiştir.

***Oğuzhan* TATLI:** Deneyleri yapmış, sonuçlarını analiz etmiş ve makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

***Merve* ÖNALAN:** Deneyleri yapmış, sonuçlarını analiz etmiş ve makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

She provided guidance during the research process, evaluated the results, and finalized the revisions.

They conducted the experiments, analyzed the results, and contributed to the writing process of the article.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

There is no conflict of interest in this study.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

[1] Albayrak Z, Konak Ö. (2022). "Tütün kullanımının çevresel zararları, pasif etkilenim ve üçüncü el sigara dumanı." Acar T, editör. Tütün Bağımlılığı ve Tedavisi. 1. Baskı. Ankara: Türkiye Klinikleri; p.78-82.

[2] WHO global report on trends in prevalence of tobacco use 2000-2025, fourth edition. WHO. [Son Erişim Tarihi: 20 Aralık 2024 https://www.who.int/publications/i/item/9789240039322]

[3] Türkiye Cumhuriyeti Sağlık Bakanlığı. (2023). "Hakkımızı Koruyalım." Havanı Koru, [Son Erişim Tarihi: 23 Aralık 2024 https://havanikoru.saglik.gov.tr/hakkimizi-koruyalim.html?utm_source]

[4] Halk Sağlığı Genel Müdürlüğü. (2019). "Dumansız hava sahası denetim sistemi nedir?" [Son Erişim tarihi: 23 Aralık 2024 https://tektiklabilgielinde.saglik.gov.tr/tutun-kullanimi/dumansiz-hava-sahasi-denetim-sistemi-nedir.html?utm_source]

[5] La Vigne, N. G., Lowry, S. S., Markman, J. A., & Dwyer, A. M. (2011). "Evaluating the use of public surveillance cameras for crime control and prevention." Urban Institute. [Son Erişim tarihi: 23 Aralık 2024 https://www.urban.org/sites/default/files/publication/27556/412403-evaluating-the-use-of-public-surveillance-cameras-for-crime-control-and-prevention.pdf]

[6] Tian, C., Xu, Z., Wang, L., and Liu, Y. (2023). "Arc fault detection using artificial intelligence: Challenges and benefits." Math. Biosci. Eng. vol. 20, pp 12404–12432. DOI:10.3934/mbe.2023552

[7] Wang Z, Lei L, Shi P. (2023). "Smoking behavior detection algorithm based on YOLOv8-MNC." Front Comput Neurosci, vol. 17, pp 1-14. DOI:10.3389/fncom.2023.1243779

[8] Khan, A., Elhassan, M. A. M., Khan, S., & Deng, H. (2025). "Deep learning-based smoker classification and detection: An overview and evaluation." Expert Systems with Applications, 267:126208. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2024.126208.

[9] Arıcı, F. N., & Orhan, H. (2024). "Farklı Derin Öğrenme Algoritmalarının Gerçek Zamanlı İHA Tespitine Etkileri." Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım Ve Teknoloji, 12(2), 691-706. https://doi.org/10.29109/gujsc.1406837

[10] Jang, H.Y.; Hwang, C.H. (2020). "Methodology for DB construction of input parameters in FDS-based prediction models of smoke detector." J. Mech. Sci. Technol. 34, 5327–5337. DOI:10.1007/s12206-020-1133-0

[11] Imtiaz, M.H.; Ramos-Garcia, R.I.; Wattal, S.; Tiffany, S.; Sazonov, E. (2019). "Wearable sensors for monitoring of cigarette smoking in free-living: A systematic review." Sensors , 19, 4678. DOI:10.3390/s19214678

[12] A. I. Khan and S. Al-Habsi, (2020). "Machine Learning in Computer Vision", Procedia Computer Science, vol. 167, pp 1444-1451. DOI:10.1016/j.procs.2020.03.355

[13] Tzu-Chih Chien, Chieh-Chuan Lin, and Chih-Peng Fan, (2020). "Deep Learning Based Driver Smoking Behavior Detection For Driving Safety." Journal of Image and Graphics, vol. 8, no. 1, pp. 15-20.

[14] C. Bahhar et al., (2023). "Wildfire and Smoke Detection Using Staged YOLO Model and Ensemble CNN," Electronics, vol. 12, no. 1. DOI:10.3390/electronics12010228

[15] Yücel, M., & Aksoy, B. (2024). "İnsansız Hava Aracı ile Yangın Bölgesinin Tespiti ve Müdahalesinin Yapay Zekâ ile Tahminlenmesi." Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 28(3), 559-569. DOI:10.19113/sdufenbed.1545887

[16] Huang, Jinfan & Li, Rong. (2023). "Smoking Driving Behavior Detection Based on Deep Learning." Academic Journal of Science and Technology. 5. 59-62.

DOI:10.54097/ajst.v5i2.6049

[17] Z. Zhang, H. Chen, R. Xiao, and Q. Li, (2021). "Research on smoking detectionbased on deep learning," Journal of Physics: Conference Series, vol.2024, no. 1, p. 012042.

DOI:10.1088/1742-6596/2024/1/012042

[18] Lakatos R, Pollner P, Hajdu A and Joo T (2024). "A multimodal deep learning architecture for smoking detection with a small data approach," Frontiers in Artificial Intelligence, vol. 7, p. 1326050. DOI:10.3389/frai.2024.1326050

[19] D. Zhang, C. Jiao and S. Wang, (2018) "Smoking Image Detection Based on Convolutional Neural Networks," IEEE 4th International Conference on Computer and Communications (ICCC), pp. 1509-1515. DOI:10.1109/CompComm.2018.8781009

[20] Y. Ma, J. Yang, Z. Li and Z. Ma, (2022). "YOLO-Cigarette: An effective YOLO Network for outdoor smoking Real-time Object Detection," in 2021 Ninth International Conference on Advanced Cloud and Big Data (CBD), pp. 121-126. DOI:10.1109/CBD54617.2021.00029

[21] W. Zhang, A. L. De Ocampo and R. Hernandez, (2024). "Detection of Smoking Behaviors Using Human Key Points and YOLOv8." in 2024 IEEE Cyber Science and Technology Congress (CyberSciTech), pp. 335-340. DOI:10.1109/CyberSciTech64112.2024.00059

[22] Xiangkui Jiang (2022). "A smoking behavior detection method based on the YOLOv5 network." J. Phys.: Conf. Ser. 2232 012001.

DOI:10.1088/1742-6596/2232/1/012001

[23] C. Bai, Y. Zhou and Q. Guo, (2022), "Application Study of Area-Based and YOLOv4 Smoking Behavior Detection," 2022 4th International Conference on Natural Language Processing (ICNLP), pp. 7-12.

[24] Singh, T. (2023). "Real Time Cigarette Detection using Deep Learning Models." International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology. pp 1946-1948.

[25] Roboflow, Roboflow: Build and deploy custom computer vision models. [Son Erişim Tarihi: 1 Aralık 2024, https://roboflow.com]

[26] Google Colab, Google Colaboratory, [Son Erişim Tarihi: 2 Aralık 2024, https://colab.research.google.com]

[27] A. Khan, S. Khan, B. Hassan, and Z. Zheng, (2022.) "CNN-based smokerclassification and detection in smart city application," Sensors, vol. 22, no. 3, p. 892.

DOI:10.3390/s22030892

[28] Python Software Foundation, Python Programming Language. Erişim Tarihi: 30 Kasım 2024, https://www.python.org

[29] Bradski, G. (2000) "The OpenCV Library." Dr. Dobb's Journal of Software Tools, 120; 122-125.

[30] Ultralytics, YOLOv5, [Son Erişim Tarihi: 1 Aralık 2024, https://ultralytics.com]

[31] Pygame, Pygame: Python Game Development, [Son Erişim Tarihi: 30 Kasım 2024, https://www.pygame.org]

[32] Python Software Foundation, time — Time access and conversions. Python Documentation. [Son Erişim Tarihi: 30 Kasım 2024, https://docs.python.org/3/library/time.html]

Gazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Dergisi
PART C: TASARIM VE TEKNOLOJİ

Gazi University
Journal of Science
PART C: DESIGN AND TECHNOLOGY

GU J Sci, Part C, 13(2): 763-776 (2025)

Topoloji Optimizasyonu ile Gemi Çift Dip Konstrüksiyonu Dolu Döşek Tasarım İyileştirilmesi

Ahmet Fatih YILMAZ[1*]

[1]*Karabuk University, Department of Mechanical Engineering, Karabuk, Turkey*

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 23/03/2025
Düzeltme: 10/05/2025
Kabul: 20/06/2025

Anahtar Kelimeler

Topoloji Optimizasyonu
Gemi Yapıları
Çift Dip Dolu Döşekler
Yapısal Ağırlık Azaltımı
Sonlu Elemanlar Analizi

Article Info

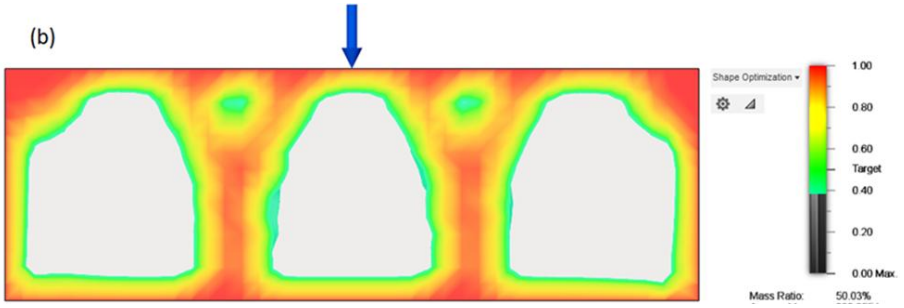
Research article
Received: 23/03/2025
Revision: 10/05/2025
Accepted: 20/06/2025

Keywords

Topology Optimization
Ship Structures
Double-Bottom Floors
Structural Weight Reduction
Finite Element Analysis

Grafik Özet (Graphical/Tabular Abstract)

Gemi çift dip dolu döşeklerinin topoloji optimizasyonu, ağırlığı %50 azaltırken gerilmeleri 150 MPa sınırı altında tutar; farklı genişlik ve kalınlıklarda en uygun açıklıkları belirler. / Topology optimization of ship double-bottom full floors reduces weight by 50 %, keeps stress under 150 MPa, and locates optimal openings for diverse widths, thicknesses.



Şekil: *3,6 metre genişlik optimizasyonları (a) 10 mm, (b) 20 mm, (c) 30 mm, (d) 40 mm. /* ***Figure:*** *Optimization results for 3.6-meter width: (a) 10 mm, (b) 20 mm, (c) 30 mm, and (d) 40 mm thicknesses.*

Önemli noktalar (Highlights)

- *%50 malzeme azaltımıyla optimize edilen dolu döşekler yapısal bütünlüğü korur / Topology-optimized full floors cut weight by 50 % while maintaining structural integrity.*
- *Tüm tasarımlarda Von Mises gerilmesi 150 MPa sınırının altındadır / All configurations keep Von Mises stress below the 150 MPa limit.*
- *Genişlik artışı açıklık sayısını, kalınlık artışı köşe yarıçaplarını büyütür / Wider floors require more openings, thicker plates demand larger corner radii.*
- *3,6 m genişlik-20 mm kalınlık-%50 korunum kombinasyonu en düşük gerilme ile en dengeli çözümdür / A 3.6 m width, 20 mm thickness, 50 % conservation model offers the most balanced performance.*

Amaç (Aim): *Gemi çift dip konstrüksiyonunda kullanılan dolu döşeklerin topoloji optimizasyonu ile %50'ye varan ağırlık azaltımı sağlarken 150 MPa gerilme sınırını aşmayan, genişlik ve kalınlığa uyarlanabilir tasarım çözümleri geliştirmek. / To develop adaptable design solutions for ship double bottom full floors through topology optimization, enabling up to 50% weight reduction without exceeding the 150 MPa stress limit.*

Özgünlük (Originality): *Literatürde ilk kez, genişlik (1,8–4,2 m) ve kalınlık (10–40 mm) değişimleri dikkate alınarak topoloji optimizasyonu yoluyla sistematik döşek hafifletmesi önerilmiş ve gerilme sınırları doğrulanmıştır. / For the first time, a systematic topology optimization-based lightening strategy for full floors is proposed across varying widths (1.8–4.2 m) and thicknesses (10–40 mm), with verified stress constraints.*

Bulgular (Results): *Açıklık sayısı genişlikle artarken, kalınlık arttıkça köşe yarıçapları büyümektedir. Tüm optimize tasarımlar 150 MPa altında kalmıştır. En iyi sonuç, 3,6 m genişlik ve 20 mm kalınlıkta %50 korunum oranıyla elde edilmiştir. / As width increases, more openings emerge; thicker plates yield larger corner radii. All optimized designs remained below 150 MPa. The best configuration was found at 3.6 m width, 20 mm thickness, and 50% material retention.*

Sonuç (Conclusion): *Topoloji optimizasyonu ile %50 hafifletilmiş döşek tasarımları, izin verilen gerilme seviyelerini aşmadan uygulanabilir. Çalışma, mühendislik ilkelerine dayalı hafiflik ve dayanım dengesini başarıyla sunmaktadır. / Topology-optimized 50% lighter full floor designs are feasible without exceeding allowable stress levels. The study successfully delivers a balance between lightness and strength based on engineering principles.*

*Corresponding author, e-mail: ahmetfatihyilmaz@karabuk.edu.tr
DOI: 10.29109/gujsc.1663786

GU J Sci, Part C, 13(2): 763-776 (2025)

Gazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Dergisi
PART C: TASARIM VE TEKNOLOJİ

Gazi University
Journal of Science
PART C: DESIGN AND TECHNOLOGY

http://dergipark.gov.tr/gujsc

Topoloji Optimizasyonu ile Gemi Çift Dip Konstrüksiyonu Dolu Döşek Tasarım İyileştirilmesi

Ahmet Fatih YILMAZ[1*]

[1]*Karabuk University, Department of Mechanical Engineering, Karabuk, Turkey*

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 23/03/2025
Düzeltme: 10/05/2025
Kabul: 20/06/2025

Anahtar Kelimeler

Topoloji Optimizasyonu
Gemi Yapıları
Çift Dip Dolu Döşekler
Yapısal Ağırlık Azaltımı
Sonlu Elemanlar Analizi

Öz

Bu çalışma, ticari gemi inşasında kullanılan dolu döşek elemanlarının topoloji optimizasyonu yoluyla yapısal ağırlıklarının azaltılmasını amaçlamaktadır. Gemilerde yaygın olarak kullanılan çelik levhalar, çeşitli açıklıklar eklenerek hafifletilmektedir. Ancak mevcut açıklık tasarımlarının çoğu deneyime dayalı olup, yapısal verimlilik açısından optimizasyona açıktır. Bu araştırmada, enine sistemli bir geminin çift dip yapısındaki dolu döşek elemanları için farklı genişlik (1,8–4,2 m) ve kalınlıklarda (10–40 mm) standart dışı açıklık tasarımları önerilmiştir. Autodesk Fusion 360 yazılımının şekil optimizasyonu modülü kullanılarak, yüksekliği 1200 mm olan levha modellerine bölgesel dip yükleri uygulanmıştır. Tüm analizlerde yapısal ağırlığın %50 azaltılması hedeflenmiştir. Optimizasyon sonuçları, her genişlik ve kalınlık için optimum açıklık sayısını ve geometrik düzenleri belirlemiştir. Ayrıca, optimize edilen tasarımlar statik gerilim analizleri ile değerlendirilmiş, maksimum gerilme bölgeleri ve büyüklükleri analiz edilmiştir. Sonuçlar, döşek genişliğinin artışıyla açıklık sayısının arttığını, kalınlığın artışıyla ise açıklık kenarlarında daha geniş köşe yarıçaplarının oluştuğunu göstermiştir. Tüm optimize edilmiş modellerde, maksimum gerilme değerleri izin verilen 150 MPa sınırının altında kalmıştır. Özellikle 3,6 m genişlik, 20 mm kalınlık ve %50 malzeme korunumuna sahip modelin en uygun çözümü sunduğu belirlenmiştir. Bu çalışma, gemi çift dip yapılarında dolu döşeklerin topoloji optimizasyonu ile hafifletilmesine yönelik önemli bulgular sunmaktadır.

Design Improvement of Solid Floor Structures in Ship Double Bottom Construction through Topology Optimization

Article Info

Research article
Received: 23/03/2025
Revision: 10/05/2025
Accepted: 20/06/2025

Keywords

Topology Optimization
Ship Structures
Double-Bottom Floors
Structural Weight Reduction
Finite Element Analysis

Abstract

This study aims to reduce the structural weight of full floor elements used in commercial ship construction through topology optimization. In shipbuilding, steel plates are commonly used, and weight reduction is achieved by incorporating various openings. However, most of the existing opening designs are based on empirical standards, which are open to further optimization in terms of structural efficiency. This research proposes non-standard opening designs for full floor elements within the double bottom structures of ships with transverse framing systems, considering different widths (1.8–4.2 m) and thicknesses (10–40 mm). Using the shape optimization module of Autodesk Fusion 360 software, plate models with a height of 1200 mm were subjected to localized bottom loads. All analyses targeted a 50% reduction in structural weight. The optimization results determined the optimal number of openings and their geometric configurations for each width and thickness. Additionally, the optimized designs were evaluated through static stress analysis, identifying the maximum stress regions and their magnitudes. The findings indicate that increasing the width of the floor element results in a higher number of openings, while increasing thickness leads to larger corner radii around the openings. In all optimized models, the maximum stress value remained below the allowable limit of 150 MPa. Notably, the model with a width of 3.6 m, a thickness of 20 mm, and 50% material conservation demonstrated the most favorable structural performance. This study presents valuable insights into the structural weight reduction of full floors within ship double bottom structures through topology optimization.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Gemi inşa sanayi, küresel ticaretin ve endüstriyel üretimin kritik bileşenlerinden biri olarak yüksek katma değer yaratan bir sektördür. Gemi yapım süreçleri, birçok mühendislik disiplinini ve farklı üretim teknolojilerini bir araya getirerek kompleks bir üretim yapısı oluşturur. Gemiler, taşıdıkları yük

*Corresponding author, e-mail: ahmetfatihyilmaz@karabuk.edu.tr
DOI: 10.29109/gujsc.1663786

miktarı ve operasyonel gereklilikler nedeniyle dayanıklı, hafif ve ekonomik açıdan verimli malzemelerle inşa edilmelidir. Ancak, geleneksel üretim yöntemleri ile gemi yapılarında kullanılan çelik levhalar çoğunlukla fazla malzeme tüketimine yol açmakta ve bu da yakıt tüketimini artırarak işletme maliyetlerini yükseltmektedir[1]. Bu durum, yapısal optimizasyon yöntemlerinin gemi mühendisliği alanında daha fazla önem kazanmasına neden olmuştur. Son yıllarda bilgisayar destekli mühendislik uygulamalarının gelişmesiyle birlikte gemi tasarım süreçlerinde sayısal analiz ve optimizasyon yöntemlerinin kullanımı yaygınlaşmıştır. Özellikle topoloji optimizasyonu, belirlenen yükleme koşulları altında malzeme kullanımını en verimli hale getirmeyi amaçlayan bir mühendislik yaklaşımıdır. Sonlu elemanlar yöntemi (FEM) tabanlı olarak yürütülen bu analizler, gereksiz malzeme kullanımını ortadan kaldırarak yapısal hafiflemeyi sağlarken, mukavemetin korunmasına da olanak tanır [2]. Gemi konstrüksiyonlarında, özellikle çift dip yapılarındaki dolu döşek elemanlarının tasarımında hafifletme açıklıkları kullanılarak hem üretim maliyetlerinin düşürülmesi hem de yakıt tüketiminin azaltılması hedeflenmektedir [3]. Gemi çift dip yapıları, mukavemet ve stabilite açısından kritik öneme sahip olup, balast tankları ve yakıt depolarını içeren ana taşıyıcı sistemlerden biridir. Çift dip konstrüksiyonunda bulunan dolu döşekler, geminin hem uzunlamasına hem de enine mukavemetini sağlayan temel elemanlar arasında yer alır[4]. Ancak, geleneksel tasarım yöntemleri genellikle yüksek malzeme tüketimine yol açarak geminin toplam ağırlığını artırmakta ve enerji verimliliğini düşürmektedir. Bu nedenle, çift dip konstrüksiyonlarında dolu döşeklerin optimizasyonu hem mühendislik hem de ekonomik açıdan önemli bir araştırma alanı olarak öne çıkmaktadır [5]. Literatürde, gemi yapılarında ağırlık azaltımı ve optimizasyon konularında çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Liu ve arkadaşları (2019), gemi gövdesinde bulunan mukavemet elemanlarının optimizasyonuna yönelik bir çalışma yaparak stiffner yerleşimlerini belirlemiştir [6]. Putra ve Kitamura (2021), üç aşamalı bir genetik algoritma kullanarak ambar kapağı ve stiffner düzenlemeleri üzerinde optimizasyon çalışmaları gerçekleştirmiştir [7]. Um ve Roh (2015), dökme yük gemilerinin ambar kapaklarında ağırlık azaltımına yönelik bir optimizasyon yöntemi önermiştir [8]. Kendibilir ve Kefal (2023), peridynamic tabanlı bir topoloji optimizasyonu yöntemi ile gemi kesit tasarımlarında yapısal iyileştirme sağlamıştır [9]. Guanxiang ve arkadaşları (2024), aerodinamik optimizasyon uygulayarak konteyner gemilerinde sürtünme direncini %20,67 oranında azaltmıştır [10]. Ayrıca, Sekulski (2020), yüksek hızlı alüminyum feribotların gövde tasarımında topoloji optimizasyonunun etkinliğini ortaya koymuştur [11]. Mevcut literatürde gemi konstrüksiyonlarının optimizasyonu ile ilgili birçok çalışma bulunmasına rağmen, çift dip yapılarında dolu döşek elemanlarının topoloji optimizasyonu ile hafifletilmesine yönelik kapsamlı bir araştırma yapılmadığı görülmektedir. Daha önceki çalışmaların büyük bir bölümü ambar kapakları, stiffner yerleşimleri veya genel gemi mukavemeti üzerine yoğunlaşmıştır [12]. Ancak, çift dip konstrüksiyonlarının doğrudan optimizasyonuna dair kısıtlı veri mevcuttur. Ayrıca, mevcut araştırmaların çoğu sadece sonlu elemanlar analizi tabanlı olup, üretim süreçlerinin fizibilitesi ve maliyet-etkinliği üzerinde detaylı çalışmalar içermemektedir [13]. Bu çalışmanın amacı, gemi çift dip konstrüksiyonunda dolu döşek elemanlarının topoloji optimizasyonu ile hafifletilmesi ve mukavemetin korunmasını sağlayacak alternatif tasarımların geliştirilmesidir. Çalışma kapsamında, farklı açıklık geometrileri ve boyutlarının dolu döşek üzerindeki etkileri analiz edilerek, optimum malzeme kullanımı sağlanacaktır. Fusion 360 yazılımı kullanılarak farklı boyut ve kalınlıklarda döşek modelleri oluşturulacak ve optimizasyon analizleri gerçekleştirilecektir. Elde edilen veriler, geleneksel tasarım yöntemleriyle karşılaştırılarak mühendislik açısından en uygun çözümler belirlenecektir.

Çalışmanın temel katkıları arasında, gemi çift dip konstrüksiyonlarında topoloji optimizasyonunun uygulanarak yapılan ilk kapsamlı araştırmalardan biri olması yer almaktadır. Yapısal hafifletme, mukavemetin korunması ve üretim maliyetlerinin azaltılması gibi faktörler göz önünde bulundurularak gerçekleştirilen optimizasyon analizleri, gelecekteki tasarım süreçlerine rehberlik edecek önemli bulgular sunacaktır. Bununla birlikte, çalışma kapsamında değerlendirilen optimizasyon teknikleri, yalnızca akademik bir araştırma olarak kalmayıp, endüstriyel ölçekte uygulanabilir bir yöntem olarak da değerlendirilecektir. Bu çalışmanın temel hipotezi, farklı genişlik ve kalınlık kombinasyonlarına sahip dolu döşek elemanlarında, topoloji optimizasyonu yöntemiyle %50'ye kadar malzeme azaltımı gerçekleştirilse dahi, elde edilen yapısal konfigürasyonların maksimum gerilme seviyelerinin gemi inşa mühendisliğinde kabul edilen 150 MPa sınır değerinin altında kalacağı yönündedir. Bu hipotez doğrultusunda yapılan optimizasyon ve gerilme analizleri, ağırlık

hafifletme ile yapısal bütünlük arasındaki dengeyi mühendislik temelli verilerle değerlendirmeyi amaçlamaktadır.

Takip eden bölümlerde, ilk olarak topoloji optimizasyonunun kuramsal temelleri ve gemi çift dip yapılarında dolu döşeklere uygulanma yöntemi açıklanacaktır. Ardından, farklı boyutlardaki dolu döşek elemanları üzerinde gerçekleştirilen topoloji optimizasyonu çalışmalarının sonuçları ve gerilme analizlerinin bulguları sunulacaktır. Son olarak, elde edilen bulguların değerlendirilmesi ve literatürdeki diğer çalışmalarla karşılaştırılması yapılarak çalışmanın genel sonuçlarına yer verilecektir.

2. MATERYAL VE METOD (MATERIALS AND METHODS)

2.1. Yapısal Optimizasyon (Structural Optimization)

Mühendislik uygulamalarında sistem verimliliğini artırmak amacıyla çeşitli optimizasyon yaklaşımları sıklıkla kullanılmaktadır. Ağırlığın azaltılması, yakıt tüketiminin düşürülmesi, mekanik dayanımın artırılması, yapısal ömrün uzatılması ve operasyonel hızın yükseltilmesi gibi hedefler, mühendislik tasarımlarında belirleyici rol oynamaktadır. Bu tür hedefler, matematiksel olarak birer amaç fonksiyonu olarak tanımlanmakta ve söz konusu fonksiyonlara etki eden tasarım değişkenlerinin uygun biçimde düzenlenmesiyle optimum çözümler elde edilmektedir [14].

Yapısal optimizasyon problemleri, matematiksel olarak amaç fonksiyonu, kısıt fonksiyonları ve tasarım değişkenlerinin tanımlandığı aşağıdaki genel denklemlerle 2.1, 2.2, ve 2.3'te gösterildiği gibidir [15].

Amaç fonksiyonu: $\varphi_o(p) = \min, \text{maks (hedef)}$ (2.1)

Kısıt fonksiyonu: $\varphi_i(p) \leq 0$ (2.2)

Tasarım alanı: $p^l \leq p_j \leq p^u$ (2.2)

Burada, $\varphi_0(p)$ optimize edilmek istenen performans fonksiyonunu temsil ederken, $\varphi_i(p)$ sistemin sınırlarını tanımlayan kısıt koşullarını ifade etmektedir. p_j ise optimize edilecek tasarım değişkenlerinden oluşan vektördür. optimizasyon

Yapısal türleri alttaki gibi sıralanabilir [16].

- Boyut optimizasyonu
- Şekil optimizasyonu
- Topoloji optimizasyonu

2.1.1. Boyut optimizasyonu (Size optimization)

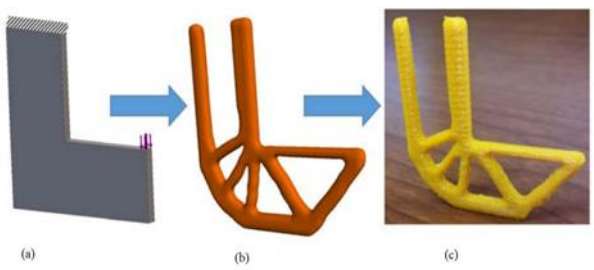
Boyut optimizasyonu, taşıyıcı yapı elemanlarının kalınlıkları, en-boy oranları ve kesit geometrileri gibi parametrelerin sistematik biçimde değiştirilmesi yoluyla gerçekleştirilen bir tasarım iyileştirme yöntemidir. Bu yaklaşımda, mevcut konstrüksiyon yapısı korunarak sadece belirli boyutsal değişkenler optimize edilmekte; böylece hem üretim süreçlerine müdahale edilmeden hem de mukavemet performansına doğrudan katkı sağlanmaktadır [17].

2.1.2. Şekil optimizasyonu (Shape optimization)

Şekil optimizasyonu, yapı elemanları üzerinde yer alan açıklıkların, eğimlerin veya kenar profillerinin biçimsel özelliklerinin yeniden düzenlenmesiyle gerçekleştirilir. Bu süreçte, tasarım geometrisi ardışık adımlarla evrimsel olarak değiştirilir ve böylece mekanik performansı maksimize edecek en uygun form elde edilmeye çalışılır [18].

2.1.3. Topoloji optimizasyonu (Topology optimization)

Topoloji optimizasyonu, bir yapının taşıyıcı elemanlarının yerleşim ve dağılım biçimini yeniden düzenleyerek, mukavemeti koruyacak şekilde malzeme kullanımını minimize etmeyi amaçlayan ileri düzey bir mühendislik yöntemidir. Bu analiz sürecinde, yapı için belirlenen yükleme ve sınır koşulları doğrultusunda tanımlı bir tasarım alanı oluşturulur. Optimizasyon yazılımı, matematiksel algoritmalar yardımıyla bu alandaki malzeme dağılımını iteratif olarak düzenleyerek en verimli taşıyıcı yapı konfigürasyonunu ortaya çıkarır. Tasarım bölgesi içinde gerçekleştirilen bu evrimsel süreç, yapının geometrisinin optimizasyon hedefi doğrultusunda sürekli olarak yeniden şekillenmesini sağlar. Söz konusu dönüşüm sürecine ait temsili bir örnek Şekil 1'de sunulmuştur [19].



Şekil 1. (a) Tasarımın ham modeli, (b) Topoloji optimizasyonu tasarımı, (c) Eklemeli imalat yöntemi ile üretilen ürün [19]. ((a) Raw design model, (b) Topology optimized design, (c) Manufactured part using additive manufacturing method [19].)

Topoloji optimizasyonu süreci sonucunda elde edilen nihai yapı, başlangıçtaki hacimsel formdan büyük ölçüde farklılık göstermektedir. Bu süreçte, Von Mises akma kriteri esas alınarak yapının dayanım sınırları gözetilmiş ve optimizasyon işlemleri bu sınırlar içerisinde gerçekleştirilmiştir. Uygulanan işlem basamakları aşağıdaki gibi özetlenebilir [20].

1. Model, uygun çözünürlükte bir sonlu elemanlar ağı (mesh) ile bölgelere ayrılır.
2. Tanımlanan yükleme ve sınır koşulları altında statik gerilme analizi gerçekleştirilir.
3. Her elemanın Von Mises kriterine göre taşıdığı maksimum gerilme değeri hesaplanır.
4. Gerilme seviyesinin düşük olduğu belirli oranlardaki elemanlar, taşıma katkısının sınırlı olması nedeniyle tasarım bölgesinden çıkarılır.
5. Belirlenen hedef (örneğin %50 malzeme azaltımı) sağlanıncaya kadar, analiz ve elime adımları döngüsel olarak tekrarlanır.

Bu süreç sonucunda ortaya çıkan tasarım, taşıyıcı özelliklerini koruyarak minimum malzeme ile optimum mekanik performans sergileyen bir yapı formuna dönüşmektedir.

Gerilme analizleri ve topoloji optimizasyonları, Autodesk Fusion 360 yazılımının "Shape Optimization" ve "Static Stress Analysis" modülleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Tüm modeller, üç

boyutlu analiz için uygun olacak şekilde quadratic (ikinci dereceden) tetrahedral elemanlar ile sonlu eleman ağına bölünmüştür.

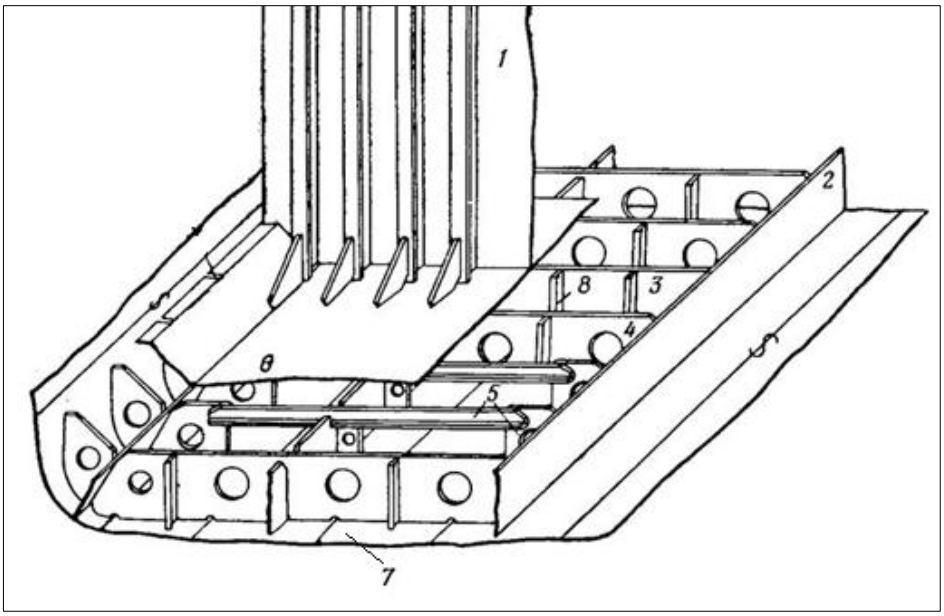
Ortalama ağ yoğunluğu 1 mm civarında tutulmuş olup, her modelin eleman sayısı yaklaşık 85.000 ile 130.000 arasında değişmektedir. Kritik bölgelerde daha yüksek çözünürlük elde etmek amacıyla yazılımın otomatik adaptif mesh rafinasyon algoritması etkinleştirilmiştir.

Gerilme analizi sırasında kullanılan çözüm algoritması, Fusion 360 yazılımına entegre edilmiş doğrusal statik analiz çözücüsüdür. Bu çözücü, Newton-Raphson tabanlı iteratif yöntem kullanarak, Von Mises gerilme dağılımını çözümlemekte ve her bir eleman üzerindeki maksimum gerilme seviyelerini belirlemektedir.

Sonuçların sayısal doğruluğu, ağ yoğunluğu artışıyla test edilmiş ve tüm modellerde gerilme değişiminin %5'in altında olduğu doğrulanarak mesh konverjansı sağlanmıştır. Bu yaklaşım, analiz sonuçlarının sayısal kararlılığını ve tekrarlanabilirliğini garanti altına almaktadır.

2.2. Dolu Döşek (Solid Floor)

Dolu döşekler, gemi dip konstrüksiyonunda enine doğrultuda konumlandırılmış, genellikle düz levha formundaki mukavemet elemanlarıdır. Bu yapılar, geminin taşıyıcı iskeleti içerisinde hem enine hem de uzunlamasına yönde yük aktarımını sağlayarak yapısal bütünlüğün korunmasına katkıda bulunurlar. Dolu döşek elemanları çoğunlukla sac malzemeden kesilerek üretilmekte ve kaynaklı birleşim teknikleriyle dip yapısına entegre edilmektedir [21].



Şekil Error! No text of specified style in document.. Enine sistem gemi dip konstrüksiyonu 1: Enine perde, 2: Merkez omurga, 3: Su geçmez döşek, 4: Dolu döşek, 5: Boş döşek 6: İç dip kaplama, 7: Dış kaplama, 8: Stifner. (Transverse system of ship bottom structure: 1. Transverse bulkhead, 2. Center girder, 3. Watertight floor, 4. Solid floor, 5. Open floor, 6. Inner bottom plating, 7. Outer bottom plating, 8. Stiffener.)

Şekil 2'de gösterildiği üzere, 4 numarayla belirtilen dolu döşekler, boyuna doğrultudaki omurga elemanları arasında yer almakta ve dip konstrüksiyonun rijitliğini artırmaktadır. Gemi dip yapısı genellikle yakıt ve balast tankları gibi sıvı taşıyan bölümleri içermektedir. Bu tankların hacimsel etkinliğini artırmak ve içerisindeki sıvıların serbest dolaşımını sağlamak amacıyla dolu döşek elemanlarında stratejik açıklıklar tasarlanmaktadır. Söz konusu açıklıklar, aynı zamanda balast sistemleri ve bakım erişimi için boru geçişlerine ve insan dolaşımına olanak tanıyacak şekilde belirli bir minimum boyutta planlanmak zorundadır.

Yapılan bu açıklıklar sadece işlevsellik açısından değil, aynı zamanda yapısal hafifletme ve üretim verimliliği gibi mühendislik hedefleri doğrultusunda da önem arz etmektedir. Bu bağlamda, açıklık geometrilerinin ve yerleşim düzenlerinin optimizasyonu, dolu döşeklerin hem mekanik performansını hem de üretim maliyetlerini doğrudan etkileyen temel bir tasarım parametresi haline gelmektedir.

Tüm analizlerde, 1200 mm yüksekliğe ve değişken genişlik/kalınlık kombinasyonlarına sahip sac modeller üzerinde topoloji optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Modellerin üst kenarının iç yüzeyine, dikey yönde etki eden 0,3 MPa büyüklüğünde yayılı yüzey yükü uygulanmıştır. Bu yükleme, gemi dip yapısında yer alan sıvı tanklarının operasyonel durumlarda oluşturduğu hidrostik etkiyi temsil etmektedir.

Sınır koşulları bakımından, alt kenar boyunca tüm yer değiştirmeler sabitlenmiş, yan kenarlarda ise sadece dikey hareket engellenmiştir; böylece enine rijitlik korunurken yatay yönde doğal deformasyon iznine olanak tanınmıştır. Bu tanımlamalar, gemi dip konstrüksiyonundaki gerçek bağlama koşullarını sayısal model üzerinde doğru şekilde temsil etmeyi amaçlamaktadır.

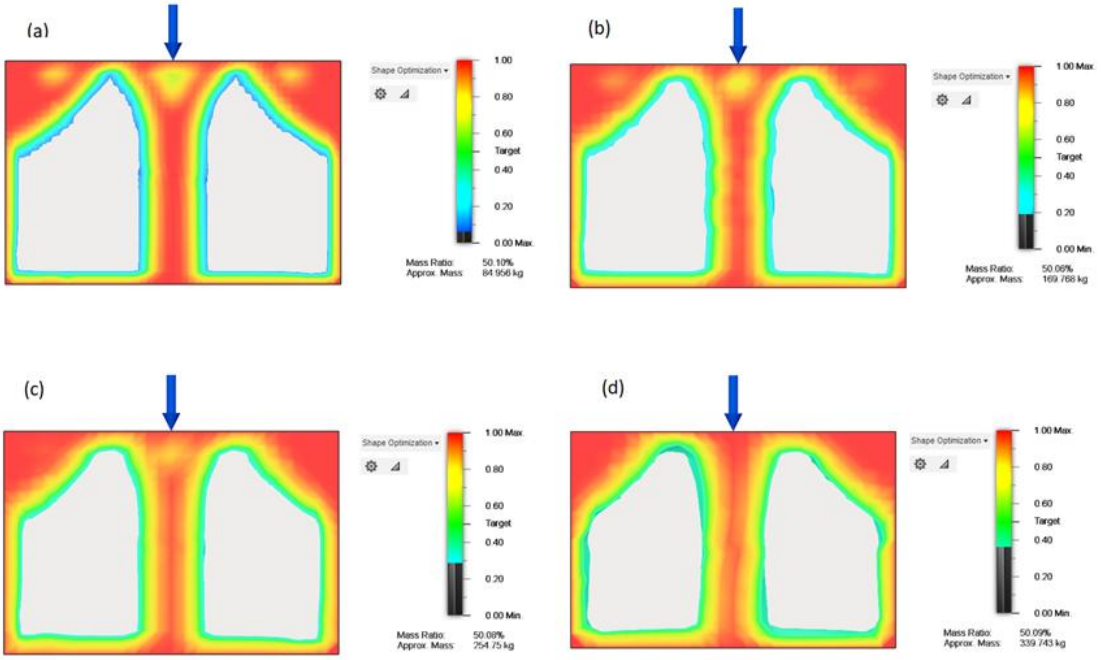
Gerilme analizlerinde, optimizasyon sonucunda elde edilen tasarımların yapısal yeterliliği, Von Mises kriterine göre 150 MPa'lık sınır değerin aşılmaması esas alınarak değerlendirilmiştir. Bu sınır değer, karbon çeliği esaslı denizcilik yapılarında kullanılan tipik akma mukavemeti (~250 MPa) baz alınarak, güvenlik katsayısı ≥1,6 olacak şekilde belirlenmiş ve DNV-GL ve ABS gibi klas kuruluşlarının mühendislik tasarım kriterlerine dayandırılmıştır (bkz. DNV-RP-C203 Fatigue Design of Offshore Steel Structures, ABS Steel Vessel Rules, Part 4, Chapter 3: Hull Structures).

