

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

PART C: TASARIM VE TEKNOLOJİ

Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology



ISSN: 2147-9526

Year: 2024, Volume: 12 Issue: 4

İmtiyaz Sahibi/ Owner	Prof. Dr. Uğur ÜNAL – Gazi Üniversitesi
Yayın Yönetmeni / Publishing Manager	Prof. Dr. Uğur GÖKMEN – Gazi Üniversitesi
Yazışma Adresi / Correspondence Address	fbedergic@gazi.edu.tr
İnternet Adresi / Web Address	https://dergipark.org.tr/tr/pub/gujsc
Yayın Türü /Publication Type	Sürekli / Periodical Yılda dört sayı yayımlanır: Mart, Haziran, Eylül, Aralık Published four issues per year: March, June, September, December
Baş Editör / Editor-in-Chief	Prof. Dr. Adem ACIR – Gazi Üniversitesi
Baş Editör Yardımcısı / Deputy Editor-in-Chief	Doç. Dr. Ramazan ÇAKIROĞLU – Gazi Üniversitesi
Alan Editörleri / Area Editors	Prof. Dr. Mustafa Serdar GENÇ – Erciyes Üniversitesi Prof. Dr. Nihat ÖZTÜRK – Gazi Üniversitesi Prof. Dr. Murat Tolga ÖZKAN – Gazi Üniversitesi Prof. Dr. Mustafa ÖZER – Gazi Üniversitesi Prof. Dr. Yusuf Tansel İÇ – Başkent Üniversitesi Doç. Dr. Orhan KAPLAN – Gazi Üniversitesi Doç. Dr. Gökhan DURMUŞ – Gazi Üniversitesi Doç. Dr. Gökhan SÜRÜCÜ – Gazi Üniversitesi Doç. Dr. Şenol BAYRAKTAR – Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi Doç. Dr. Şenol ŞİRİN – Düzce Üniversitesi Doç. Dr. Halil KARAKOÇ – Hacettepe Üniversitesi Doç. Dr. Semih ÖZDEN – Milli Savunma Üniversitesi Doç. Dr. Mehmet Erdi KORKMAZ – Karabük Üniversitesi Doç. Dr. İlyas KARASU – Samsun Üniversitesi Doç. Dr. Cemil OCAK – Gazi Üniversitesi Doç. Dr. Kamil ÇELİK – Bartın Üniversitesi Dr. Öğr. Üyesi Seda ŞAHİN – Çankırı Karatekin Üniversitesi

	<p>Dr. Öğr. Üyesi Muhammed Ali KOŞAN – Kahramanmaraş İstiklal Üniversitesi</p> <p>Dr. Öğr. Üyesi Seyfettin VADİ – Gazi Üniversitesi</p> <p>Dr. Öğr. Üyesi Sinem UZUN – Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi</p> <p>Dr. Öğr. Üyesi Sidem KANER – Pamukkale Üniversitesi</p> <p>Öğr. Gör. Dr. Onur ALTUNTAŞ – Milli Savunma Üniversitesi</p> <p>Öğr. Gör. Dr. Erşan Ömer YÜZER – Hakkari Üniversitesi</p>
Sekretarya / Secretariat	<p>Dr. Öğr. Üyesi Selçuk YAĞMUR – Gazi Üniversitesi</p>
Mizanpaj Editörleri / Layout Editors	<p>Oğuz Kaan ÇİNİCİ – Gazi Üniversitesi</p> <p>Yaren GÜVEN – Gazi Üniversitesi</p>
Teknik Editör / Technical Editor	<p>Medine ÖZKAYA – Gazi Üniversitesi</p>

HAKKINDA

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

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

ABOUT

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

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

AMAÇ ve KAPSAM

Dergi ulusal ve uluslararası düzeyde ;

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

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

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

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

AIMS and SCOPE

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

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

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

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

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

İÇİNDEKİLER / CONTENTS

89. **Sistem Odaklı Tasarım Yaklaşımı ile Yeni Bir Mühimmat Bırakma Sistemi Tasarımı** (Araştırma Makalesi), Oğuz Yılmaz, Orhan Erden 769
90. **Uçucu Kül, Silis Dumanı ve Cam Elyaf Kullanılarak İyileştirilen Kilin Mühendislik Performansının Değerlendirilmesi** (Araştırma Makalesi), Nagihan Doğan, Müge Elif Firat 784
91. **Control of Squirrel-Cage Asynchronous Motor Using Star-Delta Starting Method and Monitoring of Parameters Through Computer Interface** (Araştırma Makalesi), Seyfettin Vadi 799
92. **Four Pole Limited Angle Toroidal Motor Magnetic Design** (Araştırma Makalesi), Akın Aydın, Ali Saygın 809
93. **Estimation of Hydroelectric Power Generation and Analysis of Climate Factors with Deep Learning Methods: A Case Study in Yozgat Province in Turkey** (Araştırma Makalesi), Feyza Nur Çakici, Süleyman Sungur Tezcan, Hidir Düzakaya 819
94. **Metal Eklemeli İmalatta Topoloji Optimizasyonu Uygulamaları** (Derleme Makalesi), Büşra Çalık, Gültekin Uzun 832
95. **Yapay Zekâ Teknikleriyle Yükseköğretim Kurumları Sınavı (YKS) Puanlarının Tahmini** (Araştırma Makalesi), Betül Ersöz, Halil İbrahim Bülbül 845
96. **Investigation of the Effect of Mechanical Alloying Time on Microstructure and Mechanical Properties in Hybrid Composites Produced with Fe₃O₄/nanographene Reinforcements in Al7020 Alloy** (Araştırma Makalesi), Taha Alper Yılmaz 854
97. **Yeşil Araç Rotalama Problemlerinin Entegre Pisagor Bulanık AHP ve EDAS Yöntemleri ile Analizi** (Araştırma Makalesi), Gözde Bakioğlu 864
98. **Estimation of Discharge Energy of Lithium-ion Battery for Different Temperatures by FOX-Bidirectional Recurrent Neural Network Method** (Araştırma Makalesi), Göksu Taş 882
99. **The Effect of Various Text Representation Methods for Sentiment Analysis on Movie Review Data with Different Machine Learning Methods** (Araştırma Makalesi), Veysel Göç, Muhammet Sinan Başarslan 893
100. **Kardiyovasküler Hastalıkların Derin Öğrenme Algoritmaları ile Tanısı** (Araştırma Makalesi), Ali Vırit, Ali Öter 902
101. **Ağır Hizmet Araçlarında Kullanılan Fren Disklerinde Mikroyapının Çatlak Dayanımına Etkisi** (Araştırma Makalesi), Zehra Çınarcık, Bora Güntay 913
102. **Güç Faktörü Düzeltmeli Yükselten Dönüştürücü Tabanlı Elektrikli Araç Şarj Ünitesi Tasarımı ve Model Öngörülü Yöntem ile Kontrolü** (Araştırma Makalesi), Naki Güler, Uğur Fesli, Samet Biricik 925

İÇİNDEKİLER / CONTENTS

103. **Experimental Investigation of Machinability of Filler Weld Applied to DIN 1.2379 Tool Steel by Milling Method** (Araştırma Makalesi), Yusuf Siyambaş 936
104. **Parameter Extraction of Photovoltaic Cell and Module with Four-Diode Model Using Flood Algorithm** (Araştırma Makalesi), İpek Çetinbaş 945
105. **Mobilya Sektöründe Modülerlik: Modüler Bir Pikap Ünitesinin Sistematik Tasarım Yaklaşımı ile Tasarımı ve Tasarım Tescil Süreci** (Araştırma Makalesi), Cemile Şanlıer, Zeynep Sude Yıldırım, H. Rıza Börklü 960
106. **Yığma Yapılarda Güçlendirme Tekniklerinin Koruma İlkeleri ile İlişkilendirilmesi ve Mardin Tarihi Dokusunda Değerlendirilmesi** (Araştırma Makalesi), İzzettin Kutlu 979
107. **Toolox 44 Çeliğinin Tornalanmasında Kesme Hızı, İlerleme ve Kesici Uç Yarıçapının Takım Aşınması ve Yüzey Pürüzlülüğüne Etkileri** (Araştırma Makalesi), Emel Kuram, Nuray Üçüncü 1006
108. **Yenilenebilir Enerji Kaynaklarından Beslenen Bir Mikro Şebekenin Enerji Depolama Sistemleri Desteği ile Optimum Çalışması** (Araştırma Makalesi), Abdullah Kürşat Aktar, Murat Karakılıç 1018
109. **Microstructural, Mechanical, and Corrosion Properties Of S355J2 Structural Steels Joined By MIG Welding** (Araştırma Makalesi), Uğur Çaligülü, Cihan Özorak, Afif Daniş 1035
110. **A Review on Wave Energy Harvesting Technologies** (Derleme Makalesi), Alaaddin Yilmazer, Ali Ekber Özdemir 1047
111. **Effects of Steam Addition to the Oxidizer on the Combustion Performance and Emissions of Coke Oven Gas: A Numerical Study** (Araştırma Makalesi), Osman Kümük 1060
112. **Defects in Rotary Draw Bending and Their Effects on Formability** (Araştırma Makalesi), Cüneyt Kurtuluş, Emre Ayhan, Ahmet Mavi 1069
113. **Investigation of the Effect of Turbulence Models for CFD Simulations of a Moving Airfoil** (Araştırma Makalesi), Sinem Keskin, Mustafa Serdar Genç 1079
114. **Hierarchical Encoding for Image Inpainting with StyleGAN Inversion** (Araştırma Makalesi), Aysegül Dündar 1091
115. **Harmoni Arama Varyantlarının EEG Gürültü Temizleme Problemi Üzerinden Kıyaslanması** (Araştırma Makalesi), Serhat Celil İleri, Selçuk Aslan, Sercan Demirci 1102

İÇİNDEKİLER / CONTENTS

116. **Elementel Bor ve ZrB₂ katkılı Al₂O₃ Kompozitlerde Bor ve ZrB₂ Katkılarının Kompozitin Yapısal ve Mekanik Özelliklerine Etkisi** (Araştırma Makalesi), Tuncay Şimşek, Muharrem Pul, Murat Bilen 1111
117. **An AI-Based Sentiment Analysis Study on YouTube Contents Related to Digital Nomadism** (Araştırma Makalesi), Zafer Ayaz 1122
118. **Experimental Investigations of Sigma Vectors in Nodal Aberration Theory for Coma-Free Pivot Misalignment State of a Cassegrain Telescope** (Araştırma Makalesi), Meltem Yeşiltepe, Sefer Bora Lişesivdin 1145
119. **Effect of Increasing Weight of SiC Ceramic on Radiation Shielding of Al 2219** (Araştırma Makalesi), Kubilay Akgül, Berkay Çakır, Seda Gürgen Avşar, Zübeyde Özkan, Uğur Gökmen 1155
- Düzeltilme: Dynamics in between Structural and Electrical Properties of as Grown ZnO Thin Films by Thermal ALD**, Bilge İmer

Sistem Odaklı Tasarım Yaklaşımı ile Yeni Bir Mühimmat Bırakma Sistemi Tasarımı

Oğuz YILMAZ^{1*} , Orhan ERDEN¹ 

¹Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Endüstriyel Tasarım Mühendisliği Bölümü, 06500, Teknikokullar/ANKARA

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 25/04/2024
Düzeltilme: 29/07/2024
Kabul: 23/08/2024

Anahtar Kelimeler

Tasarım Metodolojisi
Kavramsal Tasarım
QFD
TRIZ
CAE
Biyomimetik

Article Info

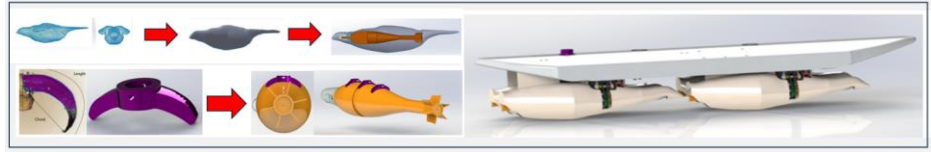
Research article
Received: 25/04/2024
Revision: 29/07/2024
Accepted: 23/08/2024

Keywords

Design Methodology
Conceptual Design
QFD
TRIZ
CAE
Biomimetics

Grafik Özet (Graphical/Tabular Abstract)

Sistem odaklı tasarım yaklaşımları kullanılarak insansız hava araçları için uygun arayüzde, mevcut sistemlerden farklı mühimmat bırakma sistemi geliştirilmiş ve yeni bir tasarım metodolojisi sunulmuştur. / Using system-oriented design approaches, an ammunition release system with a suitable interface for unmanned aerial vehicles and different from existing systems has been developed and a new design methodology has been presented.



Şekil A: Mühimmat bırakma sistemi / Figure A: Ammunition release system

Önemli noktalar (Highlights)

- Mühimmat bırakma sistemi için yeni bir tasarım metodolojisi geliştirme / Developing a new design methodology for ammunition release system
- Mühimmat bırakma sistemindeki aerodinamik kuvvet ve moment değerlerinin matematiksel hesaplamalarının gerçekleştirilmesi / Mathematical calculations of aerodynamic force and moment values in the ammunition release system
- Matematiksel hesaplamalar ile elde edilen aerodinamik kuvvetleri kullanılarak mühimmat bırakma sisteminin sonlu elemanlar analizlerinin gerçekleştirilmesi / Finite element analysis of the ammunition release system using aerodynamic forces obtained by mathematical calculations

Amaç (Aim): Bu çalışma, sistem odaklı tasarım yaklaşımları kullanarak insansız hava araçlarının arayüzüne uygun ve mevcut sistemlerden farklı, yerli bir mühimmat bırakma sisteminin geliştirilmesini amaçlamaktadır. / This study aims to develop a domestic ammunition release system that is suitable for the interface of unmanned aerial vehicles and different from existing systems by using system-oriented design approaches.

Özgünlük (Originality): Sistem odaklı tasarım yaklaşımı kullanılarak mühimmat bırakma sistemleri için yeni bir tasarım metodolojisi sunulmuştur. İlk kez Togan mühimmatına uygun mühimmat bırakma sisteminin geliştirilmiştir. / A new design methodology for ammunition release systems is presented using a system-oriented design approach. For the first time, an ammunition release system suitable for Togan ammunition has been developed.

Bulgular (Results): Geliştirilen tasarım metodolojisi ile parametrik tasarıma uygunluk, karar mekanizması bulundurma, yenilikçi problem çözme yöntemi kullanımı ve müşteri odaklılık kriterleri sağlanmıştır. Mühimmat bırakma sisteminde kompozit kabuk kullanımı ile aerodinamik verimlilik önemli ölçüde artmıştır. / With the developed design methodology, suitability for parametric design, having a decision mechanism, using innovative problem-solving methods and customer focus criteria have been provided. Aerodynamic efficiency has increased significantly with the use of composite shell in the ammunition release system.

Sonuç (Conclusion): Biyomimetik tasarım lensi ile aerodinamik yüklerle karşı daha kararlı ve mühimmat arayüzüne uygun tutucu mekanizması tasarlanmıştır. TRIZ (Yenilikçi Problem Çözme Teorisi) yöntemi kullanılarak montaj kolaylığı, düşük mekanizma hacmi elde edilmiştir. MVP (Minimum Uygulanabilir Ürün) metodu ile tasarım kriterlerine uygun, CAE (Bilgisayar Destekli Mühendislik) optimizasyonları kullanılarak ise optimum formda ve minimum ağırlıkta sistem geliştirilmiştir. / With the biomimetic design lens, a holder mechanism that is more stable against aerodynamic loads and suitable for the ammunition interface has been designed. TRIZ (Theory of Innovative Problem Solving) method was used to achieve ease of assembly and low mechanism volume. The MVP (Minimum Viable Product) method was used to develop a system that meets the design criteria and CAE (Computer Aided Engineering) optimizations were used to develop a system with optimum form and minimum weight.



Sistem Odaklı Tasarım Yaklaşımı ile Yeni Bir Mühimmat Bırakma Sistemi Tasarımı

Oğuz YILMAZ^{1*} , Orhan ERDEN¹ 

¹Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Endüstriyel Tasarım Mühendisliği Bölümü, 06500, Teknikokullar/ANKARA

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 25/04/2024
Düzeltilme: 29/07/2024
Kabul: 23/08/2024

Anahtar Kelimeler

Tasarım Metodolojisi
Kavramsal Tasarım
QFD
TRIZ
CAE
Biyomimetik

Öz

Hava araçlarındaki mühimmatın bağlanması, taşınması ve bırakılmasını sağlayan askı ekipmanlarına, mühimmat bırakma sistemi adı verilmektedir. Bu sistem, hava araçlarının gövde ve kanat kısımlarında bulunduğundan dolayı minimum ağırlıkta olmalıdır. Mühimmat bırakma sistemleri, hava araçlarında kritik bir ekipman olması nedeniyle aerodinamik yüklerle dayanması gerekmektedir. Ayrıca sistem, mühimmatın çapına ve ağırlığına uyumlu olmalıdır. Bu çalışmada, sistem odaklı tasarım yaklaşımları kullanılarak yeni bir tasarım metodolojisi sunulmuştur. Geliştirilen bu yeni model, Pahl ve Beitz, Dieter ve Schmidt, Hurst'un tasarım metodolojisi, MVP, QFD, TRIZ, biyomimetik ve CAE (Bilgisayar Destekli Mühendislik) optimizasyon yaklaşımlarından oluşmaktadır. Çalışma sonucunda geliştirilen tasarım metodolojisi ile insansız hava araçları için tercih edilebilecek arayüzde ve mevcut sistemlerden farklı yeni bir yerli mühimmat bırakma sistemi oluşturulmuştur. Biyomimetik tasarım lensi kullanılarak mevcut sistemlere kıyasla aerodinamik yüklerle karşı daha kararlı ve mühimmat arayüzüne uygun tutucu mekanizması sağlanmıştır. TRIZ metodu kullanılarak montaj kolaylığı, düşük mekanizma hacmi elde edilmiştir. MVP metodu kullanılarak tasarım kriterlerine uygun, CAE optimizasyonları kullanılarak ise optimum formda ve minimum ağırlıkta sistem tasarlanmıştır. Teorik ve matematiksel olarak hesaplanan aerodinamik kuvvetler, sonlu elemanlar analizleri ile desteklenmiştir.

Design of A New Ammunition Release System with A System Oriented Design Approach

Article Info

Research article
Received: 25/04/2024
Revision: 29/07/2024
Accepted: 23/08/2024

Keywords

Design Methodology
Conceptual Design
QFD
TRIZ
CAE
Biomimetics

Abstract

Suspension equipment that enables the attachment, transportation, and release of ammunition on aircraft is called ammunition release system. Since this system is in the fuselage and wing parts of aircraft, it must have minimum weight. Since ammunition release systems are critical equipment in aircraft, they must withstand aerodynamic loads. In addition, the system must be compatible with the diameter and weight of the ammunition. In this study, a new design methodology is presented using system-oriented design approaches. This new model developed consists of the design methodology of Pahl and Beitz, Dieter and Schmidt, Hurst, MVP, QFD, TRIZ, biomimetic and CAE (Computer Aided Engineering) optimization approaches. With the design methodology developed as a result of the study, a new domestic ammunition release system, which has a preferable interface for unmanned aerial vehicles and is different from existing systems, has been created. By using a biomimetic design lens, a holder mechanism that is more stable against aerodynamic loads and suitable for the ammunition interface compared to existing systems has been provided. Ease of assembly and low mechanism volume are achieved by using the TRIZ method. The system was designed in accordance with the design criteria using the MVP method, and in optimum form and minimum weight using CAE optimizations. Theoretically and mathematically calculated aerodynamic forces were supported by finite element analyses.

1.GİRİŞ (INTRODUCTION)

Silahlı insansız hava araçların (SİHA) ekonomiklik, savaş bölgesinden uzak kullanımı, güvenlik riski taşımaması gibi özellikleri, savunma sanayiinde yüksek kazanımlar sağlamaktadır. Bu sistemlerin

düşük hızlara sahip olması, başlangıçta dezavantaj olarak değerlendirilmektedir. Ancak, çok yüksek irtifalarda uzun süreli hedef takibi sayesinde istihbarat sağlama büyük bir avantajdır. Çatışma bölgesindeki küçük hareketlilikler, bu avantajlar sayesinde uzak menzillerde raporlanabilmektedir.

SİHA'ların savunma sanayiinde kullanımının giderek yaygınlaşması ile mühimmat bırakma sistemlerinin (MBS), SİHA'lara entegrasyonu günümüzde önemli bir araştırma konusu olmaktadır. Ülkelerin savunma sisteminde ve iç güvenliğin korunması amacı ile SİHA'ların kullanımı özellikle son on yıl içerisinde büyük bir gelişme göstermiştir. Birçok ülkenin savunma sanayii envanterinde farklı modelde ve tipte SİHA'lar mevcuttur. Bunlar keşif amaçlı özel savunma sanayii operasyonlarında, suç takiplerinde, ülke sınırları ve yer analizlerinde büyük ölçüde kullanılmaktadır. Bundan dolayı SİHA'larda kullanılan MBS'lerin boyutu, aerodinamik kararlılığı ve ağırlığı önem arz etmektedir. Yeni yapılan araştırmalar ile küçük ölçekli MBS'ler veya İHA'lar geliştirilmeye başlanmıştır. Belirtilen bu hava araçlarına, Songar adı verilen SİHA örnek olarak verilebilir [1, 2].

Dokuyucu, çalışmasında yerli bir mikro MBS geliştirmiştir. Sistemin geliştirme ve doğrulama faaliyetleri kapsamında çevresel testler (titreşim, sıcaklık, yağmur, şok, buzlanma, irtifa, nem ve ömür) gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonucunda, yerli MBS çevresel testleri başarılı şekilde tamamlamıştır [3]. Rickards ve arkadaşları çalışmasında İHA'lar için minyatür bir MBS tasarlanmıştır. Tigershark adı verilen İHA üzerine entegre edilen bir sistem ile kara kuvvetlerine daha fazla yardımcı olmayı hedeflemişlerdir [4].

Literatürdeki bu sistemler üzerine yerleştirilen her bir bileşen, sistemin karmaşıklığını arttırmakta ve mekanizmayı yavaşlatarak zaman kaybına yol açmaktadır. Bu sistemlerde hem uyarlanabilirliğin geliştirilmesi hem de sistem karmaşıklığından, zaman kaybindan ödün verilmemesi arzu edilmektedir. Literatürde, MBS'lerde tutucu ayarı olmaması, İHA'lara uygun bir arayüz yapısı olmaması ve mühimmat bölmesi bulunmadığından dolayı, mühimmatın hedefe açık durumda olmasından farklı bir MBS'ye ihtiyaç duyulmaktadır. Mühimmat bölmesi, askeri hava araçlarının görev etkinliğini, operasyonel esnekliğini ve güvenliğini artıran kritik bir bileşendir. Bu bölme, hava araçlarının aerodinamik performansını korurken, mühimmatın güvenli, etkili bir şekilde taşınmasını ve serbest bırakılmasını sağlamaktadır. Bu nedenle, modern askeri hava araçlarında mühimmat bölmesi tasarımı ve kullanımı büyük önem taşımaktadır. Mühimmatın iç bölmede taşınması, hava aracının dış yüzeyinde ekstra çıkıntılar ve düzensizlikler oluşturarak hava direncini artırmamaktadır. Böylece daha düşük hava direnci ile hava aracının manevra kabiliyetini ve aerodinamik verimi

arttırmaktadır. Mühimmatın koruyucu bölme olmadan taşınması durumunda radar tarafından tespit edilebilirlik artmaktadır. Mühimmatın çevresel etkilerden korunması, güvenli, kontrollü bir şekilde serbest bırakılması ve gizlilik sayesinde beklenmedik saldırılar yapılabilmesine olanak sağlayarak MBS'lerin görev etkinliğini de arttırmaktadır [5, 6]. Ayrıca literatürde, sistemlerin mühimmatları tutucu kulplar kullanılarak taşıdığı ve bıraktığı tespit edilmiştir. Ancak TSK envanterindeki havan topu mühimmatlarında taşıyıcı kulak yapısı olmadığından bu tip mühimmatlar için farklı bir sistem tasarımı gerekmektedir. [7-11]. Bu ihtiyaçlara çözüm sunabilmek amacı için farklı yöntemlerden faydalanılmış, böylece tüm çözümleri kapsayan yeni bir tasarım metodolojisi (TM) sunulmuştur.

TM, temel problemi tanımlayan tasarım özetinin oluşturulması, fonksiyon yapılarının kurulması, alt fonksiyonları gerçekleştiren çalışma prensiplerini belirleme, çalışma prensipleri, yapıların entegrasyonu, uygun kombinasyonların seçimi, çözüm çeşitlerinin güçlendirilmesi, teknik, ekonomik kriterlere göre değişkenlerin değerlendirilmesi ve çözümün oluşturulması aşamalarını içermektedir [12-14]. Literatürde kavramsal tasarımlar (KT) gerçekleştirilirken kullanılan yöntemler tespit edilmiş ve listelenmiştir. KT çalışmaları ile ilgili özetlenen bilgiler, farklı bakış açılarına ve önemli başlıklara göre Tablo 1'de listelenmiştir. Tablo 1'de bulunan her bir başlık, kritik bir soruyu cevaplayacak şekilde düşünülmüştür. Önerilen TM sırası ile; "(1) Hangi özel araçları veya metodolojileri kullanmaktadır? (2) Parametrik tasarıma uygun mu? (3) Karar mekanizması var mı? (4) Yenilikçi problem çözme metodu veya biyomimetik kullanım var mı? (5) Müşteri odaklı mı?" sorularına yanıt aranmıştır. Tablo 1'de görüldüğü üzere yapılan KT çalışmalarının hiçbiri belirlenen kriterleri sağlamamaktadır. Henüz tam olarak bu amaçları yerine getirecek KT yaklaşımı veya metodolojisi tespit edilmemiştir. Bu çalışmada belirtilen çözümlerin gerçekleştirilebilmesi için farklı yöntemlerden faydalanılmış ve bu sayede tüm çözümleri kapsayan yeni bir TM sunulmuştur.

Geliştirilen TM'de Pahl ve Beitz ile Dieter ve Schmidt'in kavramsal tasarım metodu kullanılmıştır. Parametrik tasarıma uygunluk CAE (Bilgisayar Destekli Mühendislik) optimizasyonları kullanılarak sağlanmıştır. Karar verme mekanizmasında ise amaçlar ağacı ve değerlendirme çizelgelerinden faydalanılmıştır. Karşılaşılan problemlerin çözümünde TRIZ (Yenilikçi Problem Çözme Teorisi) ve biyomimetik

tasarım lensi kullanılmıştır. Son olarak müşteri odaklı olma kriteri, QFD (Kalite Fonksiyon Dağılımı) ve MVP (Minimum Uygulanabilir Ürün) metodları kullanılarak sağlanmıştır.

Tablo 1. Literatürdeki kavramsal tasarımların analizi (Analysis of conceptual designs in the literature)

Çalışma	Özel araçlar veya kullanılan metodoloji	Parametrik tasarıma uygunluk	Karar mekanizması	Yenilikçi problem çözüme	Müşteri odaklılık
Yaldız [15]	YM	Hayır	Evet	Hayır	Hayır
Mayda ve ark. [16]	P&B, QFD, TRIZ, SysML	Hayır	Evet	Evet	Kısmi
Bozdemir ve ark. [17]	YZ	Hayır	Evet	Hayır	Hayır
Parlar ve ark. [18]	KS, anketler	Hayır	Evet	Hayır	Kısmi
Börklü ve ark. [19]	P&B	Hayır	Kısmi	Hayır	Hayır
Avinç ve ark. [20]	HTY	Evet	Hayır	Hayır	Hayır
Delibaş [21]	TRIZ, QFD	Hayır	Hayır	Evet	Kısmi
Yüksel ve ark. [22]	P&B, QFD, DM	Hayır	Kısmi	Hayır	Evet
Özdoğan ve ark. [23]	BS, BM, anketler	Hayır	Hayır	Evet	Kısmi
Mayda ve ark. [24]	P&B, TRIZ	Hayır	Kısmi	Evet	Hayır
Keskinkılıç [25]	D&S, FL, YSA	Evet	Evet	Hayır	Hayır
Zhang ve ark. [26]	QFD, HTEA	Hayır	Hayır	Hayır	Kısmi
Bu çalışma	P&B, D&S, QFD, MVP, TRIZ, BM, CAEO	Evet	Evet	Evet	Evet

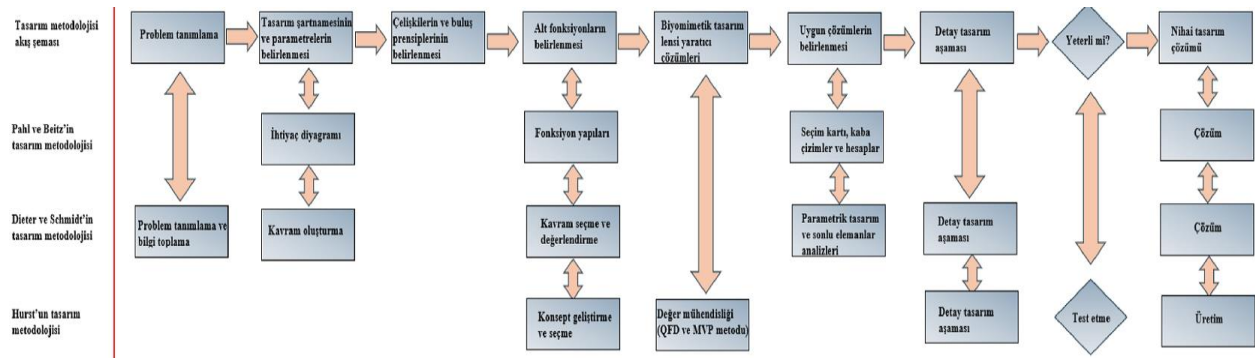
Kısaltmalar: YM: Yaprak Modeli, P&B: Pahl ve Beitz'in tasarım metodu, QFD: Kalite Fonksiyon Yayılımı, YZ: Yapay Zeka, KS: Konstrüksiyon Sistematiği, HTY: Hesaplamalı Tasarım Yöntemleri, BS: Biyosüreç, BM: Biyomimetik, D&S: Dieter ve Schmidt'in tasarım metodu, FL: Bulanık Mantık, YSA: Yapay Sinir Ağları, HTEA: Hata Türü ve Etki Analizi, CAEO: Bilgisayar Destekli Optimizasyon

2.MATERYAL VE METOD (MATERIALS AND METHODS)

2.1. Tasarım Metodolojisi (Design Methodology)

MBS için geliştirilen yeni TM'nin şematik anlatımı Şekil 1'de belirtilmiştir. TM, aşağıda akış sırasına göre ana hatlarıyla tanıtılmıştır. Her adımda, hangi yöntemler kullanılarak ilerleneceği belirtilmiştir. Geliştirilen TM'de Pahl ve Beitz, Dieter ve Schmidt, Hurst'un tasarım modelleri esas alınmıştır.

Öncelikle problem tanımlanmıştır. Tasarım şartnamesi, tasarım parametreleri, TRIZ yöntemi ile çelişkiler ve buluş prensipleri belirlenmiş, alt fonksiyonlar oluşturulmuştur. Hurst'un tasarım modelinde kullanılan MVP yaklaşımı ve QFD yöntemleri kullanılmıştır. Daha sonra ise yaratıcı çözümlerden optimum olanları tespit etmek için ön değerlendirmelerden ve biyomimetik tasarım lensinden faydalanılmıştır. Uygun çözümler, sonlu elemanlar yöntemi ile mekanik ve parametrik analizler ile desteklenerek nihai duruma gelmiştir.



Şekil 1. Geliştirilen tasarım metodolojisinin şematik anlatımı (Schematic description of the developed design methodology)

2.2. Problemin Tanımlanması (Identification of the Problem)

Problemin tanımlanması aşamasında literatürdeki MBS'ler ve sistemin eksiklikleri taranmıştır. Literatür taraması sonucunda, MBS'lerin tutucu ayarı, İHA'lara uygun arayüz yapısı olmadığı ve

mühimmat bölmesi olmadığından, hedefe açık durumda bulunduğu belirlenmiştir. Ayrıca literatürde, sistemlerin mühimmatları tutucu kulplar kullanılarak taşıdığı ve bıraktığı tespit edilmiştir. Ancak TSK envanterindeki havan topu mühimmatlarında taşıyıcı kulak yapısı

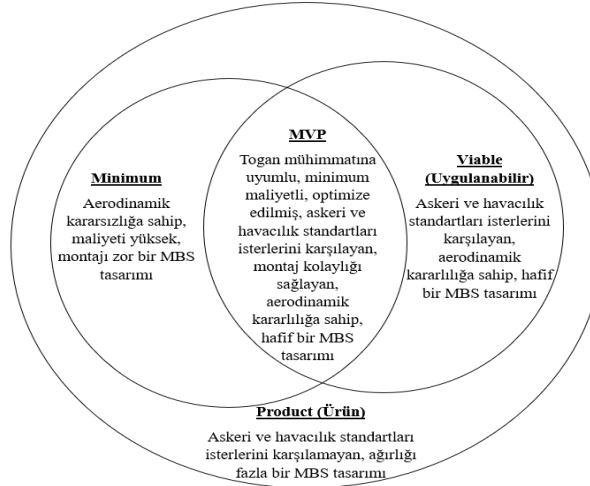
olmadığından bu tip mühimmatlar için farklı bir sistem tasarımına ihtiyaç duyulmaktadır. [7-11]. Bu çalışmada mühimmat olarak Togan mühimmatı kullanılmıştır.

2.3. Tasarım Şartnamesi ve Parametrelerin

Belirlenmesi (Determination of Design Specifications and Parameters)

Problemin tanımlaması yapıldıktan sonra tasarım şartnamesi ve tasarım parametreleri belirlenmiştir. Bu aşamada MVP yaklaşımı ve QFD diyagramları kullanılmıştır. TM'nin bu aşamasında geliştirilecek

olan MBS'lerin tasarım ve müşteri istekleri doğrultusunda en verimli ürünün nasıl ortaya konulması gerektiği kararlaştırılmıştır. MBS'de optimum ürünü geliştirebilmek için MVP yaklaşımı kullanılmıştır. MVP yaklaşımı kullanılarak çekirdek özellikleri barındıran, kullanıcı geribildirim ile test edebileceğimiz ürünün ortaya konulması hedeflenmiştir. Şekil 2'de ise bu çalışmada geliştirilecek MBS için MVP şeması verilmiştir.



Şekil 2. Sistemin MVP şeması (MVP diagram of the system)

Askeri ve havacılık standartlarını sağlamayan, ağırlığı fazla bir sistem tasarımı product (ürün), literatüre taraması yapılmadan geliştirilmiş ürünü göstermektedir. Aerodinamik kararsızlığa sahip, maliyeti yüksek, montajı zahmetli bir sistem tasarımı, minimum yani tercih edilmeyecek ürünü temsil etmektedir. Askeri ve havacılık standartlarına uygun, yüksek aerodinamik kararlılıkta, hafif bir MBS tasarımı, viable (uygulanabilir) yani geliştirmek istediğimiz ideal kalitedeki ürünü belirtmektedir. Togan mühimmatına uyumlu, minimum maliyette, optimum tasarımda, askeri, havacılık standartlarına uygun, kolay montajlanabilen, yüksek aerodinamik

kararlılıkta, hafif bir sistem tasarımı ise minimum+viable çekirdek özelliklerini barındıran en verimli ürünü belirtmektedir.

MBS'nin QFD matrisi ise Şekil 3'te yer almaktadır. QFD matrisi, ürün fonksiyonları ile bileşenler arasındaki ilişkiyi ve müşterilerin benzer özelliklerdeki rakip ürünü nasıl değerlendirdiklerine ilişkin verilerin özetini ortaya koymaktadır. Bunlara ek olarak matriste, özellikler ile tasarım parametreleri (bileşenler) arasındaki korelasyon da gösterilmektedir. MBS, QFD diyagramında belirtilen özellikler ve korelasyonlar göz önünde bulundurularak geliştirilmiştir.

Özellik / Bileşen	Ana Gövde	Tahrik ünitesi	Bağlantı Ünitesi	Kelepçe Ünitesi	Ön ve Arka İtici Ünitesi	Klemens kutusu	Müşteri Derecelendirmesi	Rakip Derecelendirmesi	Şirket Derecelendirmesi
Askeri standartlara uygunluk	▲	▲	▲	▲	▲	▲	5	3	5
Yüksek aerodinamik kararlılık	▲			▲			5	4	5
Estetik görünüm	●	●	●	●	●	●	4	2	3
Montaj kolaylığı	▲		▲	▲	●		3	3	3
Güvenli kullanım		▲					4	3	2

Güçlü ilişki (▲) Normal ilişki (●) Zayıf ilişki (■)

Şekil 3. QFD matrisi (QFD matrix)

2.4. Çelişkilerin ve Buluş Prensiplerinin Belirlenmesi (Identification of Contradicts and Invention Principles)

MBS'deki teknik çelişkilerin ve buluş prensiplerinin belirlenmesi aşamasında TRIZ yöntemlerinden faydalanılmıştır. TRIZ yöntemi, çelişkilere odaklanan analizlerdir. Teknik çelişki içeren sistemlerde, çelişkinin ortadan kaldırılması, buluş yapma sürecinde ilk adımdır. Bu kapsamda, problemleri tespit etmek, sistemdeki çelişkileri

belirlemek ve bu çelişkileri 39 çelişki tablosuyla ilişkilendirmek önemli bir aşamadır. Çözüm için öncelikle teknik ve fiziksel çelişkiler TRIZ parametrelerine dönüştürülmüştür. Daha sonra bu parametreler çelişki matrislerinde eşleştirilmiştir. Tavsiye edilen buluş prensipleri değerlendirildikten sonra probleme uygun olan çözümler seçilmiştir. Şekil 4'te MBS çelişki analizleri ve buluş prensipleri verilmiştir. Sistemde tespit edilen teknik ve fiziksel çelişkiler Şekil 5'te belirtilen buluş prensipleri kullanarak çözümlenmiştir.