3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

Bu çalışmada, yüksekliği 1,2 metre olan bir çift dip konstrüksiyonunda kullanılmak üzere tasarlanan dolu döşek elemanı üzerinde topoloji optimizasyonu analizleri gerçekleştirilmiştir. Analizler kapsamında, levha kalınlığı 10 mm, 20 mm ve 30 mm olmak üzere üç farklı değer olarak seçilmiştir. Her bir kalınlık değeri için döşek genişlikleri 1,8 metre, 2,4 metre, 3,0 metre ve 3,6 metre olacak şekilde ayrı ayrı değerlendirilmiştir. Tüm optimizasyon analizleri, Autodesk Fusion 360 yazılımının şekil optimizasyonu modülü kullanılarak yürütülmüştür. Bu analizlerde, başlangıç koşulu olarak yapısal ağırlıkta %50 oranında bir azaltım hedeflenmiştir. Topoloji optimizasyonu sonuçları doğrultusunda, yazılım tarafından her bir döşek genişliği için önerilen optimum açıklık sayısı ile bu açıklıkların geometrik konfigürasyonları belirlenmiş ve değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, farklı kalınlık ve genişlik değerleri için optimum tasarım önerilerinin karşılaştırılmasına olanak sağlamıştır.

3.1.1. Konfigürasyon I: 1,8 metre genişlik (Configuration I: 1.8 m width)

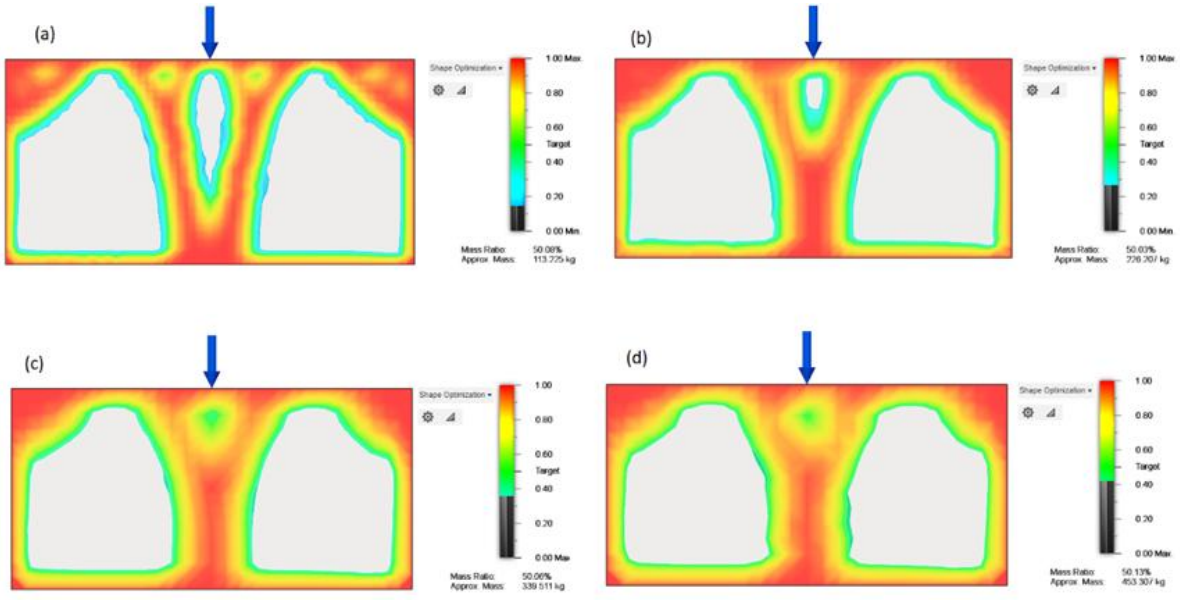
Şekil 3'te görüldüğü üzere, 1,8 metre genişliğindeki döşekler için sırasıyla 10 mm, 20 mm, 30 mm ve 40 mm kalınlıklarda gerçekleştirilen optimizasyon sonuçları incelendiğinde, malzeme üzerinde iki adet açıklığın oluştuğu tespit edilmiştir. Yayılı kuvvetin uygulandığı üst kenarın alt bölgesinde, köprü taşıyıcı konstrüksiyonuna benzer bir yapı oluşturulduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca, malzeme kalınlığı arttıkça köşe bölgelerinde yer alan yarıçapların büyüdüğü; buna karşın, kalınlığın azalması durumunda ise daha keskin hatların elde edildiği dikkat çekmektedir.



Şekil 3. 1,8 metre genişlik optimizasyonları (a) 10 mm, (b) 20 mm, (c) 30 mm, (d) 40 mm. (Optimization results for 1.8-meter width: (a) 10 mm, (b) 20 mm, (c) 30 mm, and (d) 40 mm thicknesses.)

3.1.2. Konfigürasyon II: 2,4 metre genişlik (Configuration II: 2.4 m width)

Şekil 4'te görüldüğü üzere, 2,4 metre genişliğindeki döşek için gerçekleştirilen optimizasyon çalışmalarında da benzer sonuçlara ulaşılmıştır. Ancak, 10 mm ve 20 mm kalınlığa sahip döşeklerde, en alt kenara kadar uzanmayan küçük açıklıkların oluşturulduğu dikkati çekmektedir. Ayrıca, 1,8 metre genişliğindeki döşekte olduğu gibi, kalınlık arttıkça köşe yarıçaplarının da büyüdüğü gözlemlenmiştir. Mesnet kenarları olarak kullanılan alt ve yan kenarlarda ise döşek kalınlığının artışıyla birlikte daha fazla hacmin korunduğu tespit edilmiştir.

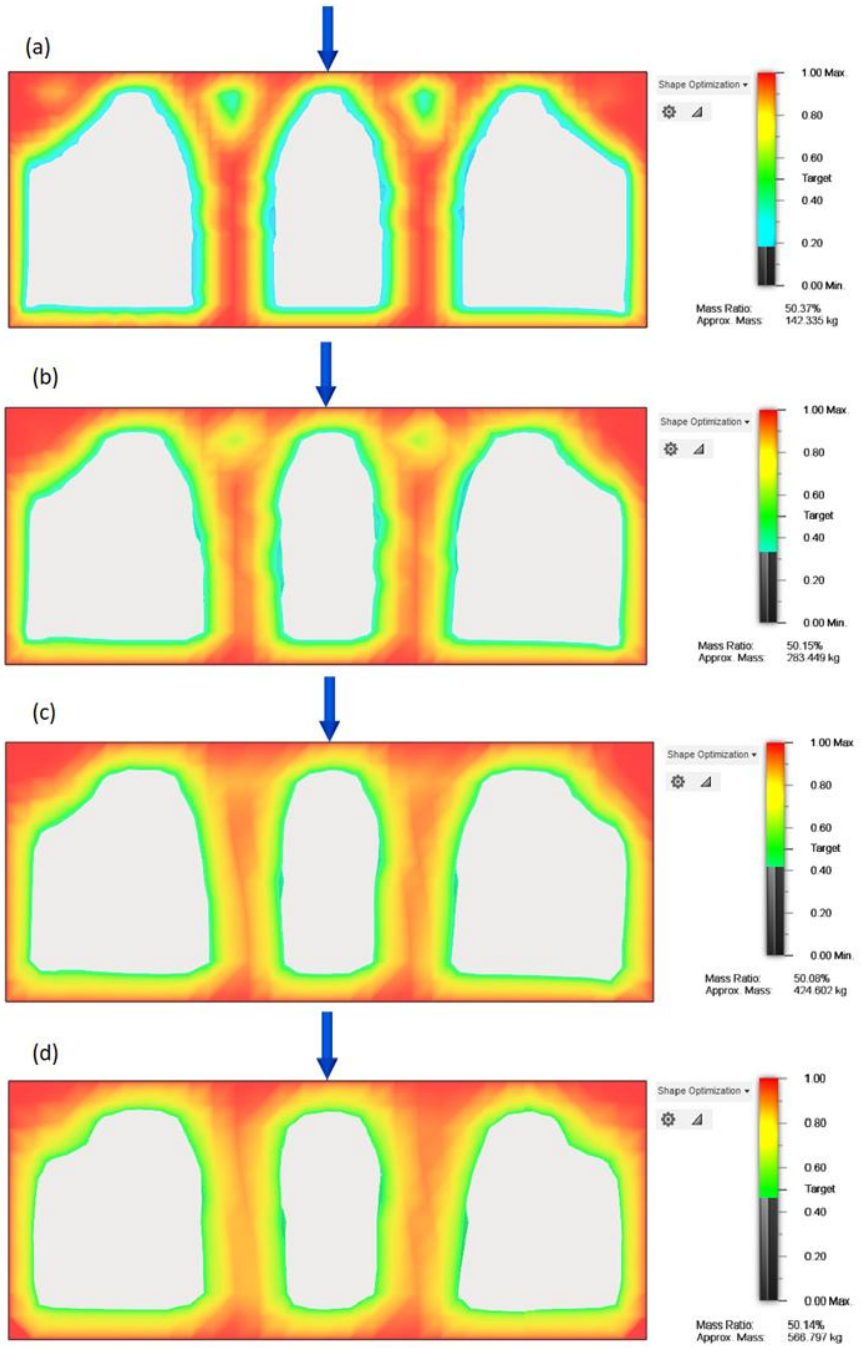


Şekil 4. 2,4 metre genişlik optimizasyonları (a) 10 mm, (b) 20 mm, (c) 30 mm, (d) 40 mm. (Optimization results for 2.4-meter width: (a) 10 mm, (b) 20 mm, (c) 30 mm, and (d) 40 mm thicknesses.)

3.1.3. Konfigürasyon III: 3 metre genişlik *(Configuration III: 3.0 m width)*

3 metre genişlikteki döşek için yapılan optimizasonda her kalınlık için 3 adet açıklık oluşturulduğu ve yanlarda yer alan açıklıkların daha büyük olduğu Şekil 5'te görülmektedir. Diğer

genişliklerdeki analizlerde de olduğu gibi 3 metrelik döşektede yayılı kuvvetin uygulandığı kenarın altına köprü taşıyıcı yapı benzeri şekil oluşturmuştur. Sağ ve sol üst köşelerde de yükleme ve mesnet belirtilen kenarlar sebebiyle üst yapı, ankastre mesnet benzeri bir zorlanmaya maruz kalmış gibi görselleştirmiştir. Malzeme korunurluğu %50 nin altına düşürülürse, 10 mm kalınlığındaki sacda ortada korunan kolon benzeri yapıların üst bölgelerinde açıklık açılabileceği renk skalasından anlaşılmaktadır. Diğer genişliklerdeki optimizasyonlarda olduğu gibi 3 metrelik döşek optimizasyonunda da kalınlık arttıkça köşe yarıçapları artmaktadır ve yan ve alt mesnet kenarlarında korunan hacim miktarı artmaktadır.

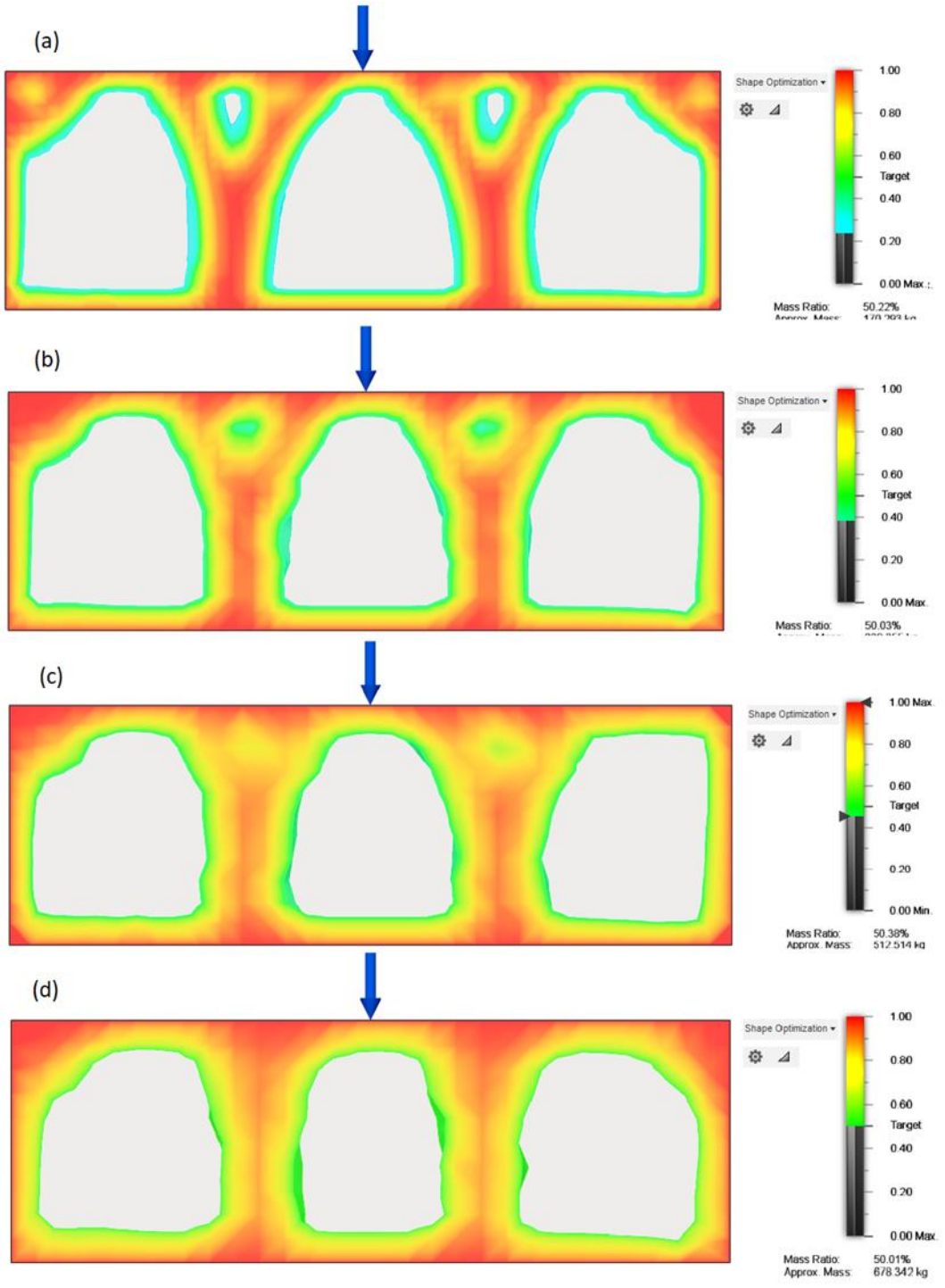


Şekil 5. 3 metre genişlik optimizasyonları (a) 10 mm, (b) 20 mm, (c) 30 mm, (d) 40 mm. (Optimization results for 3.0-meter width: (a) 10 mm, (b) 20 mm, (c) 30 mm, and (d) 40 mm thicknesses.)

3.1.4 Konfigürasyon IV: 3,6 metre genişlik (Configuration IV: 3.6 m width)

3,6 metre genişliğindeki döşek üzerinde yapılan optimizasyon çalışmaları sonucunda, boyutları birbirine yakın 3 adet açıklık içeren bir yapı düzeninin ortaya çıktığı gözlemlenmiştir. Diğer

genişliklerdeki döşek analizlerinde olduğu gibi, ince saclarda köprü kolonlarına benzer yapıların oluşturulduğu Şekil 6'da görülmektedir. Ancak, döşek kalınlığı arttıkça boşluklar ile kolonların alt ve üst kısımlarının birbirine benzemeye başladığı tespit edilmiştir. Bu durum, döşeklerin yatay eksene göre simetrik bir yapı kazandığını göstermektedir. .

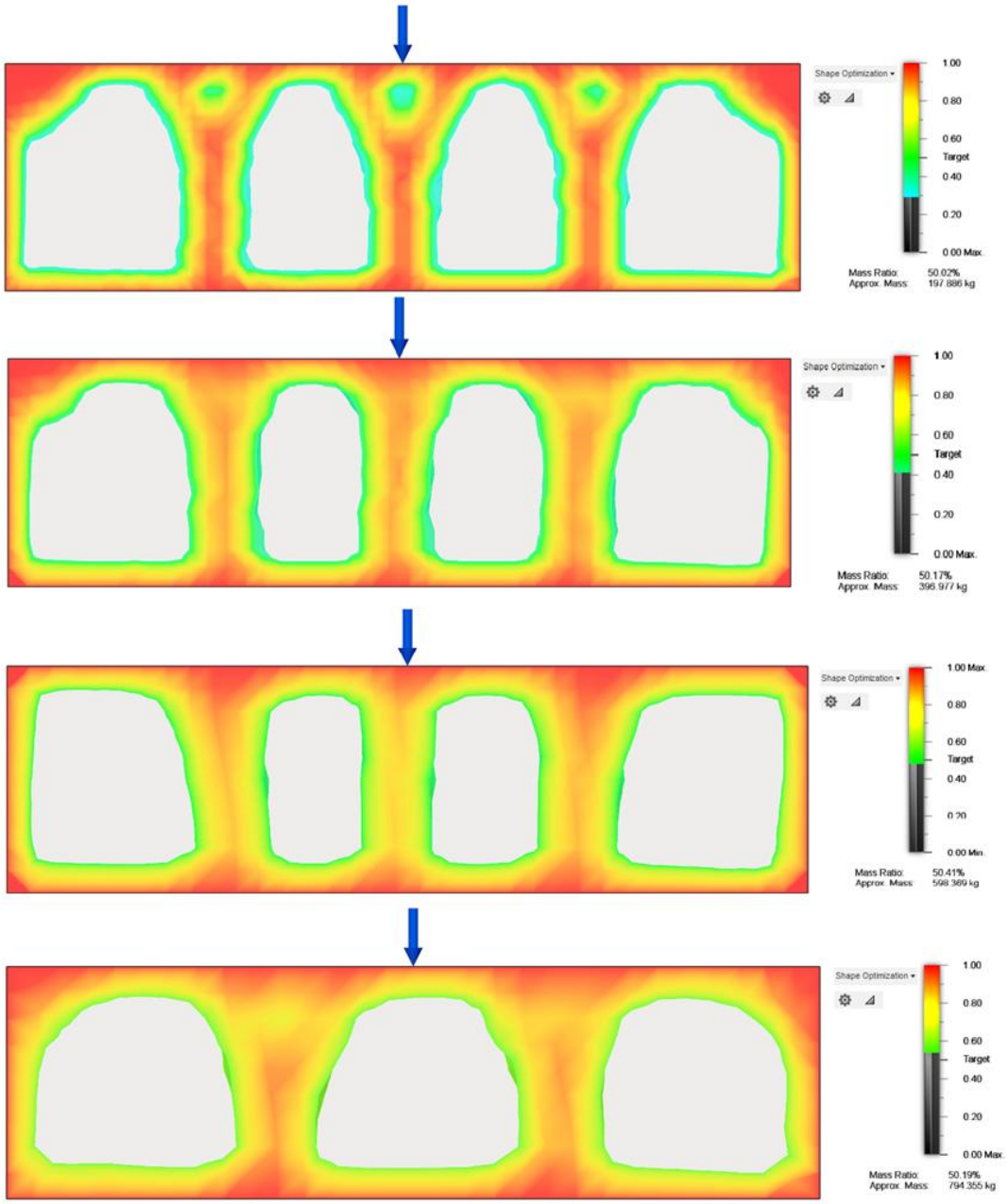


Şekil 1. 3,6 metre genişlik optimizasyonları (a) 10 mm, (b) 20 mm, (c) 30 mm, (d) 40 mm. (Optimization results for 3.6-meter width: (a) 10 mm, (b) 20 mm, (c) 30 mm, and (d) 40 mm thicknesses.)

10 mm kalınlıktaki optimizasyonda orta kolon yapıların üst tarafında açıklıklar önerilmektedir. Diğer döşek analizlerindeki gibi yine kalınlık arttıkça açıklıklardaki yarıçaplar büyümektedir.

3.1.5. Konfigürasyon V: 4,2 metre genişlik
(Configuration V: 4.2 m width)

.



Şekil 2. 4,2 metre genişlik optimizasyonları (a) 10 mm, (b) 20 mm, (c) 30 mm, (d) 40 mm. (Optimization results for 4.2-meter width: (a) 10 mm, (b) 20 mm, (c) 30 mm, and (d) 40 mm thicknesses.)

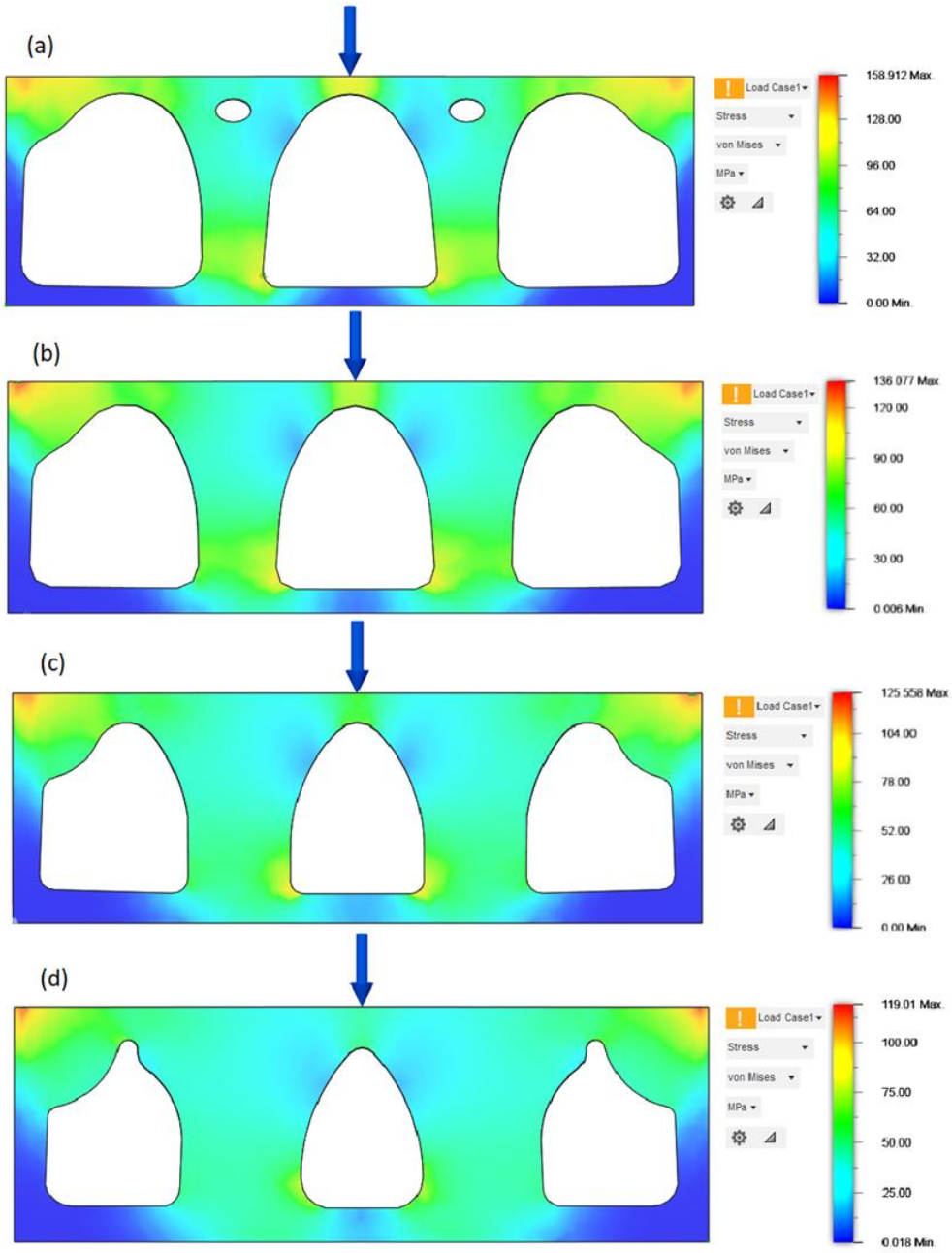
3.2. Dolu Döşek Gerilme Analizleri (Stress Analyses of Solid Floors)

Bu çalışmada, farklı genişliklerdeki (1,8 m, 2,4 m, 3 m, 3,6 m ve 4,2 m) dolu döşek elemanları üzerinde %50 hacim korunumuna göre topoloji optimizasyonları gerçekleştirilmiştir. Bununla birlikte, yalnızca 3,6 m genişliğindeki döşek elemanı için 20 mm ve 30 mm kalınlıklarına sahip modeller üzerinde, topoloji optimizasyonu tarafından önerilen farklı malzeme korunum oranları (%40, %50, %60 ve %70) kapsamında gerilme analizleri yapılmıştır. Elde edilen analiz sonuçları, farklı malzeme korunum seviyelerinin yapısal performansa etkilerini karşılaştırmalı olarak incelemek amacıyla değerlendirilmiştir.

3.2.1. Konfigürasyon IV: 3,6 metre genişlik ve 20 mm döşek gerilme analizleri (Configuration IV: stress analyses of 3.6 m width and 20 mm floor thickness)

3,6 m genişliğindeki döşek için farklı malzeme korunum oranlarına sahip tasarımların gerilme analizleri Şekil 8'de gösterilmiştir. Her bir analiz görselinin yanında verilen renk skalası, yapının farklı bölgelerinde oluşan gerilme değerlerinin yaklaşık büyüklüklerini göstermektedir. %40 malzeme korunum oranına sahip ilk tasarım dışında,

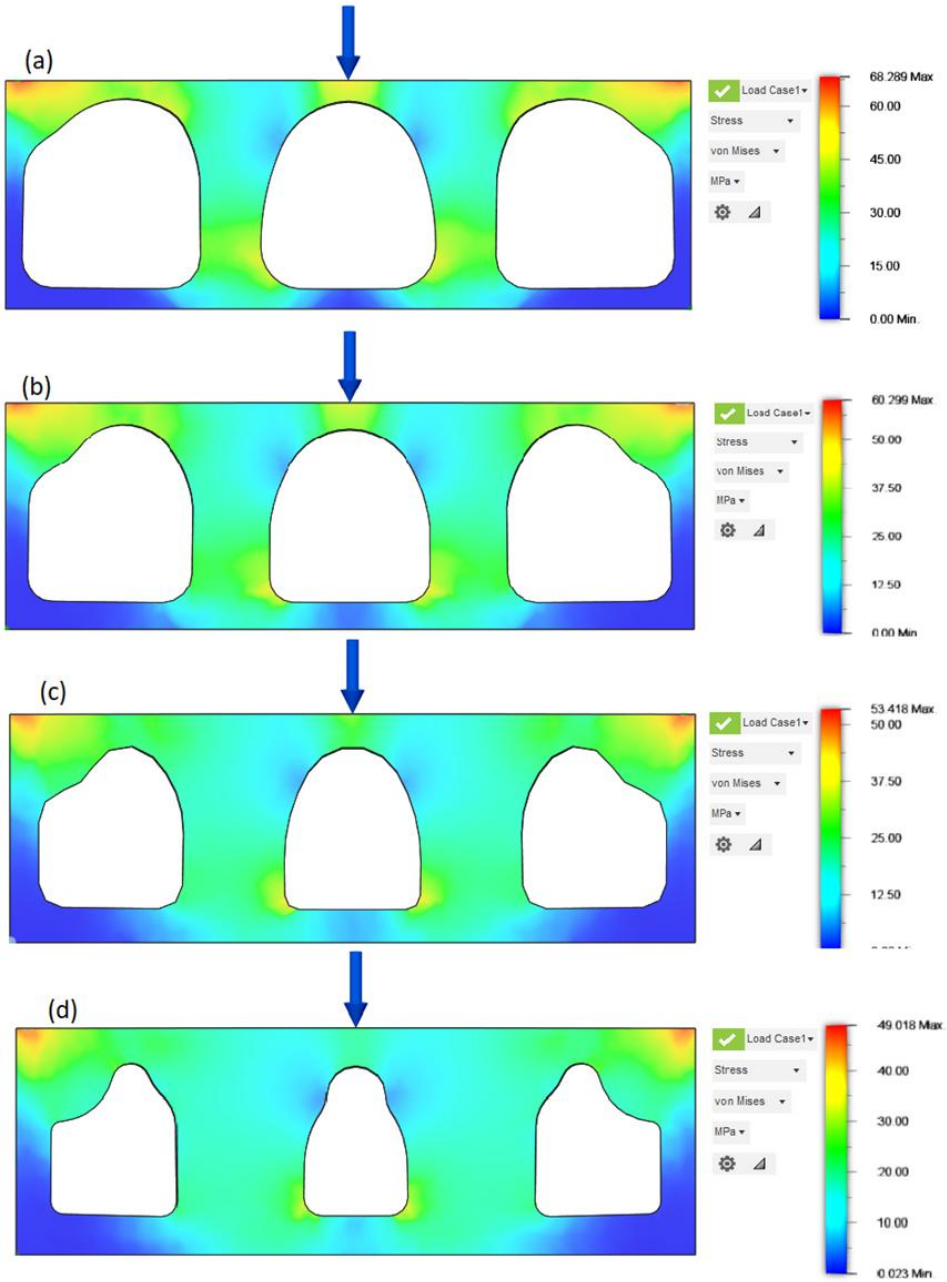
diğer üç öneri tasarımın analizlerinde maksimum gerilme değerinin 150 MPa'nın altında kaldığı görülmüştür. Ağırlık azaltımı hedefi ve yapısal uygunluk kriterleri birlikte değerlendirildiğinde ise, %50 malzeme korunumuna sahip ikinci topoloji optimizasyonu tasarımının en uygun çözüm olduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 3. 20 mm kalınlık gerilme analizleri (a) %40, (b) %50, (c) %60, (d) %70. (Stress analysis results for 20 mm thickness: (a) 40%, (b) 50%, (c) 60%, and (d) 70% load levels.)

3.2.2. Konfigürasyon IV: 3,6 metre genişlik ve 30 mm döşek gerilme analizleri (Configuration IV: stress analyses of 3.6 m width and 30 mm floor thickness)

30 mm kalınlığa ve 3,6 m genişliğe sahip dolu döşek için topoloji optimizasyonu sonucunda elde edilen önerilen tasarımlar ve bunlara ait gerilme analizleri Şekil 9'da gösterilmektedir. 20 mm kalınlık için farklı korunum oranlarıyla yürütülen çalışmalarda görülen eğilime benzer şekilde, 30 mm kalınlık durumunda da kolon benzeri yapıların üst bölgelerinde daha fazla malzemenin korunduğu görülmektedir. Üst köşe noktaların ankastre sınır şartına sahip olması nedeniyle bu köşelerde daha büyük bir malzeme hacminin korunduğu anlaşılmaktadır. Dört farklı tasarım önerisine ait gerilme analizi sonuçları ise elde edilen maksimum gerilme değerlerinin, gemi inşa kurallarında izin verilen 150 MPa'lık gerilme sınırının oldukça altında kaldığını tespit etmiştir.



Şekil 4. 30 mm kalınlık gerilme analizleri (a) %40, (b) %50, (c) %60, (d) %70. (Stress analysis results for 30 mm thickness: (a) 40%, (b) 50%, (c) 60%, and (d) 70% load levels.)

3.3. Analizlerin Değerlendirmesi (Evaluation of the Analyses)

İlk aşamada, 1,8 m ile 4,2 m arasında değişen beş farklı levha genişliği (1,8 m, 2,4 m, 3,0 m, 3,6 m ve 4,2 m) için 10 mm, 20 mm, 30 mm ve 40 mm kalınlıklardaki levhalarda %50 malzeme korunum oranıyla topoloji optimizasyonu uygulanmıştır. Bu optimizasyonlar sonucunda elde edilen tasarımlarda, levha genişliği 1,8 m ve 2,4 m olan her bir kalınlık için iki açıklık önerilmiş; 3,0 m ve 3,6 m genişlikler için tüm kalınlıklarda üç açıklık önerilmiştir. En geniş levha boyutu olan 4,2 m'de ise 10, 20 ve 30 mm kalınlıklar için dört açıklık, 40 mm kalınlık için üç açıklık öngörülmüştür. Bu sonuçlar, levha boyutu ve kalınlığının açıklık sayısı üzerindeki etkisini ortaya koyarak farklı boyutlardaki levhalar için optimum hafifletme deliği sayısını belirlemiştir.

İkinci aşamada, gerilme analizleri yalnızca 3,6 m genişliğindeki döşek üzerinde, 20 mm ve 30 mm kalınlıklara sahip tasarımlar için gerçekleştirilmiştir. Bu iki kalınlıkta, ayrı ayrı yapılan topoloji optimizasyonlarından %40, %50, %60 ve %70 malzeme korunum oranlarında elde edilen tasarımlar gerilme analizine tabi tutulmuştur. Her bir tasarımın gerilme analizi sonucunda, alt köşe bölgeleri ile maksimum gerilmenin oluştuğu üst köşe noktaları hariç tutulduğunda, tüm

bölgelerde gerilme dağılımının homojen olduğu gözlemlenmiştir. Sekiz farklı gerilme analizi sonucunun karşılaştırmalı değerlendirmesi, gerilme seviyesi ve malzeme korunum oranına dayalı uygunluk açısından, 3,6 m genişliğindeki döşek için 20 mm kalınlığında ve %50 malzeme korunumu ile elde edilen tasarımın en uygun çözüm olduğunu ortaya koymuştur. Bu tasarım, malzeme verimliliği ile yapısal dayanım arasında en dengeli sonucu sağlayarak diğer alternatiflere kıyasla daha tercih edilebilir bulunmuştur.

Literatürde gemi yapılarında yapısal ağırlığın azaltılmasına yönelik gerçekleştirilen optimizasyon çalışmalarında, genellikle açıklık düzenlemeleri veya destek elemanı yerleşimlerine odaklanıldığı görülmektedir. Örneğin, Liu ve arkadaşları (2019), gemi mukavemet elemanlarının iki aşamalı bir düzen–boyut optimizasyonuyla %35'e varan malzeme azaltımı sağladıklarını belirtmiş; ancak bazı bölgelerde maksimum gerilmenin 180 MPa seviyesini aştığını rapor etmişlerdir [6]. Benzer şekilde, Putra ve Kitamura (2021), hibrit genetik algoritma kullanarak ambar kapağı açıklıklarının yerleşimini optimize etmiş ve yaklaşık %30 oranında hafifletme elde etmişlerdir [7]. Öte yandan, Islam ve Paul (2021) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, hidrostatik yüklere maruz bırakılan tanker bölmesinde uygulanan topoloji optimizasyonu neticesinde elde edilen gerilme seviyelerinin 160 MPa civarında olduğu görülmektedir [13]. Bu bağlamda sunulan çalışma, %50'ye varan malzeme azaltımıyla birlikte tüm konfigürasyonlarda gerilme seviyesinin 150 MPa sınırının altında kalması açısından mevcut literatüre kıyasla daha dengeli ve mühendislik açısından güvenli çözümler sunmaktadır. Ayrıca açıklık konfigürasyonlarının geometrik gelişimi mühendislik ilkelerine dayandırılarak modellenmiş ve elde edilen sonuçlar nicel olarak tartışılmıştır. Bu yönüyle, çalışma hem yapısal verimliliği artırmakta hem de uygulamaya dönük nitelikli bir katkı sunmaktadır.

Elde edilen tasarımlar incelendiğinde, yükleme kenarının alt bölgesinde köprü benzeri taşıyıcı yapıların belirginleştiği ve bu yapıların rijitlik gereksinimine doğrudan yanıt verdiği gözlemlenmiştir. Özellikle genişliği artan döşeklerde açıklık sayısının fazlalaşması, yük transfer alanının dengeli dağılması ve kritik gerilme yığılmalarının minimize edilmesi adına algoritma tarafından yönlendirilmiştir. Bu durum, yük taşıyan alanlarda taşıyıcı kolonların merkezi bölgede yoğunlaştığını ve açıklıkların çevresel sınır koşullarına göre simetrik olarak optimize edildiğini ortaya koymaktadır.

Malzeme kalınlığının artması ile birlikte açıklık kenarlarında oluşan köşe yarıçaplarının büyümesi ise, yüksek kalınlık durumlarında gerilme konsantrasyonlarının daha yumuşak geçişlerle absorbe edilmesi ihtiyacına yanıt vermektedir. Bu tür yarıçap geçişleri, gerilme yığılmalarını azaltmakta ve çatlak başlangıçlarını geciktirerek yapısal güvenliği artırmaktadır.

Literatürde yer alan çalışmalarla kıyaslandığında, Liu et al. (2019) ve Putra & Kitamura (2021) gibi araştırmalarda açıklık yerleşimlerinin genel geometrik düzene etkisi tartışılmış, ancak açıklık geometrilerinin mühendislik gerekçeleriyle detaylı yorumlanmadığı görülmektedir [6,7]. Mevcut çalışmada ise hem açıklık formasyonu hem de taşıyıcı alanların topolojik dağılımı, yükleme ve mesnet sınır koşullarına bağlı olarak mühendislik temelli bir mantıkla analiz edilmiştir.

Ayrıca, 3,6 m genişliğe sahip döşek konfigürasyonunda yapılan detaylı gerilme analizlerinde, malzeme korunum oranları değiştirildikçe rijitlik dağılımı ve yük yolaklarının değişimi net biçimde gözlemlenmiş; en uygun performansın %50 malzeme korunum oranında sağlandığı doğrulanmıştır. Bu tür sonuçlar, sadece görsel benzerlik değil, aynı zamanda mekanik davranışın mühendislik gerekliliklerıyle uyumlu bir şekilde değerlendirildiğini göstermektedir.

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada, beş farklı döşek genişliği (1,8–4,2 m) ve dört farklı levha kalınlığı (10–40 mm) için %50 malzeme korunum oranıyla topoloji optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, 3,6 m genişliğindeki döşek elemanları için 20 mm ve 30 mm kalınlık değerlerinde, %40–%70 arasında değişen dört farklı korunum oranı ile gerilme analizleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, tüm optimize tasarımlarda maksimum gerilmenin 150 MPa'lık sınırın altında kaldığını göstermektedir. Özellikle, 20 mm kalınlıkta ve %50 malzeme korunumuna sahip model, en uygun yapısal performansı sergileyerek en düşük gerilme seviyelerini sağlamıştır.

Genel bir eğilim olarak, döşek genişliği arttıkça optimizasyon sonucu ortaya çıkan açıklık sayısının arttığı, levha kalınlığı yükseldikçe ise açıklık kenarlarında daha geniş köşe yarıçaplarının oluştuğu gözlemlenmiştir. Bu durum, daha geniş döşeklerde aynı oranda malzeme azaltımına ulaşmak için daha fazla sayıda boşluk gerektiğine ve daha kalın levhalarda gerilme yığılmalarını azaltmak amacıyla boşluk kenarlarının daha

yumuşak geçişlerle şekillendiğine işaret etmektedir. Sonuç olarak, incelenen parametre aralığında taşıyıcı plakaların yaklaşık %50 malzeme azaltımıyla dahi izin verilen gerilme seviyelerini aşmadan tasarlanabileceği gösterilmiştir. Çalışma, farklı genişlik ve kalınlıklardaki plakaların topoloji optimizasyonu ve gerilme performansı açısından sistematik bir değerlendirmesini sunarak literatüre optimal hafifletilmiş yapısal tasarım konusunda önemli bir katkı sağlamaktadır. İleride yapılacak çalışmalarda, optimize edilen tasarımların farklı yükleme durumları altında incelenmesi, sonuçların deneysel prototiplerle doğrulanması ve rijitlik ile dinamik davranış gibi çok ölçütlü optimizasyon yaklaşımlarının değerlendirilmesi önerilmektedir.