Gelişen Özellik Sistemde geliştirilmesi düşünülen taraf	Kötüleşen Özellik Sistemde geliştirilmesi düşünülen taraf gelişirken bozulan taraf	39x39 Çelişki matrisinden okunan prensipler ve çözüm fikirleri	40 Prensipten seçilen şifrelere göre önerilen çözümler
Mukavemet Salan sistemi askeri standartlarda olması için daha dayanıklı parça elde edilecektir. Teknik Çelişki parametresi #14	Hareketli cismin (mekanizmanın) ağırlığı Yüksek mukavemetli parça aynı zamanda parçanın ağırlık ve hacmini arttıracaktır. Teknik Çelişki parametresi #1	1.Parçalara ayırma 8. Denge ağırlığı 15. Dinamiklik 40.Kompozit malzeme	40.Tek çeşit yerine daha hafif ve dayanımı yüksek kompozit malzeme kullanılabilir.
Nesnenin yapısal kararlılığı Salan mekanizmasındaki kancaların hem kendi kendine kapanması hem de manevra sırasında kararlılığının bozulmaması istenmektedir. Teknik Çelişki parametresi #13	Otomasyon seviyesi Kararlı sistemler kullanılarak otomasyon seviyesi kötüleşmektedir. Teknik Çelişki parametresi #38	1.Parçalara ayırma 8. Denge ağırlığı 35. Fiziksel ya da kimyasal durum değişikliği	1.Parçalara ayırma şifresi ile farklı bir kelepçe yapısı ile sistem karışıklığı azaltılabilir.
Uyarlanabilirlik Mekanizmanın, hava aracının farklı manevralarına karşılık başarıyla çalışması ve sistemin dışındaki değişimlere olumlu yanıt vermesi istenmektedir. Teknik Çelişki parametresi #35	Zaman Kaybı Sistem üzerine yerleştirilen her bileşen, cihaz karmaşıklığını arttırmakta ve mekanizmanın daha yavaş çalışmasına neden olduğundan dolayı zaman kaybı oluşturmaktadır. Teknik Çelişki parametresi #25	28. Mekanik sistemin değiştirilmesi 35. Fiziksel ya da kimyasal durum değişikliği	28. Mekanik sistemin değiştirilmesi ile farklı bir sistem tasarımına gidilmelidir.
Uyarlanabilirlik Mekanizmanın, hava aracının farklı manevralarına karşılık başarıyla çalışması ve sistemin dışındaki değişimlere olumlu yanıt vermesi istenmektedir. Teknik Çelişki parametresi #35	Cihaz karmaşıklığı Sistem üzerine yerleştirilen her bileşen, cihaz karmaşıklığını arttırmaktadır. Teknik Çelişki parametresi #36	15. Dinamiklik 28. Mekanik sistemin değiştirilmesi 29. Hidrolik ve pnömatik yapılar 37. Termal genişleme	29. Hidrolik veya pnömatik yapılar kullanımı ile cihaz karmaşıklığı optimize edilebilir.
Sabit nesnenin hacmi İstenen mühimmatın bırakılması için hacim artışı gereklidir. Teknik Çelişki parametresi #8	Gerilim basınç Yüksek hacim titreşimi arttıracağından gerilme değerleri yükselecektir. Teknik Çelişki parametresi #11	24.Aracılık 35. Fiziksel ya da kimyasal durum değişikliği	24.Kelepçe sistemi ile mühimmat arasına aracı bir malzeme kullanılabilir.

Şekil 4. Çelişki analizleri ve buluş prensipleri (Contradiction analysis and invention principles)

No	Yaratıcı Prensipler	No	Yaratıcı Prensipler	No	Yaratıcı Prensipler	No	Yaratıcı Prensipler
01	Bölümlenme	21	Hızlı Hareket	11	Öncü Önlem	31	Gözenekli Malzeme
02	Ayırma	22	Zararı Faydaya Çevirme	12	Eşit Potansiyel	32	Renk Değiştirme
03	Kısmi Kalite	23	Geri besleme	13	Ters Eylem	33	Homojenlik
04	Asimetri	24	Aracılık	14	Yuvarlama	34	Atılan ya da Değiştirilen Parçalar
05	Kombinasyon	25	Self – Servis	15	Dinamiklik	35	Fiziksel ya da Kimyasal Durum Değişikliği
06	Evrensellik	26	Kopyalama	16	Kısmi Fazlalık	36	Faz dönüşümü
07	Yuvalama	27	Ucuz ve Kısa Ömürlü Cisimler Kullanma	17	Yeniden Boyutlama	37	Isıl Genleşme
08	Karşı Ağırlık	28	Mekanik Sistemin Yerine Koyma	18	Mekanik Titreşim	38	Güçlü Okside Ediciler Kullanma
09	Öncü Karşıt Eylem	29	Pnömatik ve Hidrolik Yapılar Kullanma	19	Periyodik Eylem	39	Durağan Çevre
10	Öncü Eylem	30	İnce Film ya da Zar	20	Yararlı Bir Eylemin Sürekliliği	40	Kompozit Malzeme

Şekil 5. 40 buluş prensipleri (40 principles of invention)

2.5. Alt Fonksiyonların ve Tasarım Seçeneklerinin Belirlenmesi (Determination of Sub-Functions and Design Options)

Sistemdeki alt ve genel tasarımları gerçekleştirebilmek için “(1) Sistem tahriği nasıl sağlanıyor? (2) Farklı mühimmat çaplarına uygunluk nasıl olmalıdır? (3) Askeri standartlara nasıl uygun olmalıdır? (4) Aerodinamik yükler nasıl daha fazla dayanıklı olabilir? (5) Minimum ağırlıkta nasıl tasarlanabilir?” sorularının cevapları aranmıştır. Şekil 6'da askeri MBS tasarımı için belirtilen sorular cevaplanmış ve şematik olarak ifade edilmiştir. Ayrıca MBS'nin tasarım

varyasyonları ve ön değerlendirmeler de sunulmuştur. Ön değerlendirme aşamasında belirlenen 5 farklı tasarım çözüm seçeneği seçim kartındaki işlev uyumu, ihtiyaç listesini karşılama, prensip olarak yapılabilirlik, makul maliyet, emniyet, müşteri odaklılık ve yeterli bilgi gibi kriterler kullanılarak tek tek değerlendirilmiştir. Ön değerlendirme seçim kartı kullanımı sonucunda belirlenen altı seçenek 3 seçeneğe düşürülmüştür. Seçilen bu 3 seçeneğin sistem kombinasyonları 1.3-2.1-3.3-4.2-5.1-6.1-7.2-8.3, 1.3-2.1-3.1-4.1-5.2-6.3-7.3-8.2 ve 1.2-2.1-3.2-4.3-5.3-6.2-7.1-8.1 olmuştur. Seçim yapılan bu çözümlere göre KT'ler geliştirilmiştir.

Alt fonksiyonlar	Çözümler	Tasarım seçenekleri		
		1.çözüm	2. çözüm	3. çözüm
Tahrik sistemi	Pnömatik	Pireteknik	Elektromanyetik	
Sinyal ve kontrol sistemi	PCB kart	Ağ kullanımı	Manuel	
Tutucu sistemi	Kuş pençesi ilhamı	Gecko ayağı ilhamı	Çift taraflı tutucu	
Keleçe sistemi	Yaylı ayarlı sistem	Tutucu içeren kompakt sistem	Keleçe sistemi yerine yalnızca tutucu sistem	
Havacılık standartlarına uygunluk	Düşük sıcaklıklar için termal kart ısıtıcı	Titreşim sönmüleyici aracı malzeme kullanımı	Ek gövde desteği	
Sistem kararlılığı	Uzatılmış ek tutucu desteği	Gövde optimizasyonu	Kompozit kabuk	
Sistem karmaşıklığı	Çift piston kullanımı	Yanal yönlü piston hareketi	Dikey yönlü piston hareketi	
Ağırlık	Paslanmaz çelik malzeme	Kompozit malzeme	Alüminyum malzeme	

SEÇİM KARTI		KARAR							
(+) Evet (-) Hayır (?) Bilgi yetersiz (!) Tanımı kontrol et		Çözüm varyantlarını işaretle (çv) (+) Çözümü sürdür. (-) Çözümü elimine et. (?) Bilgi topla çözümü tekrar değerlendir.							
Tüm işlevle uyumlu									
Sartname isteklerini karşıla									
Prensipite gerçekleştirilebilirlik									
Müsaade edilebilir maliyet									
Emniyet şartlarını doğrudan karşılar									
Tasarımcı şirketince tercih edilir.									
Yeterli bilgi									
İşaretler (niyetler, sebepler)									
Çv	A	B	C	D	E	F	G	Karar	
Ç1	1	+	+	+	+	?	!	+	+
Ç2	2	+	-	-	+	?	!	+	-
Ç3	3	+	+	+	-	+	+	+	+
Ç4	4	+	-	-	!	?	!	+	-
Ç5	5	+	+	-	+	+	+	+	+

Şekil 6. Alt fonksiyonlar ve çözümleri, tasarım seçenekleri, ön değerlendirme (Sub-functions and solutions, design options, preliminary consideration)

2.6. Biyomimetik Tasarım Lensi Yaratıcı

Çözümleri (Biomimetic Design Lens Creative Solutions)

Yaratıcı çözümler, biyomimetik tasarım lensi uygulaması kullanılarak elde edilmiştir. Şekil 7’de görülen tasarım stratejisi bileşenleri TM’ye dahil edilmiştir. Tasarım lensi uygulamasından önce

belirlenen konu ele alınmıştır. Böylece geliştirilecek ürün, sürdürülebilir kazanımlar, konunun biyomimetik yaşam prensibindeki karşılığı detaylı olarak açıklanmıştır. Ayrıca, biyomimetik tasarım lensi kullanılarak yaşam prensipleri de incelenmiştir. Tablo 2 ve Tablo 3’te bu çalışmada için tasarım eylemi ve yaşam prensipleri aşamaları verilmiştir.



Şekil 7. Tasarım stratejisi a) Tasarım eylemi b) Yaşam prensipleri [27] (Design strategy a) Design action b) Life principles)

Tablo 2. Tasarım eylemi (Design action)

Ürün	Gökdoğan kuşu, kel kartal pençesinden esinlenilmiş bir MBS
Sürdürülebilir Kazanımlar	Aerodinamik yüklere uyumluluk, daha verimli uçuş desteği, tutuş kabiliyeti
Esin Kaynağı	Form ve ekosistem
Yaşam Prensibindeki Karşılığı	Değişen koşullara uyum sağlamak, hayatta kalmak için evrilme

Geliştirilen sistemin, değişken yüklere karşı dayanıklı olması ve mühimmat tutuşunun zorlu hava koşullarına karşı rijit olması gerekmektedir. Literatür araştırmaları sonucunda kel kartal pençesi formunun, sistem tasarımına entegre edilmesi ile mühimmat tutuşunda iyileşme sağlanmıştır. Bu sayede mühimmat değişken hava şartlarında

aerodinamik yükler altında daha rijit kalabilmektedir. Gökdoğan kuşunun en hızlı kuş olmasından dolayı ise gövde formu, kompozit kabuk tasarımına dahil edilmiştir. Böylece değişken yüklere karşı dayanıklılık ve aerodinamik kararlılık sağlanmıştır.

Tablo 3. Çalışmanın yaşam prensipleri (Life principles of work)

1.Değişen Koşullara Uyum Sağla Mevcut Kullanıma Alternatif	Yok olan kaynaklar ve sektördeki rekabet endüstriyi daha verimli ve daha özellikli ürünler için zorlamaktadır.
2. Hayatta Kalmak İçin Evril Doğaya Bakış	Zorlu hava koşullarında hayatta kalabilmek için bu sistem kullanılabilir.
3.Kaynakları Verimli Kullan Sürdürülebilir	Gökdoğan kuşu ve kel kartal pençesi ile verimli bir sistem tasarlanmıştır.
4.Gelişime Büyüme ile Adapte Ol Endüstriye Uyum	Zorlu hava koşullarına ve tutuş özelliklerine uyum sağlanmıştır.

**2.7.Sonlu Elemanlar Çözümlemesi için
Aerodinamik Kuvvetlerin Belirlenmesi**
(Determination of Aerodynamic Forces for Finite
Element Analysis)

MBS'nin aerodinamik kuvvetlerinin tahkiki ve tasarım kriterlerinin belirlenmesi aşamalarında MIL-STD-8591, MIL-STD-8591H ve MIL-STD-2088A standartları referans alınmıştır. MIL-STD-8591 standardı, MBS'lerdeki genel yapısal ve mekanik tasarım kriterlerini belirtmektedir. MIL-STD-8591H standardı, MIL-STD-8591H'nin bir ekidir ve MBS'lerdeki diğer ayrıntıların tasarımı, analizi ve testine ilişkin genel kriterleri içermektedir. MIL-STD-2088A standardı ise MBS'lerde mühimmatın taşınması, bırakılmasına yönelik genel kuralları ve kriterleri belirtmektedir. Geliştirilen tasarım, yükleme koşullarından kaynaklanan kuvvet ve momentleri destekleyecek mukavemete sahip olmalıdır [28]. MIL-STD-8959H Ek-B ve Ek-D bölümünde belirtilen atalet yükleri ve maksimum reaksiyon kuvvetleri, geliştirilen MBS'ye entegre edilerek hesaplanmıştır. Ampirik formüller ve hesaplamalar bu bölümde açıklanmıştır. Daha sonra ise elde edilen kuvvet değerleri sonlu elemanlar analizine entegre edilmiş ve maksimum gerilme değerleri tespit edilmiştir. Bu çalışmada, İHA sistemlerinde kullanılabilmesi, MBS'lere uyumlu olması, NATO 81 mm havanların eşdeğeri olarak kullanılabilmesi, maksimum 45 kg kütlede olması, yeni geliştirilen bir mühimmat olması, düşük maliyetli olması ve havadan karaya havan mühimmatı olması sebebiyle Togan mühimmatı kullanılmıştır.

Aerodinamik kuvvet denklemlerinde atalet yükleri, hava aracının performans kabiliyetleri ve mühimmatın hava aracı üzerindeki konumu hakkındaki bilgiler referans alınarak belirlenmektedir. Yük faktörleri, aşağıdaki ve Tablo 4 ve Tablo 5'te verilen ilişkiler kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\Delta X = X_{mühimmatc.g} - X_{ihac.g} \quad (1)$$

$$\Delta Y = Y_{smühimmatc.g} - Y_{ihac.g} \quad (2)$$

$$\Delta Z = Z_{mühimmatc.g} - Z_{ihac.g} \quad (3)$$

Yük faktörü denklemleri:

$$n_x = -a_x + \frac{1}{g} [\dot{\omega}_z \Delta Y - \dot{\omega}_y \Delta Z + (\dot{\omega}_y^2 + \dot{\omega}_z^2) \Delta X - (\dot{\omega}_x \dot{\omega}_y) \Delta Y - (\dot{\omega}_x \dot{\omega}_z) \Delta Z] \quad (4)$$

$$n_y = -a_y + \frac{1}{g} [\dot{\omega}_x \Delta Z - \dot{\omega}_z \Delta X + (\dot{\omega}_x^2 + \dot{\omega}_z^2) \Delta Y - (\dot{\omega}_x \dot{\omega}_y) \Delta X - (\dot{\omega}_y \dot{\omega}_z) \Delta Z] \quad (5)$$

$$n_z = -a_z + \frac{1}{g} [\dot{\omega}_y \Delta X - \dot{\omega}_x \Delta Y + (\dot{\omega}_y^2 + \dot{\omega}_x^2) \Delta Z - (\dot{\omega}_x \dot{\omega}_z) \Delta X - (\dot{\omega}_y \dot{\omega}_z) \Delta Y] \quad (6)$$

Kuvvet denklemleri:

$$P_{xatalet} = n_x W_s \quad (7)$$

$$P_{yatalet} = n_y W_s \quad (8)$$

$$P_{zatalet} = n_z W_s \quad (9)$$

Moment denklemleri:

$$M_{xatalet} = -I_{xx} \ddot{\omega}_x + (I_{yy} - I_{zz}) \dot{\omega}_y \dot{\omega}_z + I_{yz} (\dot{\omega}_y^2 - \dot{\omega}_z^2) + I_{xz} (\ddot{\omega}_z + \dot{\omega}_x \dot{\omega}_y) + I_{xy} (\ddot{\omega}_y - \dot{\omega}_x \dot{\omega}_z) \quad (10)$$

$$M_{yatalet} = -I_{yy} \ddot{\omega}_y + (I_{zz} - I_{xx}) \dot{\omega}_x \dot{\omega}_z + I_{xz} (\dot{\omega}_z^2 - \dot{\omega}_x^2) + I_{xy} (\ddot{\omega}_x + \dot{\omega}_y \dot{\omega}_z) + I_{yz} (\ddot{\omega}_z - \dot{\omega}_x \dot{\omega}_y) \quad (11)$$

$$M_{zatalet} = -I_{zz} \ddot{\omega}_z + (I_{xx} - I_{yy}) \dot{\omega}_x \dot{\omega}_y + I_{xy} (\dot{\omega}_x^2 - \dot{\omega}_y^2) + I_{yz} (\ddot{\omega}_y + \dot{\omega}_x \dot{\omega}_z) + I_{xz} (\ddot{\omega}_x - \dot{\omega}_y \dot{\omega}_z) \quad (12)$$

Maksimum reaksiyon kuvvetleri hesaplanırken ise X-Y, Y-Z ve X-Z olmak üzere her üç düzlemde de statik denge $\Sigma F_i=0$ ve $\Sigma M_i=0$ denklemleri çözümlenmiştir. Tablo 5'teki süperpozisyon ilkesi ve kuvvet, moment kombinasyonları ve Şekil 8'de belirtilen MIL-A-8591H standardının şematik açıklamaları kullanılarak aşağıdaki denklemler türetilmiştir.

Ön sağ veya sol salınım destekleri için denklemler:

$$s_y = s_z \tan \epsilon \quad (13)$$

$$s_z = AP_x + BP_y + CP_z + DM_x + EM_y + FM_z \quad (14) \quad \text{Arka sağ veya sol salınım destekleri için denklemler ise:}$$

$$s = s_z / \cos \epsilon \quad (15)$$

Buradan;

$$A = l_5/2 (s_2 + l_1) + l_3 / \tan \epsilon; B = s_1 l_5 / sk; C = (s_1/s)(0.5 + l_3/k); \quad (19)$$

$$A = l_5/2 (s_1 + l_2) + l_3 / \tan \epsilon; B = s_2 l_5 / sk; \quad (16) \quad D = s_1 / sk; E = 0.5(s_2 + l_1); \quad (20)$$

$$C = (s_2/s)(0.5 + l_3/k); D = s_2 / sk; E = 0.5(s_1 + l_2); \quad (17) \quad F = 1 / \tan \epsilon; H = (l_5 - s_5) \tan \epsilon; k = H + (l_3 + s_3) \quad (21)$$

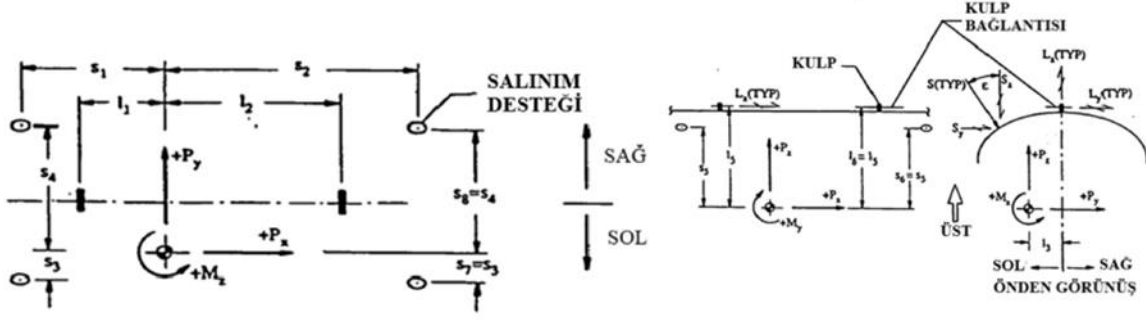
$$F = 1 / \tan \epsilon; H = (l_5 - s_5) \tan \epsilon; k = H + (l_3 + s_3) \quad (18)$$

Tablo 4. Hava araçlarındaki uçuş koşulları ve sınır yükleri [28] (Flight conditions and limit loads on aircraft)

Koşullar	Dinami k Basınç (psf)	Hava Aracı Açısı (°)		Lineer İvmelenme (g)			Tepe açıs al hızları (rad/s)			Tepe açıs al ivmeleri (rad/sec)		
		Atak α_A	Yan kayma β_A	a_x	a_y	a_z	$\dot{\omega}_x$	$\dot{\omega}_y$	$\dot{\omega}_z$	$\ddot{\omega}_x$	$\ddot{\omega}_y$	$\ddot{\omega}_z$
1.Çıkış	2500	5	0	±1.5	±1.0	7	0	0	0	±0.25	±0.5	0
2.Çıkış	1000	13	0	±1.5	±1.0	8.5	0	0	0	±0.5	±0.5	0
3.Çıkış	500	25	0	±1.5	±1.0	10	0	0	0	±0.5	±0.5	0
4.Dönüş-Çıkış	650	6	2	±1.5	±0.5	7	±5.0	0	0	±11.0	±3.0	±2.0
5.Dönüş-Çıkış	2500	3	1	±1.5	±0.25	6.5	±4.5	0	0	±13.0	±1.0	±1.0
6.Dönüş-Çıkış	2500	2	1	±1.5	±0.25	6	±4.5	0	0	±17.0	±1.0	±1.0
7.Engel ile temas	150	0	0	-4	±1.0	2	0	0	0	0	±6.0	±4.0
8.Maksimum iniş oranı	150	0	0	-1	±1.0	4	0	0	0	0	±4.0	±2.0
9.Kanattan kanata dönüş	2500	3	1	±1.5	±1.0	6	0	0	0	±13.0	±0.5	±1.0
10.Direksiyon kolu serbest bırakma (1g)	400	2	10	±1.5	±1.5	1	0	0	0	±1.0	0	±1.5
11.Aşağı itme	2500	-2	0	±1.5	±1.0	-1	0	0	0	0	0	0
12.Aşağı itme	1800	-4	0	±1.5	±1.0	-3	0	0	0	0	0	0
13.Aşağı itme	1000	-6	0	±1.5	±1.0	-6	0	0	0	±0.5	0	0

Tablo 5. Yüklerin ve momentlerin yönü [28] (Direction of loads and moments)

Yükler	Salınım desteği				Kanca	
	Ön		Arka		Ön	Arka
	Sol	Sağ	Sol	Sağ		
P_x	-	-	+	+	+	-
P_y	-	+	-	+	±	±
P_z	+	+	+	+	-	-
M_x	-	+	-	+	±	±
M_y	+	+	-	-	-	±
M_z	+	-	-	+	±	±



Şekil 8. MBS koordinat sistemi ve uzaklık değerleri [28] (MBS coordinate system and distance values)

Denklemlerde belirtilen simgelerin açıklamaları belirtilen şekildedir: a_x : Uçağın aksel ivmesi, α_A : Uçağın hücum açısı, β_A : Uçağın yan kayma açısı, ω_x : Yunuslama ivmesi, ω_y : Yalpa ivmesi, ω_z : Sapma ivmesi, ω_x : Yunuslama hızı, ω_y : Yalpa hızı, ω_z : Sapma hızı, a_y : Uçağın yan ivmesi, a_z : Uçağın normal ivmesi, c.g: Ağırlık merkezi, g: Yerçekimi ivmesi, I_{xx} , I_{yy} , I_{zz} , I_{xy} , I_{xz} , I_{yz} : Mühimmatın atalet momenti, M_x : Net yunuslama momenti, M_y : Net yalpa momenti, M_z : Net sapma momenti, n_x : Arka yük faktörü, n_y : Yan yük faktörü, n_z : Yukarı yük faktörü, P_x : Net aksel kuvvet, P_y : Net yan kuvvet, P_z : Net normal kuvvet, W_s : Mühimmat ağırlığı, X: Uçak gövde mesafesi, Y: Uçak yan hat mesafesi, Z: Uçak üst hat mesafesi.

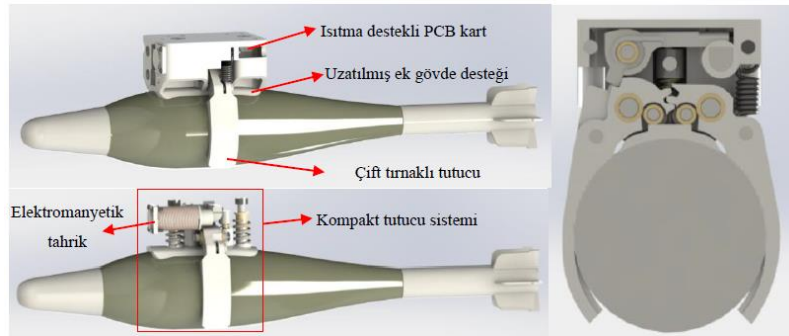
Sunulan denklemler 2,5,6,7 ve 8 numaralı koşullar için hesaplanmıştır. 7,8 numaralı koşullardaki kritik durum kuvvetleri dikkate alınmış ve reaksiyon kuvvetleri, ön salınım desteği için $s_z=204N$, $s_y=115N$, arka salınım desteği için $s_z=552N$, $s_y=612N$ olarak hesaplanmıştır. Sonlu elemanlar analizleri sınır koşullarında, hesaplanan kuvvet değerleri esas alınmıştır. Ayrıca mesh optimizasyonu yapılırken 0,8 mm eleman boyutu

kullanılmıştır. Bunun nedeni ise, daha yüksek eleman boyutlarında eleman kalitesinin düşmesidir.

3.BULGULAR VE TARTIŞMA (Results and Discussion)

3.1.Uygun Çözümler (Suitable Solutions)

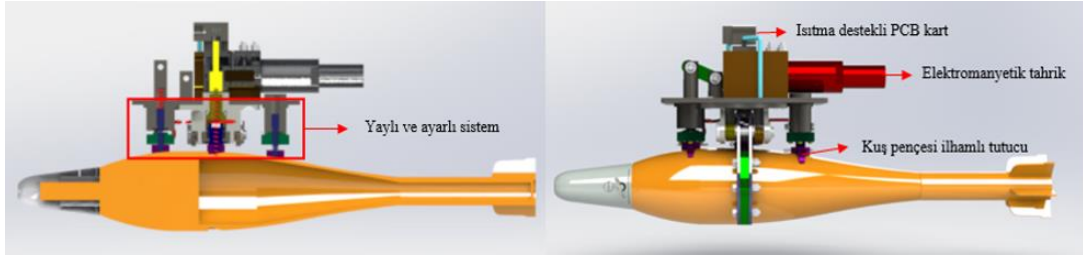
Uygun çözümleri belirlemek için ön değerlendirme aşamasında kararlaştırılan seçeneklerin KT'leri geliştirilmiştir. Sistemin daha iyi anlaşılması ve yorumlanması amacıyla bu üç çözüm seçeneğinin katı modellemeleri alt fonksiyonlar esas alınarak gerçekleştirilmiştir. Modellemeler Şekil 9, Şekil 10 ve Şekil 11'de ayrı ayrı gösterilmiştir. 1. çözüm seçeneğinde tahrik sistemi elektromanyetik piston, sinyal ve kontrol sisteminde PCB kart kullanılmıştır. Tutucu sistemi, çift tırnaklı olarak tasarlanmıştır. Kelepçe sistemindeki minimum ağırlık isteri, kompakt bir tutucu sistemi ve alüminyum malzeme kullanımı ile sağlanmıştır. Askeri standartlara uygunluk ve düşük sıcaklıklara dayanım için ısıtma destekli PCB kart sunulmuştur. Ayrıca aerodinamik sistem kararlılığı, uzatılmış ek gövde desteği elde edilmiş, sistem karmaşıklığı ise yanal yönlü piston sistemi ile çözümlenmiştir.



Şekil 9. Sistemin 1. tasarım çözüm seçeneği (The 1st design solution option of the system)

3. çözüm seçeneğinde de tahrik sistemi olarak elektromanyetik piston, sinyal ve kontrol sisteminde PCB kart kullanılmıştır. Tutucu sistemi, kartal pençesi ilhamı, kelepçe sistemi ise yaylı ve ayarlı bir sistem kullanılarak tasarlanmıştır. Askeri standartlara uygunluk ve düşük sıcaklıklara

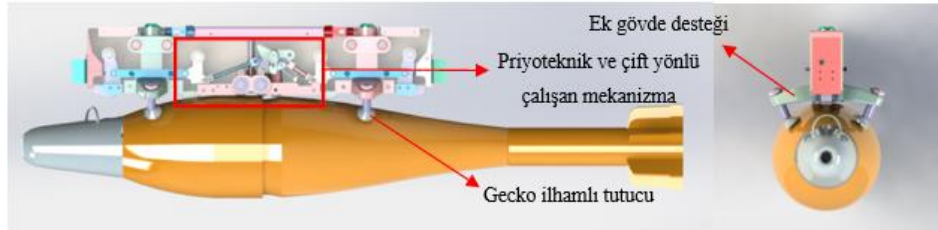
dayanım için ısıtma destekli PCB kart sunulmuştur. Ayrıca sistemin aerodinamik kararlılığı, kompozit kabuk kullanımı, sistem karmaşıklığının çözümü ise dikey yönlü piston sistemi ile sağlanmıştır. Minimum ağırlık için kompozit malzeme seçimi yapılmıştır.



Şekil 10. Sistemin 3. tasarım çözüm seçeneği (The 3rd design solution option of the system)

Son olarak 5. çözüm seçeneğinde tahrik sistemi olarak piroteknik, sinyal ve kontrol sisteminde PCB kart kullanılmıştır. Tutucu sistemi, geko kertenkele ayağı ilhamı kullanılarak tasarlanmıştır. Kelepçe sistemi ise tutucu sisteminden dolayı kullanılmamıştır. Askeri standartlara uygunluk, ek gövde desteği ve paslanmaz çelik malzeme

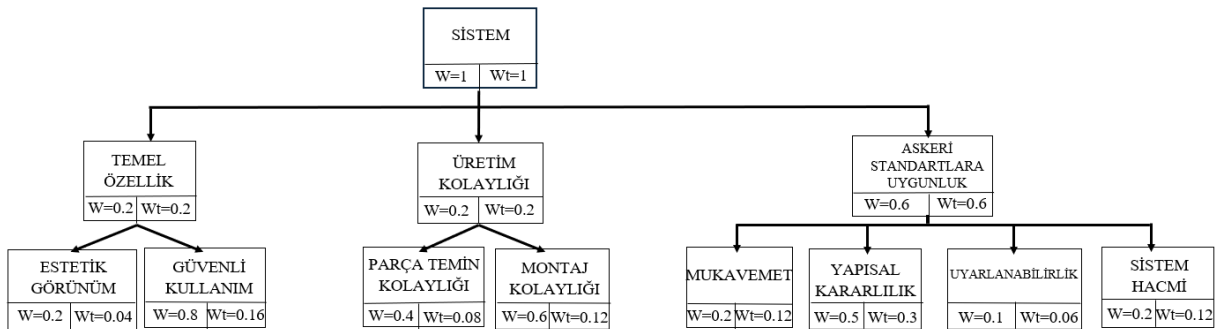
kullanılarak sağlanmıştır. Bu sayede sistemin mukavemeti artırılmıştır. Ayrıca sistemin kararlılığı, gövde optimizasyonu, sistem karmaşıklığının çözümü çift yönlü çalışan mekanizma kolu hareketi ile sağlanmıştır.



Şekil 11. Sistemin 5. tasarım çözüm seçeneği (The 5th design solution option of the system)

TM'nin karar sistemi kullanılarak altı seçenekten üç seçeneğe düşürülen çözüm seçenekleri arasında optimum olanı tespit edilmiştir. Karar sistemi, amaçlar ağacı ve değerlendirme çizelgesinden oluşmaktadır. Şekil 12'de belirtilen amaçlar ağacında belirlenen kriterler; temel teknik özellikler, üretim kolaylığı, askeri standartlara uygunluk, estetik görünüm, güvenli kullanım, parça temin kolaylığı, mukavemet, yapısal kararlılık,

uyarlanabilirlik ve sistem hacmidir. Yapılan işlemlerde her kritere, tasarıma bağlı olarak ağırlıklı yüzdeler (W, Wt) verilmiştir. Verilen yüzdeler sistemin tamamı için 1 alınmıştır. Alt basamaklara doğru devam edildiğinde tüm değerler, diğer kriterlere paylaştırılmıştır.



Şekil 12. Mühimmat bırakma sistemi amaçlar ağacı (Ammunition release system objectives tree)

Amaçlar ağacında belirlenen kriterler göz önüne alınarak üç seçeneğe ait bir değerlendirme çizelgesi oluşturulmuştur. Şekil 13'te verilen çizelgede kriterler parametre cinsinden ifade edilmiş, seçenekler için puanlama ve değerlendirme işlemi yapılmıştır. Her bir parametrenin oranı ve ağırlıklı puanı belirtilmiştir. Seçeneklerin değerlendirilmesi

yapılırken 1-2-3-4 az, 5-6-7 orta, 8-9-10 yüksek oran olarak belirlenmiştir. Sonrasında ise her bir seçenek için ağırlıklı değerler hesaplanmıştır. Seçenek 3'ün 7.58 puanla optimum tasarım olduğu görülmüştür. Bu sonuçlara göre Seçenek 3'ün detay tasarımı yapılmıştır.

Parametreler	W	SEÇENEK 1			SEÇENEK 3			SEÇENEK 5		
		Oran	Değer	Ağırlıklı değer	Oran	Değer	Ağırlıklı değer	Oran	Değer	Ağırlıklı değer
Estetik görünüm	0.04	Orta	5	0.20	Yüksek	8	0.32	Orta	6	0.24
Güvenli kullanım	0.16	Orta	5	0.80	Yüksek	8	1.28	Yüksek	8	1.28
Parça temin kolaylığı	0.08	Yüksek	8	0.64	Orta	5	0.40	Orta	6	0.48
Montaj kolaylığı	0.12	Yüksek	9	1.08	Orta	7	0.84	Az	3	0.36
Mukavemet	0.12	Az	3	0.36	Orta	7	0.84	Yüksek	8	0.96
Yapısal kararlılık	0.3	Orta	5	1.50	Yüksek	9	2.7	Yüksek	8	2.4
Uyarlanabilirlik	0.06	Orta	5	0.30	Yüksek	8	0.48	Yüksek	9	0.54
Sistem hacmi	0.12	Az	4	0.48	Orta	6	0.72	Yüksek	8	0.96
TOPLAM	1		44	5.36		58	7.58		56	7.22

Şekil 13. Mühimmat bırakma sisteminin değerlendirme çizelgesi (Evaluation chart of ammunition release system)

3.2. Detay Tasarım Aşaması (Detail Design Stage)

Sistemin aerodinamik kararlılığı alt fonksiyonlar ile belirlenen kompozit kabuk kullanımı ile sağlanmıştır. Gökdoğan kuşu biyomimetik ilhamı ile kompozit kabuk tasarımı gerçekleştirilirken 2 aşamalı bir tasarım süreci takip edilmiştir. İlk aşamada gökdoğan kuşunun fotoğrafı üzerinden gövde ve kanatların izdüşümü çıkarılmıştır.

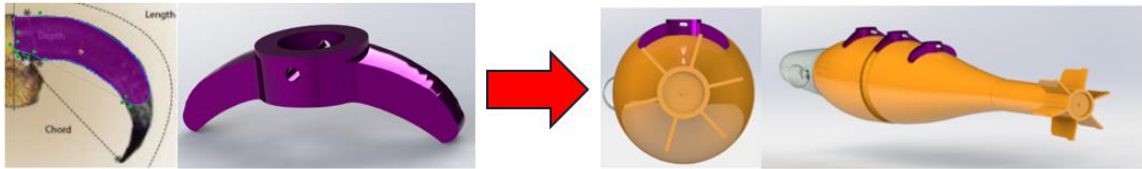
İzdüşümler Şekil 14'te belirtilen fotoğraflar esas alınarak yapılmıştır. Gövde ve kanatların izdüşümü çıkarıldıktan sonra, doğa benzetiminde seçilen boy oranına göre ölçeklendirme yapılmıştır. Daha sonra ise matematiksel boyutlandırması çıkartılan gövdenin, katı modellemesi gerçekleştirilmiştir.



Şekil 14. Gövde izdüşümü (Body projection)

Gövde izdüşümü yapıldıktan sonra Şekil 15'te belirtilen kartal pençesi benzetimi ile tutucu tasarımı yapılmıştır. Kartal pençesi benzetiminde fotoğraflar kullanılarak teknik çizim programında

bir iz düşüm çıkartılmıştır. Tasarımı yapılan tutucular Togan mühimmatı üzerine yerleştirilmiş ve mühimmatın dış yüzey formunu tam olarak sarması sağlanmıştır.



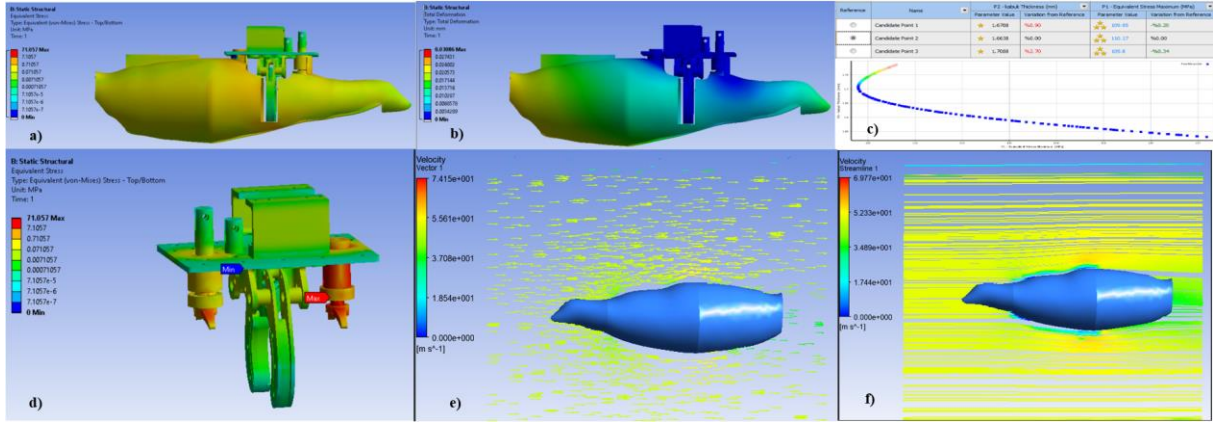
Şekil 15. Tutucu izdüşümü (Sway brace projection)

Teorik ve matematiksel hesaplamalar sonucunda tespit edilen MBS aerodinamik kuvvet değerleri ve alt fonksiyon tablolarında karşılaştırılan parametreler sonlu elemanlar analizlerinin sınır koşullarına entegre edilmiştir. Şekil 16a, Şekil 16b ve Şekil 16d'de belirtilen analizler sonucunda Von-Mises gerilme değeri 71.05 MPa, deformasyon değeri 0.03mm elde edilmiştir. Bu sonuçlara göre edilen gerilme ve deformasyon değerlerinin uygun olduğu görülmektedir.

Optimum kabuk kalınlığı ise CAE parametrik optimizasyon yaklaşımları kullanılarak tespit edilmiştir. Parametrik analizleri gerçekleştirebilmek için ilk olarak parametrelerin belirlenmesi gerekmektedir. Parametre olarak kabuk kalınlığı ve Von-Mises gerilme değeri kullanılmıştır. Kabuk kalınlığının alt ve üst sınırı sırası ile 1 ve 3.5mm olarak seçilmiştir. Şekil 16c'de

belirtildiği üzere optimizasyonlar sonucunda program tarafından 3 adet öneri kalınlık değeri sunulmuştur. Bu sonuçlar dikkate alınarak ikinci önerilen nokta yani kabuk kalınlığının 1.6738mm olduğu değer seçilmiştir. Bu seçiminin temel nedeni ise minimum ağırlık isteridir. Bu değer ile MBS'nin toplam kütlesi 3.42kg olmuştur.