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)

***Ahmet Fatih YILMAZ*:** 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] Ehrlenspiel K, Kiewert A, Lindemann U, Hundal MS, editors. Factors that influence Manufacturing Costs and Procedures for Cost Reduction. Cost-Efficient Design, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; 2007, p. 143–384. https://doi.org/10.1007/978-3-540-34648-7_7.

[2] Novikov A V, Barmin AA, Mudrova AA, Yasinskaya Y V. System analysis of the features of using information models in shipbuilding. J Phys Conf Ser 2019;1333:032090. https://doi.org/10.1088/1742-6596/1333/3/032090.

[3] Kim H, Lee S-S, Park JH, Lee J-G. A model for a simulation-based shipbuilding system in a shipyard manufacturing process. Int J Comput Integr Manuf 2005;18:427–41. https://doi.org/10.1080/09511920500064789.

[4] Yilmaz AF, Konal M. Enhanced Container Ship Hatch Cover using Topology Optimization Method for Lightweight Design and Optimal Costs. Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering 2025:1–16.

[5] Wang G, Feng Y, Dai Y, Chen Z, Wu Y. Optimization design of a windshield for a 12,000 TEU container ship based on a support vector regression surrogate model. Ocean Engineering 2024;313:119405.

[6] Liu Z, Cho S, Takezawa A, Zhang X, Kitamura M. Two-stage layout–size optimization method for prow stiffeners. International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering 2019;11:44–51.

[7] Putra GL, Kitamura M, Takezawa A. Structural optimization of stiffener layout for stiffened plate using hybrid GA. International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering 2019;11:809–18.

[8] Um T-S, Roh M-I. Optimal dimension design of a hatch cover for lightening a bulk carrier. International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering 2015;7:270–87.

[9] Kendibilir A, Kefal A. Enhanced ship cross-section design methodology using peridynamics topology optimization. Ocean Engineering 2023;286:115531.

[10] Wang G, Feng Y, Dai Y, Chen Z, Wu Y. Optimization design of a windshield for a 12,000 TEU container ship based on a support vector regression surrogate model. Ocean Engineering 2024;313. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.119405.

[11] Sekulski Z. Multi-objective topology and size optimization of high-speed vehicle-passenger catamaran structure by genetic algorithm. Marine Structures 2010;23:405–33.

[12] Niu L, Xiao L. Optimization of topology and energy management in fuel cell cruise ship hybrid power systems. Intelligent Marine Technology and Systems 2024;2. https://doi.org/10.1007/s44295-024-00026-3.

[13] Islam MS, Paul SC. Topology optimization of an oil tanker bulkhead subjected to hydrostatic loads. Journal of Naval Architecture and Marine Engineering 2021;18:207–15.

[14] Bekler YB. Shape optimization application for weight reduction of a container wagon 2013.

[15] Kilicaslan A. The conceptual design of a high container weight reduced by topology optimisation method. 2018.
[16] Bal MK. Designing universal yoke structure of suspension and release system with topology optimization for fighter aircrafts 2020.
[17] Yilmaz AF, Günay M. Investigation of mechanical strength and distortion in submerged arc welding of AH36 ship steel plate. Journal of Ship Production and Design 2017;33:335–41.
[18] Guzelbulut C, Badalotti T, Suzuki K. Optimization techniques for the design of crescent-shaped hard sails for wind-assisted ship propulsion. Ocean Engineering 2024;312:119142.
[19] Mirzendehdel AM, Suresh K. Support structure constrained topology optimization for additive manufacturing. Computer-Aided Design 2016;81:1–13.
[20] Mehmet ÖZKAL F. TOPOLOJİ ENİYİLEMESİ VE ÇUBUK BENZEŞİMİ YÖNTEMLERİ KULLANILARAK BETONARME YAPI ELEMANLARINDA EN UYGUN DONATI DÜZENİNİN BELİRLENMESİ VE DENEYSEL GERÇEKLEMESİ. 2012.
[21] Ertas AH, Alkan V, Yilmaz AF. Finite element simulation of a mercantile vessel shipboard under working conditions. Procedia Eng 2014;69:1001–7.

Gazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Dergisi
PART C: TASARIM VE TEKNOLOJİ

Gazi University
Journal of Science
PART C: DESIGN AND TECHNOLOGY

GU J Sci, Part C, 13(2): 777-787 (2025)

Enhancing the Mechanical Properties of Silty Soils Using Fibers Obtained from Waste Air Filters

Mehmet Uğur YILMAZOĞLU[1*]

[1]*Kastamonu University, Faculty of Engineering and Architecture, Department of Civil Engineering, Kastamonu, Turkey*

Article Info

Research article
Received: 12/12/2024
Revision: 28/04/2025
Accepted: 29/05/2025

Keywords

Sustainability
Waste Air Filter,
Fiber,
Soil İmprovement,
Unconfined Compressive Strength

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 12/12/2024
Düzeltme: 28/04/2025
Kabul: 29/05/2025

Anahtar Kelimeler

Sürdürülebilirlik,
Atık Hava Filtresi
Lif
Zemin İyileştirme
Serbest Basınç Dayanımı

Graphical/Tabular Abstract (Grafik Özet)

Adding fibers obtained from waste vehicle air filters significantly improved silty soil samples' unconfined compressive strength and ductility. The optimum fiber content was determined to be 0.75%, yielding a maximum strength increase of 43.6%. This sustainable approach offers an alternative use for non-recyclable air filter wastes in geotechnical applications. /Atık araç hava filtrelerinden elde edilen liflerin ilavesi, siltli zemin numunelerinin serbest basınç dayanımını ve sünekliğini önemli ölçüde artırmıştır. Optimum lif içeriği %0.75 olarak belirlenmiş ve maksimum dayanım artışı %43.6 olmuştur. Bu sürdürülebilir yaklaşım, geri dönüştürülemeyen hava filtresi atıkları için jeoteknik uygulamalarda alternatif bir kullanım sunmaktadır.



***Figure A**: Experimental process /**Şekil A:** Deneysel süreç*

Highlights (Önemli noktalar)

- *Fibers from waste air filters were successfully utilized in silty soil reinforcement. /Atık hava filtresi lifleri siltli zemin güçlendirmesinde başarıyla kullanıldı.*
- *Optimum fiber content was found to be 0.75%, achieving 43.6% UCS improvement. /Optimum lif oranı %0.75 olarak belirlenmiş ve %43.6 UCS artışı sağlanmıştır.*
- *Sustainable alternative to synthetic fibers with lower carbon footprint. /Sentetik liflere sürdürülebilir ve düşük karbon ayak izine sahip bir alternatif sunulmuştur.*
- *Enhanced ductility and deformation characteristics of treated soil. /İyileştirilen zeminde süneklik ve deformasyon özellikleri artmıştır.*

***Aim (Amaç):** To investigate the effects of fibers obtained from waste vehicle air filters on the mechanical properties of silty soil. /Atık araç hava filtrelerinden elde edilen liflerin siltli zeminlerin mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini araştırmak.*

***Originality (Özgünlük):** This study proposes a sustainable and cost-effective approach by reusing waste vehicle air filters as a fiber additive for soil improvement, an application not widely explored in geotechnical literature. /Bu çalışma, atık araç hava filtrelerinin zemin iyileştirme amacıyla lif katkı maddesi olarak yeniden kullanılmasını önererek, jeoteknik literatürde geniş ölçekte araştırılmamış sürdürülebilir ve ekonomik bir yaklaşım sunmaktadır.*

***Results (Bulgular):** The highest unconfined compressive strength increase (43.6%) was observed at 0.75% fiber content, with improved ductility and sustainability benefits. /En yüksek serbest basınç dayanım artışı (%43.6), %0.75 lif içeriğinde elde edilmiş ve süneklik ile sürdürülebilirlik avantajları sağlanmıştır.*

***Conclusion (Sonuç):** Fibers obtained from waste vehicle air filters can serve as an effective, sustainable, and environmentally friendly additive for soil improvement applications. /Atık araç hava filtrelerinden elde edilen lifler, zemin iyileştirme uygulamaları için etkili, sürdürülebilir ve çevre dostu bir katkı maddesi olarak değerlendirilebilir.*

*Corresponding author, e-mail: myilmazoglu@kastamonu.edu.tr
DOI: 10.29109/gujsc.1600295

GU J Sci, Part C, 13(2): 777-787 (2025)

Gazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Dergisi
PART C: TASARIM VE TEKNOLOJİ

Gazi University
Journal of Science
PART C: DESIGN AND TECHNOLOGY

http://dergipark.gov.tr/gujsc

Enhancing the Mechanical Properties of Silty Soils Using Fibers Obtained from Waste Air Filters

Mehmet Uğur YILMAZOĞLU[1*]

[1]*Kastamonu University, Faculty of Engineering and Architecture, Department of Civil Engineering, Kastamonu, Turkey*

Article Info

Research article
Received: 12/12/2024
Revision: 28/04/2025
Accepted: 29/05/2025

Keywords

Sustainability
Waste Air Filter,
Fiber,
Soil İmprovement,
Unconfined Compressive Strength

Abstract

In this study, the effect of waste vehicle air filters on the strength of silty soil was investigated by converting them into 6 mm long fibers. With the increase in environmental awareness worldwide and the focus on sustainability in construction applications, waste materials in geotechnical applications have attracted significant attention in recent years. The fibers obtained from vehicle air filters were mixed into the soil at 0.25, 0.50, 0.75, 1.00, 1.50, 2.00, 2.50 and 3.00 percent of the dry weight of the soil, and their effects on shear strength parameters were evaluated under laboratory conditions. Unconfined compressive strength tests were performed on fiber-reinforced soil samples, and the results were compared with those of unreinforced soil. Experimental results show that fiber reinforcement increases shear strength, and the optimum fiber ratio for maximum stability improvement is 0.75%. This study reveals that fibers obtained from waste vehicle air filters can be a sustainable alternative to polypropylene and other costly fibers with high carbon footprints. It can also be considered a potential ground improvement additive contributing to reducing waste and improving the mechanical properties of the ground.

Atık Araç Hava Filtrelerinden Elde Edilen Liflerin Kullanılmasının Siltli Zeminlerin Mekanik Özellikleri Üzerindeki Etkisi

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 12/12/2024
Düzeltme: 28/04/2025
Kabul: 29/05/2025

Anahtar Kelimeler

Sürdürülebilirlik,
Atık Hava Filtresi
Lif
Zemin Iyileştirme
Serbest Basınç Dayanımı

Öz

Bu çalışmada, atık araç hava filtrelerinin 6 mm uzunluğunda lifler haline dönüştürülerek siltli zeminin mukavemeti üzerindeki etkisi incelenmiştir. Dünyada çevresel farkındalığın artması ve buna bağlı olarak sürdürülebilirliğin inşaat uygulamalarının odağı haline gelmesiyle, atık malzemelerin geoteknik uygulamalarda kullanımı son yıllarda önemli bir ilgi görmektedir. Araç hava filtrelerinden elde edilen lifler, zeminin kuru ağırlığının yüzde 0.25, 0.50, 0.75, 1.00, 1.50, 2.00, 2.50. 3.00 oranlarında zemine karıştırılarak laboratuvar koşullarında kayma mukavemeti parametreleri üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Atık lif takviyeli zemin numuneleri üzerinde serbest basınç dayanımı testleri yapılmış ve sonuçlar, takviyesiz zeminle karşılaştırılmıştır. Deneysel sonuçlar, lif takviyesinin kayma mukavemetini artırdığını ve maksimum stabilite iyileştirmesi için optimum lif oranının % 0.75 olarak göstermektedir. Bu çalışma, atık araç hava filtrelerinden elde edilen liflerin, yüksek karbon ayak izine sahip polipropilen ve diğer maliyetli liflere sürdürülebilir bir alternatif olabileceğini ve aynı zamanda atıkların azaltılmasına ve zeminin mekanik özelliklerinin iyileştirilmesine katkıda bulunan potansiyel bir zemin iyileştirme katkı maddesi olarak değerlendirilebileceğini ortaya koymaktadır.

1. INTRODUCTION (GİRİŞ)

Soils are multi-phase compact particle systems containing soil grains of varying sizes and volumes, as well as water and air. Fine-grained (cohesive) soils generally exhibit low load-bearing capacity, high compressibility, and significant swelling potential. Therefore, improving the cohesion of soils in project sites to enhance their strength will not only reduce project costs but also extend the service life of the structures. Soil improvement refers to the enhancement of soil properties using various engineering methods [1-6]. Geotechnical challenges in soil improvement continue to be an ongoing focus of engineering research and development. Cement and lime binders are frequently used in soil stabilization [7-13].

*Corresponding author, e-mail: myilmazoglu@kastamonu.edu.tr
DOI: 10.29109/gujsc.1600295

However, while these methods increase soil strength, they are not considered environmentally sustainable or eco-friendly techniques. Like all engineering disciplines, there is an increasing emphasis on using environmentally friendly and sustainable materials in geotechnical engineering. In this context, recycling industrial waste without negatively affecting the environment holds particular importance. Today, soil improvement methods have an essential place in civil engineering applications. Although different techniques are distinguished in terms of cost, ease of application, and the effects they provide, traditional materials such as Portland cement and lime are frequently used as binding agents in soil improvement. Although these materials effectively increase soil strength, they have sustainability limitations [7,9-13]. In recent years, many studies have been conducted in the literature using chemical and mineral additives and fibers to increase the uniaxial compressive strength of clays [13-16]. Studies show that the PP fiber ratio is optimum between 0.4% and 0.6%, and the strength increase varies between 80% and 150%.In recent years, the use of industrial waste in soil stabilization has become an increasingly researched topic to support sustainability in the construction sector. Large amounts of different types of waste are produced yearly, and it is essential to dispose of these materials without harming the environment. In the context of increasing environmental problems, the fact that the additives used in the soil improvement process are both environmentally friendly and obtained from waste materials further increases the value of these materials. From this perspective, using vehicle air filter waste, which cannot be recycled, as fiber additives in the soil improvement process can offer an environmentally sustainable solution.

An air filter is a fundamental filtration system found in most vehicles. It is typically made from paper or fiber material and provides medium-level filtration. Air filters capture large particles from the air, allowing cleaner air to flow into the engine. Due to the materials used in their production, air filters have a high potential for being used as fibers.

In this study, classification tests were conducted to determine the class of the soil used in the experiments. Then, fibers obtained from waste vehicle air filters were added to the soil at the following percentages: 0.25%, 0.50%, 0.75%, 1.00%, 1.50%, 2.00%, 2.50%, and 3.00%. The optimum water content for the standard Proctor energy was determined. Laboratory samples were prepared with maximum dry unit weight and optimum water content in static conditions, and were subjected to uniaxial compression tests. The effect of fibers obtained from waste vehicle air filters on the free compressive strength of silty soils was investigated.

2.MATERIALS AND METHODS (MATERYAL VE METOD)

The aim of this study is to determine the effect of fibers obtained from waste vehicle air filters on the unconfined compressive strength of silty soil when mixed at various ratios with the dry weight of the soil. The laboratory experimental program consists of three stages. In the first stage, the physical properties of the soil and the fibers obtained from waste vehicle air filters were determined, and soil samples along with waste fibers for the experiment were prepared. In the second stage, the maximum dry unit weight and optimum water content of soil mixtures with waste fibers at the specified proportions were determined. In the third stage, unconfined compressive tests were conducted on samples prepared with different fiber ratios at maximum dry unit weight and optimum water content, and the unconfined compressive strengths were measured.

2.1. Used Material (Kullanılan Malzemeler)

The soil samples were collected from 3-4 meters deep at Yukarıbatak Village, located in the Central District of Kastamonu Province. After the organic materials in the 200 kg excess soil sample were removed, the soil was spread on a suitable surface to dry to air-dried conditions. Once air-dried, the samples were mixed to achieve homogeneity, and any existing flocculates were crushed. The soil sample was sieved through a No. 40 sieve to pass particles smaller than the most significant grain diameter. The permanent water content of the air-dried sieved soil sample ranged between 1.0% and 1.05%. The air-dried soil sample was stored in laboratory conditions. The material used in the experimental study is a silty soil containing a low amount of clay. The properties of the silty soil sample, according to ASTM D4318 [18], are presented in Table 1. The soil sample was classified as low-plasticity silt (ML) according to the Unified Soil Classification System (USCS).

Automotive engine air filters are manufactured from cellulose-based paper, synthetic polymers (e.g., polyester, polypropylene), or cotton-based materials. In some filters, these materials are combined in different proportions to form hybrid structures to provide higher durability and filtration performance. This study did not use filters of a

specific brand or model for WAFF production, and mixed filters with different properties were evaluated. WAFF obtained from polymer-based air filters has the potential to increase the mechanical strength of the soil thanks to its high tensile strength and flexibility properties. On the other hand, WAFF produced from cellulose-based air filters may have lower durability in terms of long-term stabilization due to its biodegradable properties. This situation may show differences in soil improvement performance depending on the composition of the WAFF.

Table 1. Physical properties of the soil used in experimental study (Çalışmada kullanılan zeminin fiziksel özellikleri)

Property	Value	Symbol and Unit
No 200#	66.5	FC (%)
Liquid limit	32	LL (%)
Plastic limit	24.8	PL (%)
Plasticity index	7.2	IP (%)
Specific gravity	2.54	Gs
Clay ratio	19.9	C (%)
Silt ratio	46.6	M (%)
Sand ratio	33.5	S (%)
Soil class: Low Plasticity Silt (ML)		

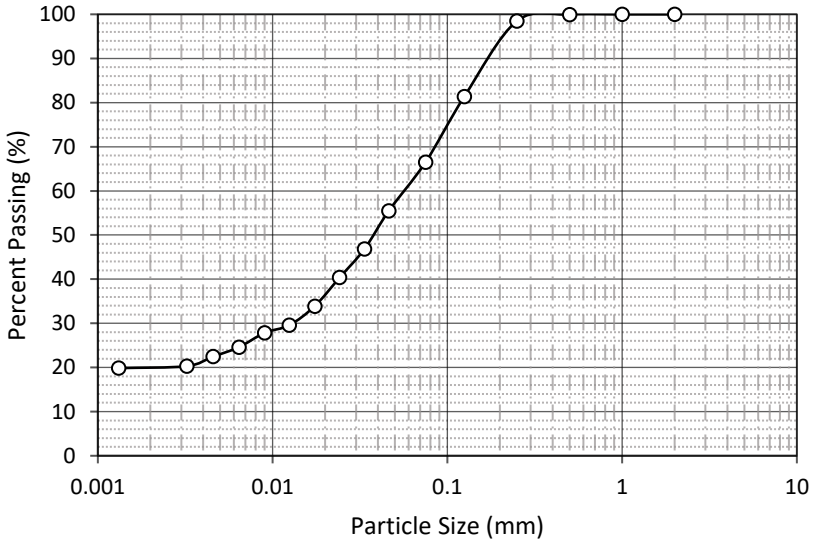


Figure 1. Grain size distribution curve (Dane boyutu dağılım eğrisi)

2.2. Sample Preparation (Numune Hazırlama)

Waste vehicle air filters were collected from the automotive industrial zone in Kastamonu, Turkey, and fibers were produced using a Mapi S-45 brand model grinder with a thickness of 1.5 mm and a height of 10 mm (Figure 2a). The silty soil sample was initially air-dried in the laboratory environment. The air-dried sample was manually ground into a powder. To ensure the samples were prepared homogeneously at the specified moisture contents, the sample was sieved through a No. 40 sieve, suitable for the maximum particle size, to prevent flocculation and remove organic materials (Figure 2b). The fibers obtained from vehicle air filters were mixed homogeneously with the soil using a cement mixer at the rates of 0.25%, 0.50%, 0.75%, 1.00%, 1.50%, 2.00%, 2.50% and 3.00% of the dry weight of the soil. Proctor tests were performed on the soil samples to which WAFF was added by the ASTM D698-12 [19] standard (Figure 3). When Figure 3 is examined, it is observed that the increase in the WAFF percentage causes a decrease in the dry unit volume weight and an increase in the optimum water content.

To prepare samples at the optimum water content determined for each fiber ratio, 2 kg of sieved soil material and WAFF were moistened with distilled (deionized and deaired) water until the targeted optimum moisture content was reached using a sample preparation mixer. In this way, a homogeneous mixture was obtained. The soil samples prepared in 2 kg groups were placed in airtight containers and left to cure at room temperature for 4 hours. This process was repeated for each waste filter fiber ratio and optimum moisture content. The prepared soil samples yielded

a homogeneous soil-water mixture with no measurable difference for the desired water contents following this procedure. After the 4-hour curing period, samples were taken from different locations of each airtight container to check the moisture content. It was confirmed that the water contents of all the mixtures in the containers were uniform, with a ±0.5% evaporation/moisture change error margin.



Figure 2. a) Filter waste fiber, **b**) Silty soil sample, **c)** Sample preparation equipments (a)Atık filtre lifi, b) Siltli zemin numunesi, c) Numune hazırlama ekipmanları)

The prepared soil samples were placed statically using a jack system in a specially designed tank to obtain 50 mm diameter and 100 mm height specimens (Figure 2c). A manually operated hydraulic cylinder jack was used as the compaction device. Plastic cylinders with diameters of 49.2 mm and heights of 180 mm and 80 mm were used as compaction apparatus. The soil was statically compacted in two layers during sample preparation to achieve homogeneous compaction. Scratches were made between the layers to prevent potential segregation. For each waste filter fiber ratio and optimum moisture content, sample weights were recalculated using the soil's volume-weight relationships and then placed in two layers in the sample container and compacted to the desired density. After the experiment, samples were taken from different specimen locations to check the moisture content.

2.3. Test Method (Test Metodu)

In this study, which investigates the effect of waste vehicle air filter fibers on the shear strength of silty soil, the basic geotechnical properties of the silty soil sample collected from Yukarıbatak Village were first determined, and the fiber addition ratio to be used in the experiments was selected based on the literature [9]. The mixture ratios are presented in Table 2. After preparing the mixtures, a standard compaction test was performed according to ASTM D698 [19] (Figure 3). The optimum moisture content and maximum dry unit weight obtained from the standard compaction test results for the mixtures are shown in Table 3.

When Figure 3 is examined, it is seen that the addition of WAFF significantly affects the compaction properties of the silt soil. While the WAFF additive generally causes a decrease in the dry unit volume weight, it tends to increase the optimum water content. Low-rate WAFF additives (0.25%, 0.50%, 0.75%) exhibit a similar tendency to the compaction curve of the soil, causing a partial decrease in the dry unit volume weight while increasing the optimum water content. Increasing the WAFF ratio to 1.00% and 1.50% significantly increases the optimum water content while creating a more visible decrease in the dry unit volume weight. Especially at WAFF content of 2.00% and above, the dry unit volume weight decrease becomes more pronounced, while a significant increase in the optimum water content is observed. This can be explained by the fact that the fibers prevent homogeneous distribution in the soil matrix, prevent intensive compaction, and create a looser structure. It is observed that the effect of WAFF additive on soil compaction properties varies depending on the additive ratio and causes significant changes at high rates.

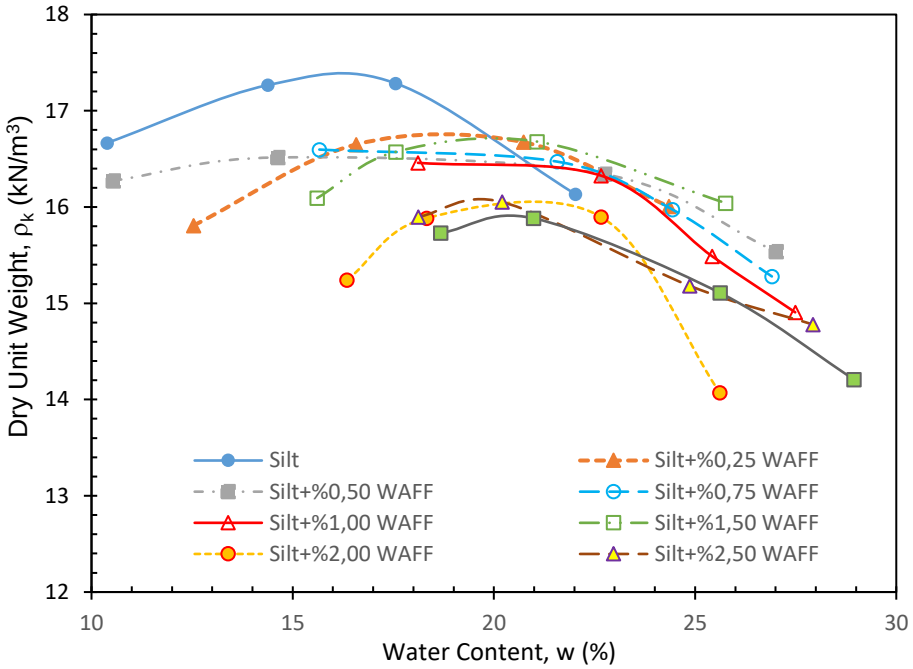


Figure 3. Compaction curves of mixtures (Karışımlara ait kompaksiyon eğrileri)

Table 2. Mixture properties and experimental design (Karışım oranları ve deneysel tasarım)

Mix ID	1	2	3	4	5	6	7	8	9
WAFF %	0	0,25	0,50	0,75	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0

Measuring water absorption rate requires an evaluation based on capillary rise and saturation times. The water absorption rate in concrete and mortar is measured according to ASTM C1585 [17]. ASTM C1585 focuses on capillary absorption and can be adapted for use with air filters. In this context, the WAFF was placed in a porous container with its bottom side in contact with water. The weight change was measured at specific intervals. In this study, the water absorption rate (WA) was calculated as the ratio of the mass of absorbed water to the dry mass of the WAFF (Eq. 1).

$$\%WA = (m_w/m_f)x100 \quad \textbf{(1)}$$

Here, WA is the water absorption rate , m_w is the mass of water absorbed by the WAFF, and m_f is the dry mass of the WAFF.

Table 3. Standard compaction test results (Standart kompaksiyon deney sonuçları)

Mixture ID	Dry Unit Weight kN/m^3	Water Content %
Silt	17,34	16,19
Silt+%0,25 WAFF	16,87	18,84
Silt+%0,50 WAFF	16,80	17,92
Silt+%0,75 WAFF	16,75	18,01
Silt+%1,0 WAFF	16,73	19,93
Silt+%1,50 WAFF	16,71	19,69
Silt+%2,0 WAFF	16,21	19,83
Silt+%2,50 WAFF	16,06	20,02
Silt+%3,0 WAFF	15,89	20,21

Unconfined compressive strength (UCS) testing is a fundamental laboratory method used to evaluate the mechanical behavior of soils and predict their performance under loading conditions. This test is critical in geotechnical engineering as it provides vital information on soil materials' shear strength and stiffness. In this study, UCS tests were conducted to evaluate the mechanical properties of

silty soil samples reinforced with WAFF. UCS tests were performed by ASTM D2166 (2016). Prepared soil samples with a standard cylindrical shape of 50 mm in diameter and 100 mm in height were subjected to axial loading using a universal testing machine. The loading rate was set at 0.80 mm per minute to ensure uniform deformation and allow accurate stress-strain measurements. Tests continued until the samples showed visible failure or significant reduction in load-carrying capacity, indicating the ultimate compressive strength of the soil-fiber mixtures. Critical parameters such as peak compressive strength, axial stress at failure, and post-peak behavior were recorded and analyzed during the testing process. The effect of different WAFF contents on UCS values was systematically studied to determine the optimum fiber dosage for maximum strength increase. The results obtained from these tests provide valuable data on the reinforcing effect of WAFF in soil stabilization and its potential as an alternative to traditional fiber reinforcement materials.

3.RESULTS (BULGULAR)

To evaluate the effect of the moisture content and water absorption time of the waste vehicle air filter fiber (WAFF) on the water absorption rate, a water absorption test was conducted on the WAFF. Samples with a natural air-dried moisture content of 5.74% were used. For every 100 g of dry mass, the WAFF was placed in a porous container that allowed water absorption from distilled water. Measurements were taken at intervals of 1, 10, 30, 60, 720, and 1440 minutes. After the water absorption process, the excess water was removed, and the mass of the WAFF was measured. The amount of water absorbed over time was plotted in a graph (Figure 4).

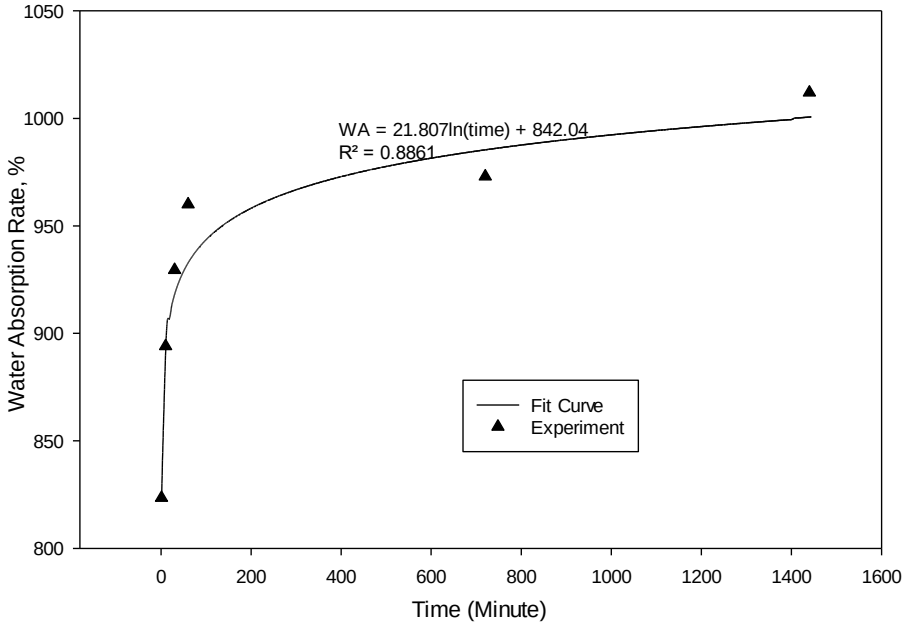


Figure 4. Water absorption of WAFF (Atık araç hava filtresinin su emmesi)

The results of the water absorption test are shown in Table 4. It was found that the WAFF used in this study had a very high water absorption rate, ranging from 823.5% to 1012%. Focusing on the water absorption time, a difference in the absorption rate was observed between 1 minute and 30 minutes, while no difference was found between 30 minutes and 1440 minutes. It can be concluded that the high water absorption capacity of the WAFF is due to the material used and its porosity. Based on this result, it is suggested that the improvement effect would be greater in soils with high water content (e.g., at the bottom of embankments).

A total of 18 unconfined compressive (UC) tests were performed on the samples obtained by static compaction. When classified according to the mixture properties and experimental design, the average values of two similar samples from 9 different scenarios are shown in Table 5.

The unconfined compressive strength test results of the samples are shown in the graphs in Figure 5 and Figure 6.

Table 4. Results of water absorption test of WAFF (Atık araç hava filtresinin su emme sonuçları)

Initial Water Content in WAFF (%)	Time (minute)	Water Absorption %
%10	1	823.5
	10	894
	20	929.5
	60	960
	720	973
	1440	1012

Table 5. Unconfined compressive strength test results (Serbest basınç deney sonuçları)

Mix ID	qu (kPa)	Load (N)	Peak Strain %
1	1346.88	280.38	2.30
2	1649.88	335.51	1.92
3	1719.87	362.96	3.06
4	1934.14	406.65	3.58
5	1689.28	355.24	3.93
6	1599.93	336.97	4.21
7	1663.15	346.50	4.54
8	1640.81	337.16	5.55
9	1703.35	353.29	6.11

Figure 6 shows the unconfined compressive strength (UCS) values of silty soil with the addition of WAFF at weight percentages of 0.25, 0.50, 0.75, 1.0, 1.50, 2.0, 2.5, and 3.0. According to the results, the average UCS of the natural silty soil (reference sample) was measured to be 1346.88 kPa. The average UCS values for the WAFF-added samples were measured as 1639.64, 1719.87, 1934.14, 1689.28, 1599.93, 1663.15, 1640.81, and 1703.35 kPa, respectively.

The percentage changes in unconfined compressive strength (UCS) values of the mixtures, relative to the reference sample, based on the WAFF addition ratio, are shown in Figure 7. The UCS increase percentages for the WAFF-added samples compared to the reference sample were 21.74%, 27.69%, 43.60%, 25.42%, 18.79%, 23.48%, 21.82%, and 26.27%, respectively.

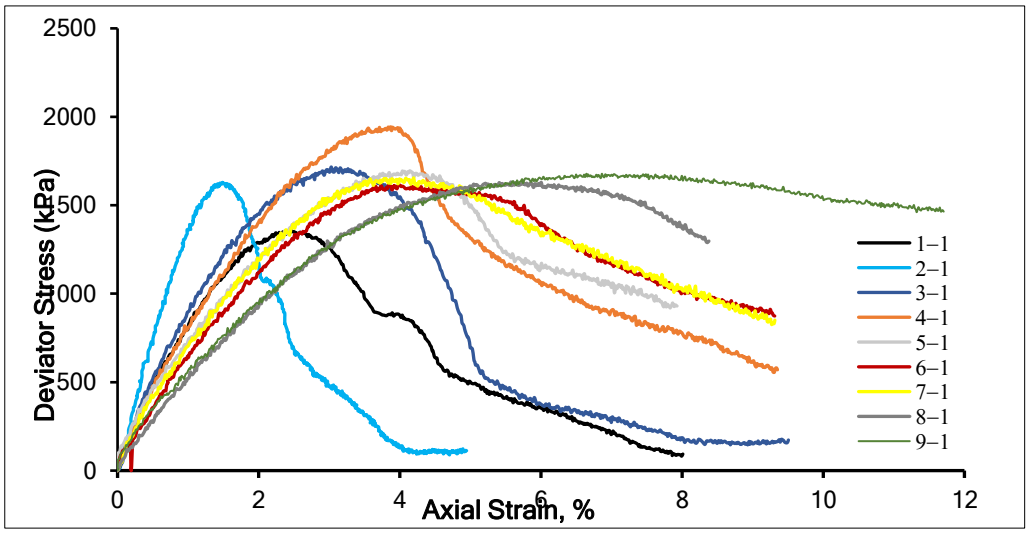


Figure 5. Unconfined compressive strength results of the first samples of the mixtures (Her karışımın ilk numunelerine ait serbest basınç deney sonuçları)

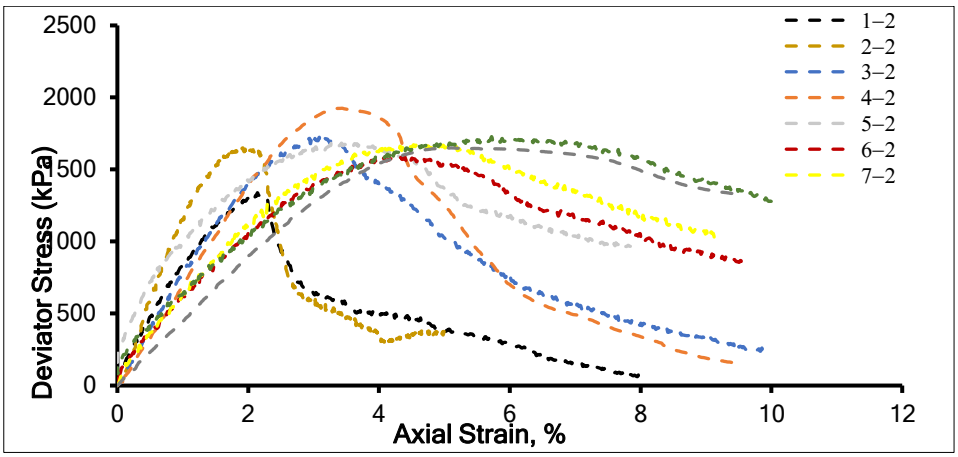


Figure 6. Unconfined compressive strength results of the second samples of the mixtures (Her karışımın ikinci numunesine ait serbest basınç deney sonuçları)

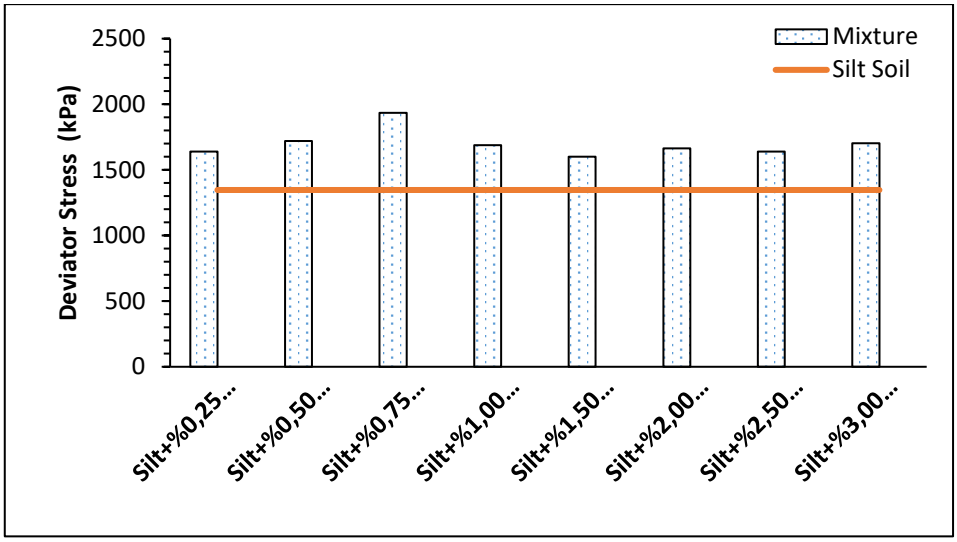


Figure 7. Unconfined compression stress test results of samples (Numunelerin serbest basınç deney sonuçları)

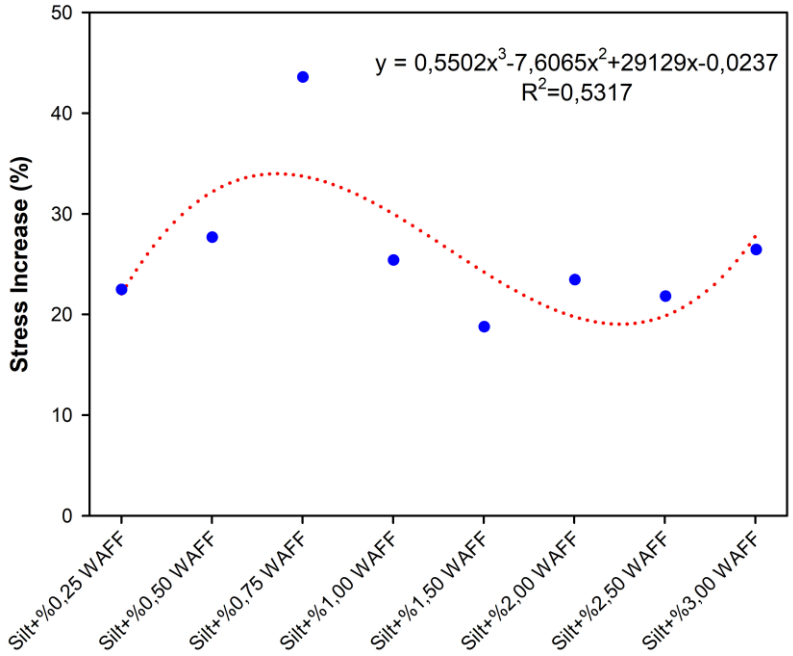


Figure 8. UCS value increase of WAFF additive samples compared to reference sample (Atık araç hava filtresi lif katkılarının referans numuneye kıyasla serbest basinç dayanımı artışı)

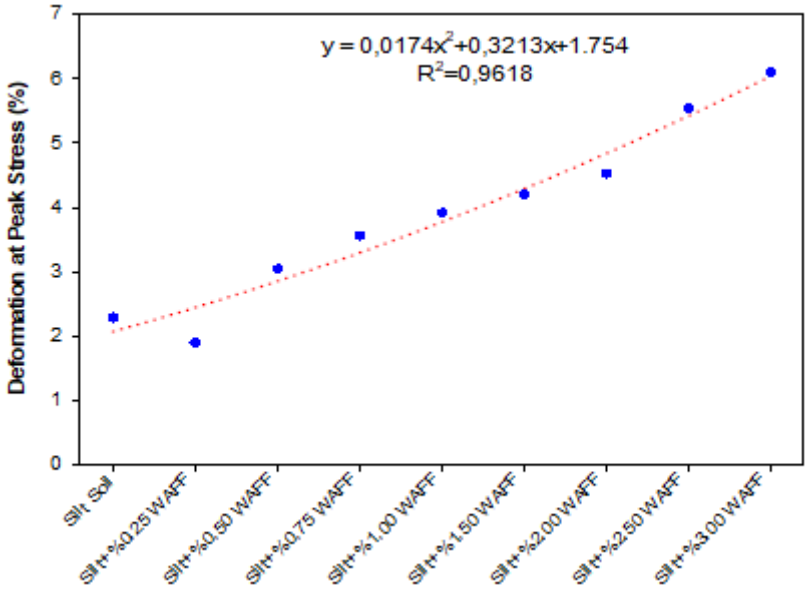
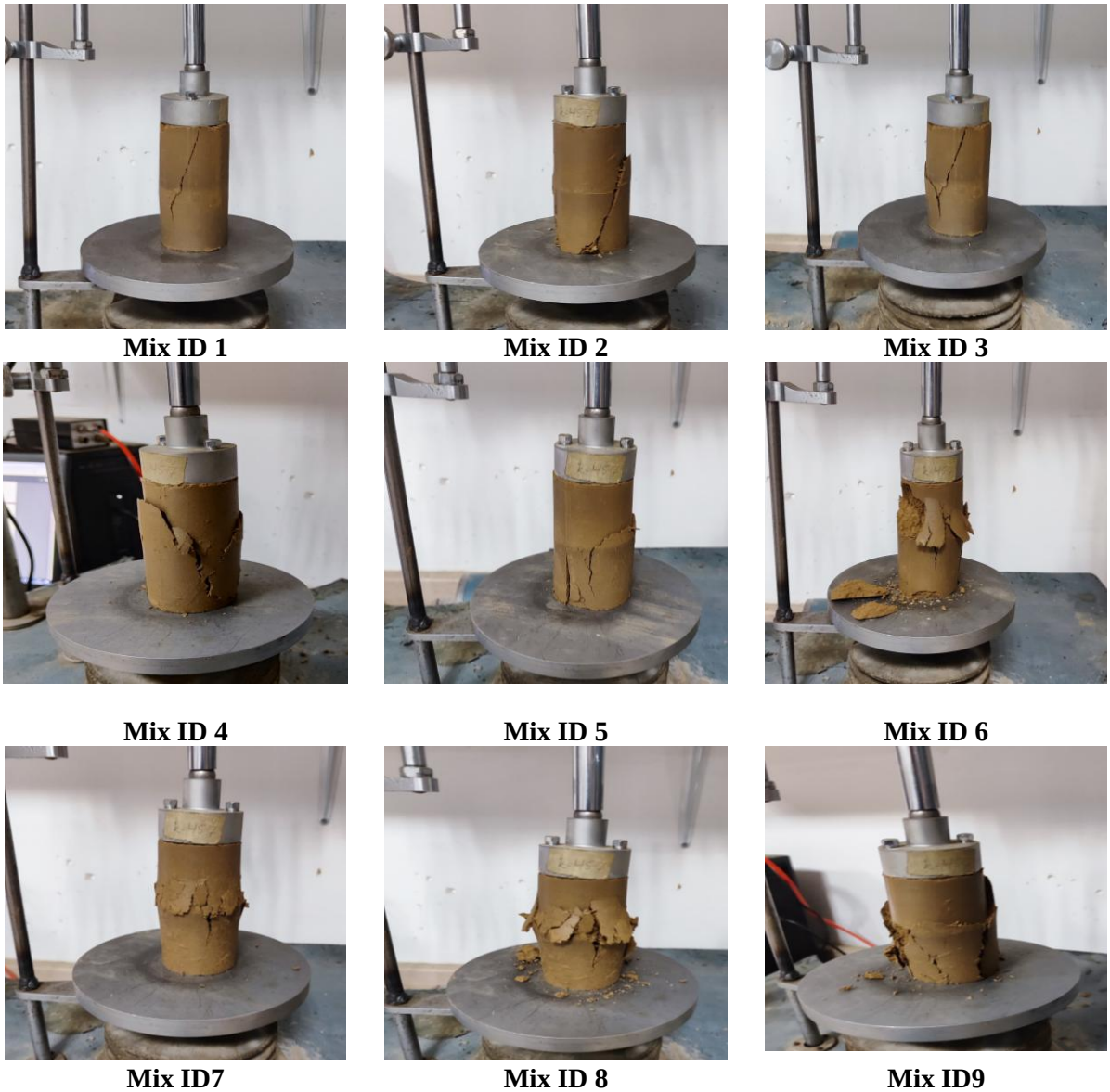


Figure 9. Deformation changes of the samples at peak stress (Numunelerin pik gerilmedeki deformasyon değişimleri)



Mix ID 1 **Mix ID 2** **Mix ID 3**

Mix ID 4 **Mix ID 5** **Mix ID 6**

Mix ID7 **Mix ID 8** **Mix ID9**

Figure 10. UCS test of samples (Numunelerin serbest basınç dayanım deneyi görüntüleri)

4.CONCLUSIONS (SONUÇLAR)

This study investigates the effects of adding fibers obtained from waste vehicle air filters (at varying rates from 0.25% to 3.00%) on the strength of silty soils. According to the experimental results, the fiber addition significantly increased the unconfined compressive strength of the soils. The maximum strength increase of 43.60% was achieved with a 0.75% fiber content, while the lowest increase of 18.79% occurred with a 1.50% fiber content. The optimum fiber content was determined to be 0.75%, which provided the maximum stability improvement. It was also observed that the fiber addition increased the ductility of the soils and altered their fracture behavior.

The literature states that the optimum usage rate of PP fibers is in the range of 0.4–0.6% and provides an increase in soil strength of 80–150% at these rates. In contrast, the optimum rate for WAFF in this study was determined to be 0.75%, and a maximum strength increase of 43.6% was obtained. In this direction, PP fibers exhibit higher performance in terms of strength increase, and the improvement provided by WAFF is also acceptable in engineering applications.

The waste fibers used in this study offer both environmental and economic benefits. The evaluation of waste vehicle air filters in this way presents a sustainable alternative to synthetic materials, such as polypropylene, which have a high carbon footprint. The use of waste air filters as an environmentally friendly soil improvement additive contributes to both the recycling of industrial waste and the improvement of soil mechanical properties. This method has been shown to be a low-cost and environmentally sustainable approach to soil improvement.

This study has demonstrated the potential of fibers obtained from waste vehicle air filters as a soil improvement additive. Future studies could extend this method to a broader range of applications by evaluating different types of waste materials (e.g., textiles, plastics, or rubber) in a similar manner. Additionally, evaluating the performance of fiber additives in different soil types (e.g., sandy or clayey soils) would enhance the general applicability of the method. Supporting the laboratory experiments with field applications is crucial for testing the practicality of this method in real-world projects. Research on long-term performance, durability, and environmental impacts will also provide more comprehensive information on the sustainability of this method.

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)

***Mehmet Uğur YILMAZOĞLU*:** He conducted the experiments, analyzed the results and performed the writing process.

Deneyleri yürüttü, sonuçları analiz etti ve yazım sürecini 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] Abbaspour, M., Aflaki, E., & Nejad, F. M. (2019). Reuse of waste tire textile fibers as soil reinforcement. Journal of Cleaner Production, 207, 1059–1071.

[2] Almuaythir, S., Zaini, M. S. I., Hasan, M., & Hoque, M. I. (2024). Sustainable soil stabilization using industrial waste ash: Enhancing expansive clay properties. Heliyon, 10(20).https://www.cell.com/heliyon/fulltext/S2405-8440(24)15155-9.

[3] Estabragh, A. R., Rafatjo, H., & Javadi, A. A. (2014). Treatment of an expansive soil by mechanical and chemical techniques. Geosynthetics International, 21(3), 233–243. https://doi.org/10.1680/gein.14.00011.

[4] Mukherjee, K., & Mishra, A. K. (2021). Recycled waste tire fiber as a sustainable reinforcement in compacted sand–bentonite mixture for landfill application. Journal of Cleaner Production, 329, 129691.

[5] Narani, S. S., Abbaspour, M., Hosseini, S. M. M., Aflaki, E., & Nejad, F. M. (2020). Sustainable reuse of Waste Tire Textile Fibers (WTTFs) as reinforcement materials for expansive soils: With a special focus on landfill liners/covers. Journal of Cleaner Production, 247, 119151.

[6] Tan, T., Huat, B. B. K., Anggraini, V., Shukla, S. K., & Nahazanan, H. (2021). Strength

Behavior of Fly Ash-Stabilized Soil Reinforced with Coir Fibers in Alkaline Environment. Journal of Natural Fibers, 18(11), 1556–1569. https://doi.org/10.1080/15440478.2019.1691701.

[7] Consoli, N. C., Zortéa, F., De Souza, M., & Festugato, L. (2011). Studies on the Dosage of Fiber-Reinforced Cemented Soils. Journal of Materials in Civil Engineering, 23(12), 1624–1632.https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000343

[8] Khattak, M. J., & Alrashidi, M. (2006). Durability and mechanistic characteristics of fiber reinforced soil–cement mixtures. International Journal of Pavement Engineering, 7(1), 53–62. https://doi.org/10.1080/10298430500489207

[9] Park, S.-S. (2011). Unconfined compressive strength and ductility of fiber-reinforced cemented sand. Construction and Building Materials, 25(2), 1134–1138.

[10] Tang, C., Shi, B., Gao, W., Chen, F., & Cai, Y. (2007). Strength and mechanical behavior of short polypropylene fiber reinforced and cement stabilized clayey soil. Geotextiles and Geomembranes, 25(3), 194–202.

[11] Yao, X., Huang, G., Wang, M., & Dong, X. (2021). Mechanical Properties and Microstructure of PVA Fiber Reinforced Cemented Soil. KSCE Journal of Civil Engineering, 25(2), 482–491. https://doi.org/10.1007/s12205-020-0998-x

[12] Yilmazoğlu, M. U. (2024). Effect of Bone Ash and Rice Husk Ash on the Unconfined Compressive Strength of Silt Soil. Kastamonu University Journal of Engineering and Sciences, 10(1), 22–28.

[13] Zhang, J., Xu, W., Gao, P., Yao, Z., Su, L., Qiu, N., & Huang, W. (2023). Compressive strength characteristics of hybrid fiber-reinforced cemented soil. International Journal of Pavement Engineering, 24(2), 2104843. https://doi.org/10.1080/10298436.2022.2104843

[14] Ali, A., Hassan, N. A., & Ali, M. (2020). Strength characteristics of fiber-reinforced clayey soil. International Journal of Geotechnical Engineering, 14(2), 120–132. https://doi.org/10.1080/19386362.2020.1736789.

[15] Hussein, A. A., & Ali, H. (2019). Effect of polypropylene fibers on the mechanical properties of expansive soils. Geotechnical and Geological Engineering, 37(5), 4563–4577. https://doi.org/10.1007/s10706-019-00952-1.

[16] Pradhan, P. K., Kar, R. K., & Naik, A. (2012). Effect of random inclusion of polypropylene fibers on strength characteristics of cohesive soil. Geotechnical and Geological Engineering, 30(1), 15–25. https://doi.org/10.1007/s10706-011-9441-9.

[17] ASTM C1585. Standard test method for measurement of rate of absorption of water by hydraulic-cement concretes; 2004.

[18] ASTM, D4318. Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils.

[19] ASTM D698-12, 2012. Standard test methods for laboratory compaction characteristics of soil using standard effort (12 400 ft-lbf/ft3 (600 kN-m/ m3)). West Conshohocken, PA: ASTM International.

Gazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Dergisi
PART C: TASARIM VE TEKNOLOJİ

Gazi University
Journal of Science
PART C: DESIGN AND TECHNOLOGY

GU J Sci, Part C, 13(2): 788-797 (2025)

İmalat Mühendisliğinin Ekonomik Büyüme ve Verimlilik Üzerindeki Rolü ve Endüstri 4.0 Perspektifi

Çiğdem ÇİÇEK[1*], Oğuz POYRAZOĞLU[1]

[1]*Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, 06500 Yenimahalle, Ankara, Türkiye*

Article Info

Research article
Received: 30/12/2024
Revision: 17/02/2025
Accepted: 11/03/2025

Keywords

Digital transformation
Industry 4.0
Manufacturing engineering
Sustainable manufacturing

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 30/12/2024
Düzeltme: 17/02/2025
Kabul: 11/03/2025

Anahtar Kelimeler

Dijital dönüşüm
Endüstri 4.0
İmalat Mühendisliği
Sürdürülebilir üretim

Grafik Özet (Graphical Abstract)

Bu araştırmada, imalat mühendisliğinin ülke ekonomisi ve verimlilik üzerindeki etkilerini analiz edilip, Endüstri 4.0'ın katkısı detaylandırılmıştır. / In this research, the effects of manufacturing engineering on the country's economy and productivity are analyzed and the contribution of industry 4.0 is detailed.



Şekil A: *Endüstri 4.0'ın gelişimi ve dönüm noktaları/**Figure A:** Development and milestones of Industry 4.0*

Önemli noktalar (Highlights)

- *Endüstri 4.0'ın imalat mühendisliğine entegrasyonuyla üretim süreçleri optimize edilerek maliyetler düşürülebilir. / With the integration of Industry 4.0 into manufacturing engineering, production processes can be optimized and costs can be reduced.*
- *Teknolojik inovasyonlarla enerji verimliliği artar ve daha sürdürülebilir çevre dostu üretim yöntemleri ekonomiye, topluma ve çevreye katkı sağlar. / Via technological innovations, energy efficiency increases and more sustainable, environmentally friendly production methods contribute to the economy, society and the environment.*

Amaç (Aim): *Bu çalışmayla imalat mühendisliğinin ekonomik büyüme, verimlilik artışı ve sürdürülebilirlik üzerindeki etkilerini analiz etmek amaçlanmıştır. / This study aims to analyze the effects of manufacturing engineering on economic growth, productivity increase and sustainability.*

Özgünlük (Orginality): *Bu araştırma, Endüstri 4.0 kapsamında sürdürülebilirlik, dijitalleşme ve teknolojik inovasyon konularını hesaba katarak imalat mühendisliğinin ekonomik büyüme üzerine etkilerini incelemesiyle özgündür. / This research is novel in that it investigates the effects of manufacturing engineering on economic growth by taking into account sustainability, digitalization and technological innovation within the scope of Industry 4.0.*

Bulgular (Results): *İmalat mühendisliğinin, dijital dönüşüm ve ileri teknolojilerin benimsenmesi yoluyla ekonomik büyüme ve sürdürülebilirlik gibi konuları desteklediği gösterilmiştir. Ayrıca, nitelikli iş gücü ihtiyacının karşılanması için eğitim ve beceri geliştirme politikalarının önem arz ettiği belirtilmiştir. / Manufacturing engineering has been shown to support subjects such as economic growth and sustainability through digital transformation and the adoption of advanced technologies. It has also been stated that education and skill development policies are important to meet the need for a qualified workforce.*

Sonuç (Conclusion): *İmalat mühendisliğinin ekonomik büyüme açısından kritik bir öneme sahip olduğunu ve teknolojik ilerlemelerin dikkate alınmasıyla daha da güçlendiğini göstermektedir. / It shows that manufacturing engineering is of critical importance to economic growth and is further strengthened by considering technological advancements.*

*Corresponding author, e-mail: cigdemcicek891@gmail.com
DOI: 10.29109/gujsc.1610127

GU J Sci, Part C, 13(2): 788-797 (2025)

Gazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Dergisi
PART C: TASARIM VE TEKNOLOJİ

Gazi University
Journal of Science
PART C: DESIGN AND TECHNOLOGY

http://dergipark.gov.tr/gujsc

İmalat Mühendisliğinin Ekonomik Büyüme ve Verimlilik Üzerindeki Rolü ve Endüstri 4.0 Perspektifi

Çiğdem ÇİÇEK[1*], Oğuz POYRAZOĞLU[1]

[1]*Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, 06500 Yenimahalle, Ankara, Türkiye*

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 30/12/2024
Düzeltme: 17/02/2025
Kabul: 11/03/2025

Anahtar Kelimeler

Dijital dönüşüm
Endüstri 4.0
İmalat mühendisliği
Sürdürülebilir üretim

Öz

İmalat mühendisliği, ekonomik büyüme ve verimlilik üzerinde anahtar bir etkiye sahiptir. Endüstri 4.0 ve dijital dönüşüm süreçleri, imalat mühendisliğinin önemini artırmış olup, modern üretim teknolojilerinin geniş alanlara yayılmasını sağlamıştır. İmalat mühendisliği üretim süreçlerini optimize eder. Bu süreçlerde maliyet düşüşü, kaynak verimliliği, sürdürülebilirlik ve ürün kalitesi açısından ilerleme sağlar. Teknolojik inovasyonlar, robotik otomasyon, yapay zeka ve dijital ikiz uygulamaları gibi araçlarla, üretim süreçlerinde esnekliğin ve etkinliğin artmasına yardımcı olur. Bu çalışma, imalat mühendisliğinin doğrudan ve dolaylı ekonomik etkilerini incelemiş; teknolojik adaptasyon, yenilikçilik ve dijitalleşmenin ekonomik performansı artırdığı gösterilmiştir. Sürdürülebilirlik açısından, enerji verimliliği, atık yönetimi ve çevre dostu teknolojilerin benimsenmesi, ekonomik ve çevresel faydalar sunmaktadır. Ancak teknolojik dönüşüm, istihdam yapısını değiştirerek nitelikli işgücüne olan talebi arttırmaktadır. Bu bağlamda, mesleki eğitim ve dijital becerilerin geliştirilmesi önem arz etmektedir. Sonuç olarak bu araştırma imalat mühendisliğinin ekonomik büyümeye katkısını vurgulamakta ve sürdürülebilir kalkınma hedefleri doğrultusunda teknoloji odaklı stratejiler geliştirilmesini önermektedir. Endüstriyel politikaların dijital dönüşümle uyumlu hale getirilmesi, küresel rekabet gücünün artırılması açısından kritik öneme sahiptir.

The Role of Manufacturing Engineering on Economic Growth and Productivity and Industry 4.0 Perspective

Article Info

Research article
Received: 30/12/2024
Revision: 17/02/2025
Accepted: 11/03/2025

Keywords

Digital transformation
Industry 4.0
Manufacturing engineering
Sustainable manufacturing

Abstract

Manufacturing engineering has a key impact on economic growth and productivity. Industry 4.0 and digital transformation processes have increased the importance of manufacturing engineering and have enabled the spread of modern production technologies to wide areas. Manufacturing engineering optimizes production processes. It provides progress in terms of cost reduction, resource efficiency, sustainability and product quality in these processes. Technological innovations help increase flexibility and efficiency in production processes with tools such as robotic automation, artificial intelligence and digital twin applications. This study examined the direct and indirect economic effects of manufacturing engineering; it has been shown that technological adaptation, innovation and digitalization increase economic performance. In terms of sustainability, energy efficiency, waste management and the adoption of environmentally friendly technologies offer economic and environmental benefits. However, technological transformation increases the demand for qualified labor by changing the employment structure. In this context, vocational training and the development of digital skills are important. As a result, this research emphasizes the contribution of manufacturing engineering to economic growth and suggests the development of technology-focused strategies in line with sustainable development goals. Aligning industrial policies with digital transformation is critical for increasing global competitiveness.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

İmalat mühendisliği, modern ekonomilerin temel taşlarından biri olarak, ülkelerin endüstriyel kapasitelerini şekillendirmede kritik bir rol oynamaktadır. Endüstri 4.0, dördüncü sanayi devrimi olarak da bilinen, üretim süreçlerinin tam otomasyonu ve dijitalleşmesini ifade eden bir kavramdır. Bu kavram, akıllı fabrikalar, siber-fiziksel sistemler, nesnelerin interneti (IoT), büyük veri analitiği ve yapay zeka gibi teknolojilerin entegrasyonunu kapsamaktadır. Endüstri 4.0 ve

*Corresponding author, e-mail: cigdemcicek891@gmail.com
DOI: 10.29109/gujsc.1610127

dijital dönüşümün yapıtaşları Tablo 1'de sunulmuştur.

Tablo 1. Endüstri 4.0 ve Dijital Dönüşümün Temel Bileşenleri [1]

Endüstri 4.0'ın Temel Bileşenleri	Dijital Dönüşüm Süreç Bileşenleri
Akıllı üretim sistemleri	İş süreçlerinin otomasyonu
Siber-fiziksel sistemler	Veri odaklı karar verme
Nesnelerin interneti (IoT)	Müşteri deneyiminin dijitalleşmesi
Büyük veri ve analitik	Tedarik zinciri optimizasyonu
Yapay zeka ve makine öğrenimi	Dijital iş modelleri geliştirme
Robotik sistemler	
Bulut bilişim	

Bu iki kavramın imalat mühendisliği üzerindeki etkisi, üretim süreçlerinin optimizasyonu, kaynak verimliliğinin artırılması ve yenilikçi üretim yöntemlerinin geliştirilmesi gibi alanlarda kendini göstermektedir. Bu bağlamda, imalat mühendisliğinin ekonomik büyüme, verimlilik artışı ve teknolojik inovasyon üzerindeki etkileri, akademik ve endüstriyel çevrelerin odak noktası haline gelmiştir [2].

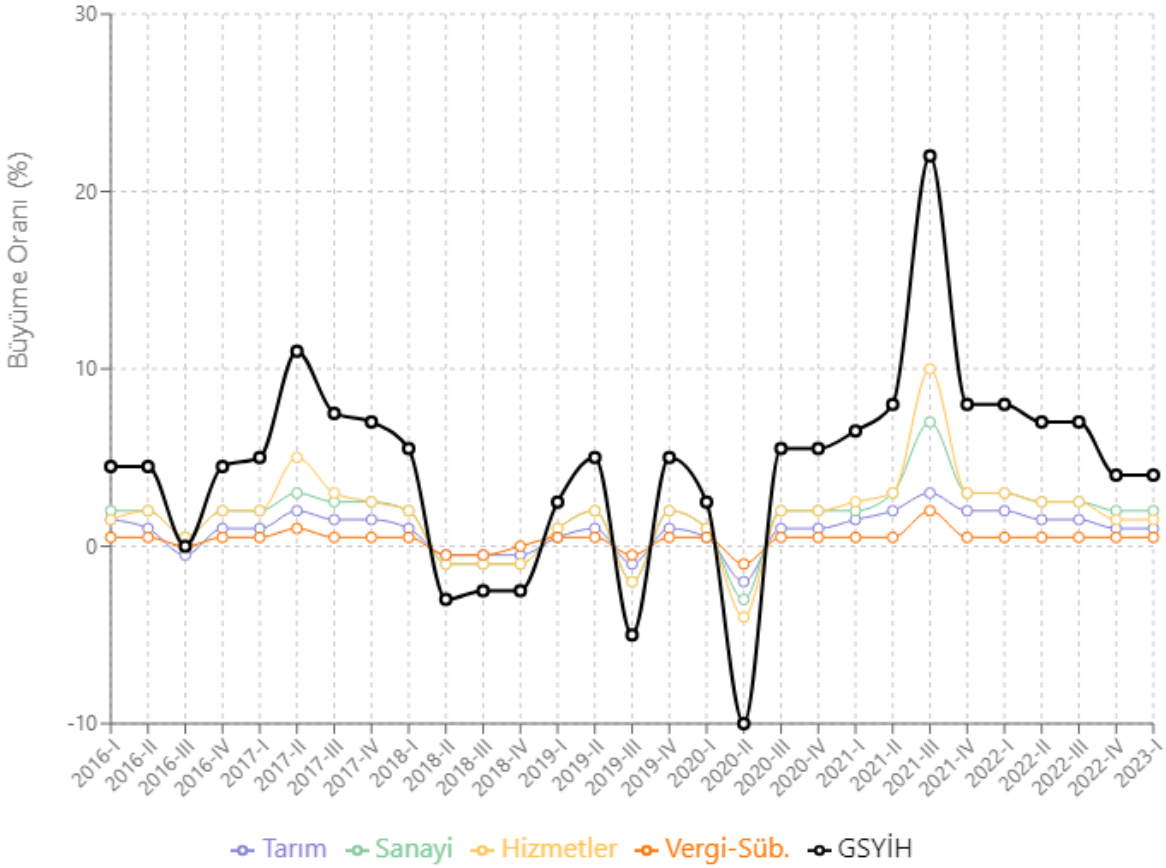
Özellikle son yıllarda, Endüstri 4.0 ve dijital dönüşüm süreçlerinin hız kazanmasıyla birlikte, imalat mühendisliğinin önemi daha da artmıştır. İmalat mühendisliği, üretim süreçlerinin optimizasyonu, kaynak verimliliğinin artırılması ve yenilikçi üretim yöntemlerinin geliştirilmesi gibi alanlarda kilit bir rol üstlenmektedir [3]. Bu durum, ülkelerin ekonomik performansını ve uluslararası pazarlardaki konumunu doğrudan etkilemektedir [4].

Verimlilik artışı perspektifinden bakıldığında, imalat mühendisliği uygulamaları, üretim maliyetlerinin düşürülmesi, ürün kalitesinin yükseltilmesi ve üretim döngü sürelerinin kısaltılması gibi kritik hedeflere ulaşılmasında vazgeçilmez bir role sahiptir [5]. Modern imalat sistemlerinin tasarımı ve uygulaması, ileri düzey otomasyon teknolojilerinin entegrasyonu ve sürdürülebilir üretim pratiklerinin geliştirilmesi, imalat mühendisliğinin temel çalışma alanları arasında yer almaktadır [6]. Bu bağlamda, çevre dostu üretim yöntemlerinin benimsenmesi hem ekonomik hem de çevresel sürdürülebilirlik açısından önem kazanmaktadır [7-9].

Bu çalışma, Türkiye imalat sektörü özelinde, imalat mühendisliğinin ekonomik büyüme ve verimlilik üzerindeki etkilerini incelemektedir. Türkiye'nin 2023 vizyonu kapsamında belirlenen hedeflere ulaşmasında imalat sektörünün kritik rolü göz önüne alınarak, çalışma özellikle 2016-2023 dönemini kapsamaktadır. Araştırma, metal, otomotiv, tekstil ve elektronik gibi Türkiye'nin önde gelen imalat sektörlerini ele almaktadır. Ayrıca aşağıdaki temel araştırma sorularına yanıt aranmaktadır: İmalat mühendisliğinin ekonomik büyüme ve kalkınma üzerindeki doğrudan ve dolaylı etkileri nelerdir? Verimlilik artışında imalat mühendisliği uygulamalarının rolü nasıl ölçümlenebilir ve değerlendirilebilir? Teknolojik inovasyon ve imalat mühendisliği arasındaki ilişki, ekonomik performansı nasıl etkilemektedir? Bu sorular çerçevesinde, çalışmamız literatür taraması, vaka analizleri ve endüstriyel uygulamalardan elde edilen verilerin değerlendirilmesine dayanmaktadır. Araştırmamızın sonuçları, imalat mühendisliğinin ekonomik, kalkınma ve verimlilik artışındaki rolünün daha iyi anlaşılmasına katkı sağlayacak ve gelecekteki politika önerilerine temel oluşturacaktır.

Tablo 2. İmalat sektörünün ekonomik büyümeye katkıları (Contributions of the manufacturing sector to economic growth)

Etki Türü	Açıklama
Doğrudan Etkiler	Verimlilik artışları, üretim maliyetlerinin düşmesi, ihracat gelirlerinin artışı
Dolaylı Etkiler	Teknoloji transferi, inovasyon ekosistemi gelişimi, altyapı iyileştirmeleri
Küresel Değer Zinciri	İleri üretim teknolojisi ile daha yüksek katma değerli pozisyonlara erişim sağlanması



Şekil 1. Üretim yöntemlerinin büyümeye katkısı (TÜİK) (Contribution of production methods to growth (TSI))

2. İMALAT MÜHENDİSLİĞİ VE EKONOMİK BÜYÜME (MANUFACTURING ENGINEERING AND ECONOMIC GROWTH)

İmalat sektörü, ekonomik büyümenin temel lokomotiflerinden biri olarak kabul edilmekte ve özellikle gelişmekte olan ekonomilerde çeşitli etkiler yapmaktadır (Tablo 2). Bu sektör, gayri safi yurtiçi hasıla (GSYİH) içindeki payı ve istihdam yaratma kapasitesi ile ekonomik kalkınmanın temel göstergeleri arasında yer almaktadır. İmalat sektörü ve üretim yöntemlerinin gelişmesi, ekonomik sürdürülebilirliği artırmaktadır. Şekil 1'de görüldüğü üzere, Türkiye ekonomisinin sektörel büyüme oranları 2016-2023 yılları arasında önemli dalgalanmalar göstermiştir. Özellikle 2020 yılının ikinci çeyreğinde Covid-19 pandemisinin etkisiyle tüm sektörlerde keskin bir düşüş yaşanmıştır. Bu dönemde GSYİH yaklaşık %10 oranında daralmıştır. Ancak, 2021 yılının dördüncü çeyreğinde ekonomi güçlü bir toparlanma göstermiş ve GSYİH %22'ye yakın bir büyüme kaydetmiştir. Buradaki toparlanmanın içerisinde önemli bir pay da imalat sektöründen kaynaklanmıştır. İmalat mühendisliği özellikle stratejik öneme sahip olan ülkeler için savunma ve yaşam döngüsü için de önem arz etmektedir [10]. İmalat sektöründeki büyüme, doğrudan verimlilik artışı ve maliyet optimizasyonu gibi önemli etkiler sağlarken, dolaylı olarak teknoloji transferi, inovasyon ekosisteminin gelişimi gibi alanları da teşvik etmektedir [11].

Son on yılda gerçekleşen dijital dönüşüm ve Endüstri 4.0 uygulamalarının yaygınlaşması, imalat mühendisliğinin ekonomik katkısını daha da belirgin hale getirmiştir. Akıllı fabrikalar, otonom sistemler ve dijital ikiz uygulamaları gibi inovatif çözümler, üretim süreçlerinde devrim niteliğinde değişiklikler yaratmıştır. Bu durum üretim maliyetlerinde önemli düşüşler sağlarken ürün



Şekil 2. Endüstri 4.0'ın gelişimi ve dönüm noktaları (Development and milestones of Industry 4.0)

Tablo 3. Gelişmekte olan çoğu ekonomide imalat sektörünün etkileri (The impact of the manufacturing sector in most developing economies)

Teknoloji	Verimlilik Artışına Katkısı
Yapay Zeka Destekli Sistemler	Gerçek zamanlı veri analizi, öngörücü bakım, hata tespiti
Robotik Otomasyon	Daha hızlı ve hassas üretim, insan gücü gereksiniminin azaltılması
Akıllı Sensör Ağları	Süreç izleme, enerji kullanımını optimize etme, kaynakların tam zamanında dağıtımı
Dijital İkizler	Sanal modelleme ile süreç optimizasyonu, üretim hatalarının öngörülmesi

kalitesini ve üretim esnekliğini artırmıştır [11]. Şekil 2'de Endüstri 4.0'ın gelişimi ve dönüm noktaları verilmiştir. Küresel değer zincirleri perspektifinden bakıldığında, imalat mühendisliği uygulamaları ülkelerin uluslararası rekabet gücünü belirleyen temel unsurlardan biri haline gelmiştir. İleri üretim teknolojilerine adaptasyon, ülkelerin küresel değer zincirlerinde daha yüksek katma değerli pozisyonlara ulaşmasına olanak tanımaktadır [12]. Bu durum, özellikle gelişmekte olan ülkeler için kritik bir fırsat sunmakta ve bu ülkelerin ekonomik büyüme stratejilerinde imalat mühendisliğini merkezine yerleştirmektedir [13].

Sonuç olarak, imalat mühendisliğinin ekonomik büyüme üzerindeki etkisi, çok yönlü bir yapı sergilemekte ve bu etki doğrudan ve dolaylı kanallar aracılığıyla gerçekleşmektedir. İmalat sektörü, ekonomik kalkınma stratejilerinin merkezine yerleştirilerek, ülkelerin sürdürülebilir büyüme hedeflerine ulaşmalarında önemli bir rol oynamaktadır [10].

3. VERİMLİLİK ARTIŞI VE İMALAT MÜHENDİSLİĞİ (PRODUCTİVITY INCREASE AND MANUFACTURING ENGINEERING)

Verimlilik artışı, modern imalat mühendisliğinin en kritik çıktılarından biri olarak kabul edilmektedir. Günümüzde verimlilik, geleneksel anlamdaki üretim hızı ve çıktı miktarı ölçütlerinin ötesine geçerek, kaynak kullanım etkinliği, enerji verimliliği, sürdürülebilirlik ve kalite parametrelerini de kapsayan çok boyutlu bir yapıya dönüşmüştür (Tablo 3). Bu dönüşüm, imalat mühendisliği uygulamalarının verimlilik üzerindeki etkisini daha da önemli hale getirmektedir. Özellikle yapay zeka ve robotik otomasyon gibi ileri üretim teknolojilerinin entegrasyonu, verimlilik artışının temel itici güçlerinden biri

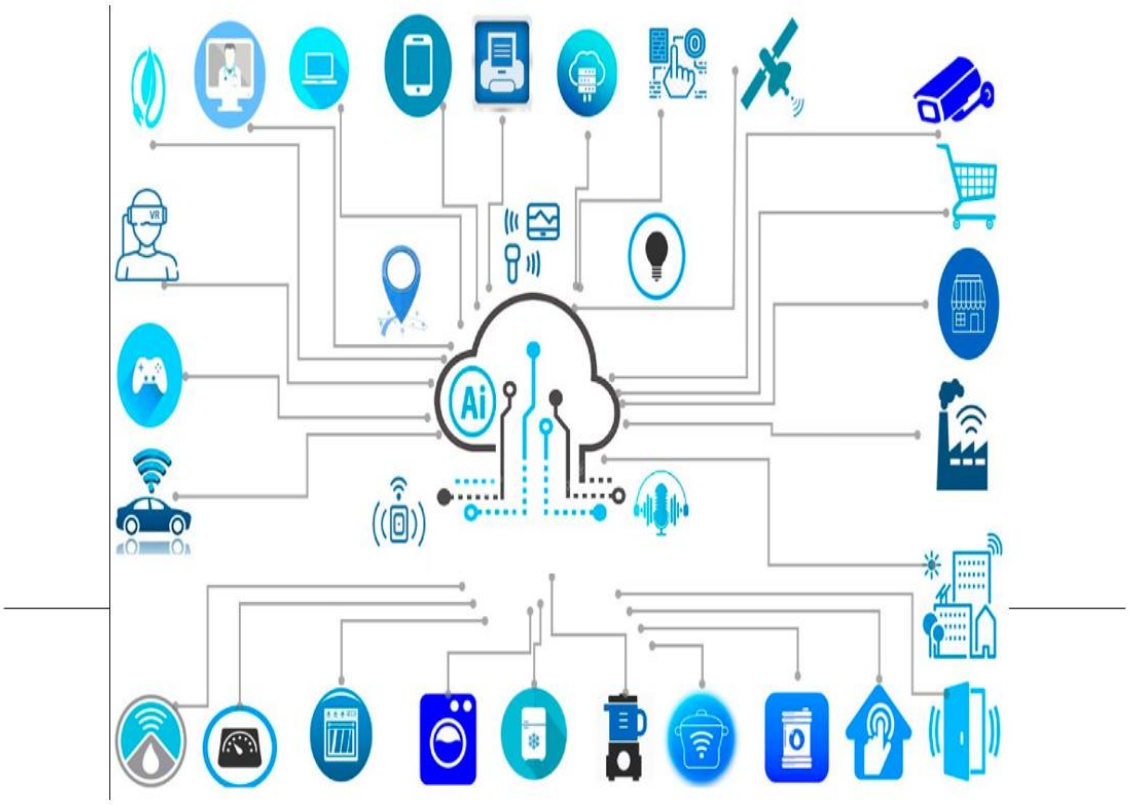
olmuş ve üretim süreçlerinde devrim niteliğinde değişimler yaratmıştır [14,15].

Sürdürülebilir üretim pratikleri, verimlilik artışının yeni boyutlarından birini oluşturmaktadır. Çevre dostu üretim teknolojileri ve döngüsel ekonomi uygulamaları, çevresel etkileri azaltmanın yanı sıra, operasyonel maliyetleri düşürerek ekonomik verimliliği de artırmaktadır. Özellikle enerji tüketiminin optimizasyonu, atık yönetimi ve malzeme geri dönüşümü gibi yaklaşımlar (Tablo 4), sürdürülebilir verimlilik artışının temel bileşenleri olarak öne çıkmaktadır [16]. Türkiye'de imalat sektöründe verimlilik artışının nicel göstergeleri şu şekildedir:

- 2020-2022 döneminde imalat sanayinde işgücü verimliliği yıllık ortalama %5.2 artış göstermiştir.
- Akıllı fabrika uygulamalarını benimseyen işletmelerde üretim maliyetleri ortalama %15-25 oranında düşüş kaydetmiştir.
- Otomasyon sistemlerinin kullanımıyla fire oranları %30'dan %5'e kadar düşürülmüştür.
- Enerji verimliliği uygulamaları ile işletmelerin enerji tüketimi %20-30 oranında azalmıştır.

Tablo 4. Sürdürülebilir üretim pratiklerinin ekonomik katkıları (Economic contributions of sustainable production practices)

Pratik	Katkıları
Enerji Tüketiminin Optimizasyonu	Çevresel etkilerin azaltılması, enerji maliyetlerinin düşmesi
Atık Yönetimi ve Geri Dönüşüm	Üretim maliyetlerinin düşürülmesi, atık miktarının azaltılması
Döngüsel Ekonomi Yaklaşımları	Kaynak kullanımının minimize edilmesi, ekonomik ve çevresel sürdürülebilirlik sağlanması



Şekil 3. Farklı cihazların birbirine bağlı olduğu bir nesnelerin interneti ağı (An internet of things network where different devices are connected to each other)

Bu bağlamda toplam kalite yönetimi uygulamaları, sürdürülebilirlik hedefleri ile entegre bir şekilde, işletmelerin verimliliklerini artırmalarına katkıda bulunmaktadır [17]. Kalite yönetimi sistemlerinin dijitalleşmesi ve verimlilik artışında önemli bir rol oynamaktadır. İleri kalite kontrol sistemleri ve dijital ikiz uygulamaları, ürün kalitesini artırırken fire oranlarını minimum düzeye indirerek müşteri memnuniyetini üst seviyelere taşımaktadır [18]. Bu yaklaşımlar, toplam kalite yönetimi prensiplerinin dijital çağa adaptasyonunda önemli bir pozisyona sahiptir [17].

4. TEKNOLOJİK İNOVASYON VE İMALAT MÜHENDİSLİĞİ (TECHNOLOGICAL INNOVATION AND MANUFACTURING ENGINEERING)

Teknolojik inovasyon, imalat mühendisliğinin evriminde en temel parametrelerden biridir. Özellikle son yıllarda yapay zeka, büyük veri analitiği ve nesnelerin interneti gibi teknolojilerin hızla gelişimi, imalat süreçlerinde köklü bir değişime yol açmıştır. Bu değişim, yalnızca üretim yöntemlerini değil aynı zamanda iş modellerini, tedarik zinciri yönetimini ve müşteri ilişkilerini de dönüştürmektedir [19,20].

Teknolojik inovasyonun imalat sektörüne etkisini gösteren önemli veriler aşağıda sunulmuştur [1]:

- Türkiye'de imalat sektöründe dijital dönüşüm yatırımları 2022 yılında bir önceki yıla göre %45 artış göstermiştir.
- Robotik otomasyon sistemlerini kullanan işletmelerde üretim kapasitesi %40'a kadar artış göstermiştir.
- Yapay zeka uygulamalarını benimseyen işletmelerde kalite kontrol maliyetleri %35 oranında azalmıştır.
- Dijital ikiz teknolojisini kullanan işletmelerde ürün geliştirme süreleri %50'ye varan oranlarda kısalmıştır.
- Nesnelerin interneti uygulamalarıyla tedarik zinciri maliyetleri ortalama %20 düşüş göstermiştir.