Aerodinamik verimi incelemek amacıyla da akış çizgileri ve hız vektörleri sisteme tanımlanmıştır. Şekil 16e ve Şekil 16f'de belirtilen akış çizgileri ve hız vektörleri incelendiğinde akışın laminar olarak ilerlediği görülmektedir. Hız vektörlerinde herhangi bir türbülans gözükmemektedir. Kabuk yüzeyi aerodinamik verimi arttırdığı görülmektedir. Kabuk yüzeyi etrafında hava akış hızı yaklaşık 1.5 kat azalmıştır. Böylece sistemin aerodinamik verimliliğinin arttığı tespit edilmiştir.

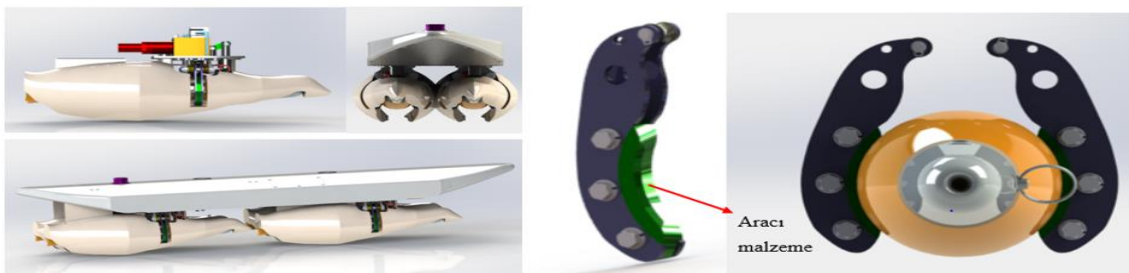


Şekil 16. a) Von-Mises gerilme değerleri, b) Deformasyon değerleri, c) Parametrik analiz sonuçları, d) Salınım desteklerinin Von-Mises gerilme değerleri, e) Akış çizgileri, f) Hız vektörleri (a) Von-Mises stress values, b) Deformation values, c) Parametric analysis results, d) Von-Mises stress values of sway braces, e) Flow lines, f) Velocity vectors)

3.3.Nihai Tasarım Çözümü (The Final Design Solution)

Nihai tasarım aşamasında belirlenen TRIZ buluş prensipleri sisteme entegre edilmiştir. Buluş prensiplerinden, kompozit malzeme şifresi kullanılarak sistemin hem daha hafif hem de yüksek mukavemetli olması sağlanmıştır. Parçalara ayırma şifresi kullanılarak tutucu ve kelepçe sistemi birbirinden ayrılmıştır. Bu sayede sistemin yapısal kararlılığı artırılmış, aynı zamanda da otomasyon seviyesi ve sistem karmaşıklığı minimize edilmiştir. Aracılık şifresi kullanılarak Şekil 17’de belirtilen kelepçe sistemi ile mühimmat arasına aracı bir malzeme kullanılmıştır. Böylece hem istenen sistem hacmi sağlanmış hem de mekanik titreşimlerden dolayı oluşacak gerilmeler minimuma indirgenmiştir. Mekanik sistemin değiştirilmesi şifresi kullanılarak literatürdeki sistemlerden farklı bir sistem tasarımı gerçekleştirilerek hem yüksek uyarlabilirlik sağlanmış hem de sistemin daha hızlı çalışması sağlanmıştır. Bu buluş prensibi ile

mekanizmanın yüksek aerodinamik kararlılıkta ve mühimmatı minimum sürede bırakan bir sistem elde edilmiştir. Hidrolik ve pnömatik yapılar şifresi kullanılarak elektromanyetik piston ile yüksek uyarlabilirlik ve minimum sistem karmaşıklığı sağlanmıştır. Tüm buluş prensiplerini içeren MBS’nin nihai tasarımı da Şekil 17’de gösterilmiştir. TRIZ buluş prensipleri kullanılarak çözülen problemler, analiz sonuçları ve literatür ile karşılaştırıldığında geliştirilen özelliklerin, başka bir özelliği kötüleştirmede görülmemiştir. Sonlu elemanlar analizleri sonucunda gerilme (71.05MPa) ve kütle (3.42kg) değerlerinin uygun olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca geliştirilen sistemin, literatürdeki diğer MBS lerde kullanılan mekanizmalardaki bileşenleri elemine ettiğinden cihaz karmaşıklığı ve otomasyon seviyesinin daha az olduğu belirlenmiştir [3, 4, 7, 28].



Şekil 17. Mühimmat bırakma sisteminin nihai tasarımı (Final design of ammunition release system)

Bu çalışmada, Pahl ve Beitz, Dieter ve Schmidt, Hurst’un tasarım metodu, QFD, TRIZ, biyomimetik ve CAE optimizasyon yaklaşımlarından oluşan yeni bir TM geliştirilmiştir. Literatürde parametrik tasarıma uygun, karar mekanizması olan, yenilikçi problem çözme metodu içeren ve müşteri odaklı bir TM bulunmamaktadır [15-26]. Korkmaz ve

arkadaşları, çalışmada MBS’lerdeki TRIZ uygulamalarında buluş prensipleri olarak özelliklerin dönüştürülmesi, mekanik sistemin değiştirilmesi, dinamiklik, termal genleşme, mekanik sistemin değiştirilmesi, parçalara ayırma, denge ağırlığı, özelliklerin dönüştürülmesi buluş prensipleri kullanılmışlardır [29]. Bu çalışmada ise

kompozit malzeme, parçalara ayırma, mekanik sistemin değiştirilmesi, hidrolik ve pnömatik yapılar kullanma ve aracılık buluş prensipleri kullanılmıştır. Billingsley ve arkadaşları, Başak ve arkadaşları, Özbek ve arkadaşları çalışmalarında hava araçlarında aerodinamik kararlılığın sağlanması amacı ile biyomimetik uygulamaları

4.SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada, sistem odaklı tasarım yaklaşımları kullanılarak yeni bir tasarım metodolojisi sunulmuştur. Geliştirilen bu yeni model, Pahl ve Beitz, Dieter ve Schmidt, Hurst'un tasarım metodolojisi, MVP, QFD, TRIZ, biyomimetik ve CAE optimizasyon yaklaşımlarından oluşmaktadır. Çalışma sonucunda geliştirilen TM ile İHA'lar için tercih edilebilecek arayüzde ve mevcut sistemlerden farklı yeni bir yerli MBS oluşturulmuştur. Biyomimetik tasarım lensi kullanılarak mevcut sistemlere kıyasla aerodinamik yüklere karşı daha kararlı ve mühimmat arayüzüne uygun tutucu mekanizması sağlanmıştır. TRIZ metodu kullanılarak montaj kolaylığı, düşük mekanizma hacmi elde edilmiştir. MVP metodu kullanılarak tasarım kriterlerine uygun, CAE optimizasyonları kullanılarak ise optimum formda ve minimum ağırlıkta sistem tasarlanmıştır. Teorik ve matematiksel olarak hesaplanan aerodinamik kuvvetler, sonlu elemanlar analizleri ile desteklenmiştir. Analizler sonucunda sistem mukavemetinin uygun olduğu ve aerodinamik verimliliğinin arttığı tespit edilmiştir. Parametrik optimizasyonlar ile 1.6738mm kalınlıklı kompozit kabuk kullanılmıştır. İlk kez Togan havan topu mühimmatına uygun yeni bir MBS optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Teknik çelişkiler TRIZ yöntemleri kullanılarak çözülmüştür. Kompozit malzeme, parçalara ayırma, mekanik sistemin değiştirilmesi, hidrolik ve pnömatik yapılar kullanma ve aracılık TRIZ buluş prensipleri kullanılmıştır. Yaratıcı ve uygun çözümler kapsamında biyomimetik tasarım lensi uygulamasından da faydalanılmıştır. Gökdoğan kuşu, kel kartal pençesi formundan ilham alınmıştır. Biyomimetik yaşam prensiplerinden değişen koşullara uyum sağlama, hayatta kalmak için evril, kaynakları verimli kullan, gelişme büyüme ile adapte ol prensipleri kullanılmıştır.

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.

kullanmışlardır [30-32]. Biyoilham kaynağı, kuşlardaki V-formasyon uçuşu, kambur balinaların yüzgeçleri, şahin kuşunun kanadı olurken bu çalışmada biyomimetik tasarım lensi uygulamalarında gökdoğan kuşu formu ve kel kartal pençesi biyoilham kaynağı olarak kullanılmıştır.

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)

Oğuz YILMAZ: Sistemin aerodinamik hesaplamalarını, tasarımlarını, sonlu elemanlar analizlerini yapmış, sonuçları değerlendirmiş ve yazım sürecini gerçekleştirmiştir.

He performed aerodynamic calculations, designs, finite element analysis of the system, evaluated the results and carried out the writing process.

Orhan ERDEN: Sistemin tasarım metodolojisini oluşturmuş, çalışmayı yönetmiş, sonuçlar hakkında yorum yapmış ve yazım sürecine de katkı sağlamıştır.

He created the design methodology of the system, directed the study, commented about results and also contributed to 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] Silahlı İnsansız Hava Araçlarının Uluslararası Alanda ve İç Güvenlikte Sevk ve İdaresine İlişkin Hukuki Saptamalar. Savunma Bilimleri Dergisi, 18.36(43-66), (2019).
- [2] Kocataş, A. H., Gürkan, D., ve Korkut, I. Silahlı İnsansız Hava Araçları için Namlu Mekanizması Analizi. Politeknik Dergisi, 27.1(211-219), (2023).
- [3] Dokuyucu, Ö. Hafif Mühimmatlar için Mikro Salan Geliştirilmesi ve Test Edilmesi. VII. Ulusal Havacılık ve Uzay Konferansı, 91, (2018).
- [4] Rickards, B. and C.J. Casey Brown. (2012). Miniature Bomb Rack Unit, License Thesis, FAMU-FSU College of Engineering, Florida.
- [5] Rajkumar, K., Tangermann, E., Klein, M., Ketterl, S., and Winkler, A. Time-Efficient Simulations of Fighter Aircraft Weapon

- Bay. CEAS Aeronautical Journal, 14.1(91-102), (2023).
- [6] Zhou, W., Research on the Influence of Flight Attitude on Unilateral Missile Separation from Embedded Bay. 33rd Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences, 78, (2022).
- [7] Bal, M.K. (2020). Designing Universal Yoke Structure of Suspension and Release System with Topology Optimization for Fighter Aircrafts, Master's Thesis, Graduate School of Science and Engineering of Hacettepe University, Ankara.
- [8] Baker, W., S. Keen, and C. Morgret. Validation of Weapon Separation Predictions Using F/A-22 Flight Test Results. USAF Developmental Test and Evaluation Summit, 6803, (2004).
- [9] Kummer, G., Besson, M., Gunnett, A., Javorsek, D., and Keithley, C. F-22 Raptor GBU-39 Separation Test Results. AIAA Atmospheric Flight Mechanics Conference, 6668, (2011).
- [10] Shilo, M. (1994). Six Degree of Freedom Flight Dynamic Model Of A Mk-82 Store. Australia :Aeronautical Research Labs Melbourne, 46.
- [11] Hetreed, C., Carroll, M., Collard, J., and Snyder, R. F-35 Weapons Separation Test and Verification. Aviation Technology, Integration, and Operations Conference, 3680, (2018).
- [12] Birkhofer, H. (2011). The Future of Design Methodology. London: Springer, 35-46.
- [13] French, M. J., Gravadahl, J. T., and French, M. J. (1985). Conceptual Design for Engineers. (Second Edition). London: Design Council.
- [14] Börklü, H. Makina Mühendisliğinde Tasarım ve Tasarım İşlem Modelleri. Makina Tasarım ve İmalat Dergisi, 3.1(35-41), (1995).
- [15] Yıldız, N. (2019). Kavramsal Tasarım Yaklaşımlarının İncelenerek Yeni Bir Yaklaşım Geliştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli.
- [16] Mayda, M., ve Börklü, H. Yeni Bir Kavramsal Tasarım İşlem Modeli. TÜBAV Bilim Dergisi, 1.1(13-25), (2008).
- [17] Bozdemir, M., ve Mendi, F. Yapay Zeka Destekli Sistemik Ürün Tasarımında Şartname ve Karar İlişkileri. Gazi Üniversitesi Endüstriyel Sanatlar Eğitim Fakültesi Dergisi, 17(18-32), (2005).
- [18] Parlar, Z., Soybora, E. K., Burhan, M. S. ve Davaslıgil, S. Sistemik Konstrüksiyon ve Tasarım Odaklı Düşünme Yaklaşımı ile Yaratıcı Kavramsal Tasarım Süreci: Küçük Ev Aleti Tasarımı. Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 21.5(1100-1109), (2017).
- [19] Börklü, H.R. ve Erdemir, F. Yeni Bir Çim Biçme Makinesinin Kavramsal Tasarımı. Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi, 7.2(15-26), (2019).
- [20] Avinç, G.M. ve Vural, S. Bir Model Önerisi: Hesaplamalı Tasarım Bağlamında Değişen Tasarım Süreci. Online Journal Of Art And Design, 8.1(77-96), (2020).
- [21] Delibaş, H. (2012). Systematic Design of Carton Separating Machine, Master's Thesis, Çukurova University Institute of Natural and Applied Sciences, Adana.
- [22] Yüksel, N., Börklü, H.R. ve Erden, O. Değer Mühendisliği Uygulaması: Köfte Yapma Makinası Tasarımı. Gazi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 6.2(95-104), (2020).
- [23] Özdoğan, M. (2016). Biyosüreç: Doğadan İlham Alan Tasarım Süreçleri için Sistemik Bir Yöntem Önerisi ve Uygulaması. Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- [24] Mayda, M. and Börklü, H.R. An Integration of Triz and the Systematic Approach of Pahl and Beitz for Innovative Conceptual Design Process. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 36(859-870), (2014).
- [25] Keskinliç, F. (2019). Mühendislik Tasarım Sürecinde Bulanık Mantık ve Bulanık Yapay Sinir Ağı Kullanımı. Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- [26] Zhang, Z. and Chu, X. A New Approach for Conceptual Design of Product and Maintenance. International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 23.7(603-618), (2010).
- [27] Ulaş, E.C., Başak, H. ve Akkurt, A. Araç Koltuğu Sırt Desteğinin Biyomimetik Tabanlı Tasarımı ve Analizi. Politeknik Dergisi, 26.2(775-785), (2022).
- [28] Swarnakari, S. and Raja, G. Design and Structural Analysis of Fighter Aircraft's Bomb Release Mechanism Subjected to Aerodynamic and Inertial Loads using FEA. International Journal of Engineering & Technology, 9.92(10), (2020)
- [29] Korkmaz, F.F., Subran, M., Hatipoğlu, A., Kaya, M.O., ve Fidanboylu, K. TRIZ Yaklaşımı Kullanılarak Hava Araçlarındaki Mühimmat Bırakma Sistemlerinde Yenilikçi Çözüm Üretilmesi. SETSCI-Conference Proceedings, 42-46, (2019).
- [30] Billingsley, E., Ghommam, M., Vasconcellos, R., and Abdelkefi, A. On the Aerodynamic Analysis and Conceptual Design

of Bioinspired Multi-Flapping-Wing Drones. *Drones*, 5.3(64). (2021).

- [31] Başak, H. ve Demirhan, H. Kambur Balina'nın Yüzgeçlerinden Esinlenerek Oluşturulan Kanat Profil Veriminin CFD Analizi ile İncelemesi. *Gazi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 3.2(15-20), (2017).
- [32] Özbek, E. (2020). Elektromekanik Doğa Benzetimli Gözlem Mini İha Tasarımı: Yapısal ve Aerodinamik Analizleri. Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.

Uçucu Kül, Silis Dumanı ve Cam Elyaf Kullanılarak İyileştirilen Killin Mühendislik Performansının Değerlendirilmesi

Nagihan Doğan¹ , Müge Elif FIRAT^{1*} 

¹Firat University, Technology Faculty, Department of Civil Engineering, Elazığ, Turkey

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 22/11/2023
Düzeltilme: 10/07/2024
Kabul: 21/10/2024

Anahtar Kelimeler

Zemin stabilizasyonu
Uçucu kül
Silis dumanı
Cam elyaf
UCS

Article Info

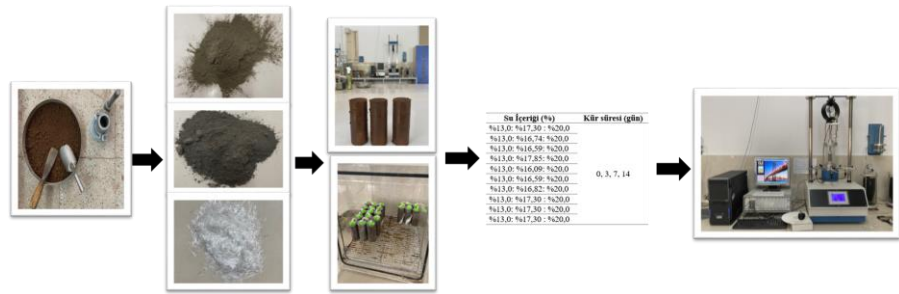
Research article
Received: 22/11/2023
Revision: 10/07/2024
Accepted: 21/10/2024

Keywords

Soil stabilization
Fly ash
Silica fume
Fiberglass
UCS

Graphical/Tabular Abstract (Grafik Özet)

Bu çalışmada uçucu kül, silis dumanı ve cam elyaf katkılarının killi bir zeminin mühendislik özellikleri üzerindeki etkileri farklı deneysel koşullarda incelenmiştir. / In this study, the effects of fly ash, silica fume and glass fibre additives on the engineering properties of a clayey soil were investigated under different experimental conditions.



Şekil A: Killi zeminin uçucu kül, silis dumanı ve cam elyaf katkısının UCS davranışı üzerindeki etkisi/**Figure A:** Effect of fly ash, silica fume and glass fiber addition on the UCS behavior of clay soil

Highlights (Önemli noktalar)

- Silis dumanı ve uçucu kül katkıları, killi zeminin plastik davranışını iyileştirmiştir. / Silica fume and fly ash additives improved the plastic behavior of the clay soil.
- Farklı su içeriklerinde yapılan tek eksenli basınç dayanımı (UCS) testlerinde, su içeriği arttıkça UCS değerlerinin düştüğü; ancak düşük su içeriğinde ve katkı eklenmiş numunelerde UCS değerlerinin yükseldiği gözlemlenmiştir. / Unconfined compression strength (UCS) tests at different water contents showed that UCS values decreased as the water content increased; however, UCS values increased at low water content and in samples with admixtures.
- %20 silis dumanı katkısı, UCS değerlerinde en etkili artışı sağlamış ve zeminin dayanım özelliklerini önemli ölçüde iyileştirmiştir. / The 20% silica fume admixture provided the most effective increase in UCS values and significantly improved the strength properties of the soil.

Aim (Amaç): Bu çalışmanın amacı, stabilizasyon malzemelerinin (silis dumanı, uçucu kül ve cam elyaf) killi zeminlerin mühendislik özellikleri üzerindeki etkilerini incelemek ve bu katkı maddelerinin zeminin dayanım, plastisite ve kırılma özelliklerini nasıl değiştirdiğini belirlemektir. / The aim of this study was to investigate the effects of stabilization materials (silica fume, fly ash and glass fiber) on the engineering properties of clayey soils and to determine how these additives change the strength, plasticity and brittleness properties of the soil.

Originality (Özgünlük): Farklı katkı malzemesinin farklı koşullarda bir arada kullanılarak zeminin dayanım, plastisite ve kırılma özellikleri üzerindeki bütüncül etkilerini ortaya koymasındır. / It is to reveal the holistic effects of different additives on the strength, plasticity and brittleness properties of the soil by using them together under different conditions.

Results (Bulgular): Çalışmada, katkı maddelerinin killi zeminin mühendislik özelliklerini iyileştirdiği ve özellikle %20 silis dumanının dayanımı artırdığı, düşük su içeriğinde daha yüksek dayanım sağladığı belirlenmiştir. / In the study, it was determined that the additives improved the engineering properties of the clay soil and especially 20% silica fume increased the strength and provided higher strength at low water content.

Conclusion (Sonuç): Çalışma sonuçları kil zeminin fiziksel ve mekanik performansını arttırmak için belirli oranlarda mineral katkı ve lif eklemelerinin başarılı bir stabilizasyon yöntemi olarak kullanılabileceğini göstermektedir. / The results of the study show that the addition of mineral additives and fibers at certain ratios can be used as a successful stabilization method to improve the physical and mechanical performance of clay soils.



Uçucu Kül, Silis Dumanı ve Cam Elyaf Kullanılarak İyileştirilen Kilin Mühendislik Performansının Değerlendirilmesi

Nagihan DOĞAN¹ , Müge Elif FIRAT^{1*} 

¹Firat University, Technology Faculty, Department of Civil Engineering, Elazığ, Turkey

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 22/11/2023
Düzelme: 10/07/2024
Kabul: 21/10/2024

Anahtar Kelimeler

Zemin stabilizasyonu
Uçucu kül
Silis dumanı
Cam elyaf
UCS

Özet

Bu çalışmada farklı stabilizasyon malzemelerinin killi bir zeminin mühendislik özellikleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bu amaçla killi zemine %5, %10, %20 oranlarında uçucu kül ile silis dumanı, %1, %1,5, %2 oranlarında cam elyaf eklenmiştir. Katkı maddeleri ile stabilize edilen zeminin fiziksel özelliklerini belirlemek için Atterberg limitleri ve Proktor deneyi uygulanmıştır. Dayanım özelliklerini değerlendirebilmek için stabilize edilmiş killi zemine farklı kür sürelerinde ve farklı su içeriklerinde tek eksenli basınç testi uygulanmıştır. Deneylerin sonucunda, silis dumanı ve uçucu kül katkılarının kil zeminin plastisite indeksi ve likit limit değerlerinde azalmaya neden olduğu görülmüştür. Silis dumanının %20 oranında ilave edilmesiyle plastisite indeksi %2,080 azalırken, %20 uçucu kül ilave edilmesiyle %0,042 azalmıştır. Serbest basınç dayanım (UCS) değerleri incelendiğinde, su içeriğinin artmasıyla birlikte killi zeminin UCS değeri azalmıştır. Optimum su içeriğinden düşük su içeriğine sahip killi zemin daha büyük UCS değerine sahipken, mineral katkı ve lif ilave edilmesiyle UCS değeri artmıştır. Silis dumanının UCS değerleri üzerinde daha etkili olduğu gözlemlenmiştir. Su içeriği arttıkça killi zeminin UCS yenilme mukavemetinin azaldığı görülmüştür. Silis dumanı, uçucu kül ve cam elyaf ilave edilen kil numunelerinin kırılma indeksi değerlerinin, optimum su içeriğinde doğal kil numunelerine göre daha kırılma hale geldiği görülmüştür. Elde edilen sonuçlar, kil zeminine ilave edilen mineral katkı malzemelerinin ve liflerin zeminin fiziksel ve mühendislik özellikleri üzerinde etkili olduğunu göstermiştir.

Evaluation of the engineering performance of clay improved using fly ash, silica fume and glass fiber

Article Info

Research article
Received: 22/11/2023
Revision: 10/07/2024
Accepted: 21/10/2024

Keywords

Soil stabilization
Fly ash
Silica fume
Glass fiber
UCS

Abstract

In this study, the effects of different stabilization materials on the engineering properties of a clay soil were investigated. To achieve this objective, silica fume and fly ash were added to the clayey soil in the proportions of 5%, 10% and 20%, and the mixture of glass fibers was obtained in the proportions of 1%, 1.5% and 2%. The physical properties of the soil with additives were studied by Atterberg limits and Proctor tests. The UCS tests were performed on the treated clay soil, considering different curing times, and different water contents to evaluate its strength properties. The experimental results showed that the inclusion of silica fume and fly ash resulted in a reduction of the plasticity index and liquid limits of the clay soil. Especially, the plasticity index decreased by 2.080% with the addition of 20% silica fume, and 20% fly ash resulting in a decrease of 0.042%. Analysis of the UCS values revealed a decrease in the strength of the clayey soil with increasing water content. The clayey soil exhibited higher UCS strength below the optimum water level, and the introduction of mineral additives and fibers further enhanced this strength. Silica fume had a more pronounced effect on UCS values. An increase in water content caused a decrease in the UCS of the clayey soil. The brittle index values of clay samples containing silica fume, fly ash, and glass fibers indicated that brittleness was increased comparing to natural clay sample at the optimum water content. These results emphasize the positive influence of added mineral additives and fibers on the physical and engineering properties of clay soils.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Kil zeminler, altyapı sistemleri için sıkça kullanılan bir zemin türüdür, ancak bu tür zeminlerin stabilize edilmesi çok önemlidir. Stabilizasyon işlemi, kil

zeminlerin mukavemetini artırmak, su emilimini azaltmak ve zeminin dayanıklılığını artırmak amacıyla gerçekleştirilir. Mühendislik uygulamaları sırasında, altyapı projelerinde kullanılan kil sınıfı zeminler, çevresel etmenlerden kaynaklanan su

içeriği değişiklikleri ve yüklerin etkisi altında değişkenlik gösterir. Bu değişen su içeriği, yüksek hacim değiştirme yeteneğine sahip kil sınıfı zeminlerin kıvam sınırlarında değişikliklere yol açabilir. Farklı plastisite özelliklerine sahip kil türlerinin, yapısal özellikler ve dayanıklılık üzerinde önemli bir rol oynamaktadır. Bu durum, zeminin dengesizleşmesine ve yer altı yapının zarar görmesine yol açabilir. Stabilizasyon işlemi, su emilimini azaltarak bu tür sorunların önlenmesine yardımcı olur. Ayrıca, kil zeminlerin mukavemeti genellikle düşüktür. Bu, üzerine inşa edilen altyapının uzun vadeli stabilitesini tehdit edebilir. Stabilizasyon, kil zeminlerin taşıma kapasitesini artırarak bu zeminlerin daha güvenli bir temel sağlamasına yardımcı olur. Son olarak, kil zeminlerin değişken yapısı nedeniyle, iklim koşulları ve mevsimsel değişiklikler zeminin özelliklerini etkileyebilir. Bu değişkenlik, altyapı projelerinin uzun vadeli dayanıklılığını tehlikeye atabilir. Stabilizasyon, zeminin mevsimsel değişikliklere karşı daha az duyarlı hale getirir. Sonuç olarak, kil zeminlerin altyapı sistemleri için stabilize edilmesi, projenin dayanıklılığını artırır, su hasarlarını önler ve ekonomik kazanım sağlar. Bu nedenle, kil zeminlerin stabilize edilmesi, altyapı projelerinin güvenli ve sürdürülebilir bir şekilde tamamlanmasını sağlamak için kritik bir adımdır [1-4]. Stabilizasyon teknikleri, zemin dayanıklılığında, termal denge, hidrolik özellikler ve diğer mühendislik özelliklerdeki iyileşmeyi içermektedir. Zeminlerin stabilizasyonu üç kategoride incelenebilir: biyolojik, fiziksel ve kimyasal. Biyolojik stabilizasyon, bitki kökleri tarafından yapılan bitki güçlendirme veya mikroorganizmaların biyosementasyonu ile gerçekleştirilir. Farklı mimari, morfolojik, fizyolojik ve biyotik özelliklere sahip bitki kökleri, toprakların fiziksel ve kimyasal evrimini etkileyerek yapısal kararlılık sağlar [5-7]. Mikroorganizmalar tarafından üretilen bağlayıcı maddeleri kullanan mikrobiyal olarak indüklenmiş kalsit çöktürme gibi biyosementasyon yöntemleri, zeminlerin kararlılığını artırmak için kullanılır. Fiziksel iyileştirme, zemin porozitesini ve tanecikler arası sürtünme veya kilitlemeyi değiştirerek, zemin fraksiyonlarını veya sıkılaşmayı değiştirme yoluyla, mukavemet ve kararlılık gibi fiziksel özelliklerini iyileştirme sürecidir [8-10]. Kimyasal stabilizasyonda ise, kil zeminlere kimyasal katkı maddeleri eklenir. En yaygın olarak kullanılan kimyasallar, kireç, çimento veya kimyasal polimerlerdir. Bu katkı maddeleri, kilin kohezyonunu artırır, zeminin sertleşmesini sağlar ve dayanıklılığını artırır. Bu tür kimyasalların yüksek etki alanı nedeniyle, son yıllarda biyopolimerik ve polimerik stabilizatörler gibi

temiz ve düşük maliyetli kimyasallar değerlendirilmiş ve önerilmiştir [11-15].

Kil zeminler tipik olarak bir yüke veya baskıya maruz kaldığında çeşitli şekillerde deformasyona uğrarlar. Tek eksenli basınç dayanımı, kil zeminin dikey bir yüke karşı direncini ifade eder ve zeminin sıkıştırma özelliklerini belirler. Bu değer, kil zeminin mukavemetini ve taşıma kapasitesini belirlemeye yardımcı olur. Bu dayanım değeri, mühendislik yapılarının temel tasarımında zeminin taşıma kapasitesinin ve stabilitesinin değerlendirilmesinde, zemin iyileştirme projelerinde kil zeminin davranışını anlamak ve uygun önlemleri alarak güvenli ve dayanıklı yapılar inşa etmeye yardımcı olmada önemlidir. Kil zeminlerdeki tek eksenli basınç dayanımı, zeminin fiziksel özelliklerine, mineralojisine, nem içeriğine ve yoğunluğuna bağlı olarak değişebilir. Bu nedenle, herhangi bir projede doğru dayanım değerlerinin belirlenmesi önemlidir [16-19].

Uçucu kül, silis dumanı ve cam elyaf kullanılarak killi zeminlerin mühendislik parametrelerinin iyileştirilmesi ile ilgili birçok çalışma yapılmıştır. Totiç vd. (2019) yapmış oldukları çalışmada killi zemine %5-%25 oranları arasında uçucu kül ilave ederek hazırladıkları zemin numunelerinin mühendislik özelliklerini incelemişlerdir. Optimum su içeriğinde ve 1, 8, 16, 32 gün kür sürelerinde hazırlanan numunelerin serbest basınç dayanımları değerlendirilmiştir. Uçucu kül içeriğinin artışıyla birlikte zemin numunelerinin mekanik özelliklerinde iyileşmenin olduğu gözlenmiştir [20]. Türköz vd. (2018) çalışmalarında killi zemin üzerinde kireç ve silis dumanının etkilerini incelemişlerdir. %3 kireç ile %0, %1, %3, %5, %10, %15, %20 oranlarında silis dumanı killi zemine eklenmiştir ve %10 silis dumanı ilavesiyle hazırlanan numunenin optimum stabilizasyonu sağladığı belirlenmiştir [21]. Rajabi vd. (2023) killi zemine %0,2, %0,5, %1, %1,5 polipropilen ve cam elyaf ekleyerek zemin üzerindeki etkisini incelemişlerdir [22].

Son yıllarda literatürde killerin tek eksenli basınç dayanımını artırmak için kimyasal ve mineral katkı malzemeleri ile liflerin kullanıldığı birçok çalışma yapılmış ve aşağıdaki gibi gruplar halinde sınıflandırılmıştır.

Çimento Katkılı Kil Zeminler: Çimento, kil zeminlerin dayanımını artırmak için sıkça kullanılan bir mineral katkı malzemesidir. Kil-çimentoyu bir araya getirilerek, zeminin dayanımı artırılır ve yapısal kararlılık sağlanır. Bu, altyapı projelerinde ve yolların güçlendirilmesinde yaygın

bir uygulamadır. Moreira vd. (2019) yaptıkları çalışmalarında, porozitenin, kuru birim hacim ağırlığın, çimento içeriğinin ve porozite/hacimsel çimento içeriği oranının siltli zemin-çatı kiremit atığı (ÇKA) karışımlarının tek eksenli basınç dayanımı üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Sonuçlar, çimento artışıyla, ÇKA-zemin karışımlarının dayanımının doğrusal bir şekilde arttığını göstermektedir. Öte yandan, sabit bir çimento yüzdesinde ÇKA eklenmesi, örneklerin UCS'sini azaltırken, porozitenin azalması UCS'yi arttırmaktadır [23].

Uçucu kül Katkılı Kil Zeminler: Kalsiyum karbonat gibi mineral katkıları, kil zeminlerin dayanımını artırmak için kullanılır. Bu katkıları, kil mineralleriyle reaksiyona girerek zeminin sertleşmesini teşvik eder. Bilici vd. (2020) kil zeminin dayanımı üzerinde farklı oranlarda ve farklı kür sürelerinde uçucu kül ve yüksek fırın cürufu malzemelerinin etkilerini incelemişlerdir. Maksimum dayanım %3 kireç + %12 uçucu kül ve %3 kireç + %9 yüksek fırın cürufu ilavesinde belirlenmiştir. Kür öncesinde atık malzemeler ile stabilizasyonda tek eksenli basınç dayanımlarının eşit olduğu gözlenirken, kür süresinin artışı ile uçucu külün yüksek fırın cürufuna nazaran daha fazla artış gösterdiği belirlenmiştir [24]. Çimen ve Keleş (2020) çalışmalarında, yüksek plastisiteli kile farklı oranlarında uçucu kül ilave ederek fiziksel özellik ve serbest basınç dayanımı deneylerini yürütmüşlerdir. Ardından, bu deney serilerine sabit oranda kireç ilavesiyle aynı deneyleri tekrarlamışlardır. Deneysel çalışmalar, kullanılan uçucu külün yüksek plastisiteli kilin mekanik özelliklerini iyileştirdiğini göstermiştir [25].

Polimer Lifler: Polimer lifler, kil zeminlerin dayanımını artırmak ve çatlak oluşumunu azaltmak için kullanılan lif malzemeleridir. Bu lifler, zemin matrisini güçlendirir ve iyileştirir. Şahbaz ve Ünsever (2020) çalışmalarında, zemini iyileştirmek için farklı oranlarda ve farklı kürlenme sürelerinde çimento ve polipropilen lif kullanarak katkı ve katkısız numunelerin serbest basınç dayanımı, CBR ve şişme deneylerini kıyaslamışlardır. Sonuç olarak, katkı maddelerinin katkısız zeminin mühendislik özellikleri üzerinde büyük oranda iyileşme sağladığı görülmüştür [26].

Cam Elyaf Katkılı Kil Zeminler: Cam elyaf, kil zeminlerin mekanik özelliklerini artırmak için kullanılan bir lif malzemesidir. Bu katkı, kil zeminlerin dayanıklılığını artırabilir [27-29].

Kil ve Silika Katkılı Karışımlar: Kil ve silika gibi mineral katkıları, kil zeminlerin tek eksenli basınç

dayanımını geliştirmek için kullanılmıştır. Bu tür karışımlar, zeminin mukavemetini artırabilir [30-32].

Altyapı malzemesi olarak kullanılacak killerin stabilizasyonu, geoteknik mühendisliğinde önemli bir konudur ve zeminin mekanik özelliklerini geliştirerek mühendislik projelerinin dayanıklılığını artırabilir. Bu bağlamda, stabilizasyonda mineral katkı malzemelerinden uçucu kül ve silis dumanı ile lif kullanımının kilin fiziksel ve mühendislik özelliklerine etkisinin farklı çevre koşullarında araştırılması büyük önem taşımaktadır.

Uçucu kül, genellikle termal enerji santrallerinde kömür yakılması sırasında oluşan yan ürünlerden elde edilir. Bu malzeme, kalsiyum oksit (CaO), silis (SiO₂), alüminyum oksit (Al₂O₃), demir oksit (Fe₂O₃) gibi bileşenleri içerir. Zemin stabilizasyonunda uçucu kül, toprakla karıştırılarak kullanılır. Kalsiyum oksit içeriği nedeniyle, uçucu kül, toprakla reaksiyona girerek zeminin sıkıştırılabilirliğini artırır. Uçucu kül, zeminde suyun tutulmasını iyileştirir ve böylece donma-çözülme etkilerine karşı direnç sağlar. Ayrıca, toprakla karıştırıldığında zeminin taşıma kapasitesini artırabilir ve yolu veya yapının temelini güçlendirebilir. Öte yandan silis dumanı, silika (silis) mineralinin öğütülmesi veya özel işlemler sırasında elde edilir. Kimyasal olarak, silis dumanı yüksek oranda silika (SiO₂) içerir. Zemin stabilizasyonunda silis dumanı, toprakla karıştırılarak kullanılır ve bu, zeminin kohezyonunu (yapışkanlığını) artırır. Bu da zeminin dayanıklılığını ve taşıma kapasitesini iyileştirir. Silis dumanı, zeminin su geçirmezliğini artırabilir ve erozyona karşı koruma sağlayabilir.

Çalışma kapsamında, kil zeminlerin stabilizasyonu için uçucu kül, silis dumanı ve cam fiberin farklı kombinasyonları kullanılarak, zeminlerin fiziksel özellikleri ve tek eksenli basınç dayanımlarını incelenmiştir. Bu çalışma, zemin stabilizasyonu alanında yeni ve kapsamlı bir araştırma sunmaktadır, farklı su içerikleri, kürlenme süreleri ve katkı oranları altında her malzemenin doğal zemin üzerindeki etkisi detaylı bir şekilde analiz edilmiştir. Öte yandan çalışma ile farklı su içerikleri ve kürlenme sürelerinin zeminlerin dayanıklılığına etkisini araştırarak, bu iki önemli parametrenin zemin stabilizasyonu sürecine olan etkisinin anlaşılmasına olanak sağlamaktadır. Zeminlerin tek eksenli basınç dayanımı, birçok inşaat projesi ve temel tasarımı için kritik bir parametredir. Bu çalışma, farklı katkı malzemelerinin zeminlerin tek eksenli basınç dayanımı üzerindeki etkisini ölçerek, mühendislik uygulamaları için önemli veriler

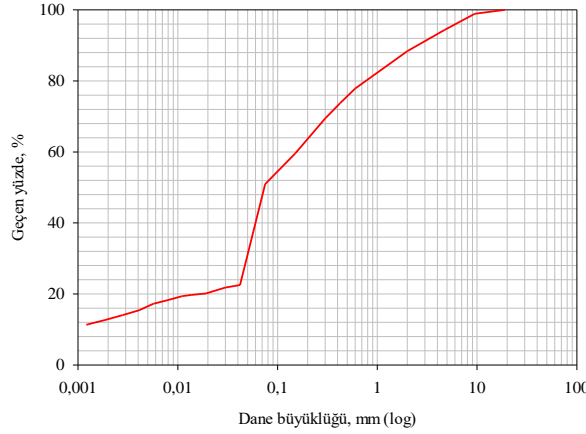
sunmaktadır. Çalışma sonuçları, zemin stabilizasyonu projeleri için tasarım ve uygulama rehberleri oluşturmak amacıyla kullanılabilir. İnşaat mühendisleri ve araştırmacılar için pratik ipuçları sağlayarak, bu alandaki çalışmalara katkıda bulunmayı hedeflenmektedir.