Yapay zeka ve nesnelerin interneti gibi akıllı teknolojiler, üretimde daha otonom ve verimli süreçlerin önünü açarak, işletmelerin değişen pazar koşullarına dinamik ve hızlı bir şekilde yanıt verebilmesine olanak tanımaktadır (Şekil 3). Bu durum, sektördeki yeniliklerin değer zincirine ek katkılar sağlayarak, rekabet avantajını artırdığını göstermektedir.

İleri otomasyon teknolojilerinin imalat sektöründe kullanımı, sektörde yeni bir çağın başlangıcını temsil etmektedir. Akıllı robotlar, otonom sistemler ve makine öğrenim algoritmaları, üretim sürecini hızlandırmakta, optimizasyon seviyesini yükseltmekte ve karar mekanizmalarını daha güçlü hale getirmektedir [21]. Buna yenilikçi teknolojilerin sunduğu avantajlar, Tablo 5'te özetlenmiştir.

Dijital ikiz teknolojisi gibi uygulamalar, üretim süreçlerini simüle ve analiz ederek daha fazla gelir elde edilmesini kolaylaştırmakta ve firmalara katma değer yaratmaktadır [19,22]. Dijital dönüşüm sürecinde veri analitiği ve simülasyon teknolojileri özel bir öneme sahiptir. Dijital ikiz uygulamaları ve sanal gerçeklik platformları, ürün tasarımından üretim planlamasına kadar tüm imalat süreçlerinin optimize edilmesine katkı sağlamaktadır [20].

İleri otomasyonun sağladığı avantajlar şu şekilde sıralanabilir:

- **Prototipleştirme Maliyetlerinin Düşürülmesi:** Sanal ortamda ürün geliştirme süreçlerinin ilerlemesi, üretim öncesi testlerin maliyetini düşürmektedir.
- **Ürün Geliştirme Döngülerinin Hızlanması:** Daha kısa sürelerde yeni ürünler pazara sunulabilmektedir.
- **Tedarik Zinciri Entegrasyonu:** Bulut tabanlı IoT platformları, tedarik zincirine gerçek zamanlı izlenebilirlik ve kontrol imkanı sunmaktadır [19,20].

Tablo 5. İleri otomasyon teknolojilerinin imalat süreçlerine katkıları (Contributions of advanced automation technologies to manufacturing processes)

Teknoloji	Katkıları
Akıllı Robotlar	Üretimin hızlanması, hassasiyetin artması, insan kaynaklı hatalarda azalma
Otonom Sistemler	Kaynak kullanımının daha verimli hale gelmesi, süreçlerin kesintisiz devam etmesi
Makine Öğrenimi Algoritmaları	Gerçek zamanlı analiz, üretimi optimize eden veriyle desteklenen karar mekanizmaları
Dijital İkiz Teknolojisi	Üretim simülasyonu, operasyonel hataların önlenmesi, ürün geliştirme döngülerinin hızlanması

5. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA (RESEARCH FINDINGS AND DISCUSSION)

Araştırma bulguları, imalat mühendisliğinde yaşanan teknolojik gelişmelerin ekonomik performans üzerindeki çok boyutlu etkilerini ortaya koymaktadır. Özellikle dijital dönüşüm sürecinin hız kazanması, işletmelerin verimlilik artışı ve inovasyon kapasitesinde önemli iyileşmeler sağlamaktadır. İleri imalat teknolojilerinin kullanımı, işletmelerin rekabet gücünü artırmakta ve bu değişim hem mikro düzeyde işletme performansı üzerinde hem de makro düzeyde ekonomik büyüme üzerinde olumlu etkiler yaratmaktadır [23,24].

Koska'nın çalışması, Türkiye'deki metal mutfak eşyası imalat sektöründe ileri imalat teknolojilerinin rekabet avantajlarına olan etkisini incelemiş, söz konusu teknolojilerin benimsenmesinin işletmelere önemli faydalar sağladığını vurgulamıştır [24]. Ayrıca, yüksek teknolojili ürün ihracatının ekonomik büyüme üzerindeki katkısı, bir başka kritik bulgu olarak öne çıkmaktadır [25].

Vaka analizleri, yapay zeka (YZ) ve robotik sistemlerin üretim süreçlerine entegrasyonunun operasyonel verimliliği artırdığını, aynı zamanda maliyetleri düşürdüğünü ve ürün kalitesini yükselttiğini göstermektedir [26,27]. Bu gelişmeler, işletmelerin yalnızca pazar paylarını genişletmesini değil, aynı zamanda yeni pazarlara erişim sağlamasını da kolaylaştırmaktadır. Özellikle Endüstri 4.0 çerçevesinde akıllı üretim sistemlerinin entegrasyonu, üretkenliği ve çevikliği artırarak işletmelerin küresel rekabet gücünü önemli ölçüde artırmaktadır [27]. Ayrıca, üretim maliyetlerindeki azalmalar, işletmelerin maliyet etkinliğini artırmakta; bu durum ise hem ulusal hem de uluslararası düzeyde önemli rekabet avantajları oluşturmaktadır [26].

Teknolojik gelişmelerin sürdürülebilirlik üzerindeki etkileri de önemli bir araştırma konusu oluşturmaktadır. Çevresel sürdürülebilirlik açısından, modern üretim teknolojilerinin enerji verimliliği, atık yönetimi ve karbon emisyonlarının azaltılması gibi alanlarda sağladığı katkılar öne çıkmaktadır [28,29]. Bu bağlamda, Endüstri 4.0 uygulamalarının yalnızca üretim süreçlerinde verimlilik artışı sağlamakla kalmadığı, aynı zamanda çevresel etkileri de minimuma indirdiği görülmektedir [26]. Gelişmiş üretim teknolojilerinin, hem ekonomik hem de çevresel sürdürülebilirlik hedeflerine eşzamanlı olarak katkıda bulunması, modern imalat mühendisliğinin önemli bir avantajıdır.

Teknolojik gelişmelerin sonuçlarından biri de istihdam yapısındaki değişimdir. Teknolojik dönüşüm, geleneksel iş rollerinin yerini daha çok yüksek vasıflı iş gücü gerektiren yeni rollere bırakmasına yol açmaktadır. Bu süreçte düşük vasıflı işlerde azalma eğilimi görülürken dijitalleşme, otomasyon ve ileri teknoloji kullanımıyla yüksek nitelikli çalışanlara olan talep artmaktadır [30].

Özdemir ve arkadaşlarının Türkiye'deki işletmeler üzerinde yaptıkları bir araştırma, yüksek nitelikli iş gücü bulma konusunda işletmelerin yaşadığı güçlükleri gözler önüne sermektedir. Çalışma, teknolojik gelişmelerin işletme beklentileri ile iş gücü piyasasındaki nitelikli çalışan arzı arasında bir uyumsuzluk yaratarak eksikliklere yol açtığını vurgulamaktadır [30]. Bu durum, eğitim ve beceri geliştirme programlarının önemini artırmakta ve işletmelerin ihtiyaçlarını karşılayabilecek insan

kaynağının yetiştirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER (CONCLUSION AND RECOMMENDATIONS)

İmalat mühendisliğinin ekonomik büyüme ve verimlilik üzerindeki etkileri, kapsamlı bir dönüşüm sürecinin göstergeleri olarak karşımıza çıkmaktadır. Araştırma sonuçları, teknolojik inovasyonun ve dijital dönüşümün, endüstriyel üretimin geleceğini şekillendiren temel faktörler olduğunu açıkça ortaya koymaktadır. Bu bağlamda, gelecek odaklı politika ve stratejilerin geliştirilmesi, sürdürülebilir ekonomik büyüme için kritik önem taşımaktadır.

Endüstriyel politikaların yeniden yapılandırılması sürecinde, teknoloji adaptasyonunun hızlandırılması ve dijital altyapının güçlendirilmesi öncelikli hedefler arasında yer almalıdır. AR-GE yatırımlarının artırılması, inovasyon ekosisteminin geliştirilmesi ve endüstri-akademi işbirliğinin güçlendirilmesi, bu hedeflere ulaşmada kritik rol oynayacak faktörlerdir. Özellikle KOBİ'lerin dijital dönüşüm süreçlerinin desteklenmesi ve finansal teşvik mekanizmalarının oluşturulması, ekonomik kalkınmanın tabana yayılması açısından önem taşımaktadır.

İnsan kaynakları gelişimi ve eğitim politikaları, dönüşüm sürecinin sürdürülebilirliği açısından kritik öneme sahiptir. Yüksek vasıflı işgücü ihtiyacının karşılanması için eğitim programlarının güncellenmesi, mesleki eğitimin güçlendirilmesi ve yaşam boyu öğrenme fırsatlarının artırılması gerekmektedir. İmalat mühendisliğinde dijital yetkinliklerin geliştirilmesi ve endüstriyel dönüşüme uyum sağlayacak becerilerin kazandırılması öncelikli hedefler arasında yer almalıdır.

İmalat sektöründe sürdürülebilirlik perspektifi, gelecek stratejilerinin ayrılmaz bir parçası olarak değerlendirilmelidir. Çevre dostu üretim teknolojilerinin yaygınlaştırılması, enerji verimliliğinin artırılması ve döngüsel ekonomi prensiplerine uyum sağlanması, uzun vadeli rekabet gücünün korunması açısından hayati önem taşımaktadır. Özellikle çevre dostu ve yeşil teknolojilere yönelik yatırımların teşvik edilmesi ve sürdürülebilir üretim uygulamalarının artarak desteklenmesi 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)

Çiğdem *ÇİÇEK*: Yazar, literatür taraması, yazım ve araştırma süreçlerini yürütmüştür.

The author has conducted the literature review, writing, and researching procedures.

Oğuz *POYRAZOĞLU*: Yazar, kavramsallaştırma, revizyon ve düzenleme süreçlerini gerçekleştirmiştir.

The author has performed conceptualization, revision, and editing processes.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

(There is no conflict of interest in this study.)

KAYNAKLAR (REFERENCES)

[1] Batmaz H, Keskin H. Sanayi performansının istihdam üzerindeki etkileri: Türkiye örneği. Journal of Politics Economy and Management, 2023; 6(2): 45-63.

[2] Küçük N E. Endüstri 4.0'ın Sanayi Bölgeleri Üzerine Etkisi: Istanbul Ilindeki Organize Sanayi Bölgeleri Üzerine Bir Değerlendirme, Marmara Üniversitesi, İstanbul, 2023.

[3] Ghobakhloo M, Azar A. Business excellence via advanced manufacturing technology and lean-agile manufacturing. Journal of Manufacturing Technology Management. 2018; 29(1): 2-24.

[4] Kirik V, Cheng S, Vyunova N, Galustyan O, Gamisonija S, Galustyan S. Education of future green engineers for achieving sustainable development in green manufacturing industry. International Journal of Engineering Pedagogy. 2021; 11(5): 138-145.

[5] Vahdani M, Khalaf G, Afsari A. Analysis and comparison of data from design for manufacturing software and catia software for machining and workpiece manufacturing costs. Research Journal of Applied Sciences

Engineering and Technology. 2014; 7(19): 4115-4123.
[6] Casamayor J, Su D. Environmental impact assessment of lighting products. Key Engineering Materials. 2011; 486: 171-174.
[7] Oliveira J, Oliveira O, Ometto A, Ferraudo A, Salgado M. Environmental management system iso 14001 factors for promoting the adoption of cleaner production practices. Journal of Cleaner Production. 2016; 133: 1384-1394.
[8] Irzaev G, Kanaev M, Isalova M. Selection of the preferred design for manufacturability by constructing the pareto tuple. Istrazivanja I Projektovanja Za Privredu. 2021; 19(2): 275-281.
[9] Puik E, Gielen P, Telgen D, Moergestel L, Ceglarek D. A generic systems engineering method for concurrent development of products and manufacturing equipment. 2014; 139-146.
[10] Alnegrish F. Manufacturing and Economic Growth in Jordan (A Test of Kaldor's Laws). CEMJP. 2023; 31(1): 46-59.
[11] Sani I, Samuel A, Ome W. Foreign capital inflows and manufacturing sector growth in nigeria. Malaysian Management Journal. 2021; 25: 235-260.
[12] Taşdemir F. Industrialization, servicification, and environmental kuznets curve: non-linear panel regression analysis. Environmental Science and Pollution Research. 2021; 29(5): 6389-6398.
[13] Suhányi L, Suhányiová A, Kádárová J, Janeková J. Relationships between average wages in the manufacturing sector and economic indicators of the manufacturing sector in the region of visegrad group countries. Sustainability. 2023; 15(5): 4164-4182.
[14] Işık A, Alakus F, Eskicioğlu Ö. Hayvancılıkta robotik sistemler ve yapay zekâ uygulamaları. Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi. 2021; 9(6): 370-382.
[15] Ever D, Demircioğlu E. Yapay zekâ teknolojilerinin kalite maliyetleri üzerine etkisi. Çukurova Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi. 2022; 31(1): 59-72.
[16] Güzel L. Evaluation of the impact of total quality management on supply chain management. Verimlilik Dergisi. 2023; 57(3): 533-548.
[17] Mucir S, Elçi M, Eminoğlu G. Çalişanlara yönelik toplam kalite yönetimi uygulamalarinin iş performansi ve iş tatmini üzerine etkisi. International Review of Economics and Management. 2021; 9(2): 136-153.
[18] Bütüner O. Kalite yönetim sistemi kavramının bibliyometrik analizi. İşletme Araştırmaları Dergisi. 2022; 14(3): 2565-2590.
[19] Duman M. A new productivity technology for business: digital twin. Verimlilik Dergisi. 2022; 189-206.
[20] Bal A, Gevrek H, Demir S. Kitlesel imalat sistemlerinde dijital ikiz kullanılarak gerçek zamanlı üretim çizelgeleme ve tekstil sektöründe bir uygulama. International Journal of Advances in Engineering and Pure Sciences. 2022; 34(2): 328-336.
[21] Aylak BL, Oral O. Yapay zeka ve makine öğrenmesi tekniklerinin lojistik sektöründe kullanımı. El-Cezeri. 2021; 8(1): 74-93.
[22] Ozguner M, Ovalı E. Dijital ikiz teknolojisinin imalat sektöründe kullanimi noktasinda kritik öneme sahip başari faktörlerinin swara yöntemiyle değerlendirilmesi. Doğuş Üniversitesi Dergisi. 2023; 24(1): 449-462.
[23] Bağcı E. Türkiye'nin imalat sanayi sektörünün uluslararasi rekabet gücü analizi. İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi. 2016; 38(1): 73-92.
[24] Koska A. İleri imalat teknolojileri kullanimi ve tasarim imalat entegrasyonu kapsaminda rekabet avantajlarina etkisi: türkiye geneli metal mutfak eşyasi imalat sektöründe bir uygulama. International Journal of Social Humanities Sciences Research. 2014; 1(1): 40-55.
[25] Kundak S, Aktop, VS. Yüksek teknolojili ürün ihracatının ekonomik büyümeye etkisi: seçilmiş oecd ülkelerinde panel veri analizi. Uluslararası Yönetim İktisat ve İşletme Dergisi. 2023; 19(3): 445-470.
[26] Terzi A. A research on the possible effects on production costs in the industry 4.0 process. Muhasebe ve Vergi Uygulamaları Dergisi. 2021; 14(2): 837-872.
[27] Sari E. Endüstri 4.0 çerçevesinde akıllı üretim sistemlerinin rekabet faktörlerine etkisinin incelenmesine yönelik vaka analizi. Journal of Business Management and Economic Research. 2019; 3(5): 168-181.
[28] Demir A. Yenilik çikti verimliliği ve ülkelerin rekabet gücüne etkisi. İstanbul Ticaret Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi. 2020; 19(39): 828-842.
[29] Tuncer, Ö. Yenilenmiş cihazlar için endüstri 4.0 standartlari. Uluslararası Yönetim Bilişim Sistemleri ve Bilgisayar Bilimleri Dergisi. 2023; 7(2): 113-127.

[30] Özdemir F, Aksoy A, Avcioğlu Ü. Nitelikli işgücü sorunu üzerine çalışma. Journal of Life Economics. 2022; 9(3): 159-169.

Gazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Dergisi
PART C: TASARIM VE TEKNOLOJİ

Gazi University
Journal of Science
PART C: DESIGN AND TECHNOLOGY

GU J Sci, Part C, 13(2): 798-811 (2025)

Koyun Yünü ve Ahşap Yonga Karışımı ile Üretilmiş Malzemede Yalıtım Özelliklerinin Belirlenmesi

Hasan ŞEN[1*] Hamza ÇINAR[1]

1 Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Ağaçişleri Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı, Ankara, Türkiye

Article Info

Research article
Received: 14/01/2025
Revision: 13/03/2025
Accepted: 12/04/2025

Keywords

Wood-based panels
Thermal conductivity
Thermal permeability

Makale Bilgisi

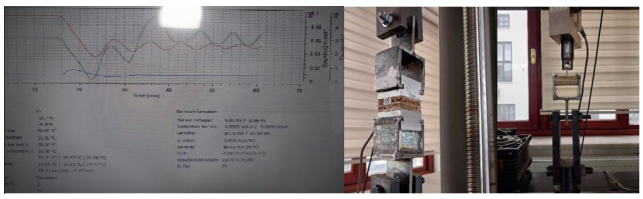
Araştırma makalesi
Başvuru: 14/01/2025
Düzeltme: 13/03/2025
Kabul: 12/04/2025

Anahtar Kelimeler

Ahşap esaslı levhalar
Isı iletkenliği
Isı geçirgenliği

(Grafik Özet) Graphical/Tabular Abstract

Enerji verimliliği ve çevresel etki değerlendirmelerinin öneminin anlaşıldığı günümüzde ahşap yapı sektöründe petrol türevi yalıtım malzemelerine alternatif koyun yünü ve ahşap yonga karışımı levha üretilerek ısı yalıtım özellikleri ile mekanik dayanım analizleri yapılmıştır. Ulaşılan değerlerde beklendiği gibi ısı iletkenlik katsayısının yoğunluk ve yün oranı ile doğrudan ilişkili olduğu tespit edilmiştir./ In today's world, where the importance of energy efficiency and environmental impact assessments are acknowledged, sheep wool and wood chip mixture boards were produced as an alternative to petroleum-derived insulation materials in the wood construction sector and their thermal insulation properties and mechanical strength were analysed. As expected from the values obtained, the coefficient of thermal conductivity was found to be directly related to the density and wool ratio.



Şekil 1:*Isı yalıtım özellikleri ve mekanik testler* ***Figure 1:*** *Thermal insulation characteristics and mechanical tests*

Önemli noktalar (Highlights)

- *Düşük yoğunluktaki levhaların orta yoğunluktaki levhalara göre % 36 oranında daha düşük ısı iletkenlik değerine sahip olduğu belirlenmiştir./ Low density panels were found to have 36 % lower thermal conductivity value than medium density panels.*

Aim (Amaç): *Ahşap esaslı bir levha üretimi ile kullanım alanlarında ısı yalıtımının sağlanması için geliştirilen levhanın standartlara uygun fiziksel ve mekanik özelliklere sahip olması, ısı yalıtım için hazırlanan malzemenin ısı iletkenlik ve ısı geçirgenlik özelliklerinin tespit edilip sayısal ifadeler ile tanımlanması hedeflenmiştir./ The aim of this study is to ensure that the board developed to provide thermal insulation in the areas of use with the production of a wood-based board has physical and mechanical properties in accordance with the standards, and to determine the thermal conductivity and thermal permeability properties of the material prepared for thermal insulation and to define them with numerical expressions.*

Originality (Özgünlük): *Levha üretiminde farklı yoğunluk ve yün oranı karışımıyla ısı iletim özelliklerinin iyileştirildiği ve yonga levha inovasyonu ile benzersiz bir çalışmadır./ This research, which is a unique study with chipboard innovation where thermal conductivity characteristics are improved with different density and wool ratio blends in board production.*

Results (Bulgular): *Düşük yoğunluklu üretilen levhalarda en yüksek (λ)değeri 0.0681 W/m.K ile %0 yün katkılı kontrol grubunda, en düşük değer ise 0.044 W/m.K ile %20 yün katkılı grupta tespit edilmiştir. / The highest (λ) value was 0.0681 W/m.K in the control group with 0% wool blended and the lowest value was 0.044 W/m.K in the group with 20% wool blended.*

Conclusion (Sonuç): *Bu değerlerin analizi ile %20 yün karışımı grubun, vida tutma ve iç yapışma özelliğinin önemsiz olduğu ahşap karkas içi yalıtım uygulamalarında kullanılabileceği sonucuna ulaşılmıştır./ Based on the analysis of these values, it was concluded that the 20% wool blended group can be used in wood carcass insulation applications where screw retention and internal adhesion properties are insignificant.*

*Corresponding author, e-mail: hasan.sen3@gazi.edu.tr
DOI: 10.29109/gujsc.1619276

GU J Sci, Part C, 13(2): 798-811 (2025)

Gazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Dergisi
PART C: TASARIM VE TEKNOLOJİ

Gazi University
Journal of Science
PART C: DESIGN AND TECHNOLOGY

http://dergipark.gov.tr/gujsc

Koyun Yünü ve Ahşap Yonga Karışımı ile Üretilmiş Malzemede Yalıtım Özelliklerinin Belirlenmesi

Hasan ŞEN[1*] Hamza ÇINAR[1]

1Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Ağaçişleri Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı, Ankara, Türkiye

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 14/01/2025
Düzeltme: 13/03/2025
Kabul: 12/04/2025

Anahtar Kelimeler

Ahşap esaslı levhalar
Isı iletkenliği
Isı geçirgenliği

Öz

Son yıllarda, çevrenin mümkün olan tüm yöntemlerle korunmasına yönelik endişeler giderek artmaktadır. Yapı sektörü en büyük enerji tüketicisi ve atık üreticisi olduğundan, tasarruf için bilimsel araştırmaların ve inovasyon çalışmalarının odağı konumdadır. Bu bağlamda çalışma; yenilenebilir doğal lif olan koyun yünü ve ahşap yonga karışımı ile yeni ısı yalıtım malzemeleri önermektedir. Bu maksatla çalışmada, kontrol grubu örnekler ile ahşap yonga ve yün karışımı (YYK) örnekler ile ara katmanlarda oranları sırasıyla %10, %20 ve %30 olan, düşük ve orta yoğunlukta levhalar üretilmiştir. Hazırlanan deney örneklerinin yoğunlukları TS EN 323 ile ısı iletkenlik ve ısı geçirgenlik katsayıları TS EN 12667, Levha yüzeyine dik çekme direnç hesaplaması TS EN 319, Levha yüzeyine dik yönde vida çekme direnci tayini TS EN 13446 standartlarına uygun olarak tespit edilmiştir. Gruplar arasındaki anlamlı farklılıklar, ortalama değerlerin en küçük anlamlı fark (LSD ve DUNCAN) testi ile karşılaştırılarak incelenmiştir. Sonuç olarak ısı iletkenlik katsayısı; Düşük yoğunluklu grup kendi arasında değerlendirildiğinde en yüksek %0 yün karışımı grupta (0,068 W/m.K), en düşük %20 yün karışımı grupta (0,058 W/m.K) elde edilmiştir. Orta yoğunluklu grup kendi arasında değerlendirildiğinde %0 yün karışımı grupta (0,093 W/m.K), en düşük ise %20 yün karışımı grupta (0,086 W/m.K) elde edilmiştir. Isı geçirgenlik katsayısı; en yüksek orta yoğunluklu %0 yün katkılı kontrol grubunda (4.675 W/m².K) en düşük ise düşük yoğunluklu %20 yün karışımı grupta minimum (1.713 W/m²K) değeri elde edilmiştir. Ulaşılan değerlerde beklendiği gibi ısı iletkenlik katsayısının yün oranı ile doğrudan ilişkili olduğu tespit edilmiştir.

Determination of İnsulation Characteristics of The Material Produced With a Mixture of Sheep Wool and Wood Chip

Makale Bilgisi

Research article
Received: 14/01/2025
Revision: 13/03/2025
Accepted: 12/04/2025

Anahtar Kelimeler

Wood-based panels
Thermal conductivity
Thermal permeability

Abstract

There has been a growing concern in recent years for protecting the environment by all possible means. The building sector is at the centre of scientific research and innovation efforts for conservation, as it is the largest energy consumer and waste producer. In this context, the study proposes new thermal insulation materials with a mixture of renewable natural fibres, sheep wool and wood chips. For this purpose, low and medium density boards were produced with control group samples and wood chip and wool mixture (YKK) samples with 10%, 20% and 30% respectively in intermediate layers. Densities of the prepared test samples were decided in accordance with TS EN 323, thermal conductivity and thermal permeability coefficients were in accordance with TS EN 12667, tensile strength calculation perpendicular to the board surface was in accordance with TS EN 319, and screw tensile strength estimation perpendicular to the board surface was in accordance with TS EN 13446 standards. Significant differences between the groups were studied by comparing mean values with the least significant difference (LSD and DUNCAN) test. The highest thermal conductivity coefficient was reached in the 0% wool mixture group (0,068 W/m.K) and the lowest was reached in the 20% wool mixture group (0,058 W/m.K) when the low density group was evaluated among themselves. In the medium level density group, the highest of this value was obtained in the 0% wool mixture group (0,093 W/m.K) and the lowest value was reached in the 20% wool mixture group (0,086 W/m.K). The highest thermal permeability coefficient was recorded in the control group with medium density 0% wool mixture (4.675 W/m².K) and the lowest value (1.713 W/m²K) was recorded in the low density 20% wool mixture group. As expected from these values, the thermal conductivity coefficient is directly related to the wool ratio.

*Corresponding author, e-mail: hasan.sen3@gazi.edu.tr
DOI: 10.29109/gujsc.1619276

1. INTRODUCTION (GİRİŞ)

Ahşap, barınma ihtiyacını karşılamak için sağlamlık, işlenebilirlik, fonksiyonellik ve ulaşılabilirlik özellikleri sebebiyle ev yapımında tercih edilen bir yapı malzemesidir[1]. Dünya genelinde birçok ülkede ahşap ve çelik karkas ev yapımı mevcut olmakla birlikte tarihi Osmanlı evleri, avluları ve bahçe kullanımlarıyla yatay mimari örnekleri olmuştur. Günümüz yapı stoğunun ise betonarme ile dikey mimari tercihi sebebiyle depremde hasar görme riski vardır. Bu durumun tespiti ve çözüm önerilerini içeren, yatay mimariye geçilmesi için başlatılan çalışmalar hakkındaki araştırmalarında Bıçkı ve Kırkan (2022)'ye göre; dikey mimari ile oluşturulan yapı stokunun depreme dayanıklı üretimi için yüksek yapım maliyeti ve gelişmiş teknolojik ürünlerin kullanımı gerekmektedir. Bu bakış açısı ile yatay mimari ile maliyet etkin binalar ve kentsel direnci artırılmış yapı stoku oluşumu sağlanabilir[2].Yatay mimari denildiğinde ahşap ve çelik yapılar ile bahçeli evler akla gelmektedir. Türkiye'de ahşap ev yapımında kullanılacak teknoloji ve laminasyon yöntemleri ile ahşap karkas yapıların oluşturulması için birleştirme teknikleri uygulanmaktadır. Karkas yapının kaplanması ve ısı yalıtımı sağlanması aşamasında yoğun işçilik ve ahşap malzeme kullanılması yapının maliyetini arttırmaktadır. Bu durumu tersine çevirerek yapı sektöründe ahşap ev kullanımının arttırılması için yapım maliyetlerinin düşürülmesine ihtiyaç vardır. Kullanılan malzeme ahşap esaslı yonga levha olduğunda maliyet etkin bir çalışma ile gereksiz kaynak kullanılmaması sonucu düşük maliyetli ahşap ev üretimi sağlanabilir. Ahşap esaslı levhaların üretim sebebi farklı teknik ve teknolojik yöntemlerle gerekli şartlara uygun maliyet etkin olarak üretilmesidir[3]. Mobilya sektörünün temel bileşenlerinden ve yarı mamul hammaddelerinden olan MDF, yonga levha, kontrplak ve OSB gibi levhaların, yalıtım malzemesi olarak kullanılabilmesi ise ısı iletkenlik değerlerinin iyileştirilmesi ile mümkündür. Uluslararası Standartlar Örgütü (ISO) ve Avrupa Standardizasyon Komitesi (CEN) tarafından belirlenen tanımlamalara göre, 0,065 W/mK değerinin altında kalan malzemeler "ısı yalıtım malzemesi" olarak adlandırılırken, bu değerin üzerinde kalan malzemeler "yapı malzemesi" olarak sınıflandırılmaktadır[4]. Şahin, 2018'e göre bu levhaların mevcut üretim değerleri ölçülmüş sırasıyla ortalama(0.099-0.097-0.101-0,085 W/m.K)değerleri tespit edilmiştir[5]. İlgili standarda göre bu levhalar yalıtım malzemesi sınıfında değildir. Enerjinin etkin bir şekilde kullanılmaması, hem enerji israfını ve ithalatı artırmakta hem de çevre kirliliğine yol açmaktadır[6]. Ahşap yapıların imalatında kullanılacak, düşük maliyetli ve enerji tüketimini azaltacak düşük ısı iletkenlik değerlerine sahip malzemelerin geliştirilmesi gerekmektedir. Ahşap yapı kullanımı için yıllar süren tanıtım ve pazarlama stratejileri ile ahşap ev yapımında gelişme sağlansa da yapı stoku betonarme yoğunluklu oluşmaktadır. Teknik ve teknolojik gelişmelerin sektörde kullanımı ile inovasyon çalışmaları akademik düzeyde araştırmalar ile desteklenmelidir. Farklı kompozit malzemelerin üretimi ile enerji kaynaklarının etkin kullanılmasına ve dünya pazarlarına yenilik sunulmasına ihtiyaç vardır. Mobilya üretimi için kullanılan yonga levha endüstrisinde, ısı iletkenliği düşük doğal ürünler ile yalıtım malzemesi olarak kullanılabilecek levhalar üretilmelidir. Zamanla birçok araştırmacı inşaat sektörünü, ilgili değerlendirmeler yaparak incelemeye yönelik çalışmalar yapmıştır. Bu kapsamda yapılan bir çalışmada, kumaş atıklarından üretilen ahşap esaslı malzeme binaların ısı yalıtımını arttırmak için dış duvarda kullanılmıştır. Atık kumaşların duvarın ısı iletkenliği direncini %56 oranında artırdığı tespit edilmiştir[7]. Martin Volf vd. 2015' te yapılan çalışmada doğal elyaf bazlı ısı yalıtım ürünlerinin ısı yalıtım malzemesi olarak kullanıldığı mineral yünlerin ısı iletkenliğinin daha düşük olduğunu tespit etmiştir. Ancak ısı tutma kapasitesi olarak koyun yününün mineral yünden %11 daha yüksek olduğu belirtilmiştir[8]. Ahşap yapı yalıtım sektöründe ise ahşap karkas içine doğal lifler, cam ve taş yünü, koyunyünü ile kaplama yöntemleri kullanılmaktadır. Polat 2017'ye göre koyun yününde insan sağlığına zararlı hiçbir özellik yoktur. Doğallığı sayesinde yaşam döngüsü değerlendirmelerinde çevresel etki bakımından zararsız kabul edilmektedir. 2017 yılı verilerine göre 30 milyon koyundan 60 bin ton yapağı üretimi yapılmaktadır. Yün karışımı ürünlerin yalıtım amaçlı kullanılabileceği belirtilmektedir[9]. Ancak bu yalıtım malzemeleri doğrudan levha olarak değil rulo halinde karkas arası serilerek kullanılmaktadır. Bu durum emek yoğun yapı sektörüne maliyet arttırıcı etkisi bilinmektedir. Isı yalıtımı yapılmayan bina yoğunluğunun enerji tüketimini 5 kat arttırdığı söylenebilir[10]. Yalıtım sektöründe kullanılan yapı malzemeleri levha halinde kullanımı montaj kolaylığı sebebiyle tercih edilmektedir. Doğal, ısı iletkenliği düşük ve kullanımı mümkün olarak gösterilen koyunyünü ile yeterli düzeyde ısı yalıtımı sağlayan, fiziksel dayanımı yüksek doğal malzemelerden ısı yalıtım levhası üretilebilir. Bu bakış açısı ile çalışmanın amacı, kontrol grubu örnekler ile ahşap yonga ve yün karışımı (YYK) örneklerde ara katmanlarda oranları sırasıyla %10, %20 ve %30 olan, düşük ve orta yoğunlukta

levhalar üretilerek en uygun ısı iletim katsayısına ve teknik özelliklere sahip olan karışımın belirlenmesidir.

2. MATERIALS AND METHODS (MATERYAL VE METOD)

2.1. Deneysel Ekipman (Experimental Equipment)

2.2. YYK levha üretiminde kullanılan yongalar, Kastamonu Entegre yonga levha üretim fabrikası depolama tesisinden temin edilmiş olup, %1,5-3 rutubettedir. Orta tabakada kullanılan yongalardan kullanılmıştır. Uygulama için temin edilen yongaların %50'si karaçam (Pinus Nigra Arnold), %25'i kayın (Fagus Oryantalis Lipsyk) ve %25'i ise piyasa talaşı karışımından oluştuğu yetkili tarafından belirtilmiştir. Üretimde kullanılan üre formaldehit (ÜF) tutkalının katı madde içeriği %55'tir ve bu tutkal, tam kuru yonga ağırlığına göre %15 oranında karışıma püskürtme yöntemi ile uygulanmıştır. Diğer katkı maddesi olarak %0-10-20-30 oranlarında kullanılan koyun yünü yıkanmış ve taranmış olarak kullanılmıştır. Ayrıca, tutkal katı madde oranına göre %0,6 oranında sertleştirici (amonyum sülfat) eklenmiştir.

Araştırma kapsamında planlanan fiziksel, mekanik ve yalıtım ile ilgili testlerde kullanılan, koyunyünü ile ahşap yongaları, İki farklı yoğunlukta ve üç farklı oranda karıştırılarak 50x50 cm ölçülerinde Her grup için 5 adet olmak üzere toplam 6 grup halinde 18 mm kalınlığında 30 adet levha üretilmiştir.

Yonga levhalar yoğunluğuna göre (ANSI A 208-1) Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Yoğunluğuna göre yonga levhalar[11] (Particleboards according to density)

1. Düşük yoğunluktaki yonga levhalar(DYL)	0.64 g/cm³ 'ten daha düşük
2. Orta yoğunluktaki yonga levhalar(OYL)	0.64-0.80g/cm³ arasındaki
3. Yüksek yoğunluktaki yonga levhalar(YYL)	0.80 g/cm³'ten yüksek

Levhaların hammadde yüzdeleri ve üretim şartları Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Levhaların hammadde yüzdeleri ve üretim şartları (Raw material percentages and production conditions of the boards)

Yoğunluk	Yün Oranı (%)	Yonga Oranı (%)	Pres Basıncı (N/mm²)	Pres Süresi (dk)
DYL	0	100	4	18
DYL	10	90	4	18
DYL	20	80	4	18
DYL	30	70	4	18
OYL	0	100	4	18
OYL	10	90	4	18
OYL	20	80	4	18

DYL: Düşük Yoğunluklu Levha OYL: Orta Yoğunluklu Levha

Üretilen ahşap esaslı levhalar kontrol grubu numunelerde tek katman halinde ve üç katmanda ise %10-20-30 oranında ilk katman yonga, ikinci katman yün ve üst katman yonga olacak şekilde preslenmiştir. Yonga yün karışımı levhalar yüksek sıcaklık (150 ± 10 ºC) ve basınç (4 n/mm²) altında 18 dk. Süre ile preslendikten sonra düzlemsel formunu korumak için soğuk preste 24 saat bekletilerek hazırlanmıştır. Bütün levha çeşitleri için aynı pres şartları uygulanmış ve Resim 1.'de verilen özelliklerdeki test numuneleri elde edilmiştir.



Resim 1. Farklı yoğunluk ve yün karışımlı numuneler (Samples with different density and wool blends)

Elde edilen deney levhalarının fiziksel ve mekanik özelliklerinin tespiti için standartlar Tablo 3' te verilmiştir.

Tablo 3. Levha özelliklerinin tespiti için standartlar (Standards for determining plate properties)

Birim hacim ağırlık tayini	TS EN-323
Isı İletim Katsayıları	TS EN 12667
Levha yüzeyine dik çekme direnç hesaplaması	TS EN 319
Levha yüzeyine dik yönde vida çekme direnci tayini	TS EN 13446

2.3. Deney tasarımı(Experimental design)

2.2.1. Yoğunluk tayini

Ağırlık ölçümleri yoğunluk hesabı için TS EN 323'e göre 24 saat aralıkla yapılmış olup, son iki ölçüm sonucu ağırlık farklarının deney numunesi ağırlığının % 0,1'inden fazla olmadığı durumundaki ağırlık değerleri sabit ağırlık değeri olarak kabul edilmiştir[12].

2.2.2. Isı iletkenlik ve ısı geçirgenlik tayini

Ahşap yonga yün karışımı TS EN 12667 (2003) esaslarına göre hazırlanmıştır[13]. Her bir tip için 300x300 mm ölçülerinde 5'er adet olmak üzere toplam 30 (6x5) adet örnek hazırlanmıştır. Üretilen levha örnekleri, 20 ℃ sıcaklık ve % 65 bağıl nem koşullarında iklimlendirme odasında sabit ağırlığa ulaşana kadar bekletilmiştir. Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Ağaç İşleri Endüstri Mühendisliği Bölümü'nde bulunan test laboratuvarındaki Linseis HFM 300 test cihazı ile ısı iletim katsayıları belirlenmiştir.

2.2.3.Levha yüzeyine dik çekme direnci tayini

Levha yüzeyine dik çekme direnç hesaplaması, TS EN 319 (1999)' da belirtilen esaslara göre yapılmıştır. Örnekler, test için özel hazırlanan kavramalı ahşap aparatlar vasıtasıyla üniversal test cihazına bağlanmıştır. Cihaza bağlanan örneklerde direnç, 2 mm/dk.' lık sabit çekme kuvvetinin uygulanmaya başlanmasından kopma anındaki en büyük kuvvete kadar tespiti yapılmıştır. Test için hazırlanan düzenek Resim 2.'de verilmiştir.



Resim 2. Deney örneklerinin üniversal test cihazındaki durumu (Condition of test samples in universal testing machine)

Örneklerin levha yüzeyine dik yönde çekme direnç değerleri TS EN 319, (1999)'a göre hesaplanmıştır.

Isı yalıtım levhası statüsü kazanabilecek düşük ve orta yoğunluktaki levhalar üzerinde çalışılmış düşük yoğunluklu levhalarda %30 yün karışımı 270,98kg/m³ yoğunluktaki levhadan alınan örnekler üzerinde yapılan levha yüzeyine dik yönde çekme direnç tayini testlerinde gerekli dayanımı gösteremeyen levhada yün yonga ve tutkal karışımında başarısız olunduğu tespit edilmiştir. Yün ağırlıkça %30 olduğunda yapışma sürecini etkileyerek tutkalın yeterli gelmediği belirlenmiş ve bu grup analiz dışı bırakılmıştır.

2.2.4. Levha yüzeyine dik yönde vida çekme direnci tayini

Vida tutma direnci, TS EN 13446 (2005)' de belirtilmiş olan esaslara göre yapılmıştır. Levha yüzeyine dik olarak yapılan vida çekme testinde, boyun çapı 4 mm, diş dibi çapı 2,4.mm, diş adımı 1,8 mm, uzunluğu 50 mm olan tam boy dişli ve yıldız başlı, düşük karbon esaslı çelikten üretilmiş vidalar kullanılmıştır. Örnekler deney cihazına bağlandıktan sonra, 2 mm/dk.'lık sabit hızla yüzeye dik olacak şekilde çekme kuvveti uygulanmış, çekme anındaki en büyük kuvvet tespiti yapılmıştır. Test için hazırlanan düzenek Resim 3'te verilmiştir.



Resim 3. Levha yüzeyine dik vida çekmede kullanılan deney örnekleri ve kalıp (Test samples and molds used in pulling screws perpendicular to the plate surface)

3. BULGULAR (RESULTS)

3.1. Yoğunluk

Ahşap esaslı levha örneklerinin hava kurusu yoğunlukları için ortalama değerleri Tablo 4.'te verilmiştir.

Tablo 4. Yoğunluk ortalama değerleri (Density average values)

Levha Tipi	Yoğunluk	Yün Oranı	x	s
T1		%0	0,446	0,044
T2	DY	%10	0,442	0,117
T3		%20	0,477	0,066
T4		%0	0,669	0,050
T5	OY	%10	0,659	0,027
T6		%20	0,687	0,028

x: Aritmetik ortalama s: Standart sapma DY: Düşük Yoğunluk OY: Orta Yoğunluk

Hava kurusu yoğunluk değeri ortalaması en yüksek T6 tipi levhalarda (0,687 g/cm³), en düşük ise T2 türü levhalarda (0,442 g/cm³) elde edilmiştir. Orta yoğunlukta hazırlanan levhaların hava kurusu yoğunluğu düşük yoğunluklu levhalardan yüksektir. Levhaların hazırlık amacına uygun değerlere yakın üretildiği görülmektedir.

3.2. Isı İletkenlik ve Isı Geçirgenlik Katsayısı

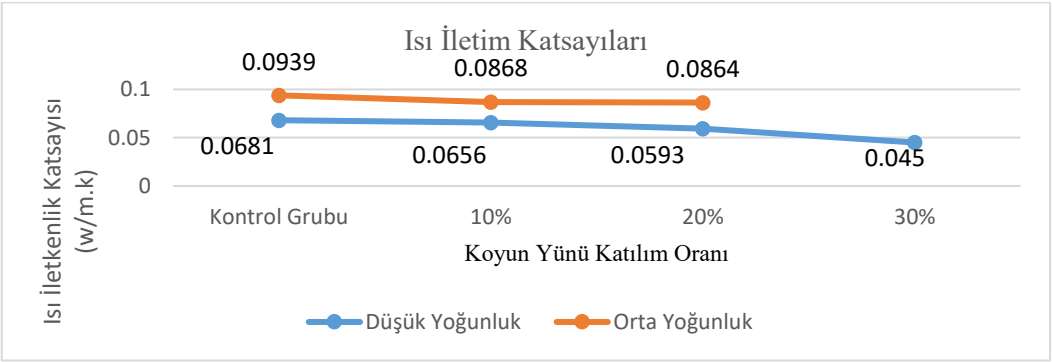
3.2.1. Isı İletkenlik katsayısı (λ)

Ticari olarak temin edilen yonga karışımı ile yıkanmış taranmış olarak temin edilen yün karışımı levhaların TS EN 323 (1999) standartlarına uygun olarak gerçekleştirilen yoğunluk belirleme testinin sonuçlarına göre; DY'taki levhaların hava kurusu yoğunluk ortalaması 0.45 g/cm³, OY'taki levhaların hava kurusu yoğunluk ortalaması 0.67 g/cm³ olduğu görülmüştür. Bu yoğunluğa sahip olan levhaların ısı iletim katsayılarına dair istatistiksel bulgular Tablo 5'te verilmiştir.

Tablo 5. Ahşap yonga yün karışımı levhalara ait ısı iletim katsayısı (λ)değerlerine dair istatistiksel bulgular (Statistical findings on the thermal conductivity coefficient (λ) values of wood chip wool blended panels)

				Isı İletkenlik (λ)			
Levha Tipi	**Yoğunluk**	**Yün Oranı**	**Yoğunluk Ortalama (kg/m³)**	**Ortalama (W/m.K)**	**Min (W/m.K)**	**Max (W/m.k)**	**Std.sp.**
T 1	Düşük yoğunlukY	Kontrol	446,28	0,0681	0,0577	0,0738	0,007
T 2		%10	442,17	0,0656	0,0469	0,0743	0,011
T 3		%20	477,90	0,0587	0,0446	0,0761	0,013
		%30	270.98	0,0450	-	-	-
T 4	Orta Yoğunluk	Kontrol	669,11	0,0939	0,0888	0,0999	0,004
T 5		%10	659,14	0,0864	0,0816	0,0930	0,004
T 6		%20	687,33	0,0864	0,0839	0,0881	0,003

Yoğunluk ve yün karışımı oranlarının levha ısı iletkenliğine etkisi istatistiksel olarak anlamlı bulunmuştur(α=0,05). Kullanılan malzeme türleri arasındaki karşılaştırma sonuçları LSD testi ile elde edilmiş olup, Şekil 2.1'de sunulmuştur.
Farklı karışım oranlarına sahip yün yonga karışımı levhalara ait ısı iletim katsayısı grafiği Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1.Yün yonga karışımı levhalara ait ısı iletim katsayısı grafiği (Thermal conductivity coefficient graph of wool chip blend boards)

Düşük yoğunluklu üretilen levhalarda en yüksek (λ)değeri 0.0681 W/m.K ile %0 yün katkılı kontrol grubunda, en düşük değer ise 0.045 W/m.K ile %30 yün katkılı grupta tespit edilmiştir.

3.2.2. Isı Geçirgenlik Katsayısı (U)

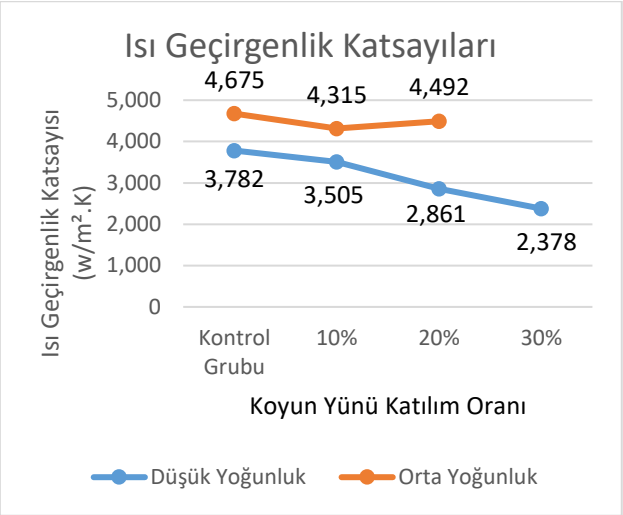
Deney örneklerinin ısı geçirgenlik katsayıları Tablo 6'da sunulmuştur.

Tablo 6. Deney örneklerinin ısı geçirgenlik katsayısı (Heat permeability coefficient of test samples)

Yoğunluk	Yün Oranı	Yoğunluk Ortalama (kg/m³)	Isı Geçirgenlik (U)			
			Ortalama (W/m².K)	Min (W/m².K)	Max (W/m².k)	Std.sp.
DY	Kontrol	446,28	3.782	3.027	4.357	0,241
	%10	442,17	3.505	2.475	3.984	0,621
	%20	477,90	2.861	1.713	4.100	1,005
	%30	270.98	2.378	-	-	-
OY	Kontrol	669,11	4.675	4.364	5.284	0,397
	%10	659,14	4.315	3.954	4.720	0,289
	%20	687,33	4.492	4.298	4.686	0,144

Isı geçirgenlik katsayısının levha tipine etkisi istatistiksel olarak anlamlı bulunmuştur(α=0,05).

Kullanılan malzeme türleri arasındaki karşılaştırma sonuçları LSD testi ile elde edilmiş olup, Şekil 2'de sunulmuştur.



Şekil 2. Levha tipinin ısı geçirgenlik katsayısına etkisine ilişkin LSD testi sonuçları (LSD test results regarding the effect of board type on heat transfer coefficient)

Isı geçirgenlik katsayısı en yüksek T4 tipi levhalarda (Orta yoğunluk kontrol grubu) 4.657W/m².K, en düşük ise T3 tipi levhalarda (Düşük yoğunluk %20 yün karışımı) 2.861 W/m²K elde edilmiştir. TS 825 Isı Yalıtım Kuralları standardında yeni yapılar için önerilen U= 2,4 W/m²K değerinin altında minimum 1.713 W/m²K'dır.

3.2.3.Yoğunluk ve Yün Oranının Isı İletkenliğine Etkisi

Ahşap yonga yün karışımı levhaların ısı iletim deneyleri sonucu elde edilen yoğunluk ve yün oranı etkilerine ilişkin varyans analizi sonuçları Tablo 7'de sunulmuştur. Metod kısmında da açıklandığı üzere %30 yün karışımı grup analize alınmamıştır.

Tablo 7. Ahşap yonga yün karışımı levhaların ısı iletim katsayılarına ait çoklu varyans analiz sonucu (Multivariate analysis results of heat transfer coefficients of wood chip wool blended boards)

Varyans Kaynağı	S D	Kareler Toplamı	Kareler Ortalaması	F Değeri	Anlamlılık Düzeyi P<0.05
Yoğunluk	1	4228.807	4228.807	178.6105	0.0000*
Yün Oranı	2	419.938	209.969	8.8684	0.0017*
Yoğunluk-Yün Oranı	2	59.622	29.811	1.2591	0.3055
HATA	20	473.523	23.676		
TOPLAM	29	6362.194			

*: Anlamlı, SD: Serbestlik derecesi

Üretilen plaka tiplerinden düşük yoğunluktaki deney örnekleri düşük ısı iletim katsayısı değerleri vermişlerdir. En yüksek ısı iletim katsayısı ise orta yoğunlukta T4 kontrol grubu numunesi örneklerinden elde edilmiştir. Tablo 7'deki çoklu varyans analizine göre yonga yün karışımı panellerde yoğunluk ve yün oranının ısı iletim katsayısına olan etkileri ($p \leq 0.05$) istatistiksel olarak anlamlı bulunmuştur. Bu iki faktörün ikili etkileşimi istatiksel olarak anlamlı bulunmamıştır. Etkileri anlamlı olan faktörlerin grupları arasındaki farklılıkları belirlemek için Duncan testi uygulanmıştır. Yoğunluk oranına göre levha ısı iletkenlik katsayısına ait homojenlik grubu Tablo 8'de sunulmuştur.

Tablo 8. Panellerin yoğunluk oranına göre ısı iletkenlik katsayısına ait homojenlik grupları (Homogeneity groups of thermal conductivity coefficient according to density ratio of panels)

Yoğunluk Etkisi	N	Isı İletkenlik (W/m.K) X	HG
Düşük Yoğunluk	15	65.07	A
Orta Yoğunluk	15	88.81	B
LSD: 3.634			

HG: Homojenlik grubu; N: Numune Sayısı

Tablo 8'e göre levha ısı iletim katsayısı; panellerin yoğunluk değişimine göre farklı olduğu tespit edilmiştir. Panellerde yoğunluk ile ısı iletim katsayısı arasında doğru orantı olduğu söylenebilir. Yün oranına göre levha ısı iletkenlik katsayısına ait homojenlik grubu Tablo 9.'da verilmiştir.

Tablo 9. Panellerin yün oranına göre ısı iletkenlik katsayısına ait homojenlik grupları (Homogeneity groups of thermal conductivity coefficient according to wool ratio of panels)

Yün Oranı	N	Isı İletkenlik (W/m.K) X	HG
% 0 (Kontrol Grubu)	10	81.97	A
%10	10	75.85	B
%20	10	73.00	B
LSD: 4.451			

Tablo 9'a göre levha ısı iletim katsayısının panellerin yün karışımı oranlarına göre farklı olduğu tespit edilmiştir. Panellerde yün oranı ile ısı iletim katsayısı arasında ters orantı olduğu söylenebilir. %20 yün karışımında ısı iletkenliğin %12 oranında düştüğü görülmektedir.%10'luk karışımında kontrol grubu numunelerinden anlamlı düzeyde ayrıştığı söylenebilir.

3.3. Levha yüzeyine dik çekme direnç tayini

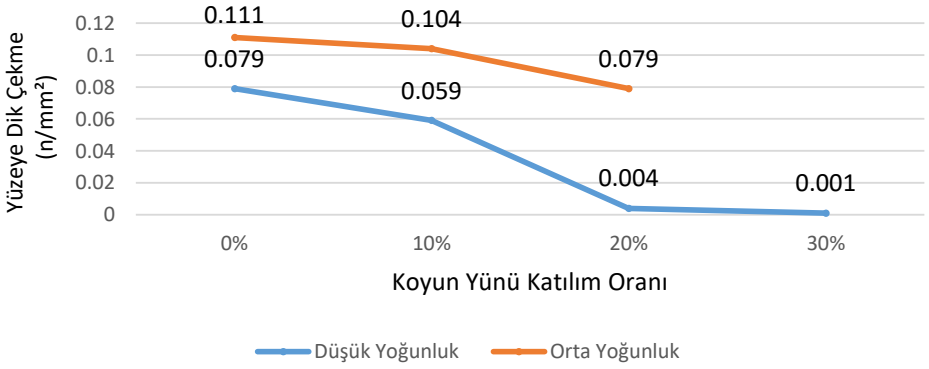
Yoğunluk değişimi ve yün oranına göre oluşan levhanın yüzeyine dik çekme direncine ilişkin değerler Tablo 10'da verilmiştir.

Tablo 10. Yoğunluk değişimi ve yün oranına göre oluşan levhanın yüzeyine dik çekme direnç özellikleri (Tensile strength properties perpendicular to the surface of the formed board depending on density change and wool ratio)

Yoğunluk	Yün Miktarı(%)	Levha yüzeyine Dik Çekme Direnci (N/mm²) Xmin	Xmax	Xort	ss
Düşük Yoğunluk	0	0,039	0,149	0,079	0,040
	10	0,047	0,078	0,059	0,009
	20	-	0,012	0,004	0,004
	30	-	0,008	0,001	0,002
Orta Yoğunluk	0	0,071	0,149	0,111	0,022
	10	0,039	0,192	0,104	0,059
	20	0,051	0,106	0,079	0,020

Levha örneklerinde levha yüzeyine dik çekme direnç değeri; en düşük %20 ve %30 yün katkılı grupta çekme direnci tespit edilemeyecek kadar düşük numunelerin olduğu, en yüksek 0,192 N/mm² ile %10 yün katkılı orta yoğunlukta levha grubunda olduğu tespit edilmiştir. Bu sonuca en yakın değer 0,149 N/mm² ile %0 yün katkılı orta yoğunluktaki levhalarda tespit edilmiştir. Düşük yoğunluktaki levhalar kendi aralarında değerlendirildiğinde; en düşük %30 yün katkılı grup iç yapışma dayanımı hususunda yeterli görülmemiş ve bu grup analiz dışı bırakılmıştır. Orta yoğunluktaki levhalar kendi aralarında değerlendirildiğinde; en düşük 0,039 N/mm² ile %10 yün katkılı grupta, en yüksek 0,192

N/mm² ile %10 yün katkılı grupta olduğu tespit edilmiştir. Bu durumun ortalama değerlerde farklılaştığı sırasıyla %0, %10 ve %20 yün katkılı grubun yapışma direncinin 0,111, 0,104 ve 0,079 N/mm² olduğu ve yün oranı arttıkça yapışma direncinin azaldığı tespit edilmiştir. Yoğunluk değişimi ve yün oranına göre oluşan levhanın yüzeyine dik çekme direnç özelliklerine ilişkin değerleri Şekil 3'te verilmiştir.



Şekil 3. Yoğunluk değişimi ve yün oranına göre oluşan levhanın yüzeyine dik çekme direnç özelliklerine ilişkin değerler (Values related to the tensile strength properties perpendicular to the surface of the formed board according to density change and wool ratio)

Tablo 11. Yoğunluk değişimi ve yün oranına göre yüzeyine dik çekme direncine ait çoklu varyans analizi (Multiple variance analysis of tensile strength perpendicular to the surface according to density change and wool ratio)

Varyans Kaynağı	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Ortalama Kareler	F Değeri	p<0,05
Yoğunluk (A)	1	0,038	0,038	41.526	0.0000
Yün Oranı (B)	2	0.031	0.016	16.8454	0.0000
AxB	2	0.005	0.002	2.5245	0.0914
Hata	45	0.042	0.001		
Toplam	59	0.131			

Yoğunluk değişimi ve yün oranına göre levhaların yüzeyine dik çekme direncine ait çoklu varyans analizi Tablo 11'de verilmiştir. Yoğunluk değişimi ve yün oranına göre levhaların yüzeyine dik çekme direncine ait çoklu varyans analizlerinde; Yoğunluk (A), Yün Oranı(B) değerlerinin istatistiksel olarak anlamlı olduğu görülmüştür ($p \leq 0,05$). Yoğunluk değişimine göre levhanın yüzeyine dik çekme direncine ait homojenlik grupları Tablo 12'de verilmiştir.

Tablo 12. Yoğunluk değişimine göre levhaların yüzeyine dik çekme direncine ait homojenlik grupları (Homogeneity groups of tensile strength perpendicular to the surface of the plates according to density change)

	Levha Yüzeyine Dik Çekme Direnci (N/mm²)	
Yoğunluk Değişimi (A)	X (N/mm²)	HG
Düşük Yoğunluk	0.047	A
Orta Yoğunluk	0.098	B
LSD: 0.01634		

Yoğunluk değişimine göre levhaların yüzeyine dik çekme direnci ortalama değeri; en yüksek 0,098 N/mm² ile orta yoğunlukta üretilen levhalarda, en düşük 0,047 N/mm² ile düşük yoğunlukta üretilen levhalardan elde edilmiştir. Ayrıca yoğunluğuna göre, homojenlik gruplarına bakıldığında; Düşük ve Orta yoğunlukta üretilen gruplar arasında anlamlı farklılık olduğu farklı homojenlik gruplarında olduğu tespit edilmiştir. Yün oranına göre levhaların, yüzeyine dik çekme direnç değerlerine ait homojenlik grupları Tablo 13'te verilmiştir.

Tablo 13. Yün oranı değişimine göre levhaların yüzeyine dik çekme direncine ait homojenlik grupları (Homogeneity groups of tensile strength perpendicular to the surface of the boards according to the change of wool ratio)

	Levha Yüzeyine Dik Çekme Direnci (N/mm²)	
Yün Oranı (B)	X (N/mm²)	HG
0	0.095	A
10	0.081	A
20	0.042	B
LSD: 0,02001		

Yün oranı bakımından levhanın yüzeyine dik çekme direnci ortalama değeri; en yüksek 0,095 N/mm² ile %0 yün karışımı levhalarda, en düşük 0,042 N/mm² ile %20 yün karışımı levhalarda elde edilmiştir.Ayrıca kullanılan yün oranına göre homojenlik gruplarına bakıldığında; %20 yün katkılı levhalar farklı homojenlik grubunda (B) yer alırken, %0 ve %10 yün katkılı levhalar aynı grupta yer almaktadır.

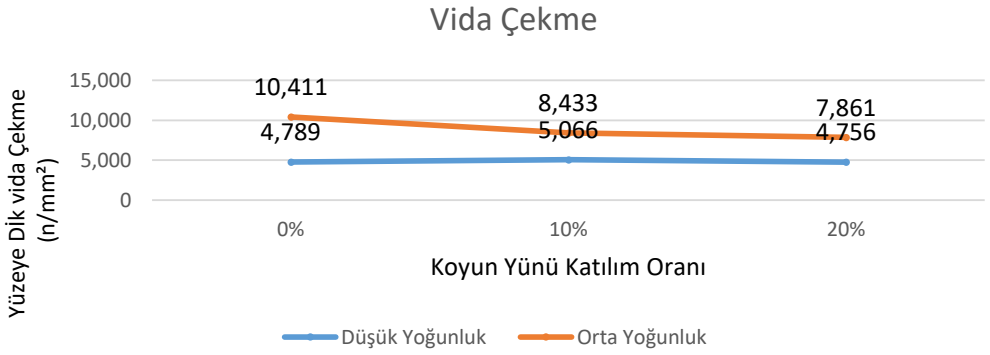
3.4. Levha yüzeyine dik yönde vida çekme direnci tayini

Yoğunluk değişimi ve yün oranına göre levhaların yüzeyine dik vida çekme direncine ilişkin değerler Tablo 14'te verilmiştir.

Tablo 14. Yoğunluk değişimi ve yün oranına göre levhaların yüzeyine dik vida çekme direnç değerleri (Screw pull resistance values perpendicular to the surface of the boards according to density change and wool ratio)

Yoğun	Yün Miktarı(%)	Levha yüzeyine Dik Vida Çekme Direnci (N/mm²)			
		X_{min}	X_{max}	X_{ort}	ss
Düşük Yoğunluk	0	3,759	6,211	4,789	0,762
	10	2,779	6,865	5,066	1,380
	20	1,961	6,538	4,756	1,649
Orta Yoğunluk	0	8,499	12,585	10,411	1,203
	10	5,067	12,422	8,433	2,580
	20	5,394	9,643	7,861	1,359

Levha örneklerinde levha yüzeyine dik vida çekme direnç değeri; en düşük 1,961 N/mm² ile düşük yoğunluklu %20 yün katkılı grupta, en yüksek 12,585 ²ile Orta yoğunlukta %0 yün katkılı grupta olduğu tespit edilmiştir. Düşük yoğunluklu levhalar kendi arasında değerlendirildiğinde; en düşük 1,961 N/mm² ile %20 yün katkılı grupta, en yüksek 6,865 N/mm² değer ile %10 yün katkılı kontrol grubu levhalarda olduğu tespit edilmiştir. Orta yoğunlukta üretilen levhalar kendi arasında değerlendirildiğinde; en düşük 5,067 N/mm² ile %10 yün katkılı grupta, en yüksek 12,585 N/mm² ile %0 yün katkılı levha grubunda olduğu tespit edilmiştir. Yoğunluk değişimi ve yün oranına göre levhaların yüzeyine dik vida çekme direnç değerlerine ilişkin değerleri Şekil 4'te verilmiştir.



Şekil 4. Yoğunluk değişimi ve yün oranına göre levhaların yüzeyine dik vida çekme direnç değerleri (Screw pull resistance values perpendicular to the surface of the boards according to density change and wool ratio)

Yoğunluk değişimi ve yün oranına göre levhaların yüzeyine dik vida çekme direncine ait çoklu varyans analizi Tablo 15'te verilmiştir.

Tablo **15.** Yoğunluk değişimi ve yün oranına göre levhaların yüzeyine dik vida çekme direncine ait çoklu varyans analizi (Multiple variance analysis of screw pull resistance perpendicular to the surface of the boards according to density change and wool ratio)

Varyans Kaynağı	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Ortalama Kareler	F Değeri	p<0,05
Yoğunluk (A)	1	243.799	243.799	90.019	0.000
Yün Oranı (B)	2	17.231	8.615	3.181	0.051
AxB	2	19.148	9.574	3.535	0.037
Hata	45	121.873	2.708		
Toplam	59	416.689			

Yoğunluk değişimi ve yün oranına göre levhaların yüzeyine dik vida çekme direncine ait çoklu varyans analizlerinde; Yoğunluk (A), Yün Oranı(B) değerlerinin ve bunların ikili etkileşimi olan (AxB) değerlerinin istatistiksel olarak anlamlı olduğu görülmüştür ($p \leq 0,05$). Yoğunluk değişimine göre levhanın yüzeyine dik vida çekme direncine ait homojenlik grupları Tablo 16'da verilmiştir.

Tablo 16. Yoğunluk değişimine göre levhaların yüzeyine dik vida çekme direncine ait homojenlik grupları (Homogeneity groups of screw pull resistance perpendicular to the surface of the boards according to density change)

	Levha yüzeyine Dik Vida Çekme Direnci (N/mm²)	
Yoğunluk Değişimi (A)	X (N/mm²)	HG
Düşük Yoğunluk	4,871	B
Orta Yoğunluk	8,902	A
LSD:0,8502		

Yoğunluk değişimine göre levhaların yüzeyine dik vida çekme direnci ortalama değeri; en yüksek 8,902 N/mm² ile orta yoğunlukta üretilen levhalarda, en düşük 4,871 N/mm² ile düşük yoğunlukta üretilen levhalardan elde edilmiştir. Ayrıca yoğunluğuna göre, homojenlik gruplarına bakıldığında; Düşük ve Orta yoğunlukta üretilen gruplar arasında anlamlı farklılık olduğu farklı homojenlik gruplarında olduğu tespit edilmiştir.

Yün oranına göre levhaların, yüzeyine dik vida çekme direnç değerlerine ait homojenlik grupları Tablo 17'de verilmiştir.

Tablo 17. Yün oranı değişimine göre levhaların yüzeyine dik vida çekme direncine ait homojenlik grupları (Homogeneity groups of screw pull resistance perpendicular to the surface of the boards according to the change of wool ratio)

	Levha yüzeyine Dik Vida Çekme Direnci (N/mm²)	
Yün Oranı (B)	X (N/mm²)	HG
0	7,600	A
10	6,750	AB
20	6,309	B
LSD: 1,041		

Yün oranı bakımından levhanın yüzeyine dik vida çekme direnci ortalama değeri; en yüksek 7,600 N/mm² ile %0 katkılı levhalarda, en düşük 6,309 N/mm² ile %20 yün karışımı levhalarda elde edilmiştir. Ayrıca kullanılan yün oranına göre homojenlik gruplarına bakıldığında; %20 yün katkılı levhalar farklı homojenlik grubunda (B) yer alırken, %10 yün katkılı levhalar AB grubunda yer almaktadır. Yoğunluk değişimi ve yün oranına göre levhanın yüzeyine dik vida çekme direnç değerleri ve homojenlik grupları Tablo 18'de verilmiştir.

Tablo 18. Yoğunluk değişimi ve yün oranına göre levhanın yüzeyine dik vida çekme direnç değerleri ve homojenlik grupları (Screw pull resistance values and homogeneity groups perpendicular to the surface of the board according to density change and wool ratio)

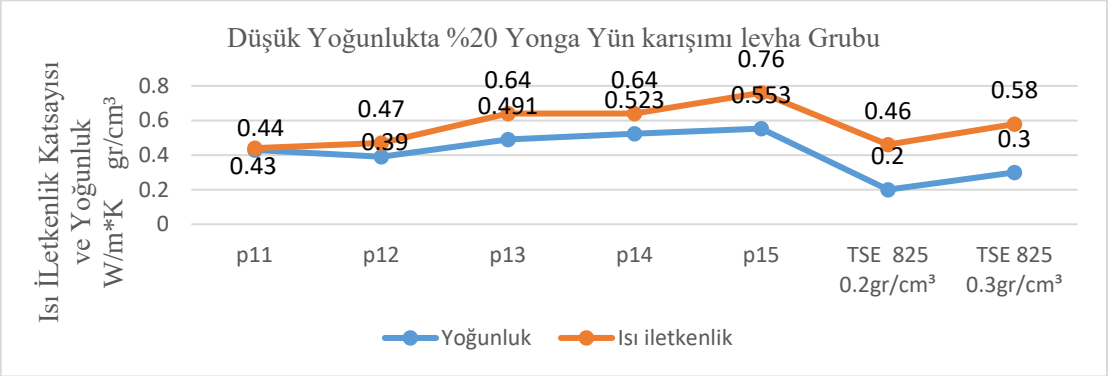
Yoğunluk ve Yün Oranı Karışımı (AxB)	X (N/mm^2)	HG
DY %0 Yün Karışımı	4,789	C
DY %10 Yün Karışımı	5,067	C
DY%20 Yün Karışımı	4,756	C
OY %0 Yün Karışımı	10,41	A
OY %10 Yün Karışımı	8,434	B
OY %20 Yün Karışımı	7,862	B
LSD: 1,473		

Kullanılan yün oranı ve yoğunluk değişimine göre levhanın yüzeyine dik vida çekme direnci ortalama değeri; en yüksek 10,41 N/mm² ile Orta yoğunluklu %0 yün katkılı grupta, en düşük 4,756 N/mm² ile Düşük yoğunluklu %20 yün katkılı levhalarda elde edilmiştir. Düşük yoğunlukta üretilen levhaların levha yüzeyine dik vida çekme direnci ortalama değerlerinde; en yüksek 5,067 N/mm² ile %10 yün katkılı levha grubunda, en düşük 4,756 N/mm² ile %20 yün katkılı levha grubunda olduğu tespit edilmiştir. Orta yoğunlukta üretilen levhalara bakıldığında; en yüksek 10,41 N/mm² ile %0 yün katkılı kontrol grubu levhalarda, en düşük 7,862 N/mm² ile %20 yün katkılı levha grubunda olduğu tespit edilmiştir.

4.TARTIŞMA

4.1. Isı İletkenlik Katsayısı

Yoğunluğu düşük üretilen yonga yün karışımı levhalarda yün oranı arttıkça ısı iletim katsayısı düşerek minimum P11-12 nolu panellerle 0,044 W/m.K değerine ulaşılmıştır. Düşük yoğunlukta %20 yonga yün karışımı levha grubu yoğunluk ve ısı iletkenlik değişimi Şekil 5'te verilmiştir.



Şekil 5. Yoğunluk ve ısı iletkenlik değişimi (Density and thermal conductivity change)

Isı yalıtım malzemesi olarak kullanılacak panel üretimi için sadece ısı iletim katsayıları değil aynı zamanda fiziksel ve mekanik dayanım da önemlidir. Direnci yüksek ve ısı yalıtımı en optimum levha analizinde %20 yün karışımı P11-12-13-14-15 nolu levhalar sırasıyla 0,044- 0,047- 0,064- 0,064- 0,076 W/m.K değerleri elde edilmiştir. TSE 825 binalarda ısı yalıtım kurallarına göre hafif odun lifi levhalarda yoğunluk < 0,2gr/cm³ = 0,046 W/m.K, Yoğunluk < 0,3gr/cm³= 0,058 W/m.K'dır. Elde edilen sonuçlar literatürde verilen değerlerin altında ve olumludur. Düşük yoğunluklu %20 yün karışımı levhaların ortalama yoğunluk değeri 0,47gr/cm³ ile lamda değeri ortalaması 0,059 W/m.K olarak tespit edilmiştir.

4.2. Isı Geçirgenlik Katsayısı

Isı Geçirgenlik Katsayısı U (W/m²K): Farklı malzemelerin ardışık olarak bir araya gelmesiyle meydana gelen bir yapı elemanının ısı transferine karşı gösterdiği dirençtir. P11 tipi DYL'da %20 karışımla elde edilen minimum U değeri ise 1.713W/m²K'dır. Bu durum literatürde; Yonga levhalar için 5.272W/m²K, Kaplan ve Aruntaş, 2021'e göre dış cephe kaplaması olarak kullanılan XPS levhalar kullanılarak ısı yalıtımı yapılan duvarlarda, en ideal yalıtım kalınlığının 5 cm olduğu belirlenmiş ve bu durumda U değeri 1.943 W/m²K olarak hesaplanmıştır[14]. Elde edilen iletim değerleri ile Tip3 DYL'ların yalıtım uygulamaları için kullanıma uygun olduğu söylenebilir.

4.3. Levha yüzeyine dik çekme direnç tayini

Levha yüzeyine dik çekme direnç sonuçlarına göre; en düşük 0,000 N/mm² ile düşük yoğunluklu %10 ve %20 yün katkılı grupta olduğu, en yüksek 0,534

N/mm² ile %10 yün katkılı orta yoğunlukta levha grubunda olduğu tespit edilmiştir. Ortalama direnç tayinlerine bakıldığında düşük ve orta yoğunluklu her iki grupta da yün oranı arttıkça iç yapışma direncinin azaldığı tespit edilmiştir. Yine %20 yün katkılı grupta iç yapışma dayanımı düşük bulunsa da benzer çalışma olarak Özen, 2009' a göre; 0,21 N/mm² direnç değerine sahip %100 çam yongasından yonga levha üretilmiştir[15]. Bu tespitle %20 yün katkılı grubun vida tutma ve iç yapışma ihtiyacı olmayan alanlarda karkas yapı arasında kullanılabileceği düşünüldüğünden farklı fiziksel ve mekanik özelliklerinin kontrol edilmesine değer görülmüştür.

TS EN 622-5 (2011)'e göre kuru şartlarda kullanılan ultra hafif lif levhalar için levha yüzeyine dik çekme direnci en az 0,15 N/mm² olduğu belirtilmiştir. Ultra hafif MDF'nin yoğunluğu ise 0,45 gr/cm³ ile 0,55 gr/cm³ aralığında olduğunu belirtmiştir[16]. Gündüz ve Yılmaz, 2005' te Türkiye'de yonga levha üreten 16 farklı işletmeden tedarik ettikleri levhaların yüzeye dik çekme direnç değerlerinin 0,15 N/mm² ile 0,76 N/mm² arasında değiştiğini belirtmişlerdir[17]. Elde edilen levha yüzeyine dik çekme direnç sonuçlarının düşük yoğunluklu %20 yün katkılı grup hariç sınır değerlere yakın olduğu görülmüştür. %20 yün karışımı gurupta iç yapışma direnci değerlerinin düşük çıkması nedeni olarak yün ağırlıkça arttırıldığında yapıştırıcının yün tarafından tutularak karışıma yeterli olmadığı tespiti yapılmıştır. Elde edilen değerlerin oldukça düşük sonuçlar vermesinin nedeni olarak; Zach ve diğerleri tarafından yapılan çalışmada da belirtildiği gibi test edilen koyun yünü numunelerinde %35'e kadar yüksek higroskopisite değerleri elde edilmiştir[18]. Bu durum ortamdaki nem dengesinin korunması için olumlu olsa da panel yapışma süreçlerini etkilediği tespit edilmiştir. En yüksek iç yapışma direnci 0,192 N/mm² ile %10 yün katkılı orta yoğunlukta levha grubunda olduğu tespit edilmiştir. Ancak yün kullanımının ısı iletkenliğe etkisinin düşük yoğunluklu levhalarda yükseldiği görülmüştür. Bu durum göz önüne alındığında en uygun ve kararlı sonuç veren karışımın 0,078 N/mm² ile %10 yün katkılı düşük yoğunluklu levhalarda olduğu sonucuna varılmıştır.

4.4.Levha yüzeyine dik yönde vida çekme direnci tayini

Levha örneklerinde levha yüzeyine dik vida çekme direnç değeri; en düşük 1,961 N/mm² ile düşük yoğunluklu %20 yün katkılı grupta, en yüksek 12,585 ²ile Orta yoğunlukta %0 yün katkılı grupta olduğu tespit edilmiştir. Düşük yoğunluklu levhalar kendi arasında değerlendirildiğinde; en düşük 1,961 N/mm² ile %20 yün katkılı grupta, en yüksek 6,865 N/mm² değer ile %10 yün katkılı kontrol grubu levhalarda olduğu tespit edilmiştir. Orta yoğunlukta üretilen levhalar kendi arasında değerlendirildiğinde; en düşük 5,067 N/mm² ile %10 yün katkılı grupta, en yüksek 12,585 N/mm² ile %0 yün katkılı levha grubunda olduğu tespit edilmiştir. Levha yüzeyine dik yönde vida çekme sonuçlarına göre; en düşük 1,961 N/mm² ile düşük yoğunluklu %20 yün katkılı grupta, en yüksek 12,585 N/mm² ile Orta yoğunlukta %0 yün katkılı grupta olduğu tespit edilmiştir.

5. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

DYL'ların OYL'lara göre % 36 oranında daha düşük ısı iletkenlik değerine sahip olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, panellerin ısı iletim katsayıları üzerinde en büyük etkiye yoğunluk değişiminin sahip olduğu belirlenmiştir(F: 178.6105). Yün oranı etkisi ise düşük olduğu (F: 8.8684) tespit edilmiştir. Ancak yün oranı artışı ile ısı iletkenlik değerinin %12 oranında düştüğü belirlenmiştir.

Isı iletim katsayısı bakımından uygun karışım düşük yoğunlukta (0,27 gr/cm³) P16 nolu %30 luk yonga yün karışımında (0,045 W/m.K) elde edilmiştir. Fakat bu levha vida tutma ile iç yapışma testlerine alınamayacak kadar dayanıksız görülerek daha homejen dağılım görülen %20 lik karışımlar üzerine durulmuştur. P11 ve P12 nolu numunelerde grup değiştirmeden yine düşük yoğunlukta (0,43-0,39 gr/cm³) yoğunluk arttırılarak levha mukavemeti arttırılmış %30luk karışım ile benzer ısı iletim (0,044 W/m.K) değerlerine ulaşılmıştır. Isı yalıtım malzemesi olarak kullanılacak panel üretimi için sadece ısı iletim katsayıları değil aynı zamanda fiziksel ve mekanik dayanım da önemlidir. Panel üretimi için ısı yalıtımı en optimum levha analizinde %20 yün karışımı P11-12-13-14-15 nolu levhalar sırasıyla 0,044- 0,047- 0,064- 0,064- 0,076 W/m.K değerleri elde edilmiştir. Bu değerlerin analizi ile %20 yün karışımı grubun, vida tutma ve iç yapışma özelliğinin önemsiz olduğu ahşap karkas içi yalıtım

uygulamalarında kullanılabileceği sonucuna ulaşılmıştır. %10 yün karışımı grubun ise fiziksel ve mekanik özelliklerinin şuan yalıtım amaçlı kullanılan levha grupları arasında yeterli görüldüğü ısı iletkenliğinin en düşük 0,0469 W/m.K değerine ulaştığı ve uygun şartlarda standart üretim ile vida tutma kabiliyetinin yeterli olduğu belirlenmiştir. %10 yün karışımı grubun yalıtım uygulamalarında kullanılabileceği sonucuna ulaşılmıştır.

Deney sonuçlarının etkisiyle aşağıda belirtilen önerilerde bulunulabilir:

5.1. Yonga yün karışımı levhalarda (YYL) yoğunluk arttıkça ısı iletkenlik katsayısının da arttığı görülmüştür. Üretilen düşük yoğunluktaki levhalarda (DYL) yün oranı arttırıldıkça ısı iletim katsayısının düştüğü görülmektedir. Bu durum orta yoğunluktaki levhalarda (OYL) aynı olmayıp yoğunluk arttıkça yün karışım oranının etkisinin azaldığı söylenebilir. Fiziksel ve mekanik özellikleri ilgili standartlara uygun levha üretimi ile DYL'ların yalıtım amaçlı kullanılması,

5.2. Levha ara katmanına %10-20 oranında yün karışımı sonucunda yonga levhalarda ısı iletkenlik katsayısı %8-12 oranında azalmıştır. Dikici 2018'e göre dış cephe kaplaması olarak kullanılan Xps levhalarda ısı iletkenlik Lamda değeri 0,036 W/m.K olarak tespit edilmiştir[19]. Düşük yoğunluklu %20 yün karışımı levha grubunda, Panel 11 ve 12'nolu levha için ısı iletkenlik değerleri 0,044 W/m.K olarak belirlenmiştir. Yine DYL'larda %10 yün karışımı grupta en düşük 0,0469 W/m.K değeri belirlenmiştir. Bu sonuçlarla ısı yalıtımı için doğal, biyobozunur özellikteki DYL'ların tercih edilebilir olduğu,

5.3. Levha tiplerine yönelik en uygun yonga yün karışımı yoğunluk oranı tespit edilmiş olup, mekanik ve fiziksel özelliklerinin iyileştirilmesi (modifikasyon) ve yangın riski için koruyucu boya ve vernikler ile borlu alev geciktiricilerin kullanımıyla ahşabın alevlenme süresi geciktirilmesi önerilmiştir.

ACKNOWLEDGMENTS (TEŞEKKÜR)

Yapmış olduğum araştırmada desteklerini esirgemeyen değerli danışman hocam Prof.Dr. Hamza ÇINAR'a, çalışmamda vermiş olduğu değerli bilgilerinden ve tecrübelerinden dolayı hocam Doç.Dr. Nihat DÖNGEL'e, çalışma sırasında değerli katkılarından ve uyarılarından ötürü TİK üyesi Doç.Dr. Harun DİLER hocama, hazırlık aşamasında birçok alanda bana yardımcı olan, deney çalışmalarında yardımlarını esirgemeyen değerli arkadaşım Dr. Ramazan BÜLBÜL'e, yazım kontrol sürecinde katkı sağlayan İbrahim TÜRKER'e sonsuz teşekkür ederim.

DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS
(ETİK STANDARTLARIN BEYANI)

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

AUTHORS' CONTRIBUTIONS (YAZARLARIN KATKILARI)

***Hasan ŞEN*:** Deneyleri yapmış, sonuçlarını analiz etmiş ve maklenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

Hamza ÇINAR: Deney sonuçlarının düzenlenmesi, analizlerin değerlendirilmesi ve yazım kontrolü işlemlerini gerçekleştirmiştir.