2. MATERYAL VE METOT (MATERIALS AND METHOD)

2.1. Materyal (Material)

Zemin (Soil)

Bu çalışmada kullanılan zemin örnekleri, Elazığ ilinin Ataşehir Mahallesi'nde yer alan bir binanın temel kazısı sırasında çıkarılan topraklardan elde edilmiştir. Bu örnekler, kazı işlemleri sırasında özenle toplanmış ve analiz için uygun şekilde muhafaza edilmiştir. Bu zeminin likit limit değeri %49,45, plastisite indeksi %24,04, maksimum kuru birim hacim ağırlığı 1,720 gr/cm³ ve optimum su muhtevası %17,3 olarak test edilmiştir. Ayrıca, özgül ağırlığı 1,66 gr/cm³ olan bu zemin numunesi, birleştirilmiş sınıflandırma sistemine (USCS) göre düşük plastisiteli kil (CL) sınıfına dahil edilmiştir. Şekil 1'de, killi zeminin granülometre eğrisi gösterilmiştir.



Şekil 1. Araştırmada kullanılan kilin granülometre eğrisi (Granulometer curve of the clay used in the study)

Uçucu Kül (Fly Ash)

Uçucu kül, termal enerji üretimi sürecinden kaynaklanan bir yan ürün olarak ortaya çıkar ve genellikle kömür yakma tesislerinde bulunur. Bu materyalin zayıf zemin sistemlerini iyileştirme açısından birçok avantajı bulunmaktadır. İlk olarak, uçucu külün maliyet açısından etkin bir malzeme olması dikkat çeker. Üretim tesislerinde yan ürün olarak elde edildiğinden, genellikle düşük maliyetle veya hatta ücretsiz olarak temin edilebilir. Bu, inşaat projelerinin maliyetini azaltarak bütçeye olumlu katkılar sağlar [27, 28]. İkinci olarak, uçucu külün kaolin killeriyle karıştırılması, zeminin mukavemetini ve dayanıklılığını artırır. Bu karışım, zeminin mekanik özelliklerini iyileştirir ve temel ile

yol yapılarının taşıma kapasitesini artırırken aynı zamanda mühendislik yapılarının uzun ömürlülüğünü artırarak bakım maliyetlerini azaltır [29]. Üçüncü olarak, uçucu külün kullanımı çevresel faydalar sunar. Bu yan ürün, doğal kaynakların tükenmesini engeller ve çöplüklerde atık miktarını azaltır. Bu da sürdürülebilir bir çevre politikasına uyum sağlamaya yardımcı olur. Bu çalışma kapsamında, mineral katkı malzemesi olarak uçucu kül tercih edilmiştir, çünkü ekonomik ve sürdürülebilir bir malzeme olmasıyla birlikte kolayca elde edilebilir bir kaynaktan gelmektedir. Şekil 2'de, çalışmada kullanılan Bursa enerji santralinden temin edilen F sınıfı uçucu külün görüntüsü ve Tablo 1'de kimyasal bileşenleri gösterilmiştir.

Tablo 1. Uçucu külün kimyasal bileşenleri (Chemical components of fly ash)

	SiO ₂	MgO	Fe ₂ O ₃	CaO	Al ₂ O ₃
Uçucu kül	48,53%	2,28%	7,59%	9,48%	24,61%



Şekil 2. Araştırmada kullanılan F-sınıfı uçucu kül ve silis dumanı (F-class fly ash and silica fume used in the study)

Silis Dumanı (Silica Fume)

Silis dumanı, inşaat ve yapı endüstrisinde yaygın olarak kullanılan bir ince toz malzemedir. Genellikle endüstriyel proseslerin bir yan ürünü olarak oluşur ve uygulamalarda çeşitli avantajlar sunar. Silis dumanı, genellikle amorf silika (silikon dioksit) olarak adlandırılan ince partiküllerden oluşur. Kimyasal olarak silikon (Si) ve oksijen (O) atomlarından meydana gelir. Silis dumanı partikülleri oldukça küçüktür ve genellikle mikron veya nano ölçekteki boyutlara sahiptir. Bu küçük partikül boyutu, malzemenin yüzey alanını artırır ve çeşitli uygulamalarda etkili bir şekilde kullanılmasını sağlar. Ayrıca, büyük bir yüzey alanına sahiptir. Bu özellik, kimyasal reaksiyonların ve bağlanmanın artmasına katkıda bulunur, bu da

malzemenin diğer malzemelerle iyi bir şekilde etkileşime girmesini sağlar. Silis dumanı, beton, harç, fibercement levhalar, polimer kompozitler ve diğer yapı malzemelerinde mükemmel bir katkı maddesi olarak kabul edilir. Öte yandan, katılaşma zamanını hızlandırma, mekanik dayanımı artırma, su geçirgenliğini azaltma, kimyasal reaksiyonlarla iyileştirme, çevresel faktörlere direnç sağlama, sürdürülebilirlik gibi özelliklerinden dolayı killi zeminlerin stabilizasyonunda sıklıkla tercih edilen malzemelerden biridir. Bu çalışma kapsamında, ikinci mineral katkı malzemesi olarak Antalya Eti Metalurji'den temin edilen silis dumanı kullanılmıştır. Şekil 2'de, çalışmada kullanılan silis dumanı ve Tablo 2'de kimyasal bileşenleri gösterilmiştir.

Tablo 2. Silis dumanının kimyasal bileşenleri (Chemical components of silica fume)

	CaO	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	MgO
Silis dumanı	0,40	94,10	1,50	0,90	94,10	0,40	0,90	0,10

Cam elyaf (Fiberglass)

Cam elyaf, cam malzemenin eritilip çekilerek ince elyaf veya iplikler haline getirilmesi sonucu elde edilen bir tür cam fiberdir. Cam elyafın özellikleri, camın dayanıklılığı ve mukavemeti ile öne çıkar. Cam elyaf, ağırlıkça hafif olmasına rağmen yüksek mukavemet, kimyasal dayanıklılık ve ısıya karşı dayanıklılık gibi birçok avantaja sahiptir. Cam elyaf, killerin mühendislik özelliklerinin stabilizasyonunda tercih edilen güçlü bir katkı maddesidir. Kil tabakasının mukavemet artışı,

çatlak direnci, su kararlılığı, sürdürülebilirlik, izolasyon, yük hafifletme gibi özellikler sunan çevre dostu bir malzemedir. Bu sayede, inşaat projelerinde daha güvenli, dayanıklı ve uzun ömürlü yapılar oluşturulması mümkün olur. Bu çalışmada kullanılan cam elyaf Fiber Elyaf Kompozitsan. ve Tic. Ltd. Şti. tarafından temin edilmiş olup killi zemini stabilize etmek için kullanılmıştır. Şekil 3'de araştırmada kullanılan cam elyaf gösterilmiştir. Cam elyafın fiziksel özellikleri ise Tablo 3'de gösterilmiştir.

Tablo 3. Cam elyafın fiziksel özellikleri (Physical properties of fiberglass)

	Çekme Dayanımı	Elastisite Modülü	Özgül Ağırlık	Uzunluk	Çap
Cam Elyaf (Fiberglass)	3400 MPa	77 GPa	2,66 g/cm ³	6 mm	13 µ



Şekil 3. Araştırmada kullanılan cam elyaf (Fiberglass used in the study)

2.2. Deneysel Metot (Experimental Method)

Bu çalışmanın temel amacı, kil stabilizasyonunda uçucu kül, silis dumanı ve cam elyafın etkisini farklı çevre koşulları için değerlendirerek karşılaştırmalı bir analiz sunmaktır. Bu anlamda, kil zemine değişen oranlarda (ağırlıkça %0, %5, %10 ve %20) uçucu kül ve silis dumanı ayrıca farklı oranlarda (ağırlıkça %0, %1, %1,5 ve %2) cam elyaf eklenerek her bir katkı malzemesinin etkisini değerlendirebilmek amacıyla katkılı numuneler

hazırlanmıştır. Bu katkı oranları daha önceki yıllarda yapılmış olan literatür çalışmalarının sonuçları göz önüne alınarak seçilmiştir. Uçucu kül, silis dumanı ve cam elyafı stabilize edilmiş numunelerin fiziksel özelliklerini değerlendirebilmek için Atterberg limitleri ve Proktor deneyleri yapılmış ve ayrıca dayanım özelliklerini değerlendirmek için tek eksenli basınç (UCS) testleri farklı kür süreleri altında (0, 3, 7 ve 14 gün) yürütülmüştür. Deneysel program detaylarıyla Tablo 4'de gösterilmektedir.

Tablo 4. Deneysel program (Experimental programme)

No	Numune	Su İçeriği (%)	Kür süresi (gün)	Test
S1	Z	% 13,0: % 17,30 : % 20,0	0, 3, 7, 14	UCS Fiziksel Testler
S2	Z+%5SD	% 13,0: % 16,74: % 20,0		
S3	Z+%10SD	% 13,0: % 16,59: % 20,0		
S4	Z+%20SD	% 13,0: % 17,85: % 20,0		
S5	Z+%5UK	% 13,0: % 16,09: % 20,0		
S6	Z+%10UK	% 13,0: % 16,59: % 20,0		
S7	Z+%20UK	% 13,0: % 16,82: % 20,0		
S8	Z+%1CE	% 13,0: % 17,30 : % 20,0		
S9	Z+%1,5CE	% 13,0: % 17,30 : % 20,0		
S10	Z+%2CE	% 13,0: % 17,30 : % 20,0		

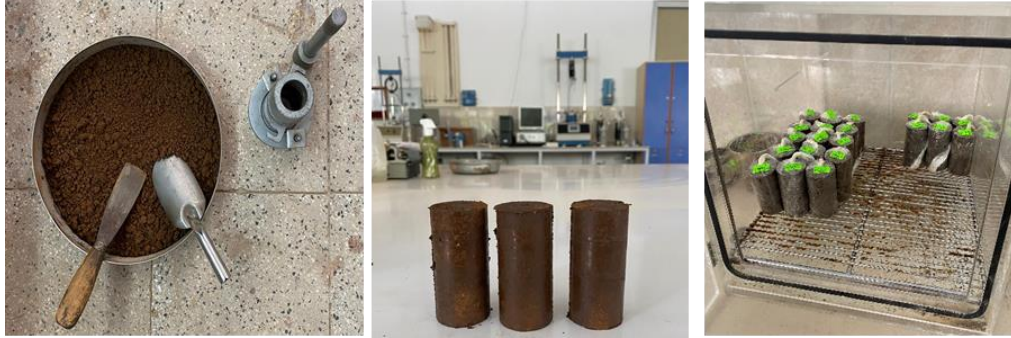
Z: zemin; UK: uçucu kül; SD: silis dumanı; CE: cam elyaf

Deney örneklerinin hazırlanma süreci Şekil 4'de gösterilmektedir. Kuru zeminin ağırlıkça yüzdesine bağlı olarak farklı mineral katkı malzemeleri (uçucu kül ve silis dumanı) farklı oranlarda (%0, %5, %10 ve %20) kullanılmıştır. Katkılı zemin numunelerinin farklı su içeriği seviyelerinin numunelerin fiziksel ve mühendislik özellikleri üzerindeki etkisini incelemek için çalışmada optimum su içeriğinde, optimum su içeriğinden küçük ve büyük içeriklerde olmak üzere üç farklı su oranında UCS deneyleri yürütülmüştür (Tablo 4). Standart Proktor deneyi ile belirlenen kompaksiyon parametreleri, her farklı oran için eklenen farklı mineral katkı malzemesi (uçucu kül ve silis dumanı) miktarını hesaplamak için kullanılmıştır.

Numuneleri hazırlamak için kil ve mineral katkı malzemeleri kuru olarak karıştırılmıştır. Tablo 4'de sunulan optimum su içeriği (w_{opt}) miktarlarına göre su, kil+uçucu kül ve kil+silis dumanı karışımlarıyla karıştırılmış ve karışımlardaki suyun kaybını önlemek için plastik torbalara konularak 24 saat boyunca saklanmıştır. Hazırlanan karışımların sıkıştırılması öncesinde su seviyesi tekrar kontrol edilmiştir. Kil+mineral katkı maddesi+su karışımlarından UCS deney numunelerini hazırlamak için Harvard minyatür tokmağı kullanılarak üç katman halinde sıkıştırılmıştır. Numunelerin ilk tabakası kalıba yerleştirilip sıkıştırılmış, ardından geriye kalan iki katman aynı şekilde ayrı ayrı yerleştirilerek sıkıştırılmış ve

deney numuneleri çapı 3.80 cm ve yüksekliği 7.60 cm olan boyutlarda hazırlanmıştır. Her örnek kalıptan çıkarılarak ve su içeriğini korumak için

hızla plastik torbalara konularak nem kaplarında muhafaza edilmiştir.

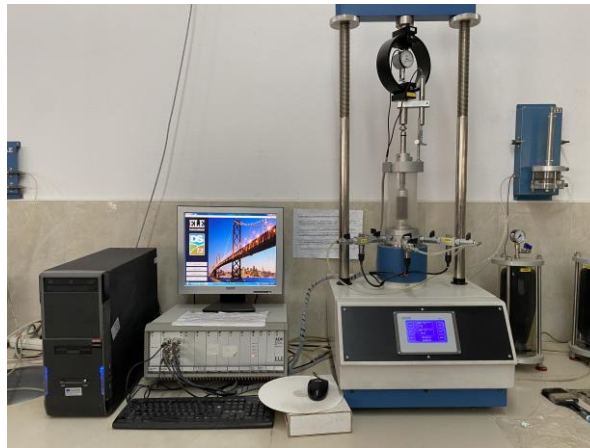


Şekil 4. Numune hazırlama süreci (Sample preparation process)

Öte yandan, kuru zeminin ağırlıkça yüzdesine bağlı olarak farklı oranlarda (%0, %1, %1,5 ve %2) cam elyaf kullanılmıştır. Literatür çalışmaları ışığında, kil partikülleri ve cam elyaf fiber homojen karışmadıklarından bu tip malzemelerle takviye edilmiş zemin numunelerinin kompaksiyon parametrelerinin (γ_{kmax} ve w_{opt}) katkısız kil zeminlerle neredeyse aynı olduğu belirlenmiştir [33, 34]. Yani cam elyaf fiberler kompaksiyon parametreleri üzerinde yok denecek kadar az etkiye sahiptir. Bundan dolayı bu çalışmada, kil numunelerde katkı malzemesi olarak cam elyaf kullanıldığında kompaksiyon parametrelerini değiştirmede kabul edilmiştir.

Serbest basınç dayanımı (UCS) prosedürü (Unconfined compression strength procedure)

Zeminlerin serbest basınç dayanımı, zemin davranışının tahmin edilmesi ve mühendislik çözümlerinin geliştirilmesinde kritik bir laboratuvar deneyidir. Mekanik özellikleri belirlemek amacıyla, silis dumanı, uçucu kül ve cam elyaf katkılı kil numuneler üzerinde UCS testleri gerçekleştirilmiştir. UCS testleri, ASTM D2166 [35] standardına uygun şekilde yürütülmüştür. Numunelerin UCS değerleri, Şekil 5’de gösterildiği gibi Fırat Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Geoteknik Laboratuvarı’nda bulunan üç eksenli test cihazı kullanılarak ölçülmüştür. Numuneler dakikada 0,760 mm’lik bir hızla yüklenmiştir. Yükleme işlemi, numune kırılana kadar tekrarlanmıştır.



Şekil 5. UCS deney aleti (UCS test apparatus)

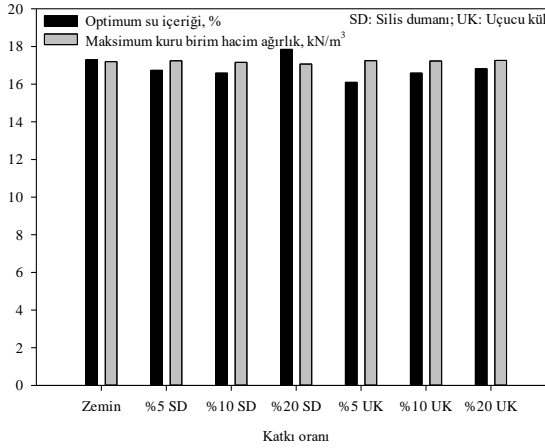
3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

3.1. Katkı malzemelerinin killerin fiziksel özellikleri üzerindeki etkisi (Effect of additives on the physical properties of clays)

Bu çalışmada, farklı karışım oranlarında kullanılan mineral katkı malzemelerinden uçucu kül ve silis dumanının doğal kil zeminin fiziksel özelliklerine etkisi ortaya konulmuştur. Bu kapsamda, kompaksiyon parametreleri [36] ve Atterberg limitleri [37] ilgili ASTM standartlarına uygun olarak yürütülmüş ve sonuçları bu bölümde tartışılmıştır.

Şekil 6'da farklı karışım oranlarında uçucu kül ve silis dumanı katkılı kil numunelerinin kompaksiyon parametrelerindeki değişimi (γ_{kmax} ve w_{opt}) gösterilmektedir. Şekilde görüldüğü gibi killi zemine mineral katkı malzemelerinin eklenmesiyle karışımların γ_{kmax} değerleri az miktarda artarken, w_{opt} değerlerinde düşüş görülmektedir. Sonuçlar, her iki katkı yüzdesi oranlarının %5'e artışı maksimum kuru yoğunluk değerindeki artış oranını arttırırken, optimum su içeriği oranını azaltmaktadır. Optimum su içeriğindeki azalma, kilin yerini su parçacıklarına karşı daha düşük afiniteye sahip olan mineral katkı malzemesinin alması nedeniyle açıklanabilir.

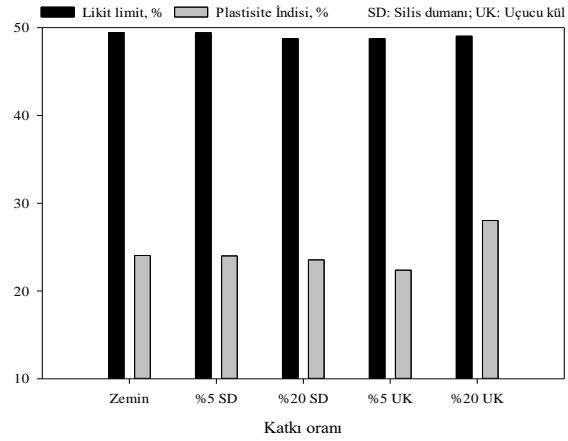
Öte yandan, killi zemin numunesine %20 oranında silis dumanı eklenmesi, daha yüksek özgül ağırlığa sahip karışım elde edilmesinden dolayı maksimum kuru birim hacim ağırlığın azalmasına yol açmıştır. Ayrıca silis dumanı numunelere kil zeminden daha



Şekil 6. Kompaksiyon parametrelerinin katkı malzemelerine göre değişimi (Variation of compaction parameters according to additives)

büyük bir yüzey alanı sağlamaktadır. Bu, optimum su içeriğinin yükseltilmesinden önce karışımları sıkılaştırmak için ek suya ihtiyaç duyulduğunu göstermektedir.

Şekil 7'de farklı mineral katkı oranının kil zeminlerin kıvam limitlerine etkisi gösterilmektedir. Silis dumanı ve uçucu kül oranlarının artması ile doğal kil zeminin plastisite indeksi ve likit limit değerlerinde azalma gözlenmiştir. Bunun nedeni, mineral katkı malzemelerinin, çimento değeri az olan ve büyük parçacıklara sahip olan tüm kil parçacıklarını kaplaması ve bağlaması olabilir. Bu etki ise mineral katkı malzemesi ile alüminli malzemeler arasındaki puzolanik reaksiyon ile ifade edilmektedir [41]. Doğal kil zemine %20 oranında silis dumanı ilavesi plastisite indeksini %2,080 azaltırken, %20 uçucu kül ilavesi %0,042 azaltmaktadır.



Şekil 7. Kıvam limitlerinin katkı malzemelerine göre değişimi (Variation of consistency limits according to additives)

3.2. Katkı malzemelerinin serbest basınç dayanımı (UCS) üzerindeki etkileri (Effects of additives on the UCS)

Şekil 8'de, farklı oranlarda uçucu kül, silis dumanı ve cam elyaf fiber içeren kil numunelerinin serbest basınç dayanımı değerleri farklı su içerikleri ve kür sürelerine göre gösterilmektedir. Killi zeminin UCS yenilme mukavemeti su içeriğinin artmasıyla azalmıştır. Bazı araştırmacılar [38] su içeriğinde de benzer bir eğilim bulmuş, ancak bazıları [39, 40] su içeriği arttıkça basınç dayanımının önce arttığını, sonra azaldığını ortaya koymuştur. Düşük su içeriklerinde hazırlanan kil numuneler üzerinde maksimum UCS değerleri gözlenmiştir. Ayrıca katkı oranı ilavesi, kür süresinin arttırılması gibi etkenlerde numunelerin UCS değerlerini doğal kil numunelere göre arttırmıştır.

Optimum su içeriğinden küçük su içeriklerindeki kil numuneleri optimum numunelere göre daha büyük UCS dayanımına sahipken, mineral katkı ve liflerin varlığı da UCS dayanımını doğal kil numunelere göre arttırmıştır. Maksimum UCS dayanımları mineral katkı malzemeleri için düşük karışım oranlarında elde edilirken, lif katkısı için yüksek oranlarda elde edilmiştir. %5 silis dumanı katkısı kil numunelerin UCS dayanımını %102,86 oranında arttırırken, %5 uçucu kül katkısı ise %87,23 oranında arttırmıştır. %2 oranında cam elyaf eklenmesi ise kil numunelerin UCS dayanımı %175,74 oranında iyileştirmiştir. Öte yandan, maksimum sayıda kür süresine maruz kalan numunelerin her iki mineral katkı oranının %10'a arttırılmasıyla UCS değerleri artmıştır. Yani %10 silis dumanı katkısı ve %10 uçucu kül katkısı %13 su içeriğine sahip kil numunelerinin maksimum

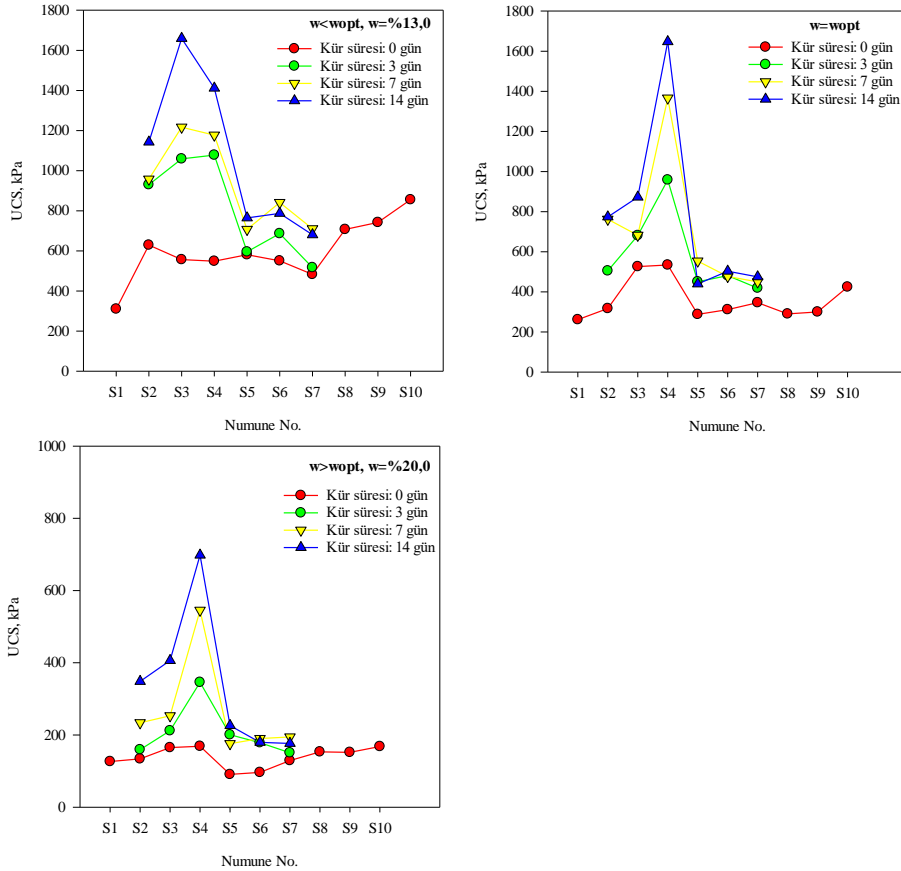
sayıda kür sonrası optimum oranını yansıtmaktadır. Mineral katkı oranının %20'ye artırılması UCS dayanımlarında azalma göstermiştir.

Optimum su içeriklerinde hazırlanan numunelerde kür öncesi, maksimum karışım oranında (%20) eklenen silis dumanı UCS değerini %104,28 oranında artırırken, maksimum karışım oranında (%20) ise %32,48 oranında ve maksimum karışım oranında (%2) cam elyaf eklenmesi ise %62,21 oranında kil numunelerin UCS değerini arttırdığı gözlenmiştir. Aynı su içeriğinde kür süresinin artışı numunelerin UCS değerini büyük oranda artırırken maksimum UCS değeri %20 katkı silis dumanı ve %10 katkı oranlı uçucu kül numunelerinde elde edilmiştir.

Optimum su içeriklerinden daha büyük su içeriklerinde ($w=20$) hazırlanan numunelerde kür öncesi UCS değerleri optimum oranda hazırlanan numunelere göre azalmıştır. Silis dumanı ve uçucu külün maksimum oranları bu su içeriğinde maksimum UCS değerine sahipken silis dumanı UCS değerini %16,20 oranında, uçucu kül ise %2,06 oranında arttırmıştır. Ayrıca maksimum karışım oranında eklenen (%2) cam elyaf ise %32,92 oranında kil numunelerin UCS değerini arttırmıştır. Yüksek su içeriğinde kür süresinin artışı

numunelerin UCS değerini büyük oranda artırırken maksimum UCS değeri %20 katkı silis dumanı ve %5 katkı oranlı uçucu kül numunelerinde elde edilmiştir. Uçucu külün belirli bir miktarı kil numunelerinin mekanik özelliklerini artırabilir. Ancak, bu artış belirli bir optimum uçucu kül oranıyla sınırlı olabilir. Optimum oranın üzerine eklenen uçucu kül, numunelerin mekanik özelliklerini negatif yönde etkilediği görülmektedir. Öte yandan, %20 uçucu kül oranı kil yapısındaki dengeyi bozarak dayanıklılığın azalmasına neden olmuştur.

Optimum su içeriğine sahip %5 silis dumanıyla hazırlanan zemin numunesinin 3 günlük kür süresi sonunda dayanımında %58,98'lik bir artış olmuştur. 7 günlük kür süresi sonunda ise dayanımında %140,1, 14 günlük kür süresi sonunda ise dayanımında %143,65'lik bir artış olmuştur. Optimum su içeriğine sahip %20 uçucu kül ilaveli zemin numunesinin 3 günlük kür süresi sonunda dayanımında %20,89'luk bir artış olmuştur. 7 günlük kür süresi sonunda %29,97, 14 günlük kür süresi sonunda ise dayanımında %37,11'lik bir artış meydana gelmiştir. Elde edilen sonuçlara göre uygulanan kür süreleri zeminin dayanımının artmasına katkıda bulunmuştur.



Şekil 8. Farklı su içeriklerinde ve kür sürelerinde katkı malzemelerinin kilin UCS performansı üzerine etkisi (Effect of additives at different water contents and curing times on UCS performance of clay)

3.3. Katkı malzemelerinin kilin kırılma indeksi (IB) ve sekant modülü (Es50) üzerine etkileri (Effects of additives on brittleness index (IB) and secant modulus (Es50) of clay)

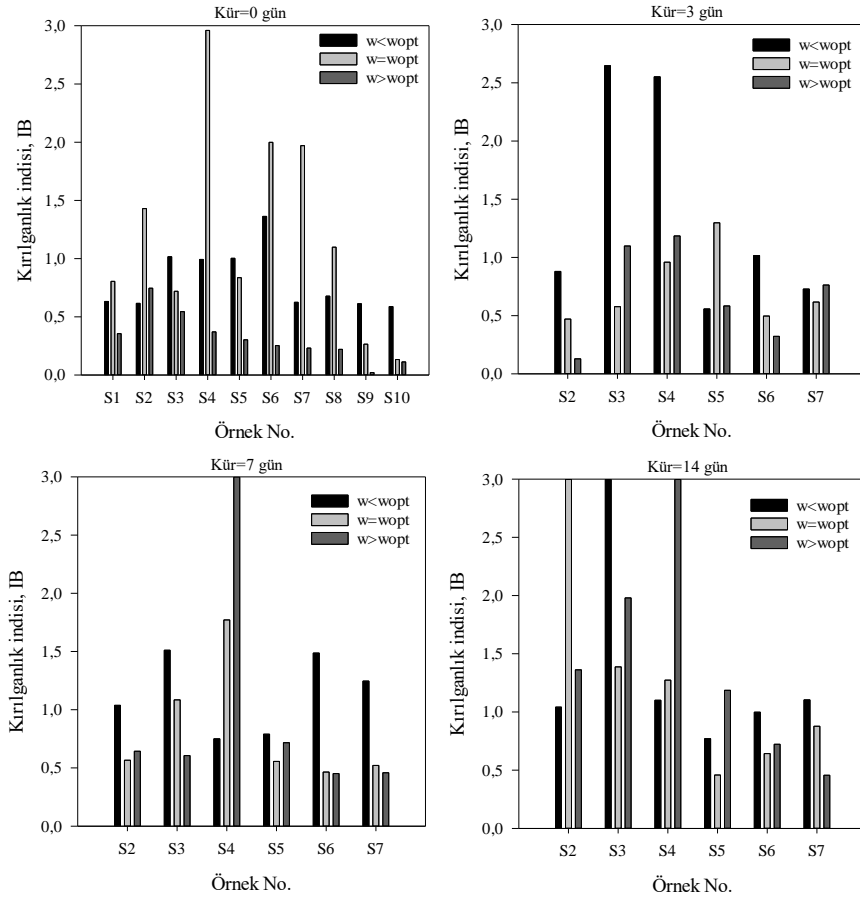
Kil numunelerine farklı su içeriklerinde silis dumanı, uçucu kül ve cam elyaf ilavesi, serbest basınç davranışları üzerinde önemli bir etkiye sahip olup numunelerin kırılma davranışında değişikliklere yol açmıştır. Numunelerin sünek ve kırılma özelliklerini açıklamak için, Denklem 1'de sunulan kırılma indeksi (IB) formülü kullanılarak hesaplanan değerler Şekil 9'da sunulmuştur.

$$IB = \frac{q_f}{q_{ult}} - 1 \quad (1)$$

q_f : UCS yenilme; q_{ult} : nihai UCS. IB değerleri sıfıra yaklaştıkça, numuneler gerilme-şekil değiştirme

eğrilerinde daha sünek bir yenilme davranışı sergilerken; uzaklaştıkça daha gevrek bir kırılma gözlenir [42].

Şekil 9'da gösterilen kırılma indeksi değerlerine göre optimum su içeriğinde doğal kil numunelere silis dumanı ve uçucu kül eklenmesi numuneyi daha kırılma hale getirmektedir. Silis dumanı ve uçucu kül, kil numunesinin kimyasal bileşimini değiştirerek, kil minerallerinin daha sıkı bir şekilde bir arada tutulmasını zorlaştırabilir, bu da numunenin daha kolay kırılmasına yol açar. Öte yandan, düşük su içeriğindeki kil numunesi optimum su içeriğindeki duruma göre daha sünek bir davranış sergilerken, yüksek su içeriğindeki kil numuneleri optimum ve düşük su içeriğindeki duruma göre daha sünek bir davranış sergilemiştir.



Şekil 9. Katkılı kil numunelerin kırılma indeksi değerleri (Brittleness index values of reinforced clay samples)

Kil mineralleri, su molekülleri ile etkileşime girerken farklı yapısal değişiklikler yaşayabilirler ve bu, kil numunelerinin davranışını etkiler. Düşük su içeriğine sahip kil numuneleri arasındaki kimyasal bağlar daha güçlüdür. Su miktarının sınırlı olması, kil minerallerinin daha yakın bir şekilde bir arada kalmasına ve numunenin sert ve kırılğan olmasına neden olabilir. Bu nedenle, düşük su içeriğine sahip kil numuneleri daha az sünek olabilir ve çatlama eğiliminde olabilirler. Yüksek su içeriğine sahip kil numunelerindeki fazla su, kil minerallerinin arasında kimyasal bağları zayıflatabilir. Bu, numunenin daha esnek ve plastik bir davranış sergilemesine neden olabilir.

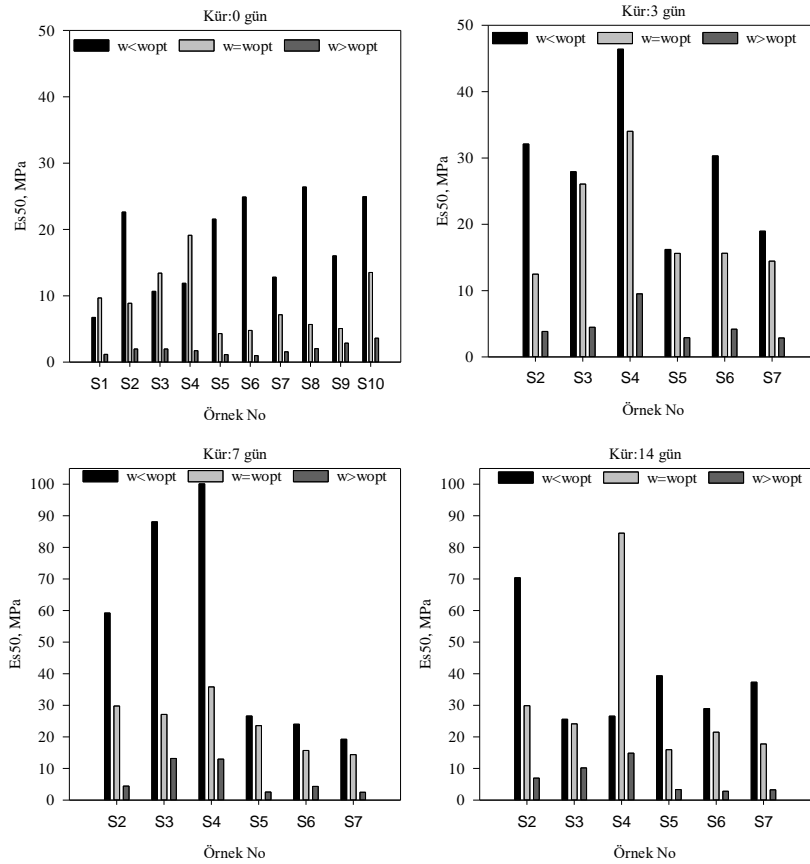
Kil numunelerin uçucu kül, silis dumanı ve cam elyaf ilavesi ile farklı su içeriklerinde ve farklı kür süreleri altında farklı davranışlar sergilediği görülmüştür. Katkı malzemelerinin ilavesi ile optimum su içeriğinden daha yüksek içerikte hazırlanan numuneler diğer su içeriklerine göre sünek davranış sergilerken, optimum oranda hazırlanan katkılı numuneler en gevrek davranış sergilemiştir. Optimum su içeriğinde hazırlanan katkılı numunelere göre maksimum kür süresi sonunda maksimum oranda eklenen silis dumanı

numune davranışını daha sünek hale getirirken, uçucu külün maksimum oranı numuneyi daha gevrek hale getirmektedir. Her iki katkı malzemesi içinde kil malzemesi maksimum kürlenme ile daha sünek hale gelmiştir.

Zeminin ortalama rijitliğini temsil eden sekant modülü (E_{s50}), zemin malzemeleri için önemli bir tasarım parametresidir. Gerilme-şekil değiştirme eğrisi üzerindeki belirli bir noktada aksel gerilmenin karşılık geldiği aksel şekil değiştirmeye oranının hesaplanmasıyla belirlenir. Başka bir deyişle, sekant modülü, sıfır noktasından tepe deviyör gerilmesinin yarısı veya üçte biri olan deviyör gerilmesine kadar olan eğrinin eğimi olarak tanımlanır [43, 44]. Bu çalışmada sekant modülü, Denklem 2'de belirtildiği gibi numunenin serbest basınç dayanımının %50'sine karşılık gelen nokta kullanılarak her bir numune için hesaplanmıştır [45].

$$E_{s50} = \frac{\Delta q_{50\%}}{\Delta \varepsilon_{50\%}} \quad (2)$$

burada $\Delta q_{50\%}$, numunenin UCS' sinin %50'sine ilişkin değerdir ve $\Delta \varepsilon_{50\%}$, numunenin UCS' sinin yarısına karşılık gelen gerinimi ifade eder



Şekil 10. Katkılı kil numunelerin sekant modülü değerleri (Secant modulus values of reinforced clay specimens)

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Çalışma kapsamında, kil zeminlerin stabilizasyonu için uçucu kül, silis dumanı ve cam fiberin farklı kombinasyonları kullanılarak, zeminlerin fiziksel özellikleri ve tek eksenli yükleme altındaki dayanımları incelenmiştir. Çalışmadan çıkarılan temel sonuçlar aşağıdaki gibidir:

•Uçucu kül ve silis dumanı katkıları, kil zeminin kompaksiyon parametreleri üzerinde belirgin etkilere neden olmuştur. Karışım oranlarındaki artış, maksimum kuru birim hacim ağırlığını artırmış, ancak optimum su içeriği değerlerinde düşüşe sebep olmuştur. Bu sonuç, uçucu külün kil partiküllerinin yerini alarak kompaksiyon özelliklerini iyileştirdiğini ve daha yoğun bir yapı oluşturduğunu göstermektedir. Öte yandan, %20 oranında silis dumanı eklenmesinin daha yüksek özgül ağırlığa sahip bir karışım elde edilmesine rağmen maksimum kuru birim hacim ağırlığının azalmasına neden olduğu gözlemlenmiştir. Silis dumanı numunelere kil zeminden daha büyük bir yüzey alanı sağlamaktadır, bu da optimum su içeriğini yükseltmeden önce karışımları sıkıştırmak için ek suya ihtiyaç duyulduğunu göstermektedir.

•Silis dumanı ve uçucu kül katkıları, doğal kil zeminin plastisite indeksi ve likit limit değerlerinde azalmaya neden olmuştur. Bu durum, mineral katkı malzemelerinin kil parçacıklarını kaplayarak ve bağlayarak kil zeminin plastisitesini azaltmasıyla açıklanmaktadır. Silis dumanının %20 oranında eklenmesi plastisite indeksini %2,080 azaltırken, %20 uçucu kül eklenmesi %0,042 azaltmaktadır. Bu bulgular, katkı maddelerinin kilin serbest hareketini kısıtlayarak daha stabil bir yapı oluşturduğunu göstermektedir.