CONFLICT OF INTEREST (ÇIKAR ÇATIŞMASI)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

REFERENCES (KAYNAKLAR)

[1] Şişman, M. E. (2018). Amerika Birleşik Devletleri'nde ahşap evin gelişimi ve prefabrik ahşap ev katalogları (Master's thesis, Fatih Sultan Mehmet Vakıf Üniversitesi, Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü). Eroğlu H, Usta M (2000). Lif Levha Üretim Teknolojisi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Orman Fakültesi, Genel Yayın No:200, Fakülte Yayın No:30, 351 s. Trabzon, Türkiye

[2] Bıçkı, D., & Kirkan, M. (2022). Bilge mimar Turgut Cansever'in perspektifinden Türkiye'de "yatay mimari" meselesi. Journal of Economy Culture and Society, 65, 289-311.

[3] İstek, A., Özlüsoylu, İ., & Kızılkaya, A. (2017). Türkiye Ahşap Esaslı Levha Sektör Analizi. Bartın Orman Fakültesi Dergisi, 19(1), 132-138. https://doi.org/10.24011/barofd.297231

[4]İnternet:https://9lib.net/article/yal%C4%B1t%C4%B1m-malzemeleri-konutlarda-enerji-verimlili%C4%9Fi-derece-b%C3%B6lgelerine-farkl%C4%B1.7qv7g6lq#google_vignette

[5] Şahin ve Döngel 2018 "Bazı ahşap ve ahşap esaslı levhaların ısı iletkenlik özelliklerinin belirlenmesi." 5. Uluslararası Mobilya Kongresi

[6] Yalçın, A.H., Elazığ ilinde kullanılan Farklı duvar tipleri için optimum yalıtım kalınlığının belirlenmesi ve ekonomi analizi. Fırat Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, (2012) Elazığ.

[7] Briga-Sá, A., Paiva, A., Boaventura-Cunha, J., Lanzinha, JC. 2012. Contribution of the Trombe wall to sustainable buildings: experimental work. In: 38th IAHS World Congress on Housing Science, İstanbul, Turkey.

[8] Martin Volfa,b, Jakub Diviša,b, Filip Havlíka, Energy Procedia 78 (2015) 1599 – 1604

[9]İnternet:Polat,2017https://www.yenimeram.com .tr/bina-yalitimlarinda-alternatif-urun-koyun-yunu 265487.htm

[10] Aşkadar, M.A., 2006. Isı Yalıtımı ve Konutlarda Enerji Verimliliği, İzolasyon Dünyası, 55. sayı, 54–58.

[11] İnternet: Akbulut, T., & Ayrılmış, N. (2024). Yongalevha endüstrisi. İstanbul: İÜC Yayınevi.

[12] TS EN 323/1. (1999). Ahşap esaslı levhalar-birim hacim ağırlığının tayini, TSE Standardı, Ankara.

[13] TS EN 12667. (2003). Yapı malzemeleri ve mamullerinin ısıl performansı-mahfazalı sıcak plâka ve ısı akış sayacı metotlarıyla ısıl direncin tayini-yüksek ve orta ısıl dirençli mamuller, TSE Standardı, Ankara.

[14] Kaplan G., Aruntaş H. Y., "XPS Yalıtımlı Dış Duvarların Isıl Performanslarının Deneysel İncelenmesi", Politeknik Dergisi, 24(2): 645-653, (2021).

[15] Özen, E. (2009). Bağ budama artıklarından elde edilen levhaların bazı mekanik ve fiziksel özelliklerinin belirlenmesi ve mobilya köşe birleştirmelerinin performans özelliklerinin araştırılması. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

[16] Ayrılmış, N. 2000. MDF'nin teknolojik özellikleri üzerine ağaç türünün etkisi. İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi

[17] Gündüz, G., Yılmaz, A.Z., 2005. Türkiye'de 16 Farklı Tesiste Üretilen Yonga Levhaların Teknolojik Özellikleri, ZKÜ, Bartın Orman Fakültesi Dergisi, 7(8).

[18] Zach, J., Korjenic, A., Petranek, V., Hroudova, J., Bednar, T. (2012). Performance evaluation and research of alternative thermal insulations based on sheep wool. contents lists available at sciverse sciencedirect. Energy and Buildings 49, 246–253

[19] Dikici A, Kocagül M., 'Isı Yalıtımında Kullanılan Eps, Xps Ve Taş Yünü İzolasyon Malzemelerinin Deneysel Olarak Karşılaştırılması' Fırat Üniversitesi Müh. Bil. Dergisi 31(1), 129-136, 2019.

Gazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Dergisi
PART C: TASARIM VE TEKNOLOJİ

Gazi University
Journal of Science
PART C: DESIGN AND TECHNOLOGY

GU J Sci, Part C, 13(2): 812-826 (2025)

Review and Assessment of Wind Power Forecasting Studies for Very Short-Term and Short-Term Horizons

Mehmet YEŞİLBUDAK[1*], Mustafa BENLİ[1*]

[1]*Nevsehir Haci Bektas Veli University, Faculty of Engineering and Architecture, Department of Electrical and Electronics Engineering, 50300, Nevsehir, Turkey*

Article Info

Review article
Received: 27/01/2025
Revision: 02/03/2025
Accepted: 05/03/2025

Keywords

Wind Energy
Wind Power
Forecast Horizon
Review
Assessment

Makale Bilgisi

Derleme makalesi
Başvuru: 27/01/2025
Düzeltme: 02/03/2025
Kabul: 05/03/2025

Anahtar Kelimeler

Rüzgâr Enerjisi
Rüzgâr Gücü
Tahmin Ufku
İnceleme
Değerlendirme

Graphical/Tabular Abstract (Grafik Özet)

This study evaluates the current status of very short-term and short-term wind power forecasting by comparing existing studies in the literature from different aspects. / Bu çalışma, literatürdeki mevcut çalışmaları farklı yönlerden karşılaştırarak çok kısa dönem ve kısa dönem rüzgâr gücü tahmininin mevcut durumunu değerlendirmektedir.

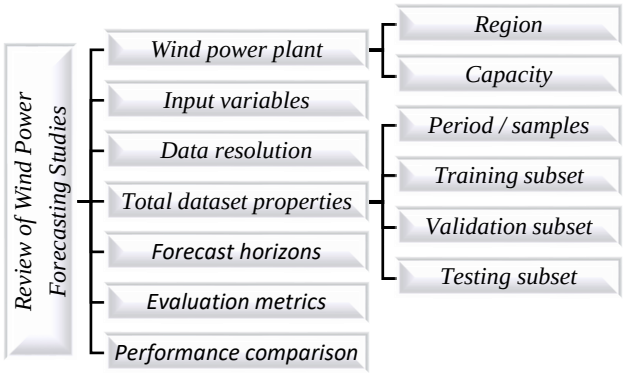


***Figure A**: The different aspects used in reviewing very short-term and short-term wind power forecasting studies / **Şekil A:** Çok kısa dönem ve kısa dönem rüzgâr gücü tahmin çalışmalarını incelerken kullanılan farklı yönler*

Highlights (Önemli noktalar)

- *Initially, the reviewed studies have been compared in terms of properties of wind power plants, input variables of forecasting methods, data resolution and total dataset properties. / İlk olarak, incelenen çalışmalar rüzgâr güç santrallerinin özellikleri, tahmin metotlarının girdi değişkenleri, veri çözünürlüğü ve toplam veri seti özellikleri açısından karşılaştırılmıştır.*
- *Then, they have been compared in terms of forecast horizons, evaluation metrics and performance of forecasting methods. / Daha sonra, tahmin ufukları, değerlendirme metrikleri ve tahmin metotlarının performansı açısından karşılaştırılmıştır.*
- *Many beneficial evaluations and guiding recommendations have been presented to researchers for more consistent wind power forecasting studies. / Araştırmacılara, daha tutarlı rüzgâr gücü tahmin çalışmaları için pek çok yararlı değerlendirme ve yol gösterici öneri sunulmuştur.*

***Aim (Amaç):** This study aims to identify the current limitations in the literature to improve the consistency of wind power forecasting research. / Bu çalışma, rüzgâr gücü tahmin araştırmalarının tutarlılığını artırmak için literatürdeki mevcut sınırlılıkları belirlemeyi amaçlamaktadır.*

***Originality (Özgünlük):** This study constitutes the highly-informative tabulated contents of all the reviewed studies. / Bu çalışma, incelenen tüm çalışmaların son derece bilgilendirici tablolaştırılmış içeriklerini oluşturmaktadır.*

***Results (Bulgular):** Overall evaluations regarding wind power forecasting studies have been made by utilizing the created literature tables. / Oluşturulan literatür tablolarından yararlanılarak rüzgâr gücü tahmin çalışmalarına ilişkin genel değerlendirmeler yapılmıştır.*

***Conclusion (Sonuç):** The important points to be taken into consideration by researchers have been indicated for future works. / Gelecekteki çalışmalar için araştırmacıların dikkat etmesi gereken önemli noktalar belirtilmiştir.*

*Corresponding author, e-mail: myesilbudak@nevsehir.edu.tr
DOI: 10.29109/gujsc.1627535

GU J Sci, Part C, 13 (2): 812-826 (2025)

Gazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Dergisi
PART C: TASARIM VE TEKNOLOJİ

Gazi University
Journal of Science
PART C: DESIGN AND TECHNOLOGY

http://dergipark.gov.tr/gujsc

Review and Assessment of Wind Power Forecasting Studies for Very Short-Term and Short-Term Horizons

Mehmet YEŞİLBUDAK[1*], Mustafa BENLİ[1*]

[1]*Nevsehir Haci Bektas Veli University, Faculty of Engineering and Architecture, Department of Electrical and Electronics Engineering, 50300, Nevsehir, Turkey*

Article Info

Review article
Received: 27/01/2025
Revision: 02/03/2025
Accepted: 05/03/2025

Keywords

Wind Energy
Wind Power
Forecast Horizon
Review
Assessment

Abstract

Wind energy penetration is continuously increasing in electricity grids and the intermittent nature of wind speed causes the problems in system operations. Therefore, utilities, system operators and researchers focus on alleviating the negative impacts of volatile generation and harvesting wind energy efficiently. At this point, accurate wind power forecasts serve as the promising research studies in the literature. To this end, this paper presents a comprehensive literature review of wind power forecasting studies for very short-term and short-term horizons. The reviewed studies have been compared in terms of installation properties of wind power plants, inputs of forecast models, data recording intervals and periods, training, validation and test subsets, forecast horizons, accuracy measures and forecast performance. As a result of the knowledge-intensive literature tables created, the up-to-date assessments of very short-term and short-term forecasting studies have been made from different perspectives, and noteworthy recommendations have been highlighted for fairer comparisons of the reviewed studies.

Çok Kısa Dönem ve Kısa Dönem Ufukları için Rüzgâr Gücü Tahmin Çalışmalarının İncelenmesi ve Değerlendirilmesi

Makale Bilgisi

Derleme makalesi
Başvuru: 27/01/2025
Düzeltme: 02/03/2025
Kabul: 05/03/2025

Anahtar Kelimeler

Rüzgâr Enerjisi
Rüzgâr Gücü
Tahmin Ufku
İnceleme
Değerlendirme

Öz

Elektrik şebekelerinde rüzgâr enerjisinin penetrasyonu sürekli olarak artmakta ve rüzgâr hızının kesintili doğası sistem operasyonlarında sorunlara neden olmaktadır. Bu nedenle, kamu hizmet kuruluşları, sistem operatörleri ve araştırmacılar değişken üretimin olumsuz etkilerini hafifletmeye ve rüzgâr enerjisini verimli bir şekilde toplamaya odaklanmaktadır. Bu noktada, doğru rüzgâr gücü tahminleri literatürde umut vadeden araştırma çalışmaları olarak hizmet vermektedir. Bu amaçla, bu makale çok kısa dönem ve kısa dönem ufukları için rüzgâr gücü tahmin çalışmalarının kapsamlı bir literatür incelemesini sunmaktadır. İncelenen çalışmalar rüzgâr güç santrallerinin kurulum özellikleri, tahmin modellerinin girdileri, veri kayıt aralıkları ve periyotları, eğitim, doğrulama ve test alt kümeleri, tahmin ufukları, doğruluk ölçümleri ve tahmin performansı açısından karşılaştırılmıştır. Oluşturulan bilgi yoğun literatür tabloları sonucunda, çok kısa dönem ve kısa dönem tahmin çalışmalarının güncel değerlendirmeleri farklı perspektiflerden yapılmış ve incelenen çalışmaların daha adil karşılaştırmaları için dikkate değer öneriler vurgulanmıştır.

1. INTRODUCTION (GİRİŞ)

The demand for energy is rapidly increasing due to high levels of economic and technological development, population growth and urbanization [1, 2]. At the same time, global warming and climate change have led to an exponential increase in greenhouse gas emissions into the atmosphere over the past few decades [3-5]. With increasing environmental issues, renewable energy sources have gained significant interest as a potential solution to fossil fuels [6-8]. Many countries around the world are increasingly investing in renewable energy installations and the reduction in system costs have accelerated this global transition in a more sustainable and resilient way [9, 10].

Wind energy is one of the leading renewable energies with its high usable potential [11]. Wind energy also stands out with its clean, environmentally friendly and pollution-free structure, as well as its easy accessibility,

*Corresponding author, e-mail: myesilbudak@nevsehir.edu.tr
DOI: 10.29109/gujsc.1627535

competitive costs and large storage capacity [12-14]. The IRENA's World Energy Transitions Outlook forecasts that global wind installations will reach approximately 3.5 TW by 2030, comprising 3,040 GW of onshore capacity and 494 GW of offshore capacity [15]. Similarly, the IEA's Net Zero by 2050 Scenario targets a total global wind capacity of 2.75 TW by 2030, with an additional 320 GW of new wind installations [15].

Although wind energy offers numerous advantages, it is influenced by external environmental factors such as weather conditions, geographic location and seasonality, causing to uncertainty and instability [16, 17]. The randomness and fluctuation of wind energy can complicate the planning and distribution processes for power system management [18-20]. In case of integrating wind energy into electricity grids, its forecasting accuracy is crucial for both security and economic assessments [21-23]. Wind power forecasting not only provides the guidance for the operation and maintenance units of wind farms but also ensures the stable operation of power system and the reduction of operational costs [13, 14]. In the literature, various methods have been proposed to enhance the accuracy in wind power forecasting, which are fundamentally categorized into physical, statistical and hybrid approaches [24, 25].

This study has been conducted to identify the existing limitations in the literature, such as the rare availability of capacity information of wind power plants, the lack of a common approach in creating test, validation and training subsets, the uncertainties in the selection of input variables and data recording intervals, the variety of forecast horizons and evaluation metrics in performance comparisons, etc. To overcome such shortcomings, in this study, very short-term and short-term wind power forecasting studies in the literature have been reviewed from different criteria. Initially, the existing studies have been characterized by the region and capacity of the operated wind power plant, input variables of the employed forecasting methods, data resolution, total dataset period/ samples, and dataset partitioning ratios/amounts. Then, the corresponding studies have been featured with forecast horizons, evaluation metrics, and performance rankings of forecasting methods. According to the up-to-date and information-rich tables constructed, many useful assessments have been made about the current status of very short-term and short-term wind power forecasting, and many guiding suggestions have been presented to the researchers for more consistent forecasting studies.

The remainder of this review is organized as follows: Sections 2.1 and 2.2 present and describe the literature tables created for very short-term and short-term wind power forecasts. Section 2.3 provides the overall assessments made on very short-term and short-term wind power forecasts. Conclusions and recommendations are given in Section 3.

2. WIND POWER FORECASTING (RÜZGÂR GÜCÜ TAHMİNİ)

In the following subsections, we first introduce the highly-summarized content of the relevant literature. We then evaluate the current status of very short-term and short-term wind power forecasting in the literature.

2.1. Very Short-Term Wind Power Forecasting (Çok Kısa Dönem Rüzgâr Gücü Tahmini)

Very short-term wind power forecasting plays a critical role in developing power generation plans, adjusting operation strategies, and providing the fundamental information for electricity market trading [26]. Very short-term wind power forecasts cover the time horizons ranging from a few seconds to 30 minutes [27]. Table 1 summarizes wind power plant information, input variables of forecasting methods, total dataset properties and data resolution of the reviewed studies for very short-term wind power forecasting. In addition, Table 2 presents the corresponding forecast horizons, evaluation metrics and performance comparison of forecasting methods.

For instance, in [36], a 10 MW wind power plant located in USA was utilized. Wind power production, air density, atmospheric pressure, wind direction, temperature and wind speed were used as the input variables of forecasting methods. The total dataset included the measurements collected at 5 min. intervals over a 2-year period. It was partitioned into one-year subsets for training and testing of the forecasting methods. RMSE was utilized as the evaluation metric, while 5 min. was used as the forecast horizon. According to the performance comparison, DDA-LightGBM method surpassed LightGBM, Adaboost, RF, Bagging, Extra-Trees, GBRT, XGBoost and SVR methods, respectively.

2.2. Short-Term Wind Power Forecasting (Kısa Dönem Rüzgâr Gücü Tahmini)

Short-term wind power forecasting has a crucial task in the optimization of the grid connection of wind power, and in the reduction of the backup

capacity of power grid [26]. Short-term wind power forecasts include the time horizons between 30 minutes to 6 hours [27]. Wind power plant information, input variables of forecasting methods, total dataset properties and data resolution of the reviewed studies for short-term wind power forecasting are summarized in Table 3. In addition, the corresponding forecast horizons, evaluation metrics and performance comparison of forecasting methods are presented in Table 4.

For instance, in [85], a wind power plant located in China was used. Wind speed, ambient temperature, wind direction and historical power prediction residuals were utilized as the input variables of forecasting methods. The total dataset contained 2264 measurements collected at 1 hour intervals. It was split into training and testing subsets with the ratios of 70% and 30%, respectively. MSE, RMSE and SSE were used as the evaluation metrics, while 1 hour was utilized as the forecast horizon. According to the performance comparison, CEEMDAN-SVR-TCN method outperformed CEEMDAN-SVR, CEEMDAN-TCN, CEEMDAN -BP, TCN, LSTM, BP and SVR methods, respectively.

2.3. Overall Assessments On Very Short-Term And Short-Term Wind Power Forecasting (Çok Kısa Dönem Ve Kısa Dönem Rüzgâr Gücü Tahmini Üzerine Genel Değerlendirmeler)

As a result of the overall evaluations of Tables 1 to 4, the following important findings are obtained for very short-term and short-term wind power forecasting:

- In both forecast horizons, the regional information of the wind power plant has been provided in almost all studies, but the capacity information of it has been specified in a limited number of studies.
- In both forecast horizons, the first three most greatly-utilized input variables of forecasting methods are wind power, wind speed and wind direction, respectively. These are followed by the ones of air temperature, atmospheric pressure, relative humidity and air density, respectively.
  - In the very short-term forecast horizon, it is very rare to use the input variables of solar radiance, other climatic factors, generator current, generator frequency, generator torque, heat flux, etc.
  - In the short-term forecast horizon, it is very seldom to use the input variables of zonal and meridional wind components, NWP data, historical power prediction residuals, etc.
- The first two most widely-utilized data resolutions in the very short-term forecast horizon are 15 min. and 10 min., respectively, followed by 5 min. Those in the short-term forecast horizon are 1 hour and 15 min., respectively, followed by 10 min.
  - It is very rare to use the data resolutions of 30 min. and 3 min. in the very short-term forecast horizon. That is 12 hours in the short-term forecast horizon.
- In both forecast horizons, the total dataset is often partitioned into the training subset with the ratio of 80% to 90%, and the testing subset with the ratio of 10% to 20%. Validation subsets are of limited utilization.
- The first two most preferred horizons in the very short-term forecasting are 15 min. and 10 min, respectively. Those in the short-term forecasting are 1 hour and 4 hours, respectively.
  - It is very seldom to prefer the horizons of 30 min., 20 min. and 5 min. in the very short-term forecasting. Those are 6 hours, 3 hours, 2 hours, 45 min. and 40 min. in the short-term forecasting.
- The first three commonly-employed evaluation metrics in the very short-term forecast horizon are RMSE, MAE and MSE, respectively, followed by MAPE, R^2 and NRMSE, respectively. Those in the short-term forecast horizon are RMSE, MAE and MAPE, respectively, followed by R^2, MSE and NRMSE, respectively. The usage rates of evaluation metrics in very short-term and short-term wind power forecasting studies are presented in Figures 1(a) and 1(b), respectively.
  - It is very rare to employ the evaluation metrics of MASE, CRPS, NMAE, MRE, U^1, etc. in the very short-term forecast horizon. Those are SDE, SSE, NMAE, MAAPE, SMAPE, PAR, etc. in the short-term forecast horizon.
- In both forecast horizons, hybrid models, which inherit the strengths of individual models, have mostly been implemented. In the design of these hybrid models,
  - LSTM, VMD, EEMD, CNN, PSO, ELM, SVR and GRU individual models have frequently been used in the very short-term forecast horizon. Among them, LSTM, VMD and EEMD stand out as the main models that contribute to achieving successful forecasting performance.
  - WOA, VMD, LSTM, TCN, ELM, KELM, CEEMDAN and SVR individual models have often been utilized in the short-term forecast horizon. Among them, WOA, VMD and LSTM come out as the essential models that help to accomplishing high prediction performance.

- Both forecast horizons suffer from the lack of sharing of total datasets used for wind power forecasting, the lack of usage of reference forecast models for benchmark tests, and the lack of provision of information on the computational requirements of forecast methods.



a) *b)*

Figure 1. The usage rates of evaluation metrics for *a)* very short-term and *b)* short-term wind power forecasting studies (*a)* Çok kısa dönem ve *b)* kısa dönem rüzgâr gücü tahmin çalışmaları için değerlendirme metriklerinin kullanım oranları)

Table 1. Region and capacity of wind power plant, input variables of forecasting methods, data resolution and total dataset properties of the reviewed studies for very short-term wind power forecasting (Çok kısa dönem rüzgâr gücü tahmini için incelenen çalışmaların rüzgâr güç santralinin bölgesi ve kapasitesi, tahmin metotlarının girdi değişkenleri, veri çözünürlüğü ve toplam veri seti özellikleri)

Ref.	Wind Power Plant		Input Variables of Forecasting Methods	Data Resolution	Total Dataset Properties			
	Region	Capacity			Period / Samples	Training Subset	Validation Subset	Testing Subset
[28]	Germany	463 MW	Wind power	15 min.	38112	80%	10%	10%
	China	99.5 MW			8544			
[29]	China	200 MW	Historical wind speed (10m, 30m, 50m, 70m), historical power generation	15 min.	1 year	90%	10%	
[30]	South Africa	100 MW	Historical wind generation power	30 min.	3 years	70%	20%	10%
[31]	China	99 MW	Wind speed (10m, 30m, 50m, hub height), wind direction (10m, 30m, 50m, hub height), air pressure, ambient temperature, humidity	15 min.	2 years	80%	-	20%
		99 MW						
		96 MW						
[32]	China	200 MWh	Actual power, wind speed (10m, 30m, 50m, 70m, hub height), wind direction (10m, 30m, 50m, 70m, hub height)	15 min.	5760	97.6%	-	2.4%
[33]	China	1.5 MW	Wind power series	15 min.	8929	7142	-	1787
		49.5 MW			8929	7142		1787
[34]	China	1.5 MW	Raw wind power series	15 min.	~6 months	80%	-	20%
		49.5 MW						
[35]	Turkey	3600 kW	Wind power	10 min.	1 year	First 80%	-	Last 20%
	France	2050 kW						
[36]	USA	10 MW	Wind power production, air density, atmospheric pressure, wind direction, temperature, wind speed	5 min.	2 years	1 year	-	1 year
[37]	China	50 MW	Wind direction, wind speed, wind power	15 min.	11 months	60 days	-	30 days
[38]	China	2 MW	Historical wind power time series	5 min.	1 year	5760 per month	-	2304 per month
[39]	France	2050 kW	Relative wind direction, wind speed	10 min.	1000	70%	-	30%
[40]	China	400 MW	Wind speed, temperature, solar irradiance	15 min.	34560	-	-	-
[41]	Denmark	2 MW	Wind power time series	10 min.	5760	-	-	-
[42]	China	-	Wind speed, wind direction, temperature, wind power	15 min.	865	60%	20%	20%
[43]	China	-	Wind power	15 min.	2976	60%	20%	20%

					2976			
[44]	China	-	Wind power, wind speed, wind direction, air temperature, atmospheric pressure	10 min.	52069	80%	10%	10%
[45]	Turkey	-	Average wind speed, absolute wind direction	10 min.	1008	60%	20%	%20
[46]	Australia	-	Wind power	5 min.	119232	~7 months	~3 months	4 months
[47]	USA	-	Surface pressure, wind direction, temperature, air density, wind speed	5 min.	1 year 1 year	80%	10%	10%
[48]	USA	-	Wind speed, wind direction, air density, air pressure	10 min.	1 year	75%	33% of training set	25%
[49]	Turkey	-	Raw wind power data	15 min.	10000 10000 10000	90%	-	10%
[50]	Spain	-	Wind power series	10 min.	1500	1200	-	300
[51]	China	-	Wind speed, active power, generator frequency, generator torque, generator current, historical wind power data	10 min.	1 year	3964	-	500
[52]	China	-	Wind speed, wind direction, temperature, atmospheric pressure, other climatic factors	10 min.	894	750	-	144
[53]	China	-	Raw wind power data	10 min.	13248	11952	-	1152
[54]	China	-	Wind power, wind speed, wind direction	10 min.	390	360	-	30
[55]	China	-	Wind speed, sine and cosine of wind direction, air density	15 min.	2 years	1 year	-	1 year
[56]	Inner Mongolia	-	Historical wind power, historical wind power vector	3 min.	13440	10080	-	3360
[57]	China	-	Historical power dataset	15 min.	31 days	24 days	-	7 days
[58]	China	-	Scada dataset	15 min.	3 months	First 85 days	-	Last 7 days
[59]	China	-	Wind speed, wind direction, temperature, air pressure, humidity, measured power data	15 min.	1 year	80%	-	20%
[60]	China	-	Wind speed (10m, 60m, 80m), wind power of Wangzi, wind speed of Wangzi (10m, 50m, 70m), wind power of Ruifeng, wind power of Dagang, air pressure (10m), temperature (10m), wind speed of Dagang (10m, 20m, 40m)	15 min.	35136	-	-	-
			Wind direction (70m), humidity (10m), temperature (10m), atmospheric pressure (10m), wind speed (10m, 50m, 70m), wind power of Taobei	15 min.	1 year			
[61]	USA	-	Wind power generation	10 min.	~3 years	-	-	-
[62]	USA	-	-	5 min.	-	80%	-	20%
[63]	-	48 MW 96 MW 55.5 MW	Wind speed, wind direction, pressure, temperature, humidity, wind farm operation data	15 min.	1 year	First 20 days per month	-	Last 10 days per month
[64]	-	130 MW	Historical wind power data, air temperature, solar radiance, surface temperature, relative humidity, soil moisture, soil temperature, wetness, wind speed, pressure, air temperature at hub height, wind direction, wind speed at hub height, air density, heat flux, change in surface temperature	10 min.	1 year	80%	-	20%
[65]	-	200 MW	Relative humidity, barometric pressure, environment temperature, wind direction, wind speed, generating power	15 min.	1500	80%	-	20%
[66]	-	-	Raw wind power time series	10 min.	5999	4199	-	1800
[67]	-	-	Wind velocity, wind direction	15 min.	6912	5760	-	384
[68]	-	-	Wind power data, NWP data	15 min.	1 year	70%	-	30%
[69]	-	-	Atmospheric pressure, humidity, temperature, wind direction, wind speed	15 min.	6000	First 5100	Last 900	-
						First 5808	-	Last 192

Table 2. Forecast horizons, evaluation metrics and performance comparison of forecasting methods of the reviewed studies for very short-term wind power forecasting (Çok kısa dönem rüzgâr gücü tahmini için incelenen çalışmaların tahmin ufukları, değerlendirme metrikleri ve tahmin metotlarının performans karşılaştırması)

Ref.	Forecast Horizons	Evaluation Metrics	Performance Comparison of Forecasting Methods
[28]	15 min.	RMSE	OLE-SANN > SANN > AGRU > TCN = MLP > CNN > BiLSTM > LSTM > CNN-LSTM > Persistence
			OLE-SANN > TCN > SANN > BiLSTM = Persistence > AGRU > LSTM > CNN > CNN-LSTM > MLP
[29]	15 min.	R^2, RMSE	VMD-2D-CNN-Transformer > VMD-1DCNN-Trans > VMD-1DCNN-GRU > VMD-LSTM > LSTM > BP
[30]	30 min.	MAE (pu)	EMD-LSTM-Output Restriction > EMD-GRU > EMD-GRU-Output Restriction > EMD-LSTM > LSTM
[31]	15 min.	MSE, R^2	GNN-LSTM-RSA > CNN-LSTM-Attention > ARIMA > CNN-LSTM
[32]	15 min.	RMSE	WPCA-PSO-GRU > PCA-PSO-GRU > WPCA-GRU > PCA-GRU > PSO-GRU > GRU = LSTM > SVM > MLR
[33]	15 min.	MSE, RMSE	VMD-ConvLSTM-LSTM > VMD-ConvLSTM > VMD-LSTM > LSTM > VMD-BPNN > BPNN > VMD-ELMAN > ELMAN
			VMD-ConvLSTM-LSTM > VMD-ConvLSTM > VMD-LSTM = LSTM > VMD-BPNN > BPNN > ELMAN > VMD-ELMAN
[34]	15 min.	MRE, RMSE	VMD-kmeans-LSTM > VMD-LSTM > LSTM > BP > VMD-ELMAN > VMD-BPNN > ELMAN
			VMD-kmeans-LSTM > VMD-LSTM > LSTM > BP > VMD-BPNN > VMD-ELMAN > ELMAN
[35]	10 min.	RMSE	CEEMDAN-EWT-LSTM > CEEMDAN-LSTM > EEMD-LSTM > EEMD- BO-LSTM > EMD-ENN > EMD-LSTM > LSTM > ANN > RF > SVR
			CEEMDAN-EWT-LSTM > CEEMDAN-LSTM > EEMD-LSTM > EMD-LSTM > LSTM > ANN > RF > SVR
[36]	5 min.	RMSE	DDA-LightGBM > LightGBM > Adaboost > RF > Bagging > Extra-Trees > GBRT > XGBoost > SVR
[37]	15 min.	MAE, MAPE, NRMSE	DC+FR+CNN > FR+CNN > DC+CNN > CNN > GRU > LSTM > ARIMA-Kal
[38]	5 min.	CRPS	EDM > KDE > DWT-SBL > k-NN > SBL > Persistence
[39]	10 min.	MAE, MAPE, R^2, RMSE	HICS-SVR > IDA-SVR > CS-SVR > GA-SVR
[40]	15 min.	MAE, MAPE, RMSE	ELM-PSO > ELM > BPNN
[41]	10 min.	MAPE	ARIMA(1,1,2) > WMA > ARMA(1,1) > MA
[42]	15 min.	RMSE	PVMD-ESMA-DELM > EEMD-ESMA-DELM > CEEMD-WOA-KELM > WT-ESMA-DELM > EEMD-ISpSA-LSSVM > FC-FWA-LSSVM > WT-PCA-RBF > EEMD-CSO-LSTM > PVMD-DELM > VMD-DELM > EEMD-DELM > WT-DELM > ESMA-DELM > SMA-DELM > WOA-DELM > PSO-DELM > GA-DELM > DELM > ELM > BP > RF
[43]	15 min.	MSE, RMSE	GWO-VMD-SE-ELM-SVR-GRU > IVMD-ELM > IVMD-GRU > IVMD-ELM-GRU > IVMD-ELM-SVR > IVMD-SVR-GRU > IVMD-SVR > SVR > GRU > ELM
			GWO-VMD-SE-ELM-SVR-GRU > IVMD-SVR-GRU > IVMD-SVR > IVMD-ELM-GRU > IVMD-ELM-SVR > IVMD-GRU > IVMD-ELM > GRU > SVR > ELM
[44]	10 min.	RMSE	EMD-CCTransformer(C) > CCTransformer(I) > CCTransformer > EMD-LSTM > Transformer > LSTM > WT-LSTM > EMD-BP > RNN > ARIMA
[45]	10 min.	MSE, RMSE	Adaboost-PSO-ELM > PSO-SVM > RF > BaggedTrees > PSO-ELM > GPR > Adaboost-GA-ELM > GA-ELM > Adaboost-PSO-BP > PSO-BP > BoostingTrees
[46]	5 min.	MAE, MASE, RMSE	CST-WPP > DBN > ANN > VAR > AR > Persistence
[47]	10 min.	RMSE	SATCN-LSTM > TCN-LSTM > LSTM > TCN > CNN-LSTM
			SATCN-LSTM > TCN-LSTM > TCN > CNN-LSTM > LSTM
[48]	10 min.	R, R^2	DAED > Simple-LSTM > LSTM-Attention > Ensemble method > N-BEATS
[49]	15 min.	MAPE	EEMD-SVR > eEEMD-SVR > eEEMD-LSTM > eEEMD-BR > GRU > EEMD-BR > EEMD-GRU > eEEMD-GRU > EEMD-LSTM > LSTM > SVR > BR
			eEEMD-LSTM > EEMD-LSTM > eEEMD-BR > eEEMD-GRU > EEMD-GRU > EEMD-SVR > eEEMD-SVR > GRU > LSTM > EEMD-BR > SVR > BR
			eEEMD-BR > eEEMD-LSTM > EEMD-LSTM > EEMD-BR > eEEMD-SVR > EEMD-SVR > eEEMD-GRU > EEMD-GRU > BR > LSTM > GRU > SVR
[50]	10, 20, 30 min.	Average Forecasting Stability	ICEEMDAN-MOMVO-WNN > ICEEMDAN-MOMFO-WNN > CEEMD-MOMFO-WNN > ICEEMDAN-MOWOA-WNN > EMD-MOMFO-WNN > ICEEMDAN-MOWCA-WNN >

			LSSVM > WNN > EEMD-MOMFO-WNN > ARIMA > GRNN > VMD-MOMFO-WNN > CEEMD-MFO-WNN > CEEMD-WNN
[51]	10 min.	MSE, RMSE	CSSOA-LSTM > SBO-LSTM > SpSA-LSTM > PSO-LSTM > LSTM
[52]	10 min.	MAE, R^2, RMSE	SaSA-ELM > PSO-ELM > ELM > BP
[53]	10 min.	MSE, RMSE	VMD-LSSVM-ARMA-BPNN > EEMD > EMD > BPNN > ARMA > LSSVM
[54]	10 min.	MAE, RMSE	CNN-GA > BPNN > GA
[55]	15 min.	MAE, RMSE	TPA-MBLSTM > TPA-LSTM > BiLSTM > LSTM
[56]	15 min.	MAE, MSE, RMSE	WOA-VCGRU > PSO-VCGRU > GA-VCGRU > VCGRU > VCLSTM > VGRU > VLSTM > EGRU > ELSTM > ECGRU > ECLSTM
[57]	15 min.	MAE	SM1MKL > SM2MKL > SimpleMKL > SM1SVM > SM2SVM > KELM > ELM > SVM
[58]	15 min.	NRMSE	Wavelet-LSTM > GRU-LSTM > CNN-LSTM > GBR > DRNets
[59]	15 min.	RMSE	HFM > ATCN > TCN > TPA-LSTM > LSTM > CNN > DNN > CNN-LSTM > Persistence
[60]	15 min.	MSE, RMSE, U_1	SiSA-HM1-MOMVMD-HM2+AM > SiSA-HM1-MOMVMD-ELM > SiSA-HM1-MOMVMD-HM2 > SiSA-HM1-MVMD-HM2+AM > SiSA-HM1-VMD-HM2+AM > SiSA-MOMVMD-HM2+AM > HM2+AM > SiSA-HM1-HM2+AM > HM1-MOMVMD-HM2+AM
			SiSA-HM1-MOMVMD-HM2+AM > SiSA-HM1-MVMD-HM2+AM > SiSA-MOMVMD-HM2+AM > HM1-MOMVMD-HM2+AM > SiSA-HM1-MOMVMD-HM2 > HM2+AM > SiSA-HM1-HM2+AM > SiSA-HM1-VMD-HM2+AM > SiSA-HM1-MOMVMD-ELM
[61]	10 min.	RMSE	STAN > STANta > STANsa > GRUm > GRUs > ANN > ARIMA > HA
[62]	5 min.	NMAE, NRMSE	FedDRL > ARIMA > RDPG > BPNN > MLR
[63]	15 min.	RMSE	CatGAN-ITCN > CatGAN-GRU > CatGAN-MLP > CatGAN-TCN > Hierarchical-ITCN > kmeans-ITCN > Hierarchical-TCN > Hierarchical-GRU > Hierarchical-MLP > kmeans-TCN > kmeans-GRU > kmeans-MLP > CatGAN-RF > kmeans-RF > CatGAN-SVM > Hierarchical-RF > Hierarchical-SVM > kmeans-SVM
			CatGAN-ITCN > kmeans-ITCN > Hierarchical-ITCN > CatGAN-MLP > kmeans-MLP > CatGAN-TCN > CatGAN-GRU > Hierarchical-GRU > Hierarchical-TCN > kmeans-GRU = kmeans-TCN > CatGAN-RF > kmeans-RF > Hierarchical-MLP > Hierarchical-SVM > CatGAN-SVM > Hierarchical-RF > kmeans-SVM
			CatGAN-ITCN > Hierarchical-ITCN > kmeans-ITCN > CatGAN-TCN > CatGAN-GRU > kmeans-GRU > CatGAN-MLP > Hierarchical-TCN > kmeans-TCN > Hierarchical-GRU > kmeans-MLP > CatGAN-RF > Hierarchical-RF > kmeans-RF > Hierarchical-MLP > CatGAN-SVM > Hierarchical-SVM > kmeans-SVM
[64]	10, 20, 30 min.	Overall NRMSE	TCN > CNN-LSTM = MLR > LSTM
[65]	15 min.	MAE, MAPE, R^2, RMSE	PCA-SpSA-VMD-BiLSTM > PCA-VMD-BiLSTM > PCA-SpSA-BiLSTM > PCA-BiLSTM > PCA-LSTM > PCA-BP
[66]	10 min.	R^2, RMSE	EEMD-PSO-LSTM > EEMD-LSTM > EMD-LSTM > PSO-LSTM > LSTM
[67]	15 min.	MAPE, NRMSE	EEMD-Tent-SpSA-LSSVM > Tent-SpSA-LSSVM > SpSA-LSSVM > LSSVM
[68]	15 min.	ACC	SVR-LSTM > LSTM > SVR
[69]	15 min.	MAPE	TCN > LSTM > RNN > BP
			EEMD-TCN > EMD-TCN > EEMD-LSTM > EMD-LSTM