•Serbest basınç dayanımı değerleri incelendiğinde, su içeriği arttıkça killi zeminin UCS yenilme mukavemetinin azaldığı görülmüştür. Optimum su içeriğinden düşük su içeriğine sahip kil numuneleri daha büyük UCS dayanımına sahipken, mineral katkı ve lif eklenmesi UCS dayanımını artırmıştır. Silis dumanı, uçucu kül ve cam elyaf fiber içeren kil numunelerinin UCS değerleri, su içeriğindeki artışa bağlı olarak değişiklik göstermiştir. Maksimum UCS dayanımları düşük karışım oranlarındaki mineral katkı malzemeleri için elde edilirken, lif için yüksek oranlarda görülmüştür. Su içeriğindeki artışın basınç dayanımını azalttığı gözlenmiş; ancak katkı oranının ve kür süresinin artmasıyla numunelerin dayanımı artmıştır. Silis dumanı ve uçucu kül katkıları, kil numunelerini daha kırılğan hale getirmiştir. Düşük su içeriğindeki numuneler daha kırılğan, yüksek su içeriğindeki numuneler ise

daha sünek bir davranış sergilemiştir. Serbest basınç dayanımı değerleri, su içeriği ve katkı maddesi oranlarıyla yakından ilişkilidir.

Silis dumanı, uçucu kül ve cam elyaf fiber içeren kil numunelerinin UCS değerleri, su içeriğindeki artışa bağlı olarak değişiklik göstermiştir. Özellikle, düşük karışım oranlarındaki mineral katkılar maksimum UCS dayanımları sağlarken, cam elyaf için yüksek oranlarda daha fazla dayanım elde edilmiştir. Bu durum, katkı maddelerinin zemin matrisini güçlendirerek dayanım artışı sağladığını göstermektedir. Ancak, su içeriğinin artması basınç dayanımını azaltmakta, bu da su miktarının kontrolünün önemini vurgulamaktadır.

•Uçucu kül katkılı zemin numunelerinde belirli bir orana kadar artan uçucu kül miktarıyla birlikte serbest basınç dayanımı değerlerinde artış meydana gelmiştir. Ancak belirli oranı aştığında bu serbest basınç dayanım değerinde azalma meydana gelmiştir. Bu durum uçucu külün optimum değerini aştığında zeminin mekanik özellikleri üzerinde olumsuz etkiye sahip olduğunu göstermiştir.

•Silis dumanı, uçucu kül ve cam elyaf eklenen kil numunelerinin kırılğanlık indeksi değerleri incelendiğinde, optimum su içeriğinde doğal kil numunelerine göre daha kırılğan hale geldiği görülmüştür. Bu durum, katkı malzemelerinin kil minerallerinin bir arada tutulmasını zorlaştırarak numunenin daha kolay kırılmasına neden olabileceğini göstermektedir. Bu kırılğanlık, zemin stabilizasyonunda dikkate alınması gereken bir faktördür, çünkü yapıların uzun vadeli dayanıklılığı ve performansı üzerinde olumsuz etkiler yaratabilir.

•Sekant modülü (Es50) değerleri, farklı katkı oranları, kür süreleri ve su içerikleri altında incelenmiştir. Bulgular, farklı katkı maddelerinin farklı oranlarının doğal kil numunelerinin sekant modülü değerlerini artırdığını göstermektedir. Kür öncesi, düşük su içeriğinde hazırlanan kil numunelerine cam elyaf eklenmesinin Es50 değerlerini mineral katkı malzemelerine göre daha fazla arttırdığı tespit edilmiştir. Kür süresinin artmasıyla katkılı numunelerin sekant modülü değerlerinde artış gözlenmiş, maksimum artışlar düşük su içeriğinde hazırlanan numunelerde görülmüştür. Silis dumanının UCS değerlerine daha fazla etki gösterdiği belirlenmiştir. Bu sonuçlar, katkı maddelerinin zemin sertliğini ve elastikiyetini artırarak zemin stabilizasyonunu iyileştirdiğini göstermektedir.

Sonuç olarak, mineral katkı malzemelerinin ve cam elyaf lifinin kil zeminin fiziksel ve mekanik

özellikleri üzerinde belirgin etkileri olduğu ve bu etkilerin karışım oranları, su içeriği ve kür süreleri gibi faktörlere bağlı olarak değişiklik gösterdiği sonucuna varılmıştır. Bu bulgular, yapı mühendisliği ve zemin stabilizasyonu gibi alanlarda malzeme tasarımı ve uygulama süreçlerini iyileştirmek için önemli bilgiler sağlamaktadır.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

Bu araştırma, Fırat Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (FUBAP) tarafından desteklenmiştir (Proje No. TEKF.23.52). FUBAP'ın sağladığı mali destek için teşekkür ederiz.

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)

Nagihan DOĞAN: Bu çalışma yayınlanmamış Yüksek Lisans tezinin bir bölümünü oluşturmakta olup, ilgili yazar tez sahibidir. Deneysel çalışmanın planlanması, veri analizi ve deneysel çalışmanın yürütülmesinden sorumludur.

This study forms part of an unpublished Master's thesis and the corresponding author is the thesis author. Responsible for the planning, analysis and execution of the experimental study.

Müge Elif FIRAT: Tez çalışması danışmanı olup, deney sonuçlarının analizi ve ilgili makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

She was the thesis advisor, analyzed the experimental results and wrote the related manuscript.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

There is no conflict of interest in this study.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Sengul T., Akray N., Vitosoglu Y., Investigating the effects of stabilization carried out using fly ash and polypropylene fiber on the properties of highway clay soils, *Construction and Building Materials*, 400 (2023), 132590.
- [2] Miraki H., Shariatmadari N., Ghadir P., Jahandari S., Tao Z., Siddique R., Clayey soil

stabilization using alkali-activated volcanic ash and slag, *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 14(2) (2022), 576-591.

- [3] de Araújo M.T., Ferrazzo S.T., Chaves H.M., da Rocha C.G., Consoli N.C., Mechanical behavior, mineralogy, and microstructure of alkali-activated wastes-based binder for a clayey soil stabilization, *Construction and Building Materials*, 362 (2023), 129757.
- [4] Odeh N.A., Al-Rkaby A.H., Strength, durability, and microstructures characterization of sustainable geopolymer improved clayey soil, *Case Studies in Construction Materials*, 16 (2022), e00988.
- [5] Naeimi M., Chu J., Khosroshahi M., Zenouzi L.K., Soil stabilization for dunes fixation using microbially induced calcium carbonate precipitation, *Geoderma*, 429 (2023), 116183.
- [6] MC Fernandes V., Rudgers J.A., Collins S.L., Garcia-Pichel F., Rainfall pulse regime drives biomass and community composition in biological soil crusts, *Ecology*, 103(9) (2022), e3744.
- [7] Armistead S.J., Smith C.C., Stanilan S.S., Sustainable biopolymer soil stabilization in saline rich, arid conditions: A 'micro to macro' approach. *Scientific Reports*, 12(1), (2022), 2880.
- [8] Saldanha R.B., Carlos H., Filho S., Mallmann J.E.C., Consoli N.C., Physical–mineralogical–chemical characterization of carbide lime: an environment-friendly chemical additive for soil stabilization. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 30(6), (2018).
- [9] Wang D., Fonte S.J., Parikh S.J., Six J., Scow K.M., Biochar additions can enhance soil structure and the physical stabilization of C in aggregates, *Geoderma*, 303, (2017) 110-117.
- [10] Bahadori H., Hasheminezhad A., Taghizadeh F., experimental study on marl soil stabilization using natural pozzolans, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 31(2), (2019).
- [11] Jalal F.E., Xu Y., Jamhiri B., Memon S.A., On the recent trends in expansive soil stabilization using calcium-based stabilizer materials (CSMs): A comprehensive review, *Advances in Materials Science and Engineering*, (2020), 1510969.
- [12] Dayioglu M., Cetin B., Nam S., Stabilization of expansive Belle Fourche shale clay with different chemical additives, *Applied Clay Science*, 146(2017), 56–69.
- [13] Anburuvel A., The engineering behind soil stabilization with additives: A state-of-the-art review, *Geotechnical and Geological Engineering*, (2023), 1-42.

- [14] Ghiasi V., Haghtalab Joraghani M., Rashno S., An overview of chemical soil stabilization methods. *Road*, 31(116), (2023),151-166.
- [15] Vichan S., Rachan R., Chemical stabilization of soft Bangkok clay using the blend of calcium carbide residue and biomass ash, *Soils and Foundations*, 53(2), (2013), 272–281.
- [16] Chen C., Wei K., Gu J., Huang X., Dai X., Liu, Q., Combined effect of biopolymer and fiber inclusions on unconfined compressive strength of soft soil, *Polymers*, 14(4), (2022),787.
- [17] Wang C., Li Z., Cai B., Tan Q., Li Y., He L., ... Deng, Y., Effect of root system of the *Dicranopteris dichotoma* on the soil unconfined compressive strength of collapsing walls in hilly granite area of South China, *Catena*, 216(2022), 106411.
- [18] Ghasem Ghanbari P., Momeni M., Mousivand M., Bayat M., Unconfined compressive strength characteristics of treated peat soil with cement and basalt fibre, *International Journal of Engineering*, 35(5), (2022), 1089-1095.
- [19] Mojtahedi F. S.F., Ahmadihosseini A., Sadeghi H., An artificial intelligence based data-driven method for forecasting unconfined compressive strength of cement stabilized soil by deep mixing technique, *Geotechnical and Geological Engineering*, 41(1), (2023), 491-514.
- [20] Totiç E., Göktepe F., Yaşar M., Uçucu kül katkısının killi zeminlerin mekanik özelliklerine etkisi, *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, 10(2), (2019), 769-778.
- [21] Türköz M., Savaş H., Tasci G., The effect of silica fume and lime on geotechnical properties of a clay soil showing both swelling and dispersive features, *Arabian Journal of Geosciences*, (2018), 11:735.
- [22] Rajabi A.M., Ghorashi S.M.S., Yeganeh M.M., The effect of polypropylene and glass fibers on strength and failure behavior of clayey sand soil, *Arabian Journal of Geosciences*, (2023), 16:6.
- [23] Moreira E.B., Baldovino J.A., Rose J.L., dos Santos Izzo R.L., Effects of porosity, dry unit weight, cement content and void/cement ratio on unconfined compressive strength of roof tile waste-silty soil mixtures, *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 11(2), (2019), 369-378.
- [24] Bilici H., Okur D.V., Türköz M., Savaş H., Kil zeminin dayanımı üzerinde uçucu kül ve yüksek fırın cürufu katkılarının etkisi ve karşılaştırmalı analizi, *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 9(2), (2020), 910-919.
- [25] Çimen, Ö. Keleş, E., Yüksek plastisiteli bir kilin mühendislik özelliklerine uçucu kül ve kireç katkılarının etkisi, *İleri Mühendislik Çalışmaları ve Teknolojileri Dergisi*, 1(2), (2020), 80-90.
- [26] Şahbaz İ., Ünsever Y.S., Çimento ve polipropilen lif kullanılarak düşük plastisiteli kil zeminlerin iyileştirilmesi, *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 25(3), (2020), 1409-1420.
- [27] Shourijeh P.T., Rad A.M., Bigloo F.H.B., Binesh S.M. Application of recycled concrete aggregates for stabilization of clay reinforced with recycled tire polymer fibers and glass fibers, *Construction and Building Materials*, 355(2022), 129172.
- [28] Valipour M., Shourijeh P.T., Mohammadinia A., Application of recycled tire polymer fibers and glass fibers for clay reinforcement, *Transportation geotechnics*, 27(2021), 100474.
- [29] Xu L., Niu L., Influence of fibre type on unconfined compressive strength of fibre-reinforced cemented soil under freeze-thaw cycling, *International Journal of Materials and Product Technology*, 65(3), (2022), 248-257.
- [30] Baştan E.E., Demir G., Şişen Zemin özelliklerinin atık malzemeler ile iyileştirilmesi. *OMÜ Mühendislik Bilimleri ve Teknolojisi Dergisi*, 2(1), (2022), 25-36.
- [31] Çınar M., Erbaşı K. Zemin iyileştirmesinde kullanılan jet grout yönteminde çimento yerine ikame edilen atık malzemelerin mekanik ve reolojik özelliklerine etkisinin incelenmesi: literatür araştırması. *Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 6(2), (2023). 1742-1767.
- [32] Topçuoğlu Y.A., Gürocak Z. Uçucu Kül, silis dumani ve tuf ile stabilize edilmiş bentonitte meydana gelen moleküler değişimlerin fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi (ft-ır) yöntemi ile belirlenmesi. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 11(1), (2023), 94-112.
- [33] Rabab'ah S., Al Hattamleh O., Aldeeky H., Alfoul B.A. Effect of glass fiber on the properties of expansive soil and its utilization as subgrade reinforcement in pavement applications. *Case Studies in Construction Materials*, 14, (2021), e00485.
- [34] Orakoglu M. E., Liu J., Effect of freeze-thaw cycles on triaxial strength properties of fiber-reinforced clayey soil. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 21(2017), 2128-2140.
- [35] ASTM D2166-06(2021), Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil," ASTM International, West Conshohocken, PA, 2021, www.astm.org.
- [36] ASTM D698-00ae1, Standard test methods for laboratory compaction characteristics of soil using standard effort (12,400 ft-lbf/ft³ (600 kN-

- m/m³)), West Conshohocken, PA, 2017, www.astm.org.
- [37] ASTM D4318-10e1, Standard test methods for liquid limit, plastic limit, and plasticity index of soils, West Conshohocken, PA, 2017, www.astm.org.
- [38] Mirzababaei M., Mirafteb M., Mohamed M., McMahon P., Unconfined compression strength of reinforced clays with carpet waste fibers. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 139(3), (2013), 483-493.
- [39] Patel S.K., Singh B., Strength and deformation behavior of fiber-reinforced cohesive soil under varying moisture and compaction states. *Geotechnical and Geological Engineering*, 35(4), (2017), 1767-1781.
- [40] Nataraj M., McManis K., Strength and deformation properties of soils reinforced with fibrillated fibers, *Geosynthetics International*, 4(1), (1997), 65-79.
- [41] Al-Soudany K., Remediation of clayey soil using silica fume. In *MATEC Web of Conferences* (Vol. 162, p. 01017), (2018), EDP Sciences.
- [42] Consoli N.C., Lopes Jr L.D.S., Prietto P.D. M., Festugato L., Cruz R.C. Variables controlling stiffness and strength of lime-stabilized soils. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 137(6), (2011), 628-632.
- [43] Jahandari S., Mojtahedi S.F., Zivari F., Jafari M., Mahmoudi M.R., Shokrgozar A., ... Jalalifar H., The impact of long-term curing period on the mechanical features of lime-geogrid treated soils. *Geomechanics and Geoengineering*, 17(1), (2022), 269-281.
- [44] Venkata Vydehi K., Moghal A.A.B., Effect of biopolymer inclusion and curing conditions on the failure strain and elastic modulus of cohesive soil. In *Indian Geotechnical Conference* (pp. 257-264). 2023, Springer, Singapore.
- [45] Saberian M., Jahandari S., Li J., Zivari F., Effect of curing, capillary action, and groundwater level increment on geotechnical properties of lime concrete: experimental and prediction studies. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 9(4), (2017), 638e47.

Control of Squirrel-Cage Asynchronous Motor Using Star-Delta Starting Method and Monitoring of Parameters Through Computer Interface

Seyfettin VADI^{1*} 

¹Gazi University, Faculty of Technology, Department of Electrical and Electronics Engineering, Ankara, Turkey

Article Info

Research article
Received: 29/09/2024
Revision: 08/10/2024
Accepted: 12/10/2024

Keywords

Asynchronous Motor
Star-Delta Starting
OPC Server
Programmable Controller

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 29/09/2024
Düzeltilme: 08/10/2024
Kabul: 12/10/2024

Anahtar Kelimeler

Asenkron Motor
Yıldız-Üçgen Yol Verme
OPC Server
Programlanabilir
Denetleyici

Graphical/Tabular Abstract (Grafik Özet)

In this study, an asynchronous motor is controlled using the star-delta starting method and circuit parameters are monitored. / Bu çalışmada, bir asenkron motor yıldız-üçgen yol verme yöntemi kullanılarak kontrol edilmiş ve devre parametreleri izlenmiştir.

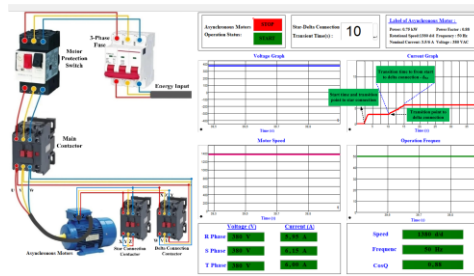


Figure A: Screenshot when the star-delta transition time is 10s / **Şekil A:** Yıldız-delta geçiş süresi 10s olduğunda ekran görüntüsü

Highlights (Önemli noktalar)

- A computer-controlled monitoring system has been developed for asynchronous motors operating with star-delta starting method. / Yıldız üçgen yol verme yöntemi ile çalışan asenkron motorlar için bilgisayar kontrollü izleme sistemi geliştirilmiştir.
- Computer-controlled operation of asynchronous motors operated by the star-delta starting method is developed a safe working environment. / Yıldız-üçgen yol verme yöntemi ile çalıştırılan asenkron motorların bilgisayar kontrollü çalıştırılması ile güvenli bir çalışma ortamı geliştirilmiştir.
- The proposed method provided much better performance than the classic methods in the literature. / Önerilen yöntem, literatürdeki klasik yöntemlere göre çok daha iyi performans sağlamıştır.

Aim (Amaç): The steady state and dynamic behavior of the system when starting asynchronous motor with the star-delta starting method is monitored. / Asenkron motora yıldız-üçgen yol verme yöntemi ile yol verilirken sistemin kararlı durum ve dinamik davranışı izlenmiştir.

Originality (Özgünlük): The star-delta starting method of the asynchronous motor has realized through the computer interface. The steady-state performance comparison of this method, its behavior in the initial start-up, the dynamic response of the asynchronous motor in the transition from star connection to delta connection are presented. / Asenkron motorun yıldız-üçgen yol verme yöntemi bilgisayar arayüzü aracılığıyla gerçekleştirilmiştir. Bu yöntemin kararlı durum performans karşılaştırması, ilk kalkıştaki davranışı, yıldız bağlantıdan üçgen bağlantıya geçişte asenkron motorun dinamik tepkisi sunulmuştur.

Results (Bulgular): The user could simultaneously monitored the motor parameters, the dynamic response of the asynchronous motor in the transition from star connection to delta connection and the changes in the parameters in the running state. / Kullanıcı eş zamanlı olarak motor parametrelerini, asenkron motorun yıldız bağlantıdan üçgen bağlantıya geçişteki dinamik tepkisini ve çalışma durumundaki parametrelerdeki değişimleri izleyebilmektedir.

Conclusion (Sonuç): The steady state and dynamic behavior of the system when starting asynchronous motor with the star-delta starting method is monitored. / Asenkron motora yıldız-üçgen yol verme yöntemi ile yol verilirken sistemin kararlı durum ve dinamik davranışı izlenmiştir.



Control of Squirrel-Cage Asynchronous Motor Using Star-Delta Starting Method and Monitoring of Parameters Through Computer Interface

Seyfettin VADİ^{1*}

¹Gazi University, Faculty of Technology, Department of Electrical and Electronics Engineering, Ankara, Turkey

Article Info

Research article
Received: 29/09/2024
Revision: 08/10/2024
Accepted: 12/10/2024

Keywords

Asynchronous Motor
Star-Delta Starting
OPC Server
Programmable Controller

Abstract

Asynchronous motors widely used in industry. The motors draw very high currents until the motor reaches its rated speed and torque. These excessive currents can damage the motor itself and other equipment in the system. A starting method is needed as an initial control to start the motor. These starting methods limit these overcurrents and help the motor to reach its rated speed gradually without drawing too much current. In this study, an asynchronous motor is controlled using the star-delta starting method and circuit parameters are monitored such as three phase current and voltage values, frequency, power coefficient, motor speed. These parameters are sent to the computer with PLC(Programmable Logic Control) over OPC(Ole for Process Control) Server in real time. The parameters are processed and monitored on the user interface prepared on the Profi-LAB platform and the motor parameters are controlled.

Sincap Kafesli Asenkron Motorun Yıldız-Üçgen Yol Verme Yöntemi ile Kontrolü ve Parametrelerin Bilgisayar Arayüzü ile İzlenmesi

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 29/09/2024
Düzelme: 08/10/2024
Kabul: 12/10/2024

Anahtar Kelimeler

Asenkron Motor
Yıldız-Üçgen Yol Verme
OPC Server
Programlanabilir
Denetleyici

Öz

Asenkron motorlar endüstride yaygın olarak kullanılmaktadır. Motorlar, motor nominal hızına ve torkuna ulaşana kadar çok yüksek akımlar çeker. Bu aşırı akımlar motorun kendisine ve sistemdeki diğer ekipmanlara zarar verebilir. Motoru başlatmak için ilk kontrol olarak bir başlatma yöntemine ihtiyaç vardır. Bu yol verme yöntemleri bu aşırı akımları sınırlar ve motorun çok fazla akım çekmeden kademeli olarak nominal hızına ulaşmasına yardımcı olur. Bu çalışmada asenkron bir motor yıldız-üçgen yol verme yöntemi kullanılarak kontrol edilmekte ve üç faz akım ve gerilim değerleri, frekans, güç katsayısı, motor hızı gibi devre parametreleri izlenmektedir. Bu parametreler gerçek zamanlı olarak OPC (Ole for Process Control) Server üzerinden PLC (Programmable Logic Control) ile bilgisayara gönderilmektedir. Profi-LAB platformunda hazırlanan kullanıcı arayüzü üzerinde parametreler işlenip izlenmekte ve motor parametreleri kontrol edilmektedir.

1. INTRODUCTION (GİRİŞ)

Recently, thanks to digitalization in the industrial field, the need for modernization of existing systems or the use for up-to-date devices has emerged. Since the preference of up-to-date devices will create additional high costs for businesses, modernization of the existing infrastructure comes to the fore. Thus, both the improvement of the systems at low cost and the efficient use of energy will be ensured. Asynchronous motors, which are the basis of

moving systems in the industry, constitute the majority of energy consumption. Therefore, improvement studies on these motors will be of great importance to the private sector[1]. These engines find use in different sectors such as food, chemistry, metallurgy, paper and water purification or drawing systems. These applications include equipment for machine components operating at constant or variable speeds, such as elevators, conveyor systems, ventilation and air conditioning systems, pumps and compressors[2]. A three-phase

asynchronous motor can have a ring rotor or a short-circuit rotor. The motors better used with a squirrel-cage rotor. The main difference between these two types comes from the construction of the motor.

The motor of the first type consists of real windings as in the stator, exhibits a more complex and fragile structure, requires periodic maintenance, has large dimensions. In the second type, the rotor is made up of rods short-circuited at both ends. Thanks to its high structural simplicity, it forms simple, robust and cost-effective motor type. The principle of operation of the asynchronous motor is to convert electrical energy into mechanical energy by rotating the motor shaft in the induced magnetic field[3]. The cross-sectional plane and components of the asynchronous motor are shown in Figure 1.

Asynchronous motors are widely used in industry due to their numerous advantages over other types of motors. They are practically maintenance-free and have easily accessible spare parts, making them highly convenient. Additionally, they are more cost-

effective compared to motors with the same power output and are known for their robustness. Unlike some motor types, asynchronous motors do not produce arcs or sparks during operation, enhancing safety. Furthermore, they can be produced in single-phase and three-phase configurations, offering flexibility for various applications.

The asynchronous motors are preferred in the industry due to the development of control methods that enable speed adjustment in simple and effective way. This is an advantage for asynchronous motors. The most important disadvantage of the motor is that it draws 5-7 times more current from the grid than the nominal current value at the first start-up moment. The asynchronous motors are operated with the starting method to prevent this negative situation. This method provides a smoother start-up of the asynchronous motor. For this purpose, direct starting, star-delta starting, auto transformer starting, resistor starting, soft starting and driver starting methods are used in the literature[4].

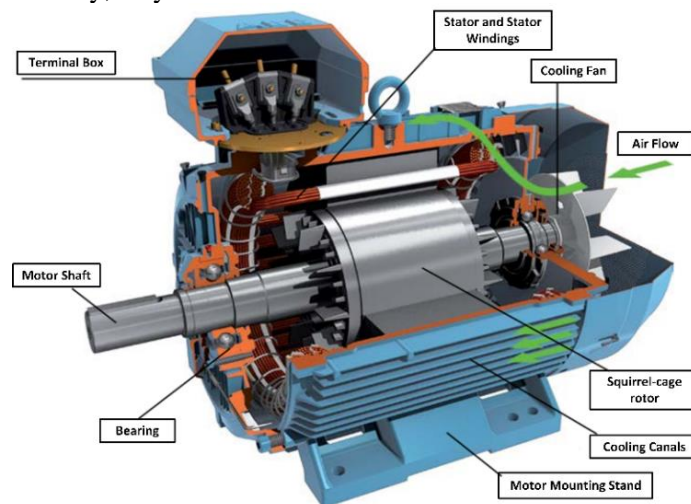


Figure 1. Components of an asynchronous motor (Asenkron motorun bileşenleri)

The most suitable starting method of asynchronous motors should be preferred to speed adjustment, continuous operation, protect against overload operation. Direct starters are a starting method that connects line voltage across the motor terminals in a single step and accelerating it to its rated speed. This method is used according to the permissible switching method for the motor by providing switching and protection functions[5].

Direct starting is the most conventional starting method for starting a squirrel-cage asynchronous motor and involves connecting the motor directly to the supply network and starting at maximum voltage. Direct starting is the simplest and most economical system and is the most commonly used

method. Since it provides a direct connection to the supply network, the starting process takes place at maximum voltage and constant frequency, generating a high starting torque with greatly reduced acceleration times[6]. Reduced-voltage starting systems involve connecting the motor directly to the electrical supply network and thus performing a reduced-voltage starting. This results in a reduction in starting current, but also a reduction in instantaneous torque [6,7].

Star-delta starting is the most familiar system and the most common starting method at reduced voltage; it is used to start the motor by reducing mechanical stresses during starting and limiting current ratings. On the other hand, it provides a

reduced instantaneous torque. Star-delta starters are used to start a three-phase motor in star connection and to ensure continuous operation in delta connection[7].

Starting with an autotransformer, the reduction of the supply voltage is realized by means of a fixed-stage autotransformer or a variable voltage transformer[9]. In the stator resistance or reactor starting method, the voltage drop is achieved by using reactors or resistors connected in series with the stator during starting. The voltage supplying the motor in the first stage is reduced by a determined coefficient with respect to the mains voltage, which corresponds to a torque reduction. The starting current is limited to approximately half of the current required for starting at maximum voltage. At the end of the acceleration phase, the reactors or resistors are deactivated and the motor returns to full voltage parameters. The disadvantages of this method are the significant reduction in power factor due to the reactors or the high temperature rise caused by the power distribution in the resistors [10]. Soft starters provide soft starting of motors by limiting the starting current. The use of this method is to ensure a soft start, avoiding the electrical and

mechanical stresses that characterize direct start and Y/Δ start. It allows limiting the starting current, determining the torque and setting the starting time so that the increased motor supply is smooth throughout the entire process. This is a modern method that can require a rather high initial investment cost [11].

The starting method with inverter of asynchronous motor is carried out together with the control and management of the electrical and mechanical parameters of the application. Also, this method provides in energy savings of 20 to 50%. Inverters offer highly reliable systems with high efficiency and low maintenance requirements. They are categorized by semiconductors and converters and are suitable for precise speed and torque control of squirrel-cage motors. These inverters based on PWM technology can be used in both for the simplest applications with quadrature torque (pumps and fans) and more complex applications[12]. The advantages and disadvantages of these methods in terms of cost, advantages and disadvantages compared to each other are given in Table 1.

Table 1. Comparison table of starting methods for asynchronous motors (Asenkron motorlara yolverme yöntemlerinin karşılaştırma tablosu)

Ref.	Starting method	Cost	Advantages	Disadvantages
13	Direct Starting Method	Very Low	This method can be used in small power motors or in self-powered generation installations. It is the cheapest method as the installation can be realized with the minimum number of equipment. It is the simplest starting method.	Since the starting torque is very high, it may cause mechanical stress at the connection points of the motor, high-level selection of installation and protection elements, energy losses on line impedance. The operating speed of the motor is constant.
14	Star-Delta Starting Method	Low	Suitable for late accelerating loads.	If the load torque is greater than the star connection torque of the motor, the motor cannot accelerate under load. There is no control of current and torque. During the transition from star to delta, there are sudden current and moment transients. This may damage the system by creating mechanical and electrical shocks. The operating speed of the motor is constant.
15	Starting Method with	Low	They work more efficiently. Less current passes through the primary of the	Instantaneous torque changes due to gradual voltage transients. Adaptation to varying load

	Auto Transformer		transformer due to the number of windings.	conditions is difficult. Due to the limited number of voltage stages, the ideal starting current cannot be controlled within wide limits.
16	Starting Method with Resistance	Medium	Since some of the mains voltage consumes on the resistors, the voltage applied to the motor is low. The motor does not draw excessive current at start-up.	Energy loss is high. The operating speed of the motor is constant.
17	Starting Method with Soft Starter	High	Flexible and simple control of the current and torque during start-up, providing stepless change of voltage and current without sudden changes, suitable for frequent starting. Ability to operate under variable starting conditions. Controlling the motor stopping time with the use of the soft stop feature, shortening the motor stopping time with the braking feature. Advanced motor protection and operator interface features.	They generate harmonics during starting. The operation speed of the motor is variable. Acceleration and deceleration time is highly dependent on the load.
18	Starting Method with Inverter	Very High	Provides speed control within wide limits and reduces maintenance costs. Energy saving, can control more than one motor.	First installation cost is high. They have 5% losses since they are on a continuous line. Heat increase occurs in motors at low speeds and they produce harmonics.

An important consideration in the selection and construction of a system for motor starting and motor control is the safety and reliability of the solution to be achieved. The main causes of motor failure are due to short circuits and are caused by moisture, oil, dust between windings or overload. The overcurrent resulting from faults can cause a temperature rise, which can cause irreversible damage to the motor and can also cause fires in the surrounding environment. As a result, starting of an asynchronous motor is a critical situation, especially for the motor and the supplying network. Thus, the nominal operation needs to be properly monitored and protected to motor against possible faulty operation [19].

The aim of this study is to provide instantaneous monitoring and control of all data of asynchronous motors operating with classical methods in moving systems through digital communication and technology. Thus, an advanced protection feature is

provided to the asynchronous motor. In addition, the digital microprocessor-controlled control unit has been designed to reduce the electrical and mechanical stresses that may occur in the motor during starting and stop. The parameters (three phase current and voltage values, frequency, power coefficient, motor speed, etc.) of the asynchronous motor operated with the star-delta starting method are transferred to the computer environment via PLC over OPC Server in real time. These parameters are processed and presented to the users through the interface prepared on the Profi-LAB platform. Thus, monitoring and control of motor parameters are provided.

The motor is controlled by starting and stopping the asynchronous motor through the user interface. The user can simultaneously monitor the motor parameters and the changes in the parameters in the running state. The star-delta starting method of the asynchronous motor is realized through the

computer interface. The steady-state performance comparison of this method, its behavior in the initial start-up, the dynamic response of the asynchronous motor in the transition from star connection to delta connection are presented. The general block diagram of the experimental setup is shown in Figure 2. According to this diagram, the hardware set was installed and the hardware specific software required for the operation of the system was prepared. The system was then calibrated and tested for operation.

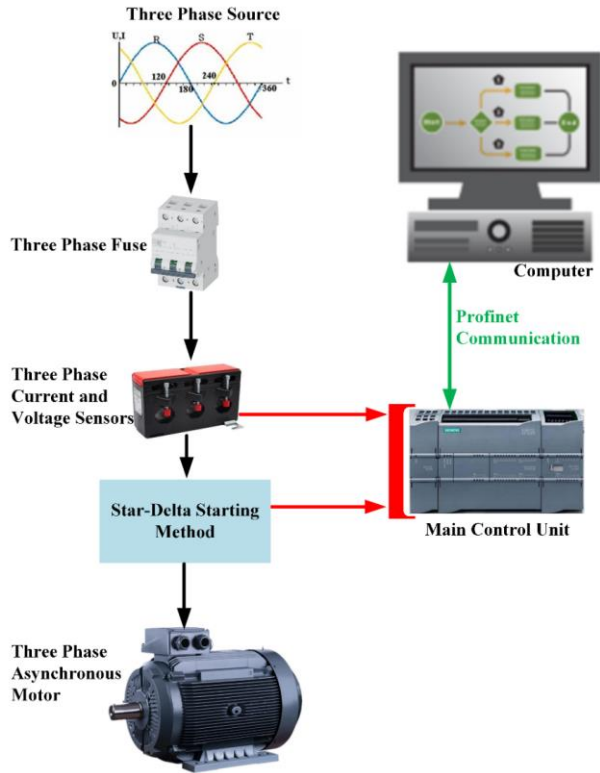


Figure 2. General block diagram of the system (Sistemin genel blok diyagramı)

2.STAR-DELTA STARTING METHOD
(YILDIZ-ÜÇGEN YOL VERME YÖNTEMİ)

This method is widely used, especially for no-load starting or starting with low and constant load torque or slightly increasing load torque (such as fans or low-power centrifugal pumps). As shown in the diagram in Figure 3, the starting method is realized by the star connection of the windings, the line contactor KL and the star contactor KY, the first phase of which is realized by the closing of the circuit breaker. After a predetermined period of time, the opening of the KY contactor and the closing of KΔ allows the transition to the delta connection, which is also the configuration of the normal operating position.

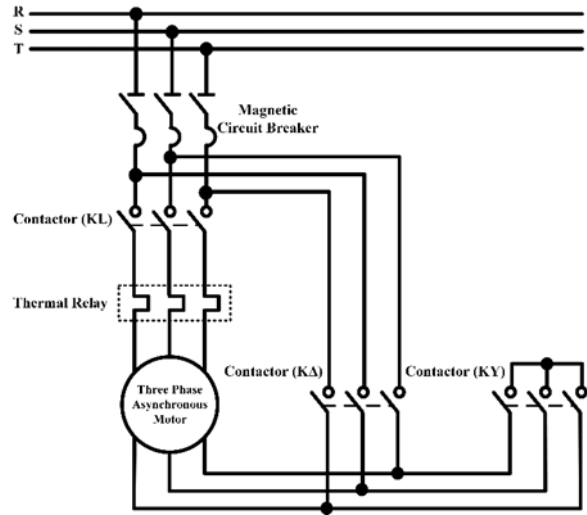


Figure 3. Principle diagram of star-delta starting method (Yıldız-üçgen yol verme yönteminin prensip şeması)

Star phase (Y) is the starting phase. The motor windings are star connected and the voltage across them is expressed as $V_L/\sqrt{3}$. The motor winding and line current are given in Eq. 1. Z_w is the motor winding impedance.

$$I_{MY} = \frac{V_L}{\sqrt{3} \times Z_w} \quad (1)$$

In this method, the starting phase coincides with the acceleration phase and continues in this way until the steady-state speed is reached. Too short a duration of this state will not allow a reduction in the stresses that characterize the type of starting; consequently, such stresses will reappear in the subsequent triangle phase, thus recreating conditions similar to those of the direct starting method. This method is used on a small-scale motor. Star connection configuration and motor terminal is shown in Fig. 4.

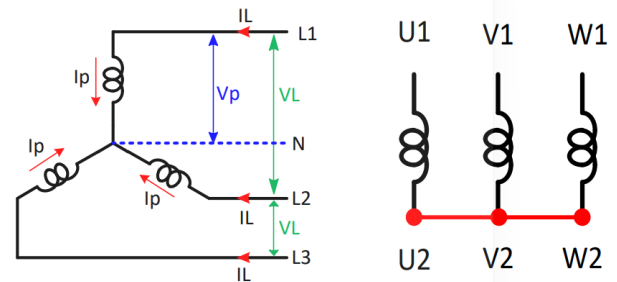


Figure 4. Star connection configuration and motor terminal (Yıldız bağlantı konfigürasyonu ve motor terminali)

The changing phase is the phase in which the transition from the star position to the delta position takes place by opening and closing the contactors. The duration and calibration of the changing phase

are important: the duration of the changing must be such as to extinguish the electric arc in the star contactor and prevent a short-circuit condition caused by the delta contactor closing too much. On the other hand, a long transition from Y to Δ will cause the motor to slow down, resulting in large current peaks in the delta phase.

The transition is regulated by analog or digital timers and, just like an indicator, the transition time can be set to an average of 50 ms. On the timer, the duration of the star phase is also set, which in general terms is the acceleration or starting time that can be considered as a function of the difference between the average driving torque and the average load torque of the motor-machine unit.

Delta phase (Δ), is the last phase of the starting method. It also represents the steady-state operating condition where the stator windings are delta-connected and subject to the full grid voltage VL and the motor reaches full torque again and the current flowing through the windings is given in equation-2.

$$I_{M\Delta} = \frac{V_L}{Z_w} \quad (2)$$

The equation for the line current is given in Equation-3.

$$I_{LM\Delta} = \frac{V_L}{Z_w} \times \sqrt{3} \quad (3)$$

Delta connection configuration and motor terminal is shown in Fig.5.

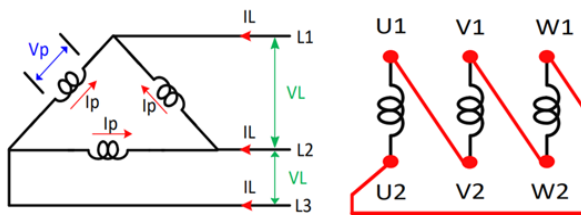


Figure 5. Delta connection configuration and motor terminal (Üçgen bağlantı konfigürasyonu ve motor terminali)

3.EXPERIMENTAL RESULTS (DENEYSEL SONUÇLAR)

The purpose of the star-delta starting method is to get rid of the excessive current and power consumption due to the high voltage that the stator windings will be exposed to in the delta connection. In general, starting methods are applied to asynchronous motors due to the excessive current draw at starting moment. One of these methods is

the star-delta starting method. According to this method, 220 V voltage is applied to the asynchronous motor stator windings when connected to star and 380 V (normal operating voltage) when connected to delta. In the star-delta starting method, the transition process is delayed. Otherwise, dangerous situations arise as the phases will be short-circuited.

The control circuit of the three-phase asynchronous motor established using the star/delta starting method is shown in Figure 6. Siemens S7-1200 CPU 1214C (DC/DC/DC) programmable controller was used for monitoring and controlling the system and communicating with the computer. Since this controller operates with 24V DC voltage, a power supply with 220V input and 24V/5A feature was used as the supply voltage. Since the outputs of these controllers are transistor outputs, contactors can burn out in case of high current draw from the output. To eliminate this negative situation, three 24V DC relays were installed on the outputs. Star, delta and main contactors were driven via these relays. The conductor connections required for the energy flow of the controller, relays and contactors were selected considering the current capacities they can carry.

The digital input/output unit of the PLC is used for On/Off control of the system and the analog module unit is used for transferring analog signals to the processor environment. Digital output unit is used for energizing relays and contactors, digital input unit is used for starting and stopping the system. The analog module is used to obtain three-phase current and voltage information of the asynchronous motor and to transfer analog signals such as frequency and speed etc. to the microcontroller environment. LEM's LV-25P voltage sensor was used to measure the voltage applied to the asynchronous motor windings, and LEM's HAS-50 current sensor was used to measure the amount of current drawn by the asynchronous motor from the grid. In order to use current and voltage sensors, an electronic card was designed and a measurement unit was developed. The energy supply card with this feature was designed since the measurement system works with +/-12V symmetrical power supply. By ensuring that these cards can work in harmony with the system, input to the microcontroller is provided as an integrated design. The main energy input of the system is provided by a 6A double pole fuse to protect both the system and the user. Data exchange between OPC Server and PLC is provided by Profi-NET communication method. A photograph of the experimental setup including the hardware units is given in Figure 6.