Abbreviations: ACC (Accuracy), AGRU (Attention-Based GRU), AM (Attention Mechanism), ANN (Artificial Neural Network), AR (Auto-Regression), ARIMA (Autoregressive Integrated Moving Average), ARMA (Autoregressive Moving Average), ATCN (Attention TCN), Bagging (Bagging Regressor), BiLSTM (Bidirectional LSTM), BO (Bayesian Optimization), BP (Back Propagation), BPNN (BP Neural Network), BR (Bayesian Ridge Regression), CatGAN (Categorical Generative Adversarial Network), CCTransformer (Causal Convolutional Transformer), CEEMD (Complementary Ensemble EMD), CEEMDAN (Complete Ensemble Empirical Mode Decomposition with Adaptive Noise), CNN (Convolutional Neural Network), ConvLSTM (Convolutional LSTM), CRPS (Continuous Rank Probability Score), CS (Standard Cuckoo Search Arithmetic), CSO (Cuckoo Search Optimization), CSSOA (Chaotic Sparrow Search Optimization Algorithm), CST (Convolution-Based Spatial-Temporal), DAED (Dual Attention-Based Encoder-Decoder), DBN (Deep Belief Network), DC (Data Cleaning), DDA (Drift Detection and Adaption), DELM (Deep ELM), DRNets (Deep Concatenated Residual Networks), DWT (Discrete Wavelet Transform), ECGRU (EMD-CNN-GRU), ECLSTM (EMD-CNN-LSTM), EDM (Empirical Dynamic Modeling), eEEMD (Entropy EEMD), EEMD (Ensemble EMD), EGRU (EMD-GRU), ELM (Extreme Learning Machine), ELSTM (EMD-LSTM), EMD (Empirical Mode Decomposition), ENN (Elman Neural Network), ESMA (Enhanced SMA), EWT (Empirical Wavelet Transform), Extra-Trees (Extremely Randomized Trees), FC (Fuzzy Cluster), FedDRL (Federated Deep Reinforcement Learning), FR (Feature Reconfiguration), FWA (Fire Works Algorithm), GA (Genetic Algorithm), GBM (Gradient Boosting Machine), GBR (Gradient Boosting Regression), GBRT (GBR Tree), GNN (Graph Network Model), GRU (Gated Recurrent Unit), GRNN (Generalized Regression Neural Network), GPR (Gaussian Process Regression), GWO (Grey Wolf Optimization), HA (Historical Average), HFM (Hybrid Wind Power Forecasting Model), HICS (Hybrid Improved Cuckoo Search Arithmetic), HM1 (Clustering-MOVMD-GRU), HM2 (CNN+BiLSTM), ICEEMDAN (Improved CEEMDAN), IDA (Improved Dragonfly Algorithm), ISpSA (Improved SpSA), IVMD (Improved VMD), Kal (Kalman Filter), KDE (Kernel Density Estimation), KELM (Kernel ELM), k-NN (k-Nearest Neighbors), LightGBM (Light GBM), LSTM (Long Short-Term Memory), LSSVM (Least Square Support Vector Machine), MASE (Mean Absolute Scaled Error), MAPE (Mean Absolute Percentage Error), MAE (Mean Absolute Error), MA (Moving Average), MBLSTM (Multi-Layer Stacked BiLSTM), MFO (Moth-Flame Optimization), MKL (Multiple Kernel Learning), MLP (Multilayer Perceptron), MLR (Mixed Logistic Regression), MOMFO (Multi-Objective MFO), MOMVO (Multi-Objective Multi-Verse Optimization), MOWCA (Multi-Objective Water Cycle Algorithm), MOWOA (Multi-Objection WOA), MSE (Mean Square Error), MRE (Mean Relative Error), MVMD (Multivariate VMD), N-BEATS (Neural Basis Expansion Analysis for Time Series), NMAE (Normalized MAE), NRMSE (Normalized RMSE), OLE-SANN (Online-Learning-Enabled SANN), PCA (Principal Component Analysis), PSO (Particle Swarm Optimization), PVMD (PSO-VMD), R^2 (Coefficient of Determination), RBF (Radial Basis Functions), RDPG (Recurrent Deterministic Policy Gradient), RF (Random Forest), RMSE (Root Mean Square Error), RNN (Recurrent Neural Network), RSA

(Random Sampling Algorithm), SANN (Self-Attention-Based Neural Network), SaSA (Salp Swarm Algorithm), SATCN (Self-Attention TCN), SBL (Sparse Bayesian Learning), SBO (Satin Blue Gardener Bird Optimisation Algorithm), SE (Sample Entropy), SiSA (Singular Spectrum Analysis), SMMKL (Soft Margin MKL), SMA (Slime Mould Algorithm), SpSA (Sparrow Search Algorithm), STAN (Spatiotemporal Attention Networks), SVM (Support Vector Machine), SVR (Support Vector Regression), TCN (Temporal Convolutional Network), TPA (Temporal Pattern Attention), U_1 (Theil U Statistic 1), VAR (Vector AR), VCGRU (VMD-CNN-GRU), VCLSTM (VMD-CNN-LSTM), VGRU (VMD-GRU), VLSTM (VMD-LSTM), VMD (Variational Mode Decomposition), WMA (Weighted MA), WNN (Wavelet Neural Network), WOA (Whale Optimization Algorithm), WPCA (Feature-Weighted Principal Component Analysis), WPP (Wind Power Predictor), WT (Wavelet Transform), XGBoost (eXtreme Gradient Boosting), 1D (1 Dimensional), 2D (2 Dimensional)

Table 3. Region and capacity of wind power plant, input variables of forecasting methods, data resolution and total dataset properties of the reviewed studies for short-term wind power forecasting (Kısa dönem rüzgâr gücü tahmini için incelenen çalışmaların rüzgâr güç santralinin bölgesi ve kapasitesi, tahmin metotlarının girdi değişkenleri, veri çözünürlüğü ve toplam veri seti özellikleri)

Ref.	Wind Power Plant		Input Variables of Forecasting Methods	Data Resolution	Total Dataset Properties			
	Region	Capacity			Period / Samples	Training Subset	Validation Subset	Testing Subset
[70]	Spain	17.6 MW	Historical wind power, wind speed, wind direction	10 min.	37 days	15 days	15 days	7 days
[71]	China	603 MW	Wind speed, pressure, temperature, humidity	15 min.	34818	8 months	4 months	
[72]	Ethiopia	153 MW	Outdoor temperature, wind speed	1 hour	6 years	5 years	1 year	
[73]	France	2050 kW	Original wind power series	10 min.	1484	1440	-	24
[74]	Belgium	806.71 MW	Wind power sequences	15 min.	4350	3500	-	850
	USA	80 MW						
[75]	China	135 MW	Actual power, humidity, air temperature, air pressure, wind direction, wind speed	15 min.	25384	12 months	-	8 months
[76]	China	265.5 MW	Historical wind power sequences	15 min.	2880	1632	-	1248
[77]	France	2050 kW	Temperature, wind direction, wind speed	10 min.	864	720	-	144
[78]	India	5480 MW	Historical generated wind power	15 min.	30 days	29 days	-	1 day
[79]	China	49.5 MW	Historical wind speed, NWP data, historical wind power	15 min.	2 years	-	-	10 days for each season
		48 MW						
		48 MW						
[41]	Denmark	2 MW	Wind power time series	1 hour	960	-	-	-
[80]	Guangxi	-	Wind speed (10m, 30m, 50m, 70m, hub height), wind direction (10m, 30m, 50m, 70m, hub height), pressure (10m), temperature (10m), air humidity (10m), actual power	15 min.	17840	70%	10%	20%
	China		Wind speed (10m, 30m, 50m), wind direction (10m, 30m, 50m), pressure, temperature, air humidity, actual power		17264			
[81]	USA	-	Wind direction (100m), wind speed (100m), air temperature (2m), surface air pressure, density (hub height), 6 historical wind power data	1 hour	5000	80%	10%	10%
[82]	Europe	-	Wind power, zonal and meridional components of surface winds (10m), wind speed, wind direction	1 hour	3 years	70%	20%	10%
[83]	Canada	-	Actual wind power series	1 hour	12312	9852		2460
[48]	USA	-	Air pressure, air density, wind direction, wind speed	1 hour	1 year	75%	33% of training set	25%
[84]	Belgian	-	Wind power times series	15 min.	12 months	1000 per month	-	1000 per month
[85]	China	-	Wind speed, ambient temperature, wind direction, historical power prediction residuals	1 hour	2264	70%	-	30%
[86]	Europe	-	Zonal and meridional wind components, wind direction, wind speed, wind power	1 hour	3 years	70%	-	30%
[87]	Europe	-	Zonal and meridional wind components, wind direction, wind speed, wind power	1 hour	~5 years	70%	-	30%

[88]	China	-	Wind speed, wind direction, relative humidity, air temperature, air pressure	1 hour	2 years	22 months	-	2 months
[58]	China	-	Scada dataset	15 min.	3 months	First 85 days	-	Last 7 days
[89]	Germany	-	Wind power data	15 min.	171 days	70%	-	30%
[57]	Canada	-	Historical power dataset	10 min.	29 days	22 days	-	7 days
[90]	China	-	Wind power time series	1 hour	2209	1767	-	442
[91]	China	-	Historical wind power segment	1 hour	1 year	4 weeks	-	1 week
[92]	China	-	Wind power time series	10 min.	7 days	6 days	-	1 day
[93]	China	-	Wind energy data	10 min.	8000	6000	-	2000
[94]	China	-	Temperature data, wind speed, wind power data	1 hour	720	696	-	24
[95]	China	-	Wind power, atmospheric pressure, humidity and wind speed time series data	15 min.	5400	70%	-	30%
[96]	USA Turkey	-	Pressure, temperature, wind direction, wind speed	1 hour	1 year	80%	-	20%
[97]	Australia	-	Wind power data, wind direction, wind speed	1 hour	16800	-	-	-
[98]	Canada	-	Raw wind power time series	10 min.	1 year	-	-	-
[99]	Turkey	-	Active power, wind speed, wind direction, theoretical power curve	10 min.	50530	-	-	-
[100]	-	20 MW	Wind speed, wind direction, the corresponding output of wind power	1 hour	1264	696	520	48
[101]	-	-	Wind speed, wind direction, air density	1 hour	1 year	80%	-	20%

Table 4. Forecast horizons, evaluation metrics and performance comparison of forecasting methods of the reviewed studies for short-term wind power forecasting (Kısa dönem rüzgâr gücü tahmini için incelenen çalışmaların tahmin ufukları, değerlendirme metrikleri ve tahmin metotlarının performans karşılaştırması)

Ref.	Forecast Horizons	Evaluation Metrics	Performance Comparison of Forecasting Methods
[70]	1 hour	MAE, RMSE, SMAPE	WGANGP-EEMD-ARENN > WGANGP-EEMD-NN(Huber) > WGANGP -EEMD-NN(Log-Cosh) > WGANGP-EEMD-NN(MAE) > WGANGP-EEMD-NN(MSE) > WGANGP-EEMD-CSO-NN > WGANGP-EEMD-GA-NN > WGANGP-EEMD-DE-NN > WGANGP-EEMD-PSO-NN
[71]	1 hour	MAE, MAPE	MLP > RF > k-NN > Persistence > SVM
[72]	1 hour	MAE, MAPE, R^2, RMSE	TRF-RHS > TRFE-RHS
[73]	4 hours	IA, MAPE, NMAE, NRMSE	WPD-VMD-SiSA-IGWO-KELM > WPD-VMD-SiSA-IGWO-GABPNN > WPD-VMD-IGWO-KELM > WPD-VMD-PSO-LSSVM > VMD-IGWO-KELM > VMD-ARIMA > WPD-IGWO-KELM > WPD-GMDH > LSTM > Original-IGWO-KELM
[74]	1, 4 hours	RMSE	CNN-MLSTMs-T > CNN-MLSTMs-D > MLSTMs > LSTM > Persistence
[75]	4 hours	RMSE	WOA-ELM > WNN > PSO-LSSVM > ELM > PSO-BP > LSTM > LSSVM
[76]	4 hours	DMAP, DMQP, NRMSE	IEMD-R > EMD-R > EMD > Persistence > ANN
[77]	1 hour	MAPE, R^2, RMSE	ENCSA-ELM > GWO-ELM > MFO-ELM > CSA-ELM > SVM
[78]	6 hours	MAE, MAPE, PAR, RMSE	R-LSTM > ARMA > RF > XGBoost
[79]	2 hours	RMSE	TSF > DWT-LSTM > MM-DFS > Persistence > SDL > ARIMA
			TSF > DWT-LSTM > MM-DFS > Persistence > ARIMA > SDL
			TSF > MM-DFS > Persistence > DWT-LSTM > ARIMA > SDL
[41]	2 hours	MAPE	ARMA(2,2) > WMA > MA > ARIMA(2,1,2)
[80]	4 hours	MSE, RMSE	Powerformer > LSTM > GRU > Transformer > BP
			Powerformer > GRU > LSTM > BP >Transformer
[81]	1 hour	MAE, RMSE	TCN > GRU > LSTM > MLP > SVM
[82]	1 hour	MAE, RMSE, SDE	GpeANN > Amjady model > Grassi model
[83]	6 hours	MAAPE	MRMLE-AMS > Liu's model > Li's model > Hao's model > Du's model > Persistence
[48]	1 hour	R, R^2	DAED > LSTM-Attention > N-BEATS > Simple-LSTM > Ensemble method
[84]	1, 2, 3, 4 hours	Average MAPE	ILSTM > LSTM > ELMAN > BP

[85]	1 hour	MSE, RMSE, SSE	CEEMDAN-SVR-TCN > CEEMDAN-SVR > CEEMDAN-TCN > CEEMDAN-BP > TCN > LSTM > BP > SVR
[86]	1 hour	MAE	MWN-LSTM > SWN-LSTM > RWN-LSTM > GWN-LSTM > GPeANN > DNN-MRT > SVR > ARIMA
[87]	1 hour	MSE, R^2, RMSE	GLSTM > LSTM > SVR-RBF > SVR-Linear > SVR-Polynomial
[88]	1 hour	RMSE	CLFNet > LSTNet > RNN-GRU > TPA-LSTM = XGBoost > WT-LSTM
[58]	45 min.	NRMSE	Wavelet-LSTM > GRU-LSTM > CNN-LSTM > GBR > DRNets
[89]	45 min.	MSE	EMD-ESN > GPI > Transformer > Informer > LSTNet = TCN > LSTM = GRU > Autoformer > DLinear
[57]	90 min.	MAE	SM1MKL > SM2MKL > SimpleMKL > SM1SVM > KELM > SM2SVM > ELM > SVM
[90]	1 hour	MAPE	CEEMDAN-WOA-GRU > CEEMDAN-GRU > EEMD-GRU > WOA-GRU > EMD-GRU > GA-GRU > PSO-GRU > GRU > LSTM > SVM > BP
[91]	1 hour	MAE, MAPE, RMSE	VMD-CAT > FVAD > RWA > WEE > EAW > LSSVM > BP > ARIMA
[92]	1 hour	MAE, MAPE, RMSE	CEEMD-WOA-KELM > EEMD-WOA-KELM > CEEMD-PSO-KELM > CEEMD-KELM > EMD-WOA-KELM > KELM
[93]	100 min.	RMSE, R^2	WOA-BiLSTM-Attention > BiLSTM > BiLSTM-Attention > LSTM > BP
[94]	1 hour	MAE, MSE, R^2	GSA-VMD-BiLSTM-MHSA > LSTM-MHSA > LSTM > BPNN
[95]	2 hours	MAE, MAPE, RMSE, R^2	WD-MIC-VMD-DNN > VMD integrated model > Pure weather model > Power-weather model
[96]	1 hour	RMSE	RF-CatBoost-XgBoost-LR > XgBoost > CatBoost > LSTM > GRU > RF
			RF-CatBoost-XgBoost-LR > XgBoost > LSTM > CatBoost > GRU > RF
[97]	1 hour	MAE	TCN-MTTS > LSTM > GRU > BP > GP > SVM
[98]	40 min. 120 min.	NMAE, NRMSE	MHF-LSH-SVR > MHF-SVR > SVR > Persistence
[99]	1 hour	RMSE	SFS-PSO-LSTM > LSTM > k-NN > DNN > Bagging > RF > Averaging = GB
[100]	1 hour	RMSE, SDE, SSE	LSSVM-GSA > SVM-GSA > BP > SVM > LSSVM
[101]	1 hour	RMSE	MMF > LMF + SDLM > IDBSCAN + SDLM > SDLM > TDLM > DLEA = IRCNN > BGRU > LESN > Se-net > Resnet-18

Abbreviations: AMS (Adaptive Model Selection), ARENN (Asexual-Reproduction Evolutionary Neural Network), BGRU (Bidirectional GRU), CAT (Component-Attention Mechanism-Based Transformer), CatBoost (Categorical Boosting), CLFNet (Image Fusion Network Based on Contrastive Learning), CSA (Crow Search Algorithm), DE (Differential Evolution), DFS (Deep Feature Selection), DLEA (Deep Learning-Based Ensemble Approach), DMAP (Daily Mean Accuracy Percent), DMQP (Daily Mean Qualified Percent), DNN (Deep Neural Network), EAW (EEMD-Adaptive Wavelet Neural Network), EMD-R (EMD-Run-Length), ENCSA (Enhanced CSA), FVAD (Fruit Fly Optimization Algorithm-VMD-ARIMA-DBN), GB (Gradient Boosting), GLSTM (Genetic LSTM), GMDH (Group Method Data Handling), GPeANN (Gaussian Process-Based Ensemble of ANN), GPI (Graph Patch Informer), GSA (Gravitational Search Algorithm), GWN (Gaussian Wavenets), IA (Index of Agreement), IDBSCAN (Improved Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise), IEMD-R (Improved EMD-R), IGWO (Improved GWO), ILSTM (Improved LSTM), IRCNN (Improved Residual-Based CNN), LESN (Leaky Echo State Network), LMF (Low-Rank Matrix Fusion), LSH (Local-Sensitive Hashing Algorithms), LSTNet (Long and Short-Term Time-Series Network), MAAPE (Mean Arctangent Absolute Percentage Error), MHF (Morphological High-Frequency Filter), MHSA (Multi-Head Self-Attention), MIC (Maximum Information Coefficient), MLSTMs (Establish LSTM for each category separately), MLSTMs-D (MLSTMs with CNN Features in Dimension Direction), MLSTMs-T (MLSTMs with CNN Features in Time Direction), MM-DFS (Multi-Model Forecasting with DFS), MMF (Multi-Modal Multi-Step Forecasting), MRMLE (Multi-Resolution Multi-Learner Ensemble), MRT (Meta Regression and Transfer Learning), MTTS (Multiple Train-Test Splits), MWN (Morelet Wavenets), NWP (Numerical Weather Prediction), PAR (Prediction Accuracy Rate), R-LSTM (Rolling LSTM), RWA (Repeated WT-ARIMA), RWN (Ricker Wavenets), SDE (Standard Deviation of Errors), SDL (Smart Deep Learning), SDLM (Stacking Deep Learning Model), Se-net (Squeeze-and-Excitation Network), SFS (Stochastic Fractal Search), SMAPE (Symmetric MAPE), SSE (Sum of Squared Errors), SWN (Shannon Wavenets), TDLM (Two-Phase Deep Learning Model), TSF (Two-Stage Forecasting), TRF-RHS (Tuned Random Forest with Reduced Hour Space), TRFE-RHS (TRF Errors with RHS), WD (Wavelet Denoise), WEE (WPD-EMD-ELM), WGANGP (Wasserstein Generative Adversarial Network with Gradient Penalty), WPD (Wavelet Packet Decomposition)

3. CONCLUSIONS (SONUÇLAR)

This paper presents an extensive review of the current status of very short-term and short-term wind power forecasting in the literature. The available studies on this issue have been summarized on the basis of wind power plant properties, input variables of forecasting methods, total dataset properties and data resolution, forecast horizons and evaluation metrics, and the accuracy results of forecasting methods. Many reasonable and beneficial outcomes have been achieved by comparing the highly-informative tabulated contents of all the reviewed studies. In light of the findings obtained from the reviewed studies, several key insights have been identified to enhance the consistency and reliability of wind power forecasting research. Moreover, by analyzing the forecasting performance of different approaches in detail, this study provides a structured framework that helps researchers to select appropriate methodologies and evaluation criteria in wind power forecasting. Researchers should also pay attention to the following points in their further studies:

- specifying the installed capacity information in order to evaluate how large a wind power plant the proposed forecast models have been applied to.

- creating a data description section in order to present the total dataset properties in a more compact manner, and to more easily evaluate what kind of data has been utilized.
- avoiding from the usage of ambiguous terms for input variables, such as other climatological factors, in order to make the input-output analysis of forecasting methods more reliable.
- making the correlation analysis between input and output variables in order to improve the forecasting accuracy, and to evaluate how much they affect the success of the forecasting methods,
- applying the data normalization process to the training, validation and testing subsets to contribute to the stability, precision and speed of forecasting methods,
- conducting a benchmark test against the persistence reference model and sharing the total dataset utilized in the forecasting process in order to realize a fairer comparison,
- providing information on the computational requirements in order to assess how dependent the methods used are on computer resources and software tools,
- considering the time frames predominantly used in the literature in order to categorize and evaluate the existing studies under the correct forecast horizon,

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

AUTHORS' CONTRIBUTIONS (YAZARLARIN KATKILARI)

***Mehmet YEŞİLBUDAK*:** He conducted the literature review, research, editing and writing process.

Literatür taraması, araştırma, düzenleme ve yazma sürecini yürütmüştür.

***Mustafa BENLİ*:** He conducted the literature review, research, editing and writing process.

Literatür taraması, araştırma, düzenleme ve yazma 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] Majeed Y, Khan MU, Waseem M, Zahid U, Mahmood F, Majeed F, Sultan M, Raza A. Renewable energy as an alternative source for energy management in agriculture. Energy Reports. 2023; 10: 344-359.

[2] Yesilbudak M. Implementation of novel hybrid approaches for power curve modeling of wind turbines. Energy Conversion and Management. 2018; 171: 156-169.

[3] Ang TZ, Salem M, Kamarol M, Das HS, Nazari MA, Prabaharan N. A comprehensive study of renewable energy sources: Classifications, challenges and suggestions. Energy Strategy Reviews. 2022; 43: 100939.

[4] Celik I, Yildiz C, Sekkeli M. An optimization model for wind turbine micro-siting in wind power plant installation. Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology. 2018; 6(4): 898-908.

[5] Yesilbudak M, Ozcan A. kNN classifier applications in wind and solar energy systems. 11th International Conference on Renewable Energy Research and Applications. 2022; 480-484.

[6] Chen C, Hu Y, Karuppiah M, Kumar PM. Artificial intelligence on economic evaluation of energy efficiency and renewable energy technologies. Sustainable Energy Technologies and Assessments. 2021; 47: 101358.

[7] Yesilbudak M, Ozcan A. Wind turbine power curve fitting using mountain gazelle optimizer and parametric functions. 12th International Conference on Smart Grid. 2024; 772-776.

[8] Oflaz AE, Yesilbudak M. Comparison of outlier detection approaches for wind turbine power curves. 10th International Conference on Smart Grid. 2022; 363-367.

[9] Bassey KE, Juliet AR, Stephen AO. AI-Enhanced lifecycle assessment of renewable energy systems. Engineering Science & Technology Journal. 2024; 5(7): 2082-2099.

[10] Abisoye BO, Sun Y, Zenghui W. A survey of artificial intelligence methods for renewable energy forecasting: Methodologies and insights. Renewable Energy Focus. 2024; 48: 100529.

[11] Sadorsky P. Wind energy for sustainable development: Driving factors and future

outlook. Journal of Cleaner Production. 2021; 289: 125799.

[12] Yesilbudak M, Sagiroglu S, Colak I. A new approach to very short term wind speed prediction using k-nearest neighbour classification. Energy Conversion and Management. 2013; 69: 77-86.

[13] Yin L, Zhao M. Inception-embedded attention memory fully-connected network for short-term wind power prediction. Applied Soft Computing. 2023; 141: 110279.

[14] Chen Y, Yu S, Islam S, Lim CP, Muyeen SM. Decomposition-based wind power forecasting models and their boundary issue: An in-depth review and comprehensive discussion on potential solutions. Energy Reports. 2022; 8: 8805-8820.

[15] Internet: Global Wind Report 2024. Available at: https://gwec.net/global-wind-report-2024 (Last accessed on November 1, 2024)

[16] Yesilbudak M, Sagiroglu S, Colak I. A novel implementation of kNN classifier based on multi-tupled meteorological input data for wind power prediction. Energy Conversion and Management. 2017; 135: 434-444.

[17] Yan H, Wu Z. A hybrid short-term wind power prediction model combining data processing, multiple parameters optimization and multi-intelligent models apportion strategy. IEEE Access. 2020; 8: 227126-227140.

[18] Yan J, Mohrlen C, Gocmen T, Kelly M, Wessel A, Giebel G. Uncovering wind power forecasting uncertainty sources and their propagation through the whole modelling chain. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2022; 165: 112519.

[19] Yesilbudak M, Ozcan A. Performance comparison of metaheuristic optimization-based parametric methods in wind turbine power curve modeling. IEEE Access. 2024; 12: 99372-99381.

[20] Yesilbudak M. A novel power curve modeling framework for wind turbines. Advances in Electrical and Computer Engineering. 2019; 19(3): 29-40.

[21] Wang C, Zhang H, Fan W, Fan X. A new wind power prediction method based on chaotic theory and Bernstein neural network. Energy. 2016; 117: 259-271.

[22] Alkhayat G, Mehmood R. A review and taxonomy of wind and solar energy forecasting methods based on deep learning. Energy and AI. 2021; 4: 100060.

[23] Tuncar EA, Saglam S, Oral B. A review of short-term wind power generation forecasting methods in recent technological trends. Energy Reports. 2024; 12: 197-209.

[24] Wang Y, Wang D, Tang Y. Clustered hybrid wind power prediction model based on ARMA, PSO-SVM, and clustering methods. IEEE Access. 2020; 8: 17071-17079.

[25] Eyecioglu O, Hangun B, Kayisli K, Yesilbudak M. Performance comparison of different machine learning algorithms on the prediction of wind turbine power generation. 8th International Conference on Renewable Energy Research and Applications. 2019; 922-926.

[26] Chen Y, Hua X, Zhang L. A review of ultra-short-term forecasting of wind power based on data decomposition - forecasting technology combination model. Energy Reports. 2022; 8: 14200-14219.

[27] Zhao E, Sun S, Wang S. New developments in wind energy forecasting with artificial intelligence and big data: A scientometric insight. Data Science and Management. 2022; 5(2): 84-95.

[28] Dai X, Liu GP, Hu W. An online-learning-enabled self-attention-based model for ultra-short-term wind power forecasting. Energy. 2023; 272: 127173.

[29] Guobin F, Xuebin W, Han Z, Rui S, Yang X, Dingran C, Yang C, Renyue J. The VMD-CNN-Trans model used for ultra-short-term power prediction in wind farms. IEEE Sustainable Power and Energy Conference. 2023; 1-5.

[30] Van Heerden L, Vermeulen HJ, Van Staden C. Wind power forecasting using hybrid recurrent neural networks with empirical mode decomposition. IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and IEEE Industrial and Commercial Power Systems. 2022; 1-6.

[31] Zhang J, Li H, Cheng P, Yan J. Interpretable wind power short-term power prediction model using deep graph attention network. Energies. 2024; 17(2): 384.

[32] Xiao Y, Zou C, Chi H, Fang R. Boosted GRU model for short-term forecasting of wind power with feature-weighted principal component analysis. Energy. 2023; 267: 126503.

[33] Sun Z, Zhao M. Short-term wind power forecasting based on VMD decomposition, ConvLSTM networks and error analysis. IEEE Access. 2020; 8: 134422-134434.

[34] Sun Z, Zhao S, Zhang J. Short-term wind power forecasting on multiple scales using VMD decomposition, k-means clustering and LSTM principal computing. IEEE Access. 2019; 7: 166917-166929.

[35] Karijadi I, Chou SY, Dewabharata A. Wind power forecasting based on hybrid CEEMDAN-EWT deep learning method. Renewable Energy. 2023; 218: 119357.
[36] Li Y, Wu Z, Su Y. Adaptive short-term wind power forecasting with concept drifts. Renewable Energy. 2023; 217: 119146.
[37] Wang S, Li B, Li G, Yao B, Wu J. Short-term wind power prediction based on multidimensional data cleaning and feature reconfiguration. Applied Energy. 2021; 292: 116851.
[38] Ma J, Wang C, Yang M, Lin Y. Ultra-short-term probabilistic wind turbine power forecast based on empirical dynamic modeling. IEEE Transactions on Sustainable Energy. 2020; 11(2): 906-915.
[39] Li L, Cen ZY, Tseng ML, Shen Q, Ali MH. Improving short-term wind power prediction using hybrid improved cuckoo search arithmetic-support vector regression machine. Journal of Cleaner Production. 2021; 279: 123739.
[40] Qian Z, Wen S, Zhang L, Zhang J, Yuan S, Mao L, Zhou L. Deep learning-based short-term wind power prediction considering various factors. 17th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision. 2022; 529-533.
[41] Colak I, Sagiroglu S, Yesilbudak M, Kabalci E, Bulbul HI. Multi-time series and -time scale modeling for wind speed and wind power forecasting Part I: Statistical methods, very short-term and short-term applications. International Conference on Renewable Energy Research and Applications. 2015; 209-214.
[42] An G, Chen L, Tan J, Jiang Z, Li Z, Sun H. Ultra-short-term wind power prediction based on PVMD-ESMA-DELM. Energy Reports. 2022; 8: 8574-8588.
[43] Wang J, Tang X. An intensive decomposition integration paradigm for short-term wind power forecasting based on feature extraction and optimal weighted combination strategy. Measurement. 2023; 223: 113811.
[44] Li N, Dong J, Liu L, Li H, Yan J. A novel EMD and causal convolutional network integrated with transformer for ultra-short-term wind power forecasting. International Journal of Electrical Power and Energy Systems. 2023; 154: 109470.
[45] An G, Jiang Z, Liang Y, Zhao Y, Li Z, Dong W, Sun H. Short-term wind power prediction based on particle swarm optimization-extreme learning machine model combined with Adaboost algorithm. IEEE Access. 2021; 9: 94040-94052.
[46] Hu T, Wu W, Guo Q, Sun H, Shi L, Shen X. Very short-term spatial and temporal wind power forecasting: A deep learning approach. CSEE Journal of Power and Energy Systems. 2020; 6(2): 434-443.
[47] Xiang L, Liu J, Yang X, Hu A, Su H. Ultra-short term wind power prediction applying a novel model named SATCN-LSTM. Energy Conversion and Management. 2022; 252: 115036.
[48] Aslam M, Kim JS, Jung J. Multi-step ahead wind power forecasting based on dual-attention mechanism. Energy Reports. 2023; 9: 239-251.
[49] Huang J, Zhang W, Qin J, Song S. Ultra-short-term wind power prediction based on eEEMD-LSTM. Energies. 2024; 17(1): 251.
[50] Du P, Wang J, Yang W, Niu T. A novel hybrid model for short-term wind power forecasting. Applied Soft Computing. 2019; 80: 93-106.
[51] Wang J, Zhu H, Zhang Y, Cheng F, Zhou C. A novel prediction model for wind power based on improved long short-term memory neural network. Energy. 2023; 265: 126283.
[52] Tan L, Han J, Zhang H. Ultra-short-term wind power prediction by salp swarm algorithm-based optimizing extreme learning machine. IEEE Access. 2020; 8: 44470-44484.
[53] Zhang G, Liu H, Zhang J, Yan Y, Zhang L, Wu C, Hua X, Wang Y. Wind power prediction based on variational mode decomposition multi-frequency combinations. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy. 2019; 7(2): 281-288.
[54] Chen G, Shan J, Li DY, Wang C, Li C, Zhou Z, Wang X, Li Z, Hao JJ. Research on wind power prediction method based on convolutional neural network and genetic algorithm. IEEE Innovative Smart Grid Technologies-Asia. 2019; 3573-3578.
[55] Zhang H, Zhu Q, Li W, Li X, Xie C, Xiang C, Fan J. Ultra short term power forecasting of wind generation based on improved LSTM. 3rd Power System and Green Energy Conference. 2023; 176-180.
[56] Xiong B, Meng X, Xiong G, Ma H, Lou L, Wang Z. Multi-branch wind power prediction based on optimized variational mode decomposition. Energy Reports. 2022; 8: 11181-11191.
[57] Li J, Ma L. Short-term wind power prediction based on soft margin multiple kernel learning method. Chinese Journal of Electrical Engineering. 2022; 8(1): 70-80.

[58] Liu ZH, Wang CT, Wei HL, Zeng B, Li M, Song XP. A wavelet-LSTM model for short-term wind power forecasting using wind farm Scada data. Expert Systems with Applications. 2024; 247: 123237.

[59] Abdulkadir AK, Chen Y, Wang YW, Xiao JW. Hybrid model based on temporal convolutional network and attention mechanism for short-term wind power forecasting. IEEE 7th International Electrical and Energy Conference. 2024; 149-154.

[60] Sun S, Du Z, Jin K, Li H, Wang S. Spatiotemporal wind power forecasting approach based on multi-factor extraction method and an indirect strategy. Applied Energy. 2023; 350: 121749.

[61] Fu X, Gao F, Wu J, Wei X, Duan F. Spatiotemporal attention networks for wind power forecasting. International Conference on Data Mining. 2019; 149-154.

[62] Li Y, Wang R, Li Y, Zhang M, Long C. Wind power forecasting considering data privacy protection: A federated deep reinforcement learning approach. Applied Energy. 2023; 329: 120291.

[63] Sheng Y, Wang H, Yan J, Liu Y, Han S. Short-term wind power prediction method based on deep clustering-improved temporal convolutional network. Energy Reports. 2023; 9: 2118-2129.

[64] Meka R, Alaeddini A, Bhaganagar K. A robust deep learning framework for short-term wind power forecast of a full-scale wind farm using atmospheric variables. Energy. 2021; 221: 119759.

[65] Wang Z, Ying Y, Kou L, Ke W, Wan J, Yu Z, Liu H, Zhang F. Ultra-short-term offshore wind power prediction based on PCA-SSA-VMD and BiLSTM. Sensors. 2024; 24(2): 444.

[66] Jiang T, Liu Y. A short-term wind power prediction approach based on ensemble empirical mode decomposition and improved long short-term memory. Computers and Electrical Engineering. 2023; 110: 108830.

[67] Zheng L, Xiaorui L, Mengjie L, Xin C, Shenhui D, Hexu S. Wind power prediction based on EEMD-Tent-SSA-LS-SVM. Energy Reports. 2022; 8: 3234-3243.

[68] Wang Y, Tong T, Hu Z, Wu K, Zhou H, Zheng Y. An ultra short-term wind power forecasting model based on meteorological feature selection. IEEE 7th International Electrical and Energy Conference. 2024; 1-6.

[69] Zhao L, Su R, Shen G, Qi W, Jiao X, Wang J. Ultra-short term wind power forecast for offshore energy system based on EEMD-TCN. 8th Asia Conference on Power and Electrical Engineering. 2023; 2491-2495.

[70] Yin H, Ou Z, Zhu Z, Xu X, Fan J, Meng A. A novel asexual-reproduction evolutionary neural network for wind power prediction based on generative adversarial networks. Energy Conversion and Management. 2021; 247: 114714.

[71] Ouyang T, Zha X, Qin L. A combined multivariate model for wind power prediction. Energy Conversion and Management. 2017; 144: 361-373.

[72] Ayele ST, Ageze MB, Zeleke MA, Miliket TA. Adama II wind farm long-term power generation forecasting based on machine learning models. Scientific African. 2023; 21: e01831.

[73] Han Y, Tong X. Multi-step short-term wind power prediction based on three-level decomposition and improved grey wolf optimization. IEEE Access. 2020; 8: 67124-67136.

[74] Miao C, Li H, Wang X, Li H. Ultra-short-term prediction of wind power based on sample similarity analysis. IEEE Access. 2021; 9: 72730-72742.

[75] Gu B, Hu H. Zhao J, Zhang H, Liu X. Short-term wind power forecasting and uncertainty analysis based on FCM-WOA-ELM-GMM. Energy Reports. 2023; 9: 807-819.

[76] Yang M, Chen X, Du J, Cui Y. Ultra-short-term multistep wind power prediction based on improved EMD and reconstruction method using run-length analysis. IEEE Access. 2018; 6: 31908-31917.

[77] Li LL, Liu ZF, Tseng ML, Jantarakolica K, Lim MK. Using enhanced crow search algorithm optimization-extreme learning machine model to forecast short-term wind power. Expert Systems with Applications. 2021; 184: 115579.

[78] Shobanadevi A, Maragatham G, Prabu MR, Boopathi K. Short-term wind power forecasting using R-LSTM. International Journal of Renewable Energy Research. 2021; 11(1): 392-406.

[79] Qin J, Yang J, Chen Y, Ye Q, Li H. Two-stage short-term wind power forecasting algorithm using different feature-learning models. Fundamental Research. 2021; 1(4): 472-481.

[80] Mo S, Wang H, Li B, Xue Z, Fan S, Liu X. Powerformer: A temporal-based transformer model for wind power forecasting. Energy Reports. 2024; 11: 736-744.

[81] Zhu R, Liao W, Wang Y. Short-term prediction for wind power based on temporal

convolutional network. Energy Reports. 2020; 6: 424-429.

[82] Zameer A, Arshad J, Khan A, Raja MAZ. Intelligent and robust prediction of short term wind power using genetic programming based ensemble of neural networks. Energy Conversion and Management. 2017; 134: 361-372.

[83] Chen C, Liu H. Medium-term wind power forecasting based on multi-resolution multi-learner ensemble and adaptive model selection. Energy Conversion and Management. 2020; 206: 112492.

[84] Han L, Jing H, Zhang R, Gao Z. Wind power forecast based on improved long short term memory network. Energy. 2019; 189: 116300.

[85] Zhu J, Su L, Li Y. Wind power forecasting based on new hybrid model with TCN residual modification. Energy and AI. 2022; 10: 100199.

[86] Shahid F, Zameer A, Mehmood A, Raja MAZ. A novel wavenets long short term memory paradigm for wind power prediction. Applied Energy. 2020; 269: 115098.

[87] Shahid F, Zameer A, Muneeb M. A novel genetic LSTM model for wind power forecast. Energy. 2021; 223: 120069.

[88] Zhu N, Dai Z, Wang Y, Zhang K. A contrastive learning-based framework for wind power forecast. Expert Systems with Applications. 2023; 230: 120619.

[89] Yuzgec U, Dokur E, Balci M. A novel hybrid model based on empirical mode decomposition and echo state network for wind power forecasting. Energy. 2024; 300: 131546.

[90] Sheng A, Xie L, Zhou Y, Wang Z, Liu Y. A hybrid model based on complete ensemble empirical mode decomposition with adaptive noise, GRU network and whale optimization algorithm for wind power prediction. IEEE Access. 2023; 11: 62840-62854.

[91] Zheng H, Hu Z, Wang X, Ni J, Cui M. VMD-CAT: A hybrid model for short-term wind power prediction. Energy Reports. 2023; 9: 199-211.

[92] Ding Y, Chen Z, Zhang H, Wang X, Guo Y. A short-term wind power prediction model based on CEEMD and WOA-KELM. Renewable Energy. 2022; 189: 188-198.

[93] Hu S, Wang Z, Hu N. Short-term wind power prediction based on whale algorithm optimization and attention mechanism of BiLSTM neural network. 5th International Conference on Power, Intelligent Computing and Systems. 2023; 915-920.

[94] Gao Z, Gao Z, Cao S, Zhang L. A GSA-VMD-BiLSTM-MHSA model for short-term wind power prediction. 4th International Conference on Energy Engineering and Power Systems. 2024; 261-266.

[95] Tongkun S, Zhenhao T. 2-hour ahead wind power prediction based on multi-model fusion. International Conference on Power Science and Technology. 2023; 787-792.

[96] Ahmed U, Abbas SS, Razzaq S, Mahmood A. A novel integrated approach for short-term wind power forecasting. 7th International Conference on Energy Conservation and Efficiency. 2024; 1-6.

[97] Hu C, Zhang Z, Zhao P, Yi H. Short-term wind power forecasting with multiple train-test splits integrated temporal convolutional network. IEEE/IAS Industrial and Commercial Power System Asia. 2022; 1234-1238.

[98] Liu L, Ji TY, Li MS, Wu QH. Short-term wind power local forecast based on morphological high-frequency filter and local-sensitive hashing. IEEE PES GTD Grand International Conference and Exposition Asia. 2019; 685-690.

[99] Tarek Z, Shams M., Elshewey AM, El-kenawy ESM, Ibrahim A, Abdelhamid AA, El-dosuky MA. Wind power prediction based on machine learning and deep learning models. Computers, Materials & Continua. 2023; 75(1): 715-732.

[100] Yuan X, Chen C, Yuan Y, Huang Y, Tan Q. Short-term wind power prediction based on LSSVM-GSA model. Energy Conversion and Management. 2015; 101: 393-401.

[101] Xing Z, He Y. Multi-modal multi-step wind power forecasting based on stacking deep learning model. Renewable Energy. 2023; 215: 118991.