The user interface prepared on the Profi-LAB platform is shown in Figure 7. The interface design is designed in a flow considering the one-to-one system model. The user can perform both monitoring and control operations as real-time through the interface. System data (three-phase motor operating voltages, phase currents, active-reactive-visible power, frequency, speed and power factor etc.) can be monitored both digitally and graphically.

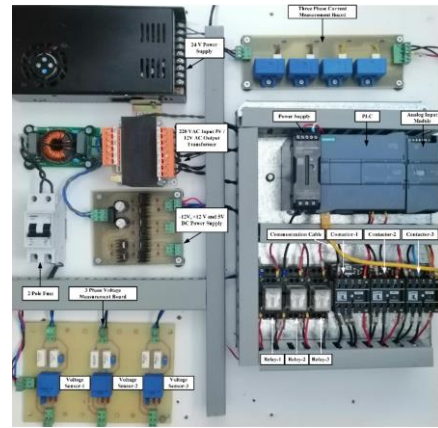


Figure 6. Experimental setup (DENEY DÜZENLEĞİ)

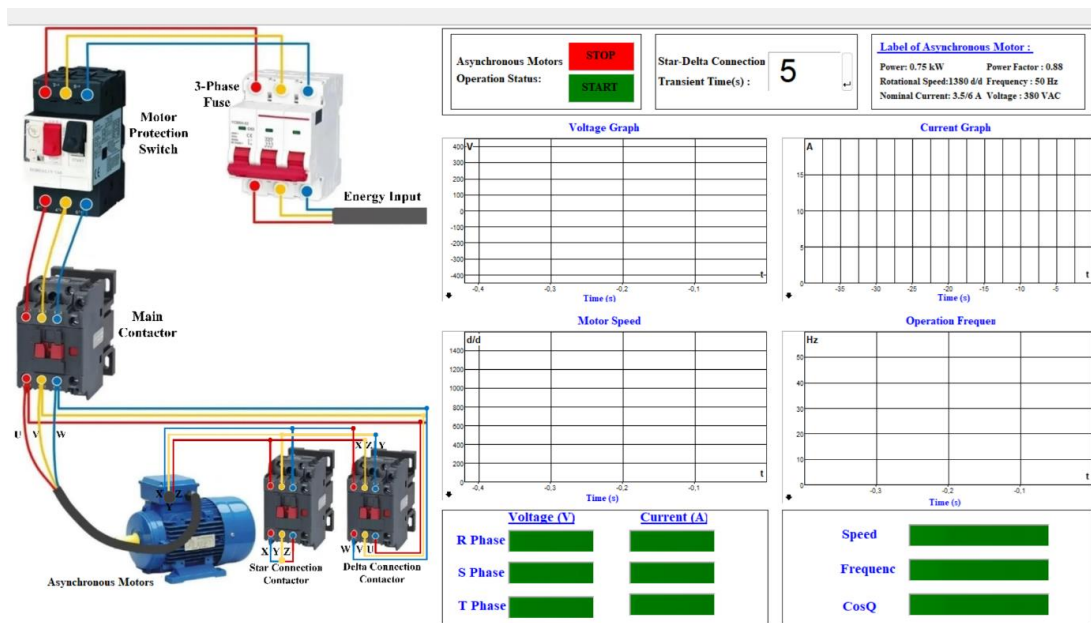


Figure 7. User computer interface (KULLANICI BİLGİSAYAR ARAYÜZÜ)

The transition time of the asynchronous motor from star connection to delta connection can be set dynamically by setting the transition time via the interface. The user is required to enter this transition time before starting the system. Otherwise, the system continues to stop with a warning. In Figure 8, the star-delta transition time is set to 5s on the user interface. The responses of the asynchronous motor at the first starting moment are shown graphically. The nominal current value of the motor is 3.5A for the star connection. When the wavelength of the current signal is analyzed in Figure 8, it is seen that the maximum point is approximately 6A. In this case, it is seen from the

current graph that the motor draws more current from the grid in delta mode than in star mode. It is seen from the current graph that the current value drawn by the motor is approximately 5 times the nominal current value when the asynchronous motor transitions from star connection mode to delta connection mode. When the asynchronous motor is transitioned to delta connection, the nominal speed is 1380 rpm, the power coefficient is 0.88 and the motor operating frequency is 50 Hz. In this transition, the behavior of other parameters of the motor is also seen both digitally and graphically on the interface.

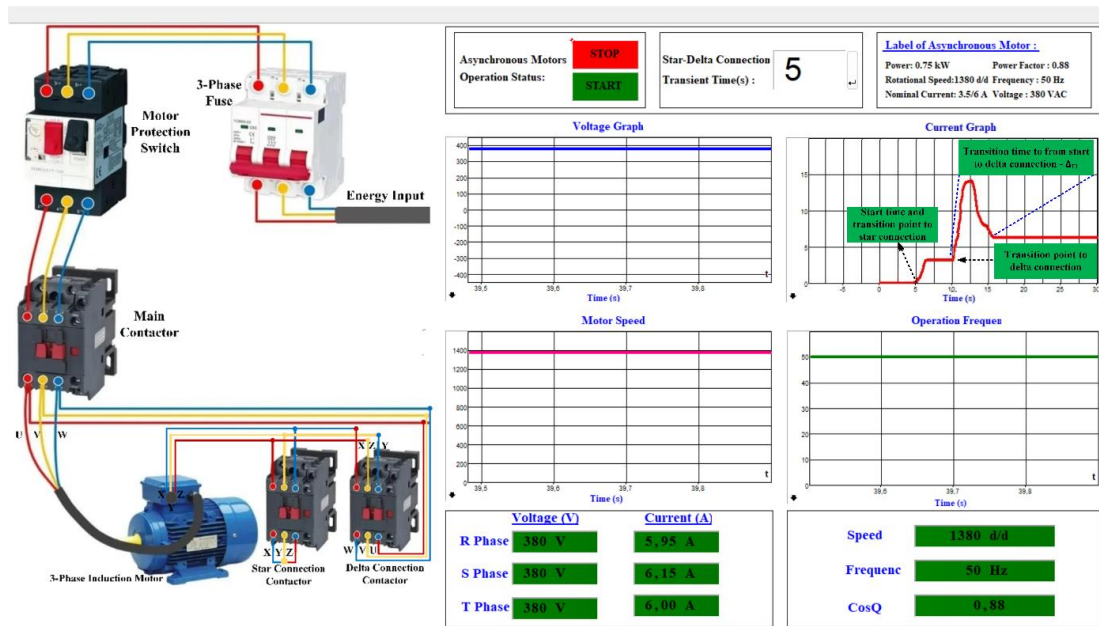


Figure 8. Screenshot when the star-delta transition time is 5s (Yıldız-delta geçiş süresi 5s olduğunda ekran görüntüsü)

The steady state and dynamic behavior of the system is shown in Figure 9 when the asynchronous motor is started using the star-delta starting method with a transition time of 10 seconds. It is seen from the current graph that the current value drawn by the motor is approximately 5 times the nominal current value when the asynchronous motor transitions

from star connection mode to delta connection mode. It is seen from the result graphs that the effect of transition time is effective on the current drawn from the grid.

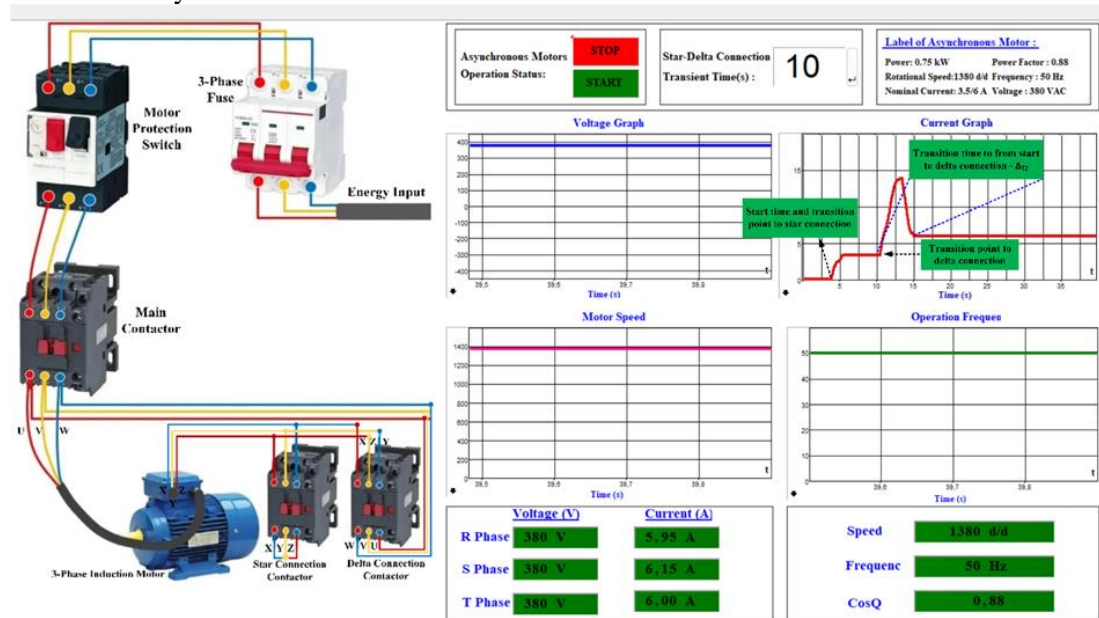


Figure 9. Screenshot when the star-delta transition time is 10s (Yıldız-delta geçiş süresi 10s olduğunda ekran görüntüsü)

4.CONCLUSIONS (SONUÇLAR)

Asynchronous motors, which constitute the majority of the industrial load, draw too much current at start-up. Starting methods are used to eliminate this situation. The star-delta starting

method, which is simple and inexpensive, is one of these methods. Thanks to this work that has been implemented;

- Determination of the steady state and dynamic behavior of the system when starting an asynchronous motor with the star-delta starting method,
- With this study, it can guide production in R&D studies, as well as provide convenience to employees in experimental studies and in selecting the most appropriate routing method,
- It can be used as an auxiliary course tool in the Electrical Machines course given in technical and vocational education institutions. Thus, it contributes to the more permanent learning of the formulas related to the subject and to see the effects of parameter change graphically,
- The star-delta starting method, on the other hand, is preferred mostly in simple applications due to the jumps in current and knocking in the motor due to the abruptness of the transitions,
- Computer-controlled operation of asynchronous motors operated by the star-delta starting method creates a safe working environment,

The disadvantage of the star- delta starting method is;

- Since this method provides a two-stage control process consisting of start and stop operation, it does not offer different speed control options,
- Inadequate control of the initial development speed of the asynchronous motor, inability to control torque, as well as the occurrence of vibrations on the machine shaft due to the high currents generated during the transition from star to triangle,
- In the selection of circuit elements such as residual current relay, fuse, motor protection switch and thermal switch used for protection purposes while using asynchronous motors operated with star-delta starting method in the market, it should be selected to be 5-6 times more than the nominal current value,

was identified in the application results.

ACKNOWLEDGMENTS (TEŞEKKÜR)

This study was supported with the project number 1919B012206044 under the program of "TÜBİTAK 2209 - University Students Research Projects Support Program".

AUTHORS' CONTRIBUTIONS (YAZARLARIN KATKILARI)

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

Deneyleyi 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] Habyarimana M, Dorrell DG. Methods to reduce the starting current of an induction motor, IEEE International Conference on Power, Control, Signals and Instrumentation Engineering, 2018(34-38).
- [2] Negm MMM, Bakhawain JM, Shwehdi MH. Speed control of a three-phase induction motor based on robust optimal preview control theory, IEEE Transactions on Energy Conversion, 2006; 21: 77-84.
- [3] Larabee J, Pellegrino B, Flick B. Induction motor starting methods and issues, Rec. Conf. Pap. - Annu. Pet. Chem. Ind. Conf., 2005(217-222).
- [4] Morizane T, Tsujikawa K, Kimura N. Control of Traction and Levitation of Linear Induction Motor Driven by Power Source With Frequency Component Synchronous With the Motor Speed, IEEE Transactions on Magnetics, 2011; 47: 4302-4305.
- [5] VanderMeulen H, Natali TJ, Dionise TJ, Paradiso G, Ameen K. Exploring New and Conventional Starting Methods of Large Medium-Voltage Induction Motors on Limited kVA Sources, IEEE Trans. Ind. Appl., 2019; 69: 1-10.
- [6] Danang Wijaya F, Kusumawan SA, Prabowo H. Reducing induction motor starting current using magnetic energy recovery switch (MERS), International Conference on Information Technology and Electrical Engineering, 2014(1-6).
- [7] Tohir T, Habinuddin E, Ilman SM, Putra FAS, Anwar H, Fadilah RA. Comparative Study of Inrush Current On Star, Delta, and Star-Delta Starters for a 1,5kW Three Phase Induction Motor with Power Quality Analyzer and Powertag, 2023 Innovations in Power and Advanced Computing Technologies (i-PACT), 2023; 1: 1-7.

- [8] Vadi S, Bayindir R, Toplar Y, Colak I. Induction motor control system with a Programmable Logic Controller (PLC) and Profibus communication for industrial plants - An experimental setup, *ISA Transactions*, 2022; 122: 459-471.
- [9] Du J, Mo G, Wu G, Huang K. An improved method for induction motor constant current soft-starting using fuzzycontrol, *International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery*, 2009(52-56).
- [10] Baimel D, Rabinovici, R. The performance of thyristor operated induction generator with stator connected in star, delta and delta with thyristors inside, *18th International Conference on Electrical Machines*, Portugal, 2008(1-6).
- [11] Demirbaş Ş, Irmak E, Bayhan S, Colak I. Torque and Speed Control Of Wound Rotor Induction Motor By Adjusting The Rotor Resistance With A Microcontroller, *J. Fac. Eng. Arch. Gazi Univ.*, 2008; 23: 801-809.
- [12] Fredemar Runcos CG, Stringari E. Benefit and drawbacks of low inrush large induction squirrel case electric motors, *IEEE Petroleum and Chemical Industry Technical Conference (PCIC)*, 2020(257-268).
- [13] Shuai Y, Jiang D, Chen Z, Liu Z, Sun H., Li P. Study of Star-Delta Soft Switch to Extend AC Motor High Speed Operation Region, *CES Transactions on Electrical Machines and Systems*, 2023; 7: 248-255.
- [14] Stermecki I, Tičar I, Zagradisnik Kitak P. FEM-based design of an induction motor's part winding to reduce the starting current, *IEEE Trans. Magn.*, 2006; 42: 1299-1302.
- [15] Lei Y, Zhao Z, Wang S, Dorrell DG, Xu W. Design and Analysis of Star-Delta Hybrid Windings for High-Voltage Induction Motors, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2011; 58: 3758-3767.
- [16] Ferreira FJTE, Ge B, Quispe EC, De Almeida, AT. Star and delta connected windings tolerance to voltage unbalance in induction motors, *International Conference on Electrical Machines*, 2014(2045-2054).
- [17] Cistelecan MV, Ferreira FJTE, Popescu M. Adjustable Flux Three-Phase AC Machines With Combined Multiple-Step Star-Delta Winding Connections, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2010; 25: 348-355.
- [18] Huang H, Chang, L. Electrical two-speed propulsion by motor winding switching and its control strategies for electric vehicles, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 1999; 48: 607-618.
- [19] Ferreira FJTE. On the star, delta and star-delta stator winding connections tolerance to voltage unbalance, *International Electric Machines and Drives Conference*, 2016(1888-1894).

Four Pole Limited Angle Toroidal Motor Magnetic Design

Akın AYDIN^{1*}, Ali SAYGIN²

¹Gazi University, Graduate School of Natural and Applied Sciences, Ankara, Turkey

²Department of Electrical and Electronics Engineering, Faculty of Technology, Gazi University, Ankara, Turkey

Article Info

Research article
Received: 25/07/2024
Revision: 02/10/2024
Accepted: 19/10/2024

Keywords

Limited Angle Torque
Motor
Limited Angle Toroidal
Motor
Finite Element Analysis

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 25/07/2024
Düzeltilme: 02/10/2024
Kabul: 19/10/2024

Anahtar Kelimeler

Sınırlı Açılı Tork Motoru
Sınırlı Açılı Toroid Motor
Sonlu Eleman Analizi

Graphical/Tabular Abstract (Grafik Özet)

In this paper, the mathematical modeling and magnetic analysis of a four-pole limited angle toroidal wound motor are presented in detail. / Bu çalışmada dört kutuplu sınırlı açılı toroidal sargılı motorun matematiksel modellemesi ve manyetik analizi kapsamlı olarak sunulmaktadır.

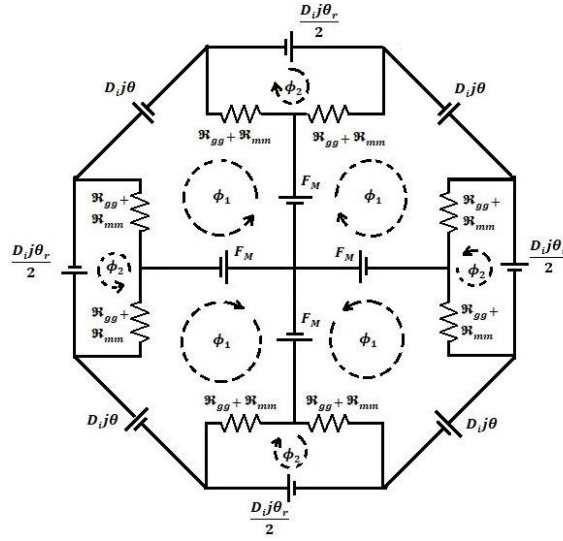


Figure A: Arc type 4 pole limited angle toroidal motor magnetic equivalent circuit / Şekil A: Yay tip dört kutuplu sınırlı açılı toroid motorun manyetik eşdeğer devresi

Highlights (Önemli noktalar)

- 4-pole LATM magnetic and transient analysis / 4 kutuplu LATM manyetik ve geçici durum analizi
- Torque performance at different stator inner diameter variations / Farklı stator iç çap değişimlerinde tork performansı
- Torque performance with different winding-pole geometries / Farklı sargı-kutup geometrilerinde tork performansı

Aim (Amaç): This study aims to design and electromagnetic performance analysis of a limited angle torque motor. / Bu çalışma, sınırlı açılı tork motorunun tasarımını ve elektromanyetik performans analizini amaçlamaktadır.

Originality (Özgünlük): This study presents the design of a limited angle torque motor specific to the field of use and requirements. / Bu çalışma, kullanım alanına ve gereksinimlere özel sınırlı açılı tork motor tasarımını sunmaktadır.

Results (Bulgular): The designed LATM can be used in high precision applications with low magnetization risk and high torque per unit volume. / Tasarlanan LATM, yüksek hassasiyetin ön planda olduğu uygulamalarda, düşük manyetizasyon riski ve birim hacimdeki yüksek torku ile kullanılabilir.

Conclusion (Sonuç): As a result of the study, a LATM design with torque linearity at 95% of the peak torque in the constant torque region, with a peak torque value of 2.221Nm, has been obtained with a high torque per unit volume compared to its alternatives. / Yapılan çalışma sonucunda, sabit tork bölgesinde tepe torkun %95 inde tork doğrusallığı olan, 2.221Nm tepe tork değeri ile alternatiflerine kıyasla birim hacimde yüksek torka sahip olan bir LATM tasarımı elde edilmiştir.



Four Pole Limited Angle Toroidal Motor Magnetic Design

Akın AYDIN^{1*} , Ali SAYGIN² 

¹Gazi University, Graduate School of Natural and Applied Sciences, Ankara, Turkey

²Department of Electrical and Electronics Engineering, Faculty of Technology, Gazi University, Ankara, Turkey

Article Info

Research article

Received: 25/07/2024

Revision: 02/10/2024

Accepted: 19/10/2024

Keywords

Limited Angle Torque

Motor

Limited Angle Toroidal

Motor

Finite Element Analysis

Abstract

This article presents the theoretical analysis of limited angle torque motors (LATM), numerical modeling for 4-pole types and the effect of various dimensions on motor performance. First, the magnetic equivalent circuit model and equations of the LATM are defined and the motor torque expression for 4 poles is established. Then analytical hierarchy process (AHP), a decision-making tool, is used as a reference to determine the best LATM design parameters. The cogging torque, constant torque region and peak torque value of the motor at the lower and upper values of the obtained design parameters are analyzed in the finite element analysis environment. The transient analysis of the best design considering certain limitations is performed and the operating performance is analyzed in no-load condition. With the proposed model, the torque of the 4-pole limited angle torque motor in the constant torque region is obtained at 95% of the peak torque. This value is verified by finite element analysis.

Dört Kutuplu Sınırlı Açılı Toroid Motor Manyetik Tasarımı

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi

Başvuru: 25/07/2024

Düzeltilme: 02/10/2024

Kabul: 19/10/2024

Anahtar Kelimeler

Sınırlı Açılı Tork Motoru

Sınırlı Açılı Toroid Motor

Sonlu Eleman Analizi

Öz

Bu makale, sınırlı açılı tork motorlarının (LATM) teorik analizini, 4 kutuplu tipler için sayısal modellemeyi ve çeşitli boyutların motor performansı üzerindeki etkisini sunmaktadır. İlk olarak, LATM'nin manyetik eşdeğer devre modeli ve denklemleri tanımlanmış ve 4 kutup için motor torku ifadesi oluşturulmuştur. Ardından, bir karar verme aracı olan analitik hiyerarşi süreci (AHP), en iyi LATM tasarım parametrelerini belirlemek için referans olarak kullanılmıştır. Elde edilen tasarım parametrelerinin alt ve üst değerlerinde motorun vuru torku, sabit tork bölgesi ve tepe tork değeri sonlu elemanlar analizi ortamında analiz edilmiştir. Belirli sınırlamalar göz önünde bulundurularak en iyi tasarımın geçici durum analizi gerçekleştirilmiş ve yüksüz durumda çalışma performansı analiz edilmiştir. Önerilen model ile 4 kutuplu sınırlı açılı tork motorunun sabit tork bölgesindeki torku, tepe torkunun %95'i olarak elde edilmiştir. Bu değer sonlu elemanlar analizi ile doğrulanmıştır.

1. INTRODUCTION (GİRİŞ)

Electrical machinery is used in all areas of life. Today, they are used in aviation, especially in unmanned aerial vehicles, space technology, automobiles, optical scanning, thermal imaging, servo valves, scanning mirror mechanism, laser mirrors, positioning missile guidance radar antennas, small-scale gas turbines, especially small-scale engines. These motors can be seen as key components as they significantly affect the performance and reliability of the system in their field of use. It is generally expected to be a low-cost but highly reliable component. Fast response, accurate positioning and robustness against possible parameter changes and external disturbances are preferred. LATM is one of these motors that

emphasizes precision. It is preferred in situations where full and precise control over a certain range is required. For example, in aviation, the ability of fuel meters to precisely control the fuel flow is an important component in the reliable operation of the aircraft [1]. However, the lack of diversity in the limited angle torque motor and the limited number of manufacturers cause new designs using this motor to be dependent on the existing motor geometry. Therefore, given that size is an important issue in areas where limited angle torque motors are used, diversity is essential in this motor. In addition, fluctuations in rare element magnet prices have sometimes been experienced as a rare element crisis. In this context, researchers have turned to the development of electric motors with reduced rare element content. From this point of view, it is

necessary to investigate the effect of magnet type and geometry on the material in limited angle torque motor design and to seek maximum energy in the smallest possible volume. Since there is very little research in the literature based on magnetic analysis of LATMs, new analytical solutions have been sought for the design of motors with different pole numbers and types.

In the literature, there are some studies on the design, performance comparison and improvement of LATMs. These studies focused on optimization techniques of physical dimensions and driver controls in conventional arc type rotor motors. Krishna and Kannan compared the slotted and slotless type brushless DC LATM design. They found that although slotted-wound LATMs have higher torque constants, they have greater magnetic friction and iron losses, and even torque fluctuation due to the slot [2]. Tsai et al. designed a 2-pole brushless DC LATM and investigated its performance in fuel control of a gas turbine engine and found that the precision is efficient [3]. Zarandi et al. created a magnetic equivalent circuit model for 2-pole LATM design. In order to reduce the volume and weight of the rotor, the magnet geometry was made in parts, but it was shown that the losses in the generated torque increased [4]. Wu et al. studied the design and optimization of LATM for small gap applications. The magnetic equivalent circuit model is organized in matrix format and the measurement of torque constant and linearities by MOPSO method is consistent with experimental results [5]. Hekmati et al. made a comparison between outer rotor type and inner rotor type LATMs and found performance advantages in the outer rotor type topology [6]. Li et al. analyzed a new LATM with an irregular number of slots and presented an analytical equation to support the optimum design of the LATM. It was found that the proposed design resulted in an increase in operating area and a decrease in losses [7]. Mina Roohnavazfar et al. considered the axiomatic design (AD) method to obtain the most efficient 2-pole limited angle torque motor and found that the results are reliable [8]. Widdowson et al. investigated computer-based optimizations of the LATM to maximize torque per current [9]. Saaty studied the effect of nonlinear parameters in a limited angle torque motor and found that each factor has different consequences. Analytic hierarchy process was proposed to select the best alternative design [10]. As an alternative to the time-consuming solutions of AHP, the AD (axiomatic design) approach was proposed by Suh. This solution is proposed to reduce expert requirements and save time in design solutions [11]. In the research on LATM control, Xiao et al. studied

a PID controller for LATM position that includes angle, velocity and current loops, and Zhao et al. studied a PID control method that also has an acceleration loop [12-13]. Chen et al. proposed a feedback controller to manage the nonlinear variables with the variation of angle in LATM and to increase the torque produced per current. The prototype results demonstrated the operating efficiency [14].

Previous studies have only focused on magnetic analysis, simulations, optimization of LATM parameters and driver design of 2-pole LATMs with conventional arc-type rotor structure. Unfortunately, there is very little literature on the effect of rotor pole geometry and number of poles on motor performance in limited angle torque motors. Due to the high torque of the proposed frameless limited angle torque motor and the large constant torque region, it is necessary to examine many related parameters. Changes in parameters such as magnet type, geometry, stator-rotor radial and axial distances, inner diameter, air gaps, mechanical clearances, pole and stator winding arc lengths will be monitored in order to create the most suitable design for the application area. AHP, one of the decision-making tools, will be used to determine the best LATM design parameters and the outputs will be verified by finite element analysis method.

2.FOUR POLE LIMITED ANGLE TOROIDAL MOTOR MAGNETIC ANALYSIS (DÖRT KUTUPLU SINIRLI AÇILI TOROİDAL MOTOR MANYETİK ANALİZİ)

A limited angle toroidal motor is an electric machine with two or more poles and a permanent magnet rotor, fed by a toroidally wound coil on the stator. With the stator-rotor concentric structure, the radial magnetic attraction force balances each other and the state in which the rotor is inside is called the inner rotor. The interaction between the magnetic field created by the current-carrying windings and the constant magnetic flux produced by the magnets determines the direction and magnitude of the motion in the motor. Since the magnetic flux produced by the magnets is constant, the component that affects torque is the direction and magnitude of the direct current flowing through the windings and the position of the magnet. The constant torque operating field depends on the toroidal coil arc length and the pole arc angle lengths. Cogging torque is either absent or negligible. The fact that LATMs have a toroidal wound coil in a slotless structure prevents torque ripple. The small length/diameter ratio of these motors allows them to operate in very small confined spaces. In addition,

the low inertia of the rotor assembly allows high angular acceleration. Brushless and non-commutation are also advantages. With these advantages, LATM is also used in military and medical applications.

The cross-section of the LATM structure with an arc-type rotor is shown in Figure 1. As can be seen from Figure 1, an arc type magnet is mounted on the rotor and designed to determine the operating area.

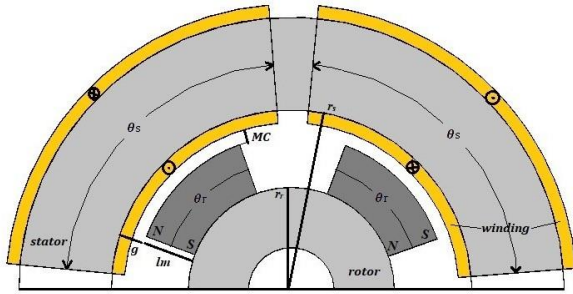


Figure 1. Arc type 4 pole limited angle toroidal motor half section (Yay tip dört kutuplu sınırlı açılı toroid motorun yarım kesiti)

In LATM design, electromagnetic, thermal, mechanical and some problems need to be investigated. Magnetic analysis is examined both analytically and through software programs. Analytical calculation requires the properties of the magnet and all the geometric values in the motor. Considering the LATM shown in Figure 1, the magnetic flux of the permanent magnet first passes through to the air gap and then into the stator material. The magnetic flux, which is splitted into two here, completes its circulation on the stator and completes its circuit with the air gap on the other pole, the magnet surface on the other pole and rotor. This circuit circulation, which is linear when there is no current in the windings, completes its circuit by concentrating in one direction according to the direction of the current when the current flows through the windings. When there is current in the windings, a force is generated in the air gap due to magnetic interaction and as a result of this force, rotational movement occurs in the rotor. The value and area of influence of this torque is determined by some calculations. In magnetic circuit analysis, it is first necessary to determine the magnetic reluctances in the flux path. The magnetic flux produced by the magnet will be scattering in two different directions due to the arc type of the magnet. The circuit analysis of this situation is shown in Figure 2.

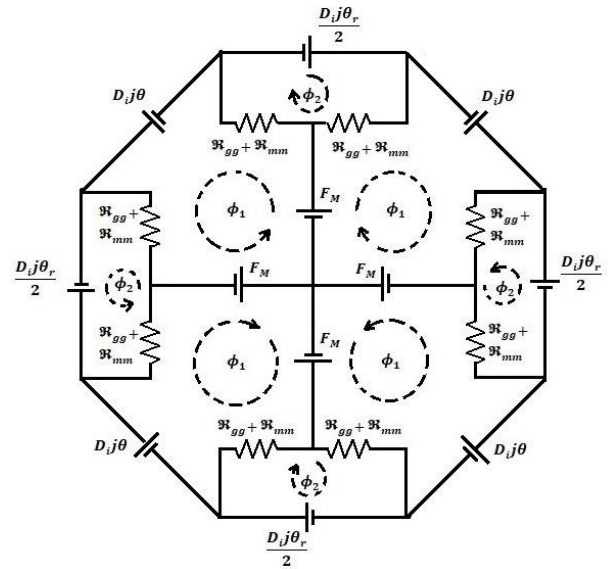


Figure 2. Arc type 4 pole limited angle toroidal motor magnetic equivalent circuit (Yay tip dört kutuplu sınırlı açılı toroid motorun manyetik eşdeğer devresi)

As can be seen from Figure 2, the magnetic flux produced in F_M (magneto motor force produced by magnet) completes its circuit in such a way that there are two approximately equal magnetic flux distributions from the arc-shaped magnet and the air gap to the neighboring magnets. This is expressed in the equivalent circuit as R_{gg} (magnetic reluctance of the half-arc in the air gap) and R_{mm} (magnetic reluctance of the half-arc magnet). As it is known, the magnetic reluctance of a material is directly proportional to the length of the magnetic flux path and inversely proportional to the permeability and cross-sectional area of the material, as expressed in the following equation [15]. Since half of the arc type magnet is considered in the magnetic equivalent circuit, the cross sections are taken as half.

$$R_{mm} = \frac{l_m}{\mu_0 \mu_m x (A_m/2)} \tag{1}$$

$$R_{gg} = \frac{l_g}{\mu_0 x (A_g/2)} \tag{2}$$

where A_m and A_g are the cross-sectional areas of the magnet and the air gap, respectively, and μ_0 and μ_m are the relative magnetic permeability values of the gap and the magnet. In the Eq. 1 and 2, l_m is the radial length of the magnetic flux on the magnet and l_g is the air gap distance. The directions of the magnetic flux formed by the interaction of the magnetic flux created by the current passing through the windings and the magnet are shown in Figure 2. The magneto motor force that creates the magnetic flux in the magnetic equivalent circuit is of two types. One is the magneto motor force F_M

produced by the magnets, and the other is the magneto motor force F_W produced by the current carrying windings. These two magneto-motor forces determine the direction and magnitude of the circulating magnetic flux. When the position of the rotor is in the center of the opposite winding, the magneto motor force generated by the windings is calculated as follows;

$$F_W = \frac{N_s I_s}{\theta_s} \theta_r \quad (3)$$

where N_s and I_s are the number of turns in the winding and the current passing through the winding, respectively. In the Eq.3, θ_r is pole arc length and θ_s is the coil arc length. As seen in Eq. 3, the magneto-motor force of the winding opposite the pole is equal to the pole arc length ratio of the total ampere-turn value of the winding. While the magneto motor force of the winding effects across the pole in the ratio of the pole arc length, it effects outside the pole region in the ratio of the rotor position angle. The effect of the magnetomotive force of the winding across and out of the pole in the equivalent circuit is shown in Figure 2 with a linear current density expression. Linear current density is the current density per unit length of the winding and is calculated as follows [4,9];

$$J = \frac{N_s I_s}{(D_i/2)\theta_s} \quad (4)$$

where D_i is stator inner diameter. The circulating magnetic flux in the magnetic equivalent circuit is the ratio of the total magneto motor force to the equivalent reluctance. Considering the magnetomotor force of the magnet and the magnetomotor force of the windings connected to the rotor position, the circulating magnetic fluxes are:

$$\phi_1 = \frac{2xF_M}{2(\mathfrak{R}_{gg}+\mathfrak{R}_{mm})} + \frac{D_i j \theta}{2(\mathfrak{R}_{gg}+\mathfrak{R}_{mm})} \quad (5)$$

$$\phi_2 = \frac{\frac{D_i j \theta_r}{2}}{2(\mathfrak{R}_{gg}+\mathfrak{R}_{mm})} \quad (6)$$

where, θ is rotor position. The difference between stator winding and pole arc lengths is the region where the torque is constant and is called constant torque region. The constant torque region depends on the stator winding arc length and pole arc length as follows:

$$\theta_0 = \frac{\theta_s - \theta_r}{2} \quad (7)$$

The LAT motor runs at constant torque within the range of $\pm \theta_0$. In the literature, torque in the constant torque region is required to be more than 80% of the peak torque [2,3].

For the torque produced in the motor when the magnetic reluctance of the stator and rotor is neglected; the torque can be calculated by calculating the derivative of the total coenergy produced by the windings and the magnet with respect to the rotor position. The total coenergy, energy and the torque can be expressed by the following equations [4]:

$$W_T' = \sum \int \lambda di = \sum \frac{F\phi}{2} \quad (8)$$

$$W_T' = \frac{4\left(\frac{N_s I_s}{\theta_s}\right)^2}{(\mathfrak{R}_{gg}+\mathfrak{R}_{mm})} \theta^2 + \frac{8F_M\left(\frac{N_s I_s}{\theta_s}\right)}{(\mathfrak{R}_{gg}+\mathfrak{R}_{mm})} \theta + \frac{4F_M^2 + \left(\frac{N_s I_s}{\theta_s}\right)^2}{(\mathfrak{R}_{gg}+\mathfrak{R}_{mm})} \quad (9)$$

$$T = \frac{\partial W_T'}{\partial \theta} = \frac{2N_s I_s}{\theta_s} \left(\frac{4N_s I_s \theta + 4F_M}{\mathfrak{R}_{gg}+\mathfrak{R}_{mm}} \right) \quad (10)$$

$\theta = 0$; torque;

$$T_p = \frac{8F_M N_s I_s}{(\mathfrak{R}_{gg}+\mathfrak{R}_{mm})\theta_s} \quad (11)$$

According to the equation obtained in the analytical calculation, the electromagnetic torque is directly proportional to the magneto motor force of the magnet, number of turns and current magnitude and inversely proportional to the magnetic reluctance and stator winding arc length.

3.DESIGN IMPROVEMENT METHODS AND FINITE ELEMENT ANALYSIS (TASARIM İYİLEŞTİRME YÖNTEMLERİ VE SONLU ELEMEN ANALİZİ)

The mathematical model of the 4-pole LATM provides the magnetic analysis and torque calculation. Eq. 5 and Eq. 6 are used to determine whether the material is in magnetic saturation by considering the circulating magnetic flux and the cross-sectional ratio of the material. The mathematical model allows the output to be predicted according to the type and geometry of the material to be selected. The principle of operation is quite simple and design improvement is required to achieve maximum torque output without cogging torque in the smallest possible volume. In this context, design improvement should be done by determining usage area constraints and minimum requirements. When determining the variables, the

parameters where the material does not saturate are determined using a mathematical equation. However, due to the non-linear structure of the material used in the motor, the magnetic flux density distribution can only be determined through computer aided programs. In general, the accuracy of the solution is increased with the finite element method (FEM). As it is known, the solution in FEM is based on the principle of dividing the material into a finite number of small regions. In the solution region, the effect of the elements connected to each other in a chain is analyzed. The degree of accuracy is proportional to the number of meshes of the appropriate size. Therefore, the most accurate result is achieved through time-consuming simulations. It is aimed to achieve maximum torque within certain cogging torque limits with the smallest possible volume and less material.

There are multiple variables in limited angle torque motor design. While each parameter change has its own consequences, sometimes changing certain parameters together produces different results. The

best design should be selected by considering industrial requirements and restrictions in design criteria. For this purpose, there is a need to use a decision-making tool. AHP, one of the useful tools that can be used in the multi-criteria decision-making process, is discussed in this article. Using AHP has the advantage of choosing a higher quality alternative in both objective and subjective problem areas that can control the consistency of comparisons [4]. In AHP, which is widely used as a powerful and flexible decision-making tool, some effective criteria are taken into account and evaluated according to expert judgments and acceptable design solutions. The weight, volume, magnetic torque, copper loss and mechanical clearance of the LATM are considered as criteria. In the LATM design procedure, it is desirable to minimize weight, volume, maximize torque as high as possible, and maximize mechanical clearance considering the manufacturing process. Therefore, it is necessary to first define the decision problem in detail and create a decision hierarchy. The hierarchy framework for LATM design is shown in Figure 3.

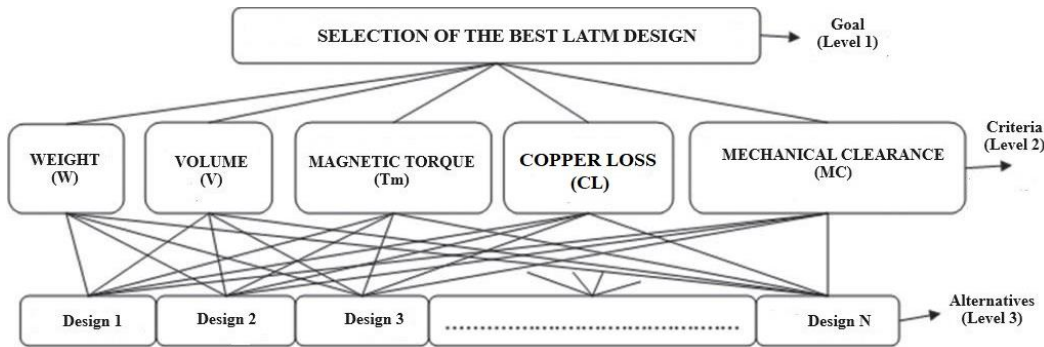


Figure 3. Hierarchy framework of the LATM design (LATM tasarımının hiyerarşik çerçevesi)

The first level is the overall objective of the decision making and the selection of the best LATM is specified here. The second stage is the criteria defining LATM efficiency, where the designs are determined based on the knowledge of the industrial application of the LATM. In the last stage, decision alternatives are identified. Prior to the analysis, pairwise comparison matrices should be created and

priority vectors should be determined using the arithmetic mean, geometric mean or least squares method. Considering the industrial limitations and requirements, five different designs are selected with the help of analytical calculations. The following table is taken as a performance priority criterion and the priority vector is determined by arithmetic method.

Table 1. Criteria matrix (Kriter matrisi)

	Weight (W)	Volume (V)	Torque (Tm)	Copper Losses (CL)	Mechanical Clearance (MC)
Weight (W)	1	1/3	1/9	1/7	1/5
Volume (V)	3	1	1/7	1/5	1/3
Torque (Tm)	9	7	1	3	5
Copper Losses (CL)	7	5	1/3	1	3
Mechanical Clearance (MC)	5	3	1/5	1/3	1

$$\text{Priority vector} = \begin{bmatrix} 0.0348 \\ 0.0678 \\ 0.5028 \\ 0.2602 \\ 0.1344 \end{bmatrix} \quad (12)$$

The samples taken from Design 1 to Design 5 are compared with each other separately in terms of each criterion in the table above. The priority vector is determined from the matrices obtained from the comparisons and these vectors together form the main matrix. When the resulting main matrix is

multiplied by the priority vector of the criteria matrix given in Eq. 12, the design with the highest value is the best design determined by AHP. The determined alternative values are verified in finite element analysis and the effect of changing some parameters in the design on the motor is examined. In the search for alternative designs considering industrial requirements, the parameters given in the table below are determined. Table 2 shows the parameters obtained as a result of some improvements made for the 3.5 inch outer diameter motor subject to the study.

Table 2. Main design parameters (Ana tasarım parametreleri)

Parameter	Value	Parameter	Value
Pole Number, (p)	4	Magnet length, (lm)	5 mm
Stator outer diameter, (Do)	3.5 inch (88.9mm)	Air gap, (lg)	3 mm
Stator inner diameter, (Di)	70 mm	Mechanical clearance, (MC)	0.5 mm
Rotor outer diameter, (Ro)	64 mm	Stator-rotor material	Steel 1010
Rotor inner diameter, (Ri)	26 mm	Torque constant	1.11 Nm /A
Motor axial length, (La)	32 mm	Excursion angle	± 45

The effects of some variables on design improvements are examined. These are values such as stator and rotor inner diameter changes, air gaps, mechanical clearances between pole windings, magnet thickness, length, arc degree and type, axial and radial distances in the motor, winding arc length, etc. These variables affect variables such as torque and cogging torque. Although examining these parameters individually gives an idea of the effect on motor performance, the main result is that all components change together. This prolongs the simulation process for multiple variables at the same time. Based on the reference parameters obtained with AHP, geometric changes of all components, material selection analysis for magnet and core are performed using the finite element method with the Ansys-Maxwell software program.

In Ansys Maxwell, the design geometry is first created with the values taken from Table 2. The magnetostatic solver is selected for the solid model shown in Figure 4, and mesh elements are created for this analysis. For a better and more precise solution the analysis is examined with 1200000 mesh elements. After determining the current directions of the windings and the poles of the magnets, magnetic analysis is started. For a 4-pole motor, a variable is assigned to the rotor position in the ±45 degree operating region, and the values of the rotor at different positions are examined. As a result, the torque constant in Table 2 is obtained.

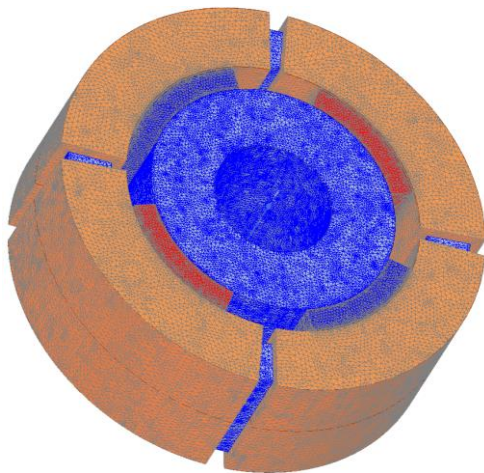


Figure 4. Mesh plot of the the LATM design (LATM tasarımının ağ çizimi)

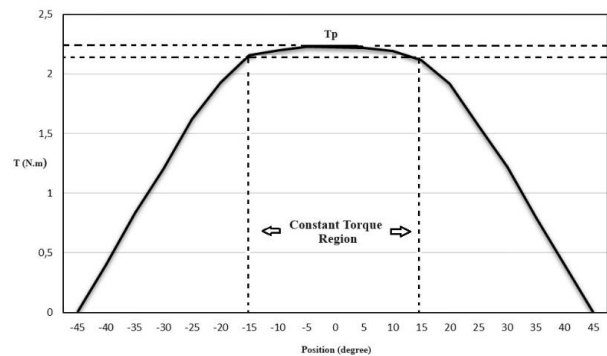


Figure 5. Torque-angle characteristic of the LATM design (LATM tasarımının tork-açı karakteristiği)

When the values in Table 2 are taken, the variation of the magnetic torque obtained from the finite element analysis according to the rotor position is shown in Figure 5. When the rotor position is moved from -45 degrees to +45 degrees, the force in the air gap affects the torque. When it moves from -15

degrees to +15 degrees, a constant torque region is formed. It is desirable that the peak torque in the constant torque region is close to the torque values at the inlet and outlet of the constant torque region of the rotor, that is, the torque curve is linear in this region.

In addition, inductance values, magnetic flux and flux densities, peak torque, constant torque region and cogging torque are determined. In order to obtain the effect of the parameters determining the LATM on the motor in the magnetostatic solver, first of all the effect of the inner diameter of the motor with an outer diameter of 3.5 inches, together with the stator and rotor pole arc lengths, is analyzed.

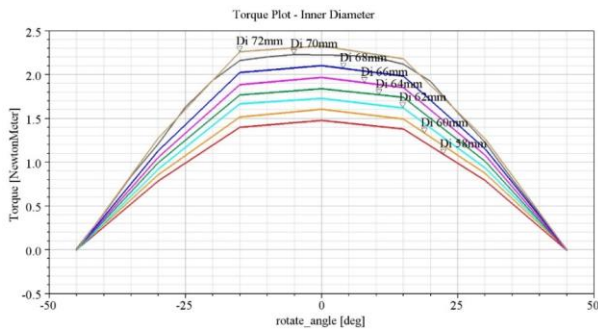


Figure 6. Effect of stator inner diameter change (Stator iç çap değişiminin etkisi)

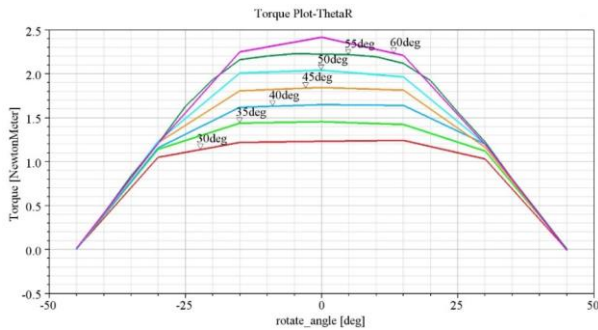


Figure 7. Effect of pole arc length change (Kutup yay uzunluğu değişiminin etkisi)

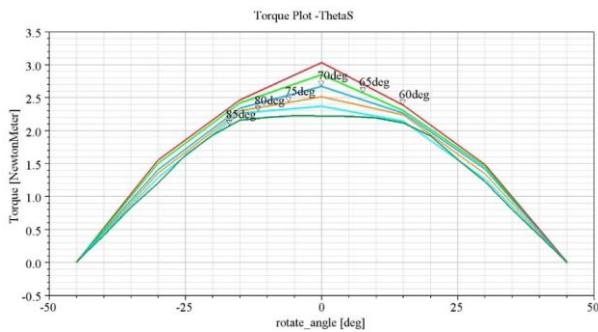


Figure 8. Effect of coil arc length change (Sargı yay uzunluğu değişiminin etkisi)

In Figure 6, it is seen that the increase in the inner diameter causes an increase in the torque. However, in the constant torque region, the torque curve linearity changes. At this stage, the value where the inner diameter is 70 mm is the value that meets the most linear and the highest torque together. Likewise, Figure 7 and Figure 8 show the effects of pole arc lengths on torque when the stator winding is 85 degrees, and the effects of the coil arc length wound on the stator on torque when the pole arc is 55 degrees. It has been determined that the arc lengths increase the torque as they get closer to each other, but decrease the constant torque region. Considering the magnet cost and the magnetic saturation limits of the material, the effect of the magnet thickness on the torque is analyzed in Figure 9 and the maximum torque value is desired with the smallest possible magnet. Air gap and mechanical clearance are also analyzed in the design development stages and it is observed that the torque increased in the smallest possible air gap. In addition, 0.5 mm changes in the mechanical clearance are tested and it is determined that the increase and decrease in the clearance affect the torque as can be seen in Figure 10. Considering the ease of design and winding thickness, an air gap of 3 mm is chosen for the design.

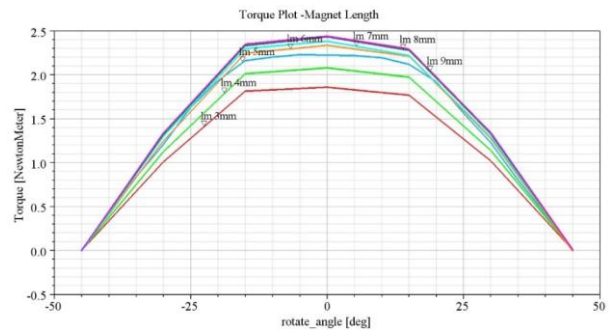


Figure 9. Effect of magnet thickness. (Mıknatıs kalınlığı etkisi)

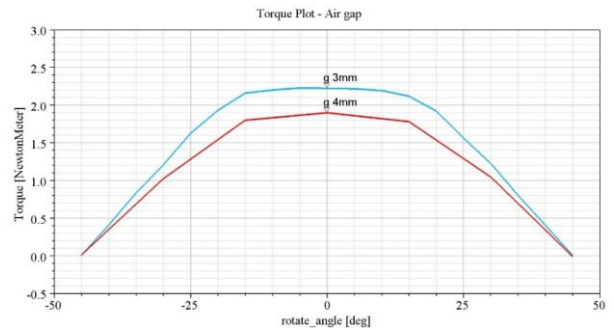


Figure 10. Effect of air gap and mechanical clearance (Hava aralığı ve mekanik açıklık etkisi)

Although the change of the rotor inner diameter has no direct effect on the torque, it should be taken into

account in the saturation of the material and the weight of the moving part. Since it is observed that the magnetic saturation in the rotor is exceeded at the values above of 26 mm, the design is created with an inner diameter of 26 mm.

4.SIMULATION RESULTS (SİMULASYON SONUÇLARI)

The magnetic analysis is completed by considering the constraints and requirements. Magnetic flux values, magnetic flux densities and peak torque values obtained in Ansys-Maxwell matched with mathematical expressions to a certain extent. Taking the values in Table 2 into Eq. 11, a peak torque of 2.414 Nm is obtained. This value is the value where leakage is ignored and the actual value is the result obtained in the simulation where leakage in the nonlinear material is taken into account. The curve is given in Figure 11. The error due to the 8.69% leakage flux shown in Table 3 also confirms the mathematical expression. Considering the torque linearity in the constant torque region, the lowest torque in the constant torque region is 95%

of the peak torque. This is the most linear curve in the design development stages.

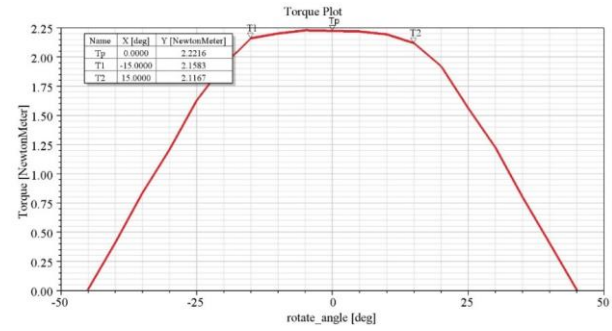


Figure 11. LATM magnetic torque plot (LATM manyetik tork eğrisi)

Table 3. Comparison of analytical model and FEA (Analitik model ve sonlu eleman analiz karşılaştırması)

	Analytical Model	FEA	Error (%)
Peak Torque (Nm)	2.41	2.22	-8.69
Average Airgap Flux Density (T)	0.681	0.688	0.891

Table 4. Comparison of LATM3500 and others (LATM3500 ve diğerlerinin karşılaştırması)

Product Name	Number of Poles	Torque Sensivity (Nm/A)	Peak Torque (Nm)	Outside Diameter (mm)	Motor Axial Height (mm)
LATM3500	4	1.11	2.221	88.9	32
Ref-2	4	0.20	0.35	84	16
Ref-4	2	1.11	2.48	89.46	48
ICPE TQR-28	4	0.148	0.296	70	16
MOOG TD4094	6	0.339	1.016	103.98	23

When the torque value obtained from the simulation results is compared with the alternatives, it is seen that the peak torque value per unit volume is higher. The comparison table in terms of the outer diameter and axial heights of the motor compared to its counterparts is as follows. The design is named as LATM3500 and the Table 4 shows the designs taken from the reference sources numbered 2 and 4 in the literature researches and the products of some manufacturers with similar geometry.

The magnetic flux density in the air gap, which provides the force and thus the torque, is given in Figure 12. It has been shown that the design is optimized without saturation of the material, which has been found to have similar and symmetrically balanced fluxes at all poles.

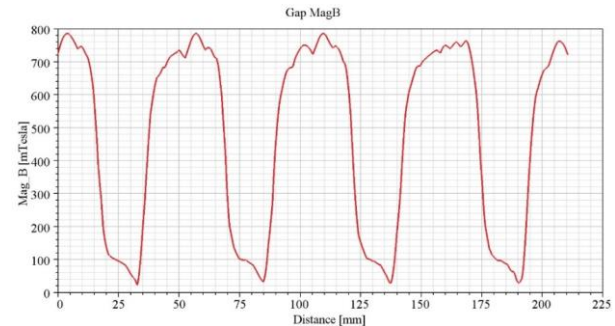


Figure 12. Magnetic flux density change in air gap (Hava aralığındaki manyetik akı yoğunluğu değişimi)

The vectoral direction and magnitude of the magnetic flux is shown in Figure 13, where it completes its circuit without reaching magnetic

saturation. In addition, vectoral magnetic flux directions confirm the magnetic equivalent circuit.

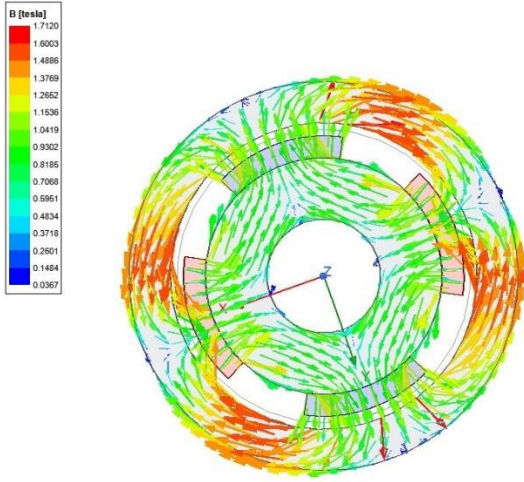


Figure 13. Magnetic flux density vector distribution (Manyetik akı yoğunluğu vektörel dağılımı)

A transient analysis is performed for the position response of the design. It is important to calculate the moment of inertia correctly in order to calculate the exact torque from time-varying position information. Since calculations are difficult due to the complexity of the structure, Ansys-Maxwell transient solver is used. After determining the moment of inertia and damping coefficient in the mechanical transient analysis, the change curve of the rotor position with respect to time is created. The position response of the design is examined in the transient analysis when current passed through the windings at no load. When a voltage of 70 V is applied to the stator terminals, the rotor moves thanks to the magnetic flux generated. As can be seen in Figure 14, the rotor moves from 0 degrees to 45 degrees in 150ms.

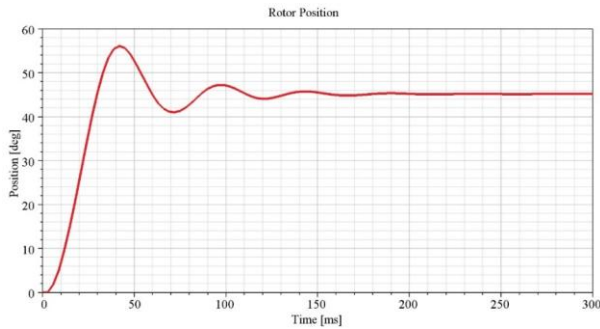


Figure 14. FEA result for position response of LATM (LATM'nin pozisyon tepkisi için sonlu eleman analiz çıktıları)

5.CONCLUSIONS (SONUÇLAR)

In this study, the mathematical model and magnetic analysis of a 4-pole limited angle toroidal motor, which is not available in the literature, are completed. The effects of changing the magnet and stator-rotor geometry on the performance of the motor are investigated. In the constant torque operating region, both linear and high torque, minimum cost, minimum volume and weight values are determined with the help of AHP. A linear torque curve that does not fall below 95% of the peak torque in the ± 15 degree operating region was obtained. It is seen that the torque constant per unit volume is more advantageous than the alternatives produced in the industry and the designs obtained in article researches. In addition, by examining motors with different geometry and number of poles, it was ensured to reduce the dependence on traditional type motors in the inventory of a few manufacturers and to shed light on the design of the LAT motor specific to the area of use.

ACKNOWLEDGMENTS (TEŞEKKÜR)

The author would like to acknowledge the Gazi University Scientific Research Unit for financial support of this research under grants FDK 2023-8444.

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)

Akın AYDIN: He conducted the research, analyzed the results and performed the writing process. Araştırmayı yapmış, sonuçlarını analiz etmiş ve makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

Ali SAYGIN: He contributed subject and article evaluation.

Konu ve makale değerlendirmesinde katkıda bulunmuştur.




CONFLICT OF INTEREST (ÇIKAR ÇATIŞMASI)

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

REFERENCES (KAYNAKLAR)

- [1] Chen Q., Sheng H., Jiang S. Integrated Physical Modeling and Optimal Control Method of Limited-Angle Torque Motor in Fuel Metering Apparatus. *Micromachines* 2022; 13(6), 949.
- [2] Krishna P.M., Kannan N. Brushless DC limited angle torque motor. In Proceedings of the 1996 international conference on power electronics, drives and energy systems for industrial growth, vol. 1; 1996. pp. 511–516.
- [3] Tsai C.C., Lin S.C., Huang H.C., Cheng Y.M. Design and control of a brushless DC limited angle torque motor with its application to fuel control of small-scale gas turbine engines. *Mechatronics* 2009; 19(1), pp. 29–41.
- [4] Nasiri-Zarandi R., Mirsalim M., Cavagnino A. Analysis, optimization, and prototyping of a brushless DC limited-angle torque-motor with segmented rotor pole tip structure. *IEEE Trans. Ind. Electron* 2015; 62 (8): 4985–4993.
- [5] Wu S., Zhao X., Jiao Z., Luk P.C.K., Jiu C. Multi-objective optimal design of a toroidally wound radial-flux Halbach permanent magnet array limited angle torque motor. *IEEE Trans. Ind. Electron.* 2016; 64 (4): 2962–2971.
- [6] Hekmati P., Yazdanpanah R., Mirsalim M., Ghaemi E. Radial-flux permanent-magnet limited-angle torque motors. *IEEE Trans. Ind. Electron.* 2016; 64 (4): 1884–1892.
- [7] Li Y., Ma P., Wang Q., Zhao M. Analysis, Modeling, and Verification of Limited Angle Torque Motors with Irregular Slot Numbers for Performance Improvement. *IEEE Trans. Energy Convers.* 2020; 35 (2): 1004–1013.
- [8] Roohnavazfar M., Houshmand M., Nasiri-Zarandi R., Mirsalim M. Optimization of design parameters of a limited angle torque motor using analytical hierarchy process and axiomatic design theory, *Production & Manufacturing Research.* 2014; 2 (1): 400-414.
- [9] Widdowson G. P., Howe D., Evison, P. R. (1991). Computer-aided optimization of rare-earth permanent magnet actuators, *Computation in Electromagnetics.* London, 93,96.
- [10] Saaty T. L. A scaling method for priorities in hierarchical structures. *Journal of Mathematical Psychology.* 1977; 15 (3): 234–281.
- [11] Suh N. P. (2001). *Axiomatic design: Advances and applications.* New York.
- [12] Xiao R., Zhou M., Hao S.G. Design of Position Servo Driver for DC Limited Angle Torque Motor. *Micromotors* 2008; 41, 37–39+42.
- [13] Zhao H.W. Design and Research on LABLTM Used for the Electronic Governor's Actuator of Diesel Engine. Master's Thesis, Harbin Engineering University, Harbin, China, 2008.
- [14] Chen S.L., Kamaldin N., Teo T.J., Liang W., Teo C.S., Yang G., Tan K.K. Toward comprehensive modeling and large-angle tracking control of a limited-angle torque actuator with cylindrical Halbach. *IEEE/ASME Trans. Mechatronics.* 2015; 21 (1): 431–442.
- [15] Lee H.-Y., Yoon S. Y., Kwon S. O., Shin J. Y., Park S. H., Lim M. S. A Study on a Slotless Brushless DC Motor with Toroidal Winding. *Processes* 2021; 9 (11):1881.

Estimation of Hydroelectric Power Generation and Analysis of Climate Factors with Deep Learning Methods: A Case Study in Yozgat Province in Turkey

Feyza Nur ÇAKICI^{1*}  Süleyman Sungur TEZCAN¹  Hidir DUZKAYA¹ 

¹Gazi University, Faculty of Engineering, Department of Electrical-Electronic Engineering, Ankara, Turkey

Article Info

Research article
Received: 17/07/2024
Revision: 13/09/2024
Accepted: 21/09/2024

Keywords

Hydroelectric Generation
Climate Data
Deep Learning Methods
Power Forecasting

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başyuru: 17/07/2024
Düzeltilme: 13/09/2024
Kabul: 21/09/2024

Anahtar Kelimeler

Hidroelektrik Üretim
İklim Verisi
Derin Öğrenme Metotları
Güç Tahmini

Graphical/Tabular Abstract (Grafik Özet)

In this study, hydroelectric power forecasting is conducted using Long Short-Term Memory (LSTM), Support Vector Regression (SVR), and hybrid LSTM-SVR models based on climate data. / Bu çalışmada, iklim verilerine dayalı olarak Uzun Kısa Süreli Hafıza (LSTM), Destek Vektör Regresyonu (SVR) ve hibrit LSTM-SVR modelleri kullanılarak hidroelektrik güç tahmini gerçekleştirilmiştir.

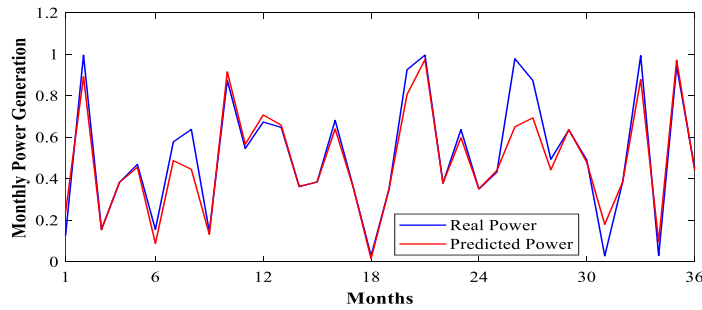


Figure A: Test graph of the SVR model with 12 parameters / Şekil A: 12 parametrelili SVR modelinin test grafiği

Highlights (Önemli noktalar)

- Twelve climate variables obtained from the Yozgat Meteorological Directorate are being used. In this way, the impact of climate data on hydroelectric power generation is being examined./ Yozgat Meteoroloji Müdürlüğü'nden elde edilen 12 iklim verisi kullanılmaktadır. Böylece iklim verilerinin hidroelektrik güç üretimi üzerindeki etkisi incelenmektedir.
- The effects of climate data on hydroelectric power generation are analyzed using Pearson correlation analysis./ Pearson Korelasyon analizi ile iklim verilerinin hidroelektrik güç üretimine etkileri analiz edilmektedir.
- Hyperparameters are selected using the Bayesian Optimization method, and the performance of the models is enhanced./ Bayes Optimizasyon yöntemi kullanılarak hiperparametreler seçilmekte ve modellerin performansı artırılmaktadır.

Aim (Amaç): The aim of this study is to investigate the effect of climate data on hydroelectric power generation. / Bu çalışmanın amacı, iklim verilerinin hidroelektrik enerji üretimi üzerindeki etkisini incelemektir.

Originality (Özgünlük): Power prediction has been conducted using LSTM, SVR, and the LSTM-SVR models, utilizing data obtained from the Süreyyabey Hydroelectric Power Plant and the Yozgat Meteorological Directorate. / Süreyyabey hidroelektrik güç santrali ve Yozgat Meteoroloji Müdürlüğü'nden elde edilen veriler kullanılarak LSTM, SVR ve LSTM-SVR modelleri ile güç tahmini gerçekleştirilmiştir.

Results (Bulgular): As a result of power prediction using the SVR model with 11 and 12 climate parameters, the R-value is close to 1, while the MAE and RMSE values are observed to be close to 0./ SVR modelinin 11 ve 12 iklim parametresi ile güç tahmini sonucunda R değeri 1'e yakın olmakta, MAE ve RMSE değerleri ise 0'a yakın değerler almaktadır.

Conclusion (Sonuç): In this study, the SVR model has achieved the best performance in power prediction, and it has been concluded that climate data has a significant impact on hydroelectric power generation. / Bu çalışmada, SVR modeli güç tahmininde en iyi performansı elde etmiş ve iklim verilerinin hidroelektrik güç üretiminde önemli bir etkisi olduğu sonucuna varılmıştır.



Estimation of Hydroelectric Power Generation and Analysis of Climate Factors with Deep Learning Methods: A Case Study in Yozgat Province in Turkey

Feyza Nur ÇAKICI^{1*} Süleyman Sungur TEZCAN¹ Hidir DUZKAYA¹

¹Gazi University, Vocational School of Technical Sciences, Department of Design, Ankara, Turkey

Article Info

Research article
Received: 17/07/2024
Revision: 13/09/2024
Accepted: 21/09/2024

Keywords

Hydroelectric Generation
Climate Data
Deep Learning Methods
Power Forecasting

Abstract

Hydroelectric power is a significant renewable energy source for the development of countries. However, climatic data can impact power generation in hydroelectric power plants. Hydroelectric power forecasting is conducted in this study using Long Short-Term Memory (LSTM), Support Vector Regression (SVR), and hybrid LSTM-SVR models based on climatic data. The dataset consists of climate data from the Yozgat Meteorology Directorate in Turkey from 2007 to 2021 and power data obtained from the Süreyyabey Hydroelectric Power Plant in Yozgat. The correlation coefficient examines the relationship between climate data and monthly hydroelectric power generation. The hyper-parameters of the models are adjusted using the Bayesian Optimization (BO) method. The performance of monthly hydroelectric power prediction models is assessed using metrics such as correlation coefficient (R), root mean square error (RMSE), and mean absolute error (MAE). When trained using 11 and 12 climate parameters, the SVR model exhibits an R-value close to 1, and MAE and RMSE values close to 0 are observed. Additionally, regarding training time, the SVR model achieves accurate predictions with the shortest duration and the least error compared to other models.

Yozgat İli'nde Hidroelektrik Enerji Üretimini Tahmini ve İklim Faktörlerinin Derin Öğrenme Yöntemleri ile Analizi: Bir Vaka Çalışması

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başyuru: 17/07/2024
Düzeltilme: 13/09/2024
Kabul: 21/09/2024

Anahtar Kelimeler

Hidroelektrik Üretim
İklim Verisi
Derin Öğrenme Metotları
Güç Tahmini

Öz

Hidroelektrik enerji, ülkelerin kalkınmasında önemli bir yenilenebilir enerji kaynağıdır. Ancak iklim verileri, hidroelektrik santrallerindeki enerji üretimini etkileyebilmektedir. Bu çalışmada, hidroelektrik enerji üretimi tahmini, iklim verilerine dayalı olarak Uzun Kısa Süreli Hafıza (LSTM), Destek Vektör Regresyonu (SVR) ve hibrit LSTM-SVR modelleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Veri seti, Türkiye'deki Yozgat Meteoroloji Müdürlüğü'nden 2007-2021 yılları arasında alınan iklim verileri ve Yozgat'taki Süreyyabey Hidroelektrik Santrali'nden elde edilen enerji verilerinden oluşmaktadır. İklim verileri ile aylık hidroelektrik enerji üretimi arasındaki ilişki, korelasyon katsayısı ile incelenmiştir. Modellerin hiper-parametreleri, Bayesian Optimizasyonu (BO) yöntemi kullanılarak ayarlanmıştır. Aylık hidroelektrik enerji tahmin modellerinin performansı; korelasyon katsayısı (R), ortalama kare hatası (RMSE) ve ortalama mutlak hata (MAE) gibi metriklerle değerlendirilmiştir. 11 ve 12 iklim parametresi ile eğitilen SVR modelinde R değeri 1'e yakın olup, MAE ve RMSE değerlerinin 0'a yakın olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca eğitim süresi açısından SVR modeli, diğer modellere kıyasla en kısa sürede en az hata ile doğru tahminler yapmıştır.

1. INTRODUCTION (GİRİŞ)

Advancements in technology, the proliferation of industrial activities, and population growth increase electricity demand, escalating the electricity generated to meet this demand. The International Renewable Energy Agency (IRENA) predicts that global electricity demand will increase by an average of 3.4% annually until 2026

[1]. Sustainable energy sources are becoming increasingly popular to meet this growing demand and reduce greenhouse gas emissions [2]. As a result, global hydroelectric power generation in 2020 has reached 4345.99 TWh [3]. According to the IRENA report, 2022 global hydroelectric installed capacity has reached 1256 GW, excluding pumped hydro. This represents 37% of total renewable energy sources [4].

Hydroelectric power plants are affected by climate change because they use natural water resources for energy production [5-7]. Due to the negative effects of climate change, hydroelectric power capacity decreased by more than 2% globally, and hydroelectric power generation decreased by 4.5% in Turkey in 2023 [1]. Floods, droughts, rainfall acceleration or increase, changes in rainfall timing, and temperature changes are a few of these effects [2]. As a result of a decrease in precipitation, the turbine efficiency is affected by a reduction of flow [8]. In contrast, excessive precipitation may damage turbine blades due to increased sediment load, even though increasing precipitation increases power generation [6]. Increased temperatures lead to increased evaporation from reservoir surfaces, resulting in a decrease in water levels.

The Representative Concentration Pathway (R.C.P.) climate scenarios are used to examine the impact of climate change on hydroelectric power generation. RCP 2.6, RCP 4.5, and RCP 8.5 scenarios illustrate future climate conditions. Data derived from these scenarios are analyzed using machine learning, deep learning, and statistical methods to estimate hydroelectric power generation. In the RCP 4.5 and RCP 8.5 scenarios, carbon emissions are projected to reach 4.5 W/m² and 8.5 W/m² by 2100, respectively. In contrast, the RCP 2.6 scenario anticipates a reduction in carbon emissions. Based on these carbon emission projections, the RCP 2.6, RCP 4.5, and RCP 8.5 scenarios are considered best-case, moderate, and worst-case scenarios, respectively [9-11].

The studies evaluating the effects of climate change on hydroelectric energy production from dams in China, conducted by Huang et al. (2021), state that the hydroelectric energy production of the Liyuan Dam decreased by 163.3 MW and 188.3 MW under the RCP2.6 and RCP8.5 climate scenarios, respectively, relative to the base period. It is also projected that the increase in electricity demand by 91.42 MW could lead to power outages [9]. Meanwhile, the study by Huangpeng et al. (2021) predicts that the electricity production of the Jinanqiao Hydroelectric Power Plant may decrease by 10.74%, 16.38%, and 22.25% by 2050 under the RCP2.6, RCP4.5, and RCP8.5 climate scenarios, respectively [12].

According to findings from various studies in Africa, Boadi et al. (2019) indicate that the power generation of the Aksombo Hydroelectric Power Plant in Ghana has been influenced by rainfall fluctuations, accounting for 21% between 1970

and 1990, while 72.4% has been influenced by ENSO (El Niño Southern Oscillation) and lake levels. These results suggest Ghana must explore alternative energy sources for electricity generation [13]. Hamududu et al. (2016) project that power generation in the Zambezi River Basin will decrease by 8%, 18%, and 28% by 2020, 2050, and 2080, respectively, due to rising temperatures and reduced rainfall [14]. Uamusse et al. (2020) suggest that hydroelectric power plants in Mozambique will experience reduced power generation due to drought, negatively impacting the economy. The study predicts a 20% decrease in power generation for the Cahora Bassa hydroelectric power plants by 2100 [15].

From the studies in Iran, Behesti et al. (2019) stated that the hydroelectric power production of the Karun III Dam is affected by the flow. Accordingly, hydroelectric power production is estimated to increase by 26.7% to 40.5% between 2020 and 2049 and 17.4% to 29.3% between 2070 and 2099 [5]. In the study by Wang et al. (2021), it is indicated that the decrease in flow of the Aras Dam on the border of Iran and the Republic of Azerbaijan would result in a reduction in hydroelectric power generation. Additionally, according to the RCP2.6, RCP4.5, and RCP8.5 climate scenarios, this dam's annual average hydropower generation is projected to decrease by 3.36 MW, 4.62 MW, and 6.64 MW, respectively [11].

One of the studies conducted by different countries, Khaniya et al. (2020) in its research, Samanalawawe Hydroelectric Power Station in Sri Lanka is estimated to increase hydroelectric power generation by 7.29% and 10.22% from 2020 to 2050, respectively, according to RCP4.5 and RCP8.5 climate scenarios. This study reveals that Samanalawawe Dam is not affected by climate change [16]. In another study, Shrestha et al. (2021) predict that the hydroelectric power generation of the Kulekhani Hydroelectric Power Plant in Nepal will decrease by between 0.5% and 13%. The decrease is attributed to the temperature increase and rainfall fluctuations [17].

One of the studies on hydroelectric power prediction in Turkey is the work by Karakuş (2023), who employed a new deep hybrid model to forecast power generation and Net Head for the Hirfanlı Hydroelectric Power Plant in Kırşehir. This study utilized climate factors and data obtained from hydroelectric plants. The successful performance of the hybrid model in predicting hydroelectric power generation and Net Head has

been confirmed through statistical analyses. Additionally, the article emphasizes that this model will be used to adjust energy consumption [18]. In Ceribaşı's study, energy predictions for the Adasu Regulator and Hydroelectric Power Plant and Pamukova Hydroelectric Power Plant in the Sakarya Basin, Turkey, are made both in the short and long term. The study emphasizes that these predictions demonstrated strong performance and underscores the importance of short and long-term forecasts in energy planning [19].

This study aims to investigate the effect of climate data on hydroelectric power generation. The study utilized monthly climate data from the Yozgat Meteorology Directorate in Turkey from 1 January 2007 to 31 December 2021. Following the preparation phase of the climate data, the Bayesian Optimization technique is employed to enhance prediction performance. For hydroelectric power forecasting, Long Short-Term Memory (LSTM), Support Vector Regression (SVR), and hybrid LSTM-SVR models are applied, and the accuracy of these models is evaluated using statistical measurement parameters.

2.MATERIALS AND METHODS (MATERİYAL VE METOD)

This section provides information about Süreyyabey hydroelectric power plants and climate datasets. The min-max normalization technique is employed for data preprocessing. The relationship between climate data is being examined through Karl Pearson correlation coefficient. Bayesian optimization is used to tune the hyper-parameters of the RNN and SVR models to improve the prediction accuracy. RNN, SVR, and hybrid RNN-SVR models are used in hydroelectric power prediction.

2.1.Study Area And Data Set (Çalışma Alanı ve Veri Seti)

Süreyyabey Dam, located on the Çekerek Stream in the Yozgat province, has a reservoir area of 41.34 km² [20], with a riverbed elevation of 103 meters [21]. The annual energy production of the Süreyyabey Dam is projected to be 51 GWh [21]. The data set consists of climate data from the

Table 1. Daily climate and power generation data for the Süreyyabey hydroelectric power plant (Süreyyabey hidroelektrik santralleri için günlük iklim ve enerji üretim verileri)

Feature	Units	Range
Precipitation Amount	Mm	(0)-(93.139)
Open Surface Evaporation Amount	mm	(0)-(12.2)
Sunshine Duration	h	(-1.6)-(20.25)
Average Air Temperature	°C	(-12.1)-(40.762)
Maximum Air Temperature	°C	(-9.2)-(37.4)
Minimum Air Temperature	°C	(-17.0)-(22.2)
Average Wind Direction	°	(0.3)-(359.8)
Average Wind Speed	m/s	(0.7)-(12.2)
The Direction of Maximum Wind	°	(1.0)-(360)
Maximum Wind Speed	m/s	(1.9)-(25.3)
Time of Maximum Wind	h	(-1.38)-(23.58)
Average Humidity	%	(0)-(100)
Power Generation	kWh	(89.0)-(331.02)

Yozgat Meteorology Directorate and power generation data from the Süreyyabey hydroelectric power plant for 15 years. The parameters of the data set are indicated in Table 1.

Figure 1 illustrates the total hydroelectric power generation data between 2007 and 2021. In the graph, hydroelectric power generation reached its lowest level at 13.40 GWh in 2009 and its highest level at 44.10 GWh in 2012. There is a downward trend in hydroelectric power generation from 2012

to 2015. However, power generation shows an increasing trend in 2016, 2017, 2019, and 2021 but has yet to reach the highest level seen in 2012.

2.2.Min-Max Normalization (Min-Mak Normalizasyon)

Data sets in machine learning, deep learning, regression, and classification problems often have different ranges [22]. These differences prevent the model from achieving better results. Therefore, the min-max normalization technique transforms the

data set into a standard format [23]. This method normalized the data values to the [0,1] range, eliminating scale differences [22]. Equation (1) provides the mathematical formula for the min-max normalization technique.

$$X' = \frac{X - \min(X)}{\max(X) - \min(X)} \quad (1)$$

The normalization of climate data converts different scales of data into standardized data.

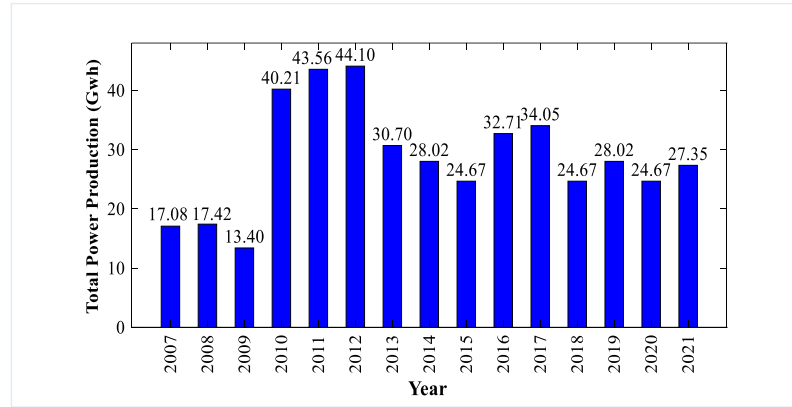


Figure 1. Total power generation values (GWh) for Süreyyabey Hydroelectric Power Plant (Süreyyabey Hidroelektrik Santrali için toplam güç üretim değerleri (GWh))

2.3. Correlation Coefficient (Korelasyon Katsayısı)

Correlation is a data analysis technique used to describe the strength of the relationship between any two variables in a dataset [24]. Additionally, it examines whether the relationship between these variables is linear. To determine the relationship between two variables, two methods are commonly used: the Karl Pearson correlation coefficient and the Spearman rank correlation coefficient. The Pearson correlation coefficient examines whether there is a linear relationship between two independent variables. The correlation coefficient is a scientific measure that takes values ranging from +1 to -1. There are specific criteria for interpreting the correlation coefficient. As a result of these criteria, "0" indicates that there is no linear relationship between the variables, "+1" indicates a powerful positive relationship, and "-1" means a very strong negative relationship [25]. Equation (2) shows the equality of the correlation coefficient [26].

$$r_{y\hat{y}} = \frac{\sum(\hat{y}_i - \bar{\hat{y}})(y_i - \bar{y})}{[\sum(y_i - \bar{y})^2]^{1/2}[\sum(\hat{y}_i - \bar{\hat{y}})^2]^{1/2}} \quad (2)$$

where \hat{y}_i denotes the predicted value of y , and \bar{y} represents the mean of the y values. Equation (3) is used to calculate the mean value [27].

$$\bar{U} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n U_i \quad (3)$$

2.4. Bayesian Optimization (BO) (Bayes Optimizasyonu)

Hyper-parameter tuning is a crucial aspect of deep learning and machine learning algorithms. In deep learning, hyper-parameters such as learning rate, number of iterations, number of hidden layers, batch size, and activation functions are used [28]. Hyper-parameters affect the model's performance, thereby increasing the accuracy of the predicted data. Hyper-parameters are used in the training process and the development of the model [29]. The learning rate is used to adjust the speed at which the weights in the model are updated [30].

In the literature, manual tuning, grid search, random search, and Bayesian Optimization (BO) methods are preferred for hyper-parameter tuning [31]. Manual hyper-parameter tuning is more challenging and requires expertise compared to other methods. As the size of the dataset increases, manual tuning can significantly impact the performance and accuracy of the models during training. Therefore, using automated search methods for hyper-parameter tuning is more efficient [32]. Grid search is an easy-to-implement method; however, its efficiency decreases as hyper-parameters increase [31]. Random search has advantages such as being more efficient by not searching for unnecessary hyper-parameters for the

model, having lower costs than grid search, and being efficient in high-dimensional datasets [32]. However, its disadvantage is that it conducts unnecessary analyses as the search space increases since it only utilizes previously found good performances [31]. Unlike other optimization methods, Bayesian Optimization (BO) utilizes prior knowledge of the objective function to minimize loss effectively, leading to improved prediction accuracy [28]. BO utilizes a probabilistic model for solving complex problems [33]. In BO, Gaussian process models and acquisition functions tune hyper-parameters.

In LSTM, SVR, and LSTM-SVR models, hyper-parameters such as batch size, activation function, epoch, optimization algorithm, hidden layer structure, learning rate, kernel function, box constraint, epsilon, and kernel scale are tuned using the Bayesian Optimization (BO) method.

2.5. Long Short-Term Memory (Uzun Kısa Süreli Bellek)

Long Short-Term Memory (LSTM) addresses the vanishing gradient problem encountered in RNN models [34]. LSTM consists of four fundamental components: the forget gate, input gate, output gate, and cell state [35]. With its three gates, input, output, and forget, LSTM has a longer data retention time than RNN. The cell state is used to store and update information in the gates. The forgetting gate processes data that will not be considered, the input gate determines the data to be added, and the output gate identifies the data to be outputted [36]. LSTM utilizes sigmoid and hyperbolic tangent functions. Sigmoid functions determine which data to forget and which to remember, whereas hyperbolic tangent functions regulate cell data [37]. Figure 2 illustrates the structure of the LSTM model.

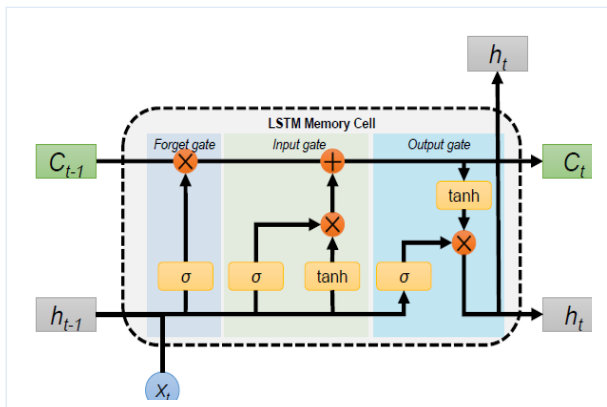


Figure 2. The structure of the LSTM model [38] (LSTM modelin yapısı)

2.6. Support Vector Regression (SVR) (Destek Vektör Regresyon)

Support Vector Regression (SVR) is modeled as a supervised machine learning algorithm capable of predicting nonlinear data. Its computation is based on the linear regression model [39]. SVR aims to minimize the error between predicted and actual values. Its advantages are achieving good results even with small data sizes and overcoming complex problems [40]. Furthermore, parameter selection plays an important role in the performance of SVR [31]. Several disadvantages are associated with this method, including increased computation time with growing datasets [30] and difficulties in selecting the appropriate kernel function for optimal solutions [40]. To improve the accuracy of the SVR model, it is crucial to adjust the type of kernel function and its parameters. Improper adjustment of these values can lead to issues such as over-fitting or under-fitting [41].

2.7. Performance Metrics (Performans Metrikler)

To evaluate the methods used and the predicted hydroelectric power using monthly climate data, as well as to compare the performance results, the measurement parameters of correlation coefficient (R), root mean square error (RMSE), and mean absolute error (MAE) are utilized.

The mean absolute error (MAE) is used to calculate the difference between the predicted power data and the actual power data [33]. The MAE ranges from 0 to $+\infty$, with values closer to 0 indicating that the predicted values are closer to the actual data [42]. Equations (4) and (5), respectively, depict the mathematical formulas of MAE and RMSE [31]. RMSE also ranges between 0 and $+\infty$, similar to MAE. As RMSE approaches MAE, model error robustness improves [42].

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y - \hat{y}| \tag{4}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y - \hat{y})^2} \tag{5}$$

where y represents the actual data, the predicted data, and the total number of data points in the dataset.

3. RESULTS (Sonuçlar)

This section discusses the comparison results of the LSTM, SVR, and hybrid LSTM-SVR models

used for power predictions of the Süreyyabey Hydroelectric Power Plant. Climate data are

obtained from the Yozgat Weather Directorate, and

power production data from the Süreyyabey Hydroelectric Power Plant are utilized. The study initially is conducted as a correlation analysis of twelve climate variables. Table 2 presents the correlation analysis coefficients of the monthly climate data.

there is a positive relationship between precipitation amount, average wind direction, the direction of maximum wind, average wind speed, maximum wind speed, sunshine duration, and power production. Conversely, climate variables such as average humidity, maximum air temperature, minimum air temperature, time of maximum wind, open surface evaporation amount, and average air temperature negatively correlate with power production.

The correlation coefficients of climate data with power production from strong to weak in Table 2. When examining the correlation coefficients of monthly climate data in Table 2, it is observed that

Table 2. The correlation analysis results of the monthly climate data (Aylık iklim verilerinin korelasyon analizi sonuçları)

Parameter Values	Correlation Analysis
Precipitation Amount	0.3717
Average Wind Direction	0.2108
The Direction of Maximum Wind	0.1774
Average Wind Speed	0.1570
Maximum Wind Speed	0.1249
Sunshine Duration	0.0742
Average Humidity	-0.1956
Maximum Air Temperature	-0.1846
Minimum Air Temperature	-0.0855
Time of Maximum Wind	-0.0743
Open Surface Evaporation Amount	-0.0514
Average Air Temperature	-0.0138

The correlation analysis results are used as inputs for LSTM, SVR, and hybrid LSTM-SVR models for predicting power generation. In the hybrid

LSTM-SVR model, the outputs of LSTM are used as input data for the SVR model.

Table 3. Hyper-parameters and their values for LSTM, SVR and LSTM-SVR (LSTM, SVR ve LSTM-SVR için Hiperparametreler ve Değerleri)

Models	Hyper-parameters	Values
LSTM	Batch size	19
	Activation Function	ReLU
	Epoch	149
	Optimization Algorithm	Adam
	Hidden Layer Structure	6
	Learning Rate	0.047997
SVR	Kernel Function	Gaussian
	Box Constraint	5.6355
	Epsilon	0.0028193
	Kernel Scale	1.3571
LSTM-SVR	Kernel Function	Gaussian
	Box Constraint	960.81
	Epsilon	0.0010132
	Kernel Scale	9.9369
	Batch size	29
	Activation Function	ReLU
	Epoch	277
	Optimization Algorithm	Adam
	Hidden Layer Structure	2
Learning Rate	0.024174	

The study randomly partitioned the dataset into 80% training and 20% test data in MATLAB. Table 3 shows the hyper-parameters and their values for the LSTM, SVR, and LSTM-SVR models.

Table 4 compares R, RMSE, and MAE values obtained after 10 iterations for LSTM, SVR, and LSTM-SVR models across 12 parameters in monthly data. Table 5 compares 11 parameters, excluding average air temperature, for LSTM, SVR, and hybrid LSTM-SVR models. The R-value of 0.96183 obtained for the SVR model with 12

parameters and 0.96463 obtained for 11 parameters indicates a strong relationship between climatic data and hydroelectric power generation. Additionally, the lower RMSE value of the SVR model compared to other models suggests that the model makes predictions with small errors. Furthermore, the MAE value of the SVR model is close to 0 when compared to actual hydroelectric power generation values, indicating that the model operates with minimal errors. The SVR model completes its training process in the shortest time when comparing the training times of the models in the study.

Table 4. The performance metrics of LSTM, SVR, and LSTM-SVR models for 12 parameters (LSTM, SVR ve LSTM-SVR modellerinin 12 parametre için performans metrikleri)

Model	R	RMSE	MAE	Training Time
LSTM	0.8625	0.14132	0.10951	6.0711
SVR	0.96183	0.08811	0.052819	0.15625
LSTM-SVR	0.83162	0.14576	0.12129	LSTM: 8.4592 - SVR:4.1605

Table 5. The performance metrics of LSTM, SVR, and LSTM-SVR models for 11 parameters (LSTM, SVR ve LSTM-SVR modellerinin 11 parametre için performans metrikleri)

Model	R	RMSE	MAE	Training Time
LSTM	0.75665	0.14964	0.12243	6.5335
SVR	0.96463	0.083663	0.051532	0.15625
LSTM-SVR	0.8400	0.16902	0.14056	LSTM: 10.3138 - SVR:4.0729

Figures 3, 4, and 5 show the real power and power graphs predicted using the SVR, LSTM, and LSTM-SVR models for 12 parameters. The graphs depict 36 test data points, representing 20% of the 180 monthly power data points. The blue lines indicate the actual power values of the test data, while the red lines represent the power values predicted by the models. Figure 3 demonstrates that the SVR model, utilizing 12 climate

parameters, predicts the actual power with less error. Although the LSTM model has an R-value of 0.8625 for the 12 climate parameters, its MAE value is lower than the LSTM-SVR model, indicating that it predicts the actual power with less error. This observation is clearly illustrated in Figure 4, showcasing the LSTM model's performance.

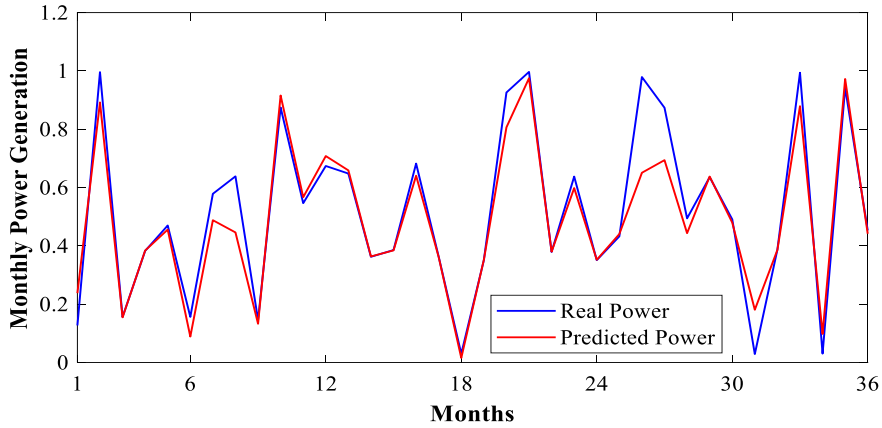


Figure 3. Test graph of the SVR model with 12 parameters (12 parametrelı SVR modelinin test grafiği)

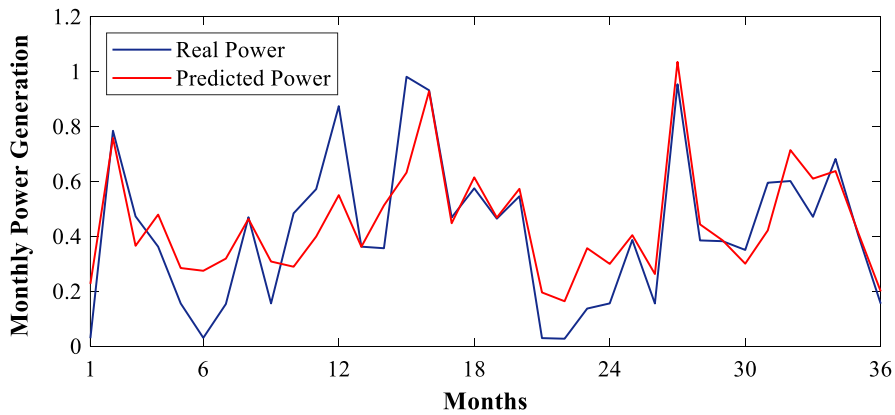


Figure 4. Test graph of the LSTM model with 12 parameters (12 parametrelı LSTM modelinin test grafiği)

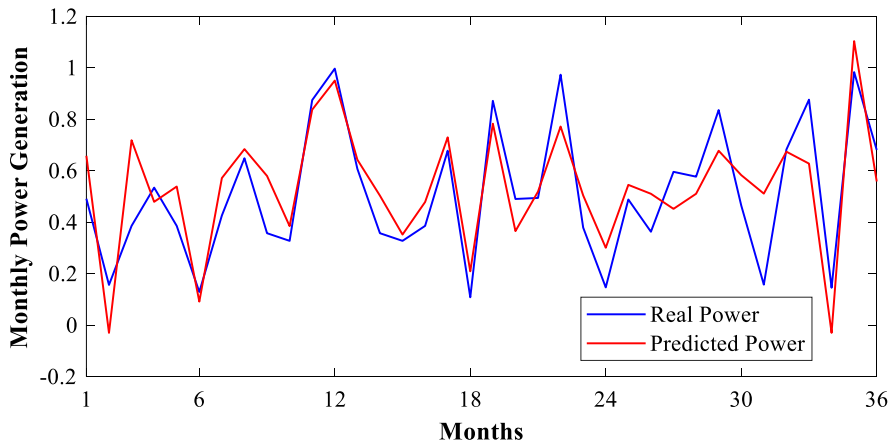


Figure 5. Test graph of the LSTM-SVR model with 12 parameters (12 parametrelı LSTM-SVR modelinin test grafiği)

Figures 6, 7, and 8 show the real power and power graphs predicted using the SVR, LSTM, and LSTM-SVR models for 11 parameters. Figure 6 illustrates the relationship between actual and predicted power data when the average air

temperature parameter, among the total of 12 climate parameters, is excluded from the SVR model. Figures 7 and 8, however, observe a more pronounced discrepancy between actual and predicted power values.

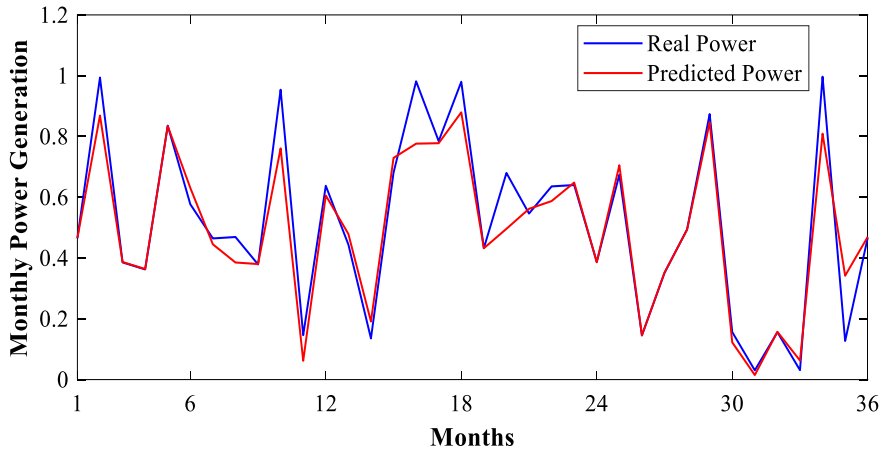


Figure 6. Test graph of the SVR model with 11 parameters (11 parametrelili SVR modelinin test grafiği)

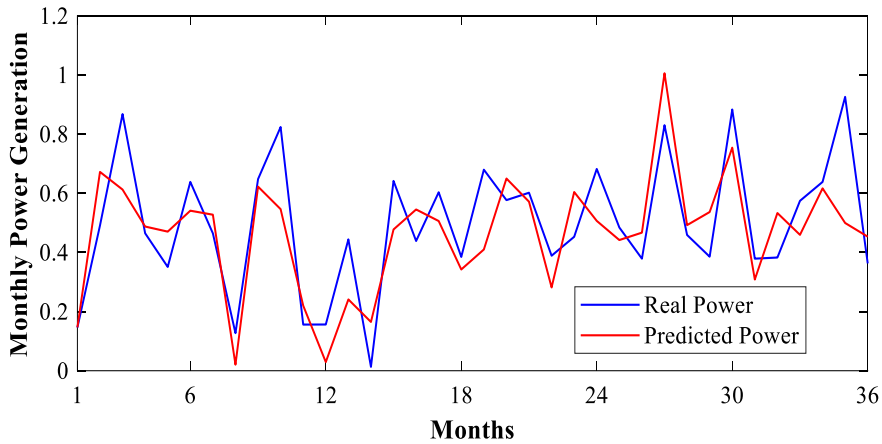


Figure 7. Test graph of the LSTM model with 11 parameters (11 parametrelili LSTM modelinin test grafiği)

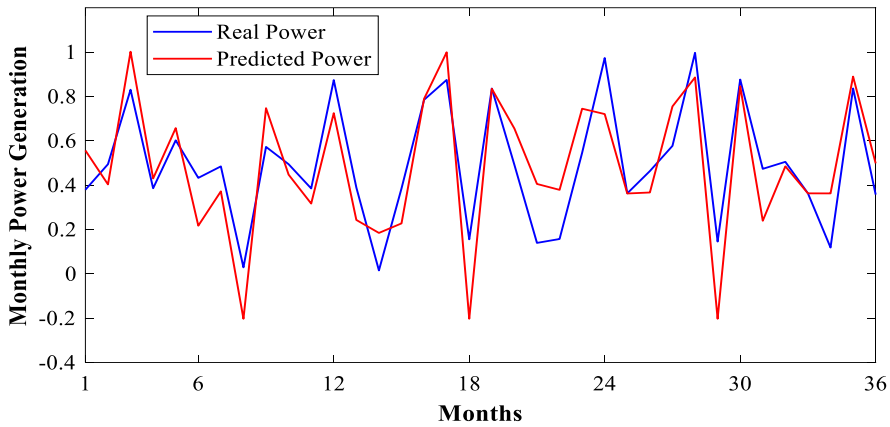


Figure 8. Test graph of the LSTM-SVR model with 11 parameters (11 parametrelili LSTM-SVR modelinin test grafiği)

4. DISCUSSION (TARTIŞMA)

In the study, the impact of climate data on power generation is examined by calculating the Pearson correlation coefficient. According to the correlation analysis results, the highest correlation within monthly climate data is found between precipitation amount and hydroelectric power generation, with a correlation coefficient of 0.3717. The correlation coefficient for average air temperature is calculated as -0.0138, indicating no significant relationship between average air temperature and hydroelectric power generation. The correlation analysis reveals that the average air temperature has a value close to 0. This value indicates that the effect of average air temperature on hydroelectric power generation is weak.

The close R values of the 12 and 11 parameters presented in Tables 4 and 5 of the SVR model indicate that similar parameters are used in both models. However, it is determined that the exclusion of average air temperature has a minimal effect on the overall performance of the model. According to the results of the correlation analysis, average air temperature is found to have a weak effect on hydroelectric power generation. Therefore, it is concluded that average air temperature has a minimal impact on the performance of the SVR model.

In other studies, various models have been developed to predict hydroelectric power generation for hydroelectric plants located in different countries. These models examine the impact of different climatic parameters on hydroelectric power generation. In the study by Ekanayake et al. (2021), rainfall data, minimum and maximum temperature, and evaporation parameters collected from six locations in the catchment area of the Samanalawewa reservoir in Sri Lanka have been used. Pearson and Spearman correlation analysis has revealed that rainfall data from only one location has a minimal impact on energy production. Gaussian Process Regression (GPR), Support Vector Regression (SVR), Multiple Linear Regression (MLR), and Power Regression (PR) models have been used to predict hydroelectric power generation. The performance of these models has been evaluated using different

statistical methods, including the correlation coefficient (R), root mean square error (RMSE), mean absolute percentage error (MAPE), the ratio of RMSE to the standard deviation of measured data (RSR), BIAS, and the Nash number. In the study, the R values for the SVR, GPR, MLR, and

PR models are 0.87, 0.92, 0.60, and 0.67, respectively. It has been emphasized that the GPR model provided the most accurate predictions, with its R-value being the closest to 1 among the models. Compared to our study, the prediction accuracy of the SVR model increases with the number of parameters [39].

Javed et al. (2020) conducted a study on hydroelectric power prediction using temperature and rainfall data from the Tarbela Dam in Pakistan. The study employed MLR, K-Nearest Neighbour (K-NN), SVR, Random Forest (RF), and LSTM models. The RF model achieved the lowest prediction error when using temperature data, with an MAE of 2.47 and an RMSE of 3.98. While the accuracy of the LSTM model improves with an increased dataset size, this study did not perform as well, yielding an MAE of 4.39 and an RMSE of 6.89. According to the paper, the SVR model exhibited the highest error rates, with an MAE of 9.24 and an RMSE of 10.75 [43].

5. CONCLUSIONS (SONUÇLAR)

In this study, the monthly power prediction of the Süreyyabey Hydroelectric Power Plant has been conducted using LSTM, SVR, and a hybrid LSTM-SVR model. The statistical measurement parameters R, RMSE, and MAE have been employed to determine the best model for power prediction. A dataset consisting of 12 climatic variables obtained from the Yozgat Meteorological Directorate has been utilized, from 2007 to 2021 monthly. In this dataset, climate and power data have been normalized and ranked from strong to weak relationships through correlation analysis. The selection of hyper-parameters in the models has been performed using the BO method. The BO method is used to quickly find the optimal results for hyper-parameters, thereby preventing models from overfitting or under-fitting.

The SVR model achieves R values of 0.96183 and 0.96463 on the 12 and 11 climate datasets, respectively, which are closest to 1 compared to other models. Additionally, the SVR model's RMSE values are 0.08811 and 0.083663, while the MAE values are 0.052819 and 0.051532. These RMSE and MAE values are close to 0 compared to other models, indicating that the SVR model exhibits more accurate prediction performance. According to the performance results in Tables 4 and 5, the SVR model is observed to predict hydroelectric power generation most accurately.

This study emphasizes the importance of climate data in hydroelectric power prediction. In future studies, climate scenarios can be utilized for hydroelectric power plants or various energy types. Hydroelectric power can be predicted using hybrid deep learning and machine learning models.

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)

Feyza Nur ÇAKICI: He performed the simulation studies, analyzed the results, and carried out the writing process.

Benzetim çalışmalarını gerçekleştirdi, sonuçlarını analiz etti ve yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

Süleyman Sungur TEZCAN: He performed the simulation studies, analyzed the results, and carried out the writing process.

Benzetim çalışmalarını gerçekleştirdi, sonuçlarını analiz etti ve yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

Hidir DUZKAYA: He performed the simulation studies, analyzed the results, and carried out the writing process.

Benzetim çalışmalarını gerçekleştirdi, sonuçlarını analiz etti ve 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] International Energy Agency, Electricity 2024: Analysis and Forecast to 2026, (2024) 1-170.
- [2] Hasan, M. M., & Wyseure, G., Impact of climate change on hydropower generation in Rio Jubones Basin, Ecuador, Water Science, and Engineering, 11(2), 157-66, (2018).
- [3] Ullah, A., Topcu, A., Doğan, M. & Imran, M., Exploring the nexus among hydroelectric

power generation, financial development, and economic growth: Evidence from the most significant 10 hydroelectric power-generating countries, Energy Strategy Reviews, 52, 101339, (2024).

- [4] I. W. E. T. O. C. Pathway, World Energy Transitions Outlook 2023: 1.5°C Pathway, Abu Dhabi, 2023.
- [5] Beheshti, M., Heidari, A., & Saghafian, B., Susceptibility of hydropower generation to climate change: Karun III Dam case study, Water, 11(5), 1025, (2019).
- [6] Lumbroso, D., Woolhouse, G., & Jones, L., A review of the consideration of climate change in the planning of hydropower schemes in sub-Saharan Africa, Climatic Change, 133, 621-633, (2015).
- [7] Zhao, X., Huang, G., Li, Y., & Lu, C., Responses of hydroelectricity generation to streamflow drought under climate change, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 174, 113-141, (2023).
- [8] De Souza Dias, V., Pereira da Luz, M., Medero, G. M., & Tarley Ferreira Nascimento, D., An overview of hydropower reservoirs in Brazil: Current situation, future perspectives and impacts of climate change, Water, 10(5), 592, (2018).
- [9] Huang, J., Cang, J., Zhou, Z., & Gholinia F., Evaluation effect climate parameters change on hydropower production and energy demand by RCPs scenarios and the Developed Pathfinder (DPA) algorithm, Energy Reports, 7, 5455-5466, (2021).
- [10] Fang, W., Chen, Y., & Xue, Q., Survey on research of RNN-based spatio-temporal sequence prediction algorithms, Journal on Big Data, 3(3), 97-110, (2021).
- [11] Wang, H., Wu, X., & Gholinia, F., Forecasting hydropower generation by GFDL-CM3 climate model and hybrid hydrological-Elman neural network model based on Improved Sparrow Search Algorithm (ISSA), Concurrency and Computation: Practice and Experience, 33(24), e6476, (2021).
- [12] Huangpeng, Q., Huang, W., & Gholinia, F., Forecast of the hydropower generation under influence of climate change based on RCPs and Developed Crow Search Optimization Algorithm, Energy Reports, 7, 385-397, (2021).
- [13] Boadi, S. A., & Owusu, K., Impact of climate change and variability on hydropower in Ghana, African Geographical Review, 38(1), 19-31, (2019).

- [14] Hamududu, B. H., & Killingtveit, Å., Hydropower production in future climate scenarios; the case for the Zambezi River, *Energies*, 9(7), 502, (2016).
- [15] Uamusse, M. M., Tussupova, K., & Persson, K. M., Climate change effects on hydropower in Mozambique, *Applied Sciences*, 10(14), 4842, (2020).
- [16] Khaniya, B., Karunanayake, C., Gunathilake, M. B., & Rathnayake, U., Projection of future hydropower generation in samanalawewa power plant, Sri Lanka, *Mathematical Problems in Engineering*, 1-11, (2020).
- [17] Shrestha, A., Shrestha, S., Tingsanchali, T., Budhathoki, A., & Ninsawat, S., Adapting hydropower production to climate change: A case study of Kulekhani Hydropower Project in Nepal, *Journal of Cleaner Production*, 279, 123483, (2021).
- [18] Karakuş, M. Ö., Impact of climatic factors on the prediction of hydroelectric power generation: a deep CNN-SVR approach, *Geocarto International*, 38(1), 2253203, (2023).
- [19] Babacan, H. T., & Yüksek, Ö., Investigation of climate change impacts on daily streamflow extremes in Eastern Black Sea Basin, Turkey, *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 134, 103599, (2024).
- [20] Benzer, S., New Record Of The Kizilirmak Killifish (*Aphanius Marassantensis* Pflleiderer, Geiger & Herder, 2014) From Süreyyabey Dam Lake In Yeşilirmak Basin, *Mugla Journal of Science and Technology*, 4(1), 41-45, (2018).
- [21] Yılmaz, D., Süreyyabey Barajı Dolusavak Kazı Şevlerinde Yaşanan Zemin Hareketlerinin Analizi, *Muş Alparslan Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 4(1), 23-31, (2023).
- [22] Salcedo-Sanz, S., Cornejo-Bueno, L., Prieto, L., Paredes, D., & García-Herrera, R., Feature selection in machine learning prediction systems for renewable energy applications, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 90, 728-741, (2018).
- [23] Rao, S., Poojary, P., Somaiya, J., & Mahajan, P., A comparative study between various preprocessing techniques for machine learning, *Int. J. Eng. Appl. Sci. Technol*, 5(3), 2455-2143, (2020).
- [24] Gogtay, N.J., & Thatte, U. M., Principles of correlation analysis, *Journal of the Association of Physicians of India*, 65(3), 78-81, (2017).
- [25] Ratner, B., The correlation coefficient: Its values range between+ 1/- 1, or do they?, *Journal of targeting, measurement and analysis for marketing*, 17(2), 139-142, (2009).
- [26] Asuero, A. G., Sayago, A., & González, A., The correlation coefficient: An overview, *Critical reviews in analytical chemistry*, 36(1), 41-59, (2006).
- [27] Duzkaya, H., & Beroual, A., Statistical analysis of AC dielectric strength of natural ester-based ZnO nanofluids, 14(1), 99, (2020).
- [28] Victoria A. H., & Maragatham, G., Automatic tuning of hyperparameters using Bayesian optimization, *Evolving Systems*, 12(1), 217-223, (2021).
- [29] Yu, T., & Zhu, H., Hyper-parameter optimization: A review of algorithms and applications, *arXiv preprint arXiv:2003.05689*, (2020).
- [30] Shrestha, A., & Mahmood, A., Review of deep learning algorithms and architectures, *IEEE Access*, 7, 53040-53065, (2019).
- [31] Yang, L., & Shami, A., On hyperparameter optimization of machine learning algorithms: Theory and practice, *Neurocomputing*, 415, 295-316, (2020).
- [32] Wu, J., Chen, X. Y., Zhang, H., Xiong, L. D., Lei, H., & Deng, S. H., Hyperparameter optimization for machine learning models based on Bayesian optimization, *Journal of Electronic Science and Technology*, 17(1), 26-40, (2019).
- [33] Habtemariam, E. T., Kekeba, K., Martínez-Ballesteros, M., & Martínez-Álvarez, F., A Bayesian optimization-based LSTM model for wind power forecasting in the Adama district, Ethiopia, *Energies*, 16(5), 2317, (2023).
- [34] Sherstinsky, A., Fundamentals of recurrent neural network (RNN) and long short-term memory (LSTM) network, *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 404, 132306, (2020).
- [35] Sahoo, B. B., Jha, R., Singh, A., & Kumar, D., Long short-term memory (LSTM) recurrent neural network for low-flow hydrological time series forecasting, *Acta Geophysica*, 67(5), 1471-1481, (2019).
- [36] Wang, Y., Zhu, S., & Li, C., Research on multistep time series prediction based on LSTM, in *2019 3rd International Conference on Electronic Information Technology and Computer Engineering (EITCE)*, 1155-1159 (2019).
- [37] Jailani, N. L. M, Dhanasegaran, J. K., Alkawsi, G., Alkahtani, A. A., Phing, C. C., Baashar, Y., & Tiong, S. K., Investigating the power of LSTM-based models in solar energy forecasting, *Processes*, 11(5), 1382, (2023).

- [38] Fan, H., Jiang, M., Xu, L., Zhu, H., Cheng, J., & Jiang, J., Comparison of long short term memory networks and the hydrological model in runoff simulation, *Water*, 12(1), 175, (2020).
- [39] Ekanayake, P., Wickramasinghe, L., Jayasinghe, J. J. W., & Rathnayake, U., Regression-based prediction of power generation at samanawewa hydropower plant in Sri Lanka using machine learning, *Mathematical Problems in Engineering*, 1-12, (2021).
- [40] Gzar, D. A., Mahmood, A. M., & Abbas, M. K., A Comparative Study of Regression Machine Learning Algorithms: Tradeoff Between Accuracy and Computational Complexity, *Mathematical Modelling of Engineering Problems*, 9(5), (2022).
- [41] Wu, J., & Cheng, E., A novel hybrid particle swarm optimization for feature selection and kernel optimization in support vector regression, in *2010 International Conference on Computational Intelligence and Security*, 189-194, (2010).
- [42] Ly, H. -B., Nguyen, T, -A., & Pham, B. T., Estimation of soil cohesion using machine learning method: A random forest approach, *Advances in civil engineering*, 1, 8873993, (2021).
- [43] Javed, U., Fraz, M. M., Mahmood, I., Shahzad, M., & Arif, O., Forecasting of electricity generation for hydro power plants, in *2020 IEEE 17th International Conference on Smart Communities: Improving Quality of Life Using ICT, IoT and AI (HONET)*, 2020: IEEE, 32-36 (2020).

Metal Eklemeli İmalatta Topoloji Optimizasyonu Uygulamaları

Büşra ÇALIK^{1*}  Gültekin UZUN^{1*} 

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

Article Info

Research article
Received: 03/09/2024
Revision: 14/10/2024
Accepted: 23/10/2024

Anahtar Kelimeler

Metal Eklemeli İmalat
Topoloji Optimizasyonu
Üretim Verimliliği
Sürdürülebilir Üretim
Yapısal Verimlilik

Makale Bilgisi

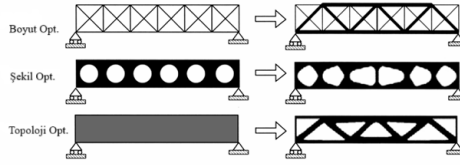
Araştırma makalesi
Başvuru: 03/09/2024
Düzeltilme: 14/10/2024
Kabul: 23/10/2024

Keywords

Metal Additive
Manufacturing
Topology Optimization
Manufacturing Efficiency
Sustainable Manufacturing
Structural Efficiency

Grafik Özet (Graphical/Tabular Abstract)

Bu çalışmada Metal Eklemeli İmalat ve Topoloji optimizasyonunun entegre olduğu çalışmalar ele alınmıştır. Metal Eklemeli İmalat ve Topoloji Optimizasyonunun entegrasyonu, havacılık, otomotiv ve medikal gibi sektörlerde verimliliği artırmak, maliyetleri düşürmek ve sürdürülebilir üretimi desteklemek için uygulanmaktadır. Bu yöntemle, karmaşık geometrilere sahip, hafif ve dayanıklı parçalar üretilebilirken, üretim sürecindeki malzeme ve enerji verimliliği de artırılmaktadır. Çalışma sonuçlarına göre, metal eklemeli imalat ve topoloji optimizasyonunun bir arada kullanılması, özellikle yüksek hassasiyet gerektiren sektörlerde yenilikçi çözümler sunmaktadır.



Şekil A: Boyut, Şekil ve Topoloji Optimizasyonunun Karşılaştırmalı Gösterimi / **Figure A:** Comparative Representation of Size, Shape, and Topology Optimization

Önemli noktalar (Highlights)

- Metal Eklemeli İmalat ve Topoloji Optimizasyonu Entegrasyonu, daha hafif, dayanıklı ve verimli yapılar elde edilmesini sağlar. / The integration of Metal Additive Manufacturing and Topology Optimization enables the creation of lighter, stronger, and more efficient structures.
- Üretim sürecinde yüzey kalitesi, destek yapı gereksinimleri ve malzeme anizotropisi gibi kısıtlamalar dikkate alınmıştır. / Considerations include limitations such as surface quality, support structure requirements, and material anisotropy in the manufacturing process.
- Bu teknolojilerin kullanımı ile maliyetlerin azaltılması ve sürdürülebilir üretim sağlanması hedeflenmektedir. / The use of these technologies aims to reduce costs and support sustainable manufacturing.

Amaç (Aim): Metal Eklemeli İmalat ve Topoloji Optimizasyonunun entegre edildiği çalışmalar incelenerek bu alanda yapılacak akademik araştırmalara ve özel sektör uygulamalarına katkıda bulunması amaçlanmaktadır. / This study aims to contribute to future academic research and private sector applications by reviewing studies that integrate metal additive manufacturing and topology optimization.

Özgünlük (Originality): Metal Eklemeli İmalat ve Topoloji Optimizasyonunun üretimde verimliliği artırma potansiyeline dair giderek artan ilgi doğrultusunda, bu alandaki güncel akademik ve endüstriyel çalışmalar, yerli ve yabancı kaynaklar taranarak sistematik bir şekilde bir araya getirilmiştir. / In response to the growing interest in the potential of metal additive manufacturing and topology optimization to enhance production efficiency, recent academic and industrial studies in this field have been systematically compiled by reviewing both domestic and international sources.

Bulgular (Results): Metal Eklemeli İmalat ve Topoloji Optimizasyonunun entegrasyonunun, üretimde malzeme verimliliği, maliyet azaltımı, daha dayanıklı ve hafif yapıların, karmaşık geometrilerin üretimi gibi konularda sağladığı katkılar ve kısıtlamalar ortaya konulmuştur. / The integration of metal additive manufacturing and topology optimization has demonstrated contributions and limitations in terms of material efficiency, cost reduction, production of complex geometries, and industrial applications in manufacturing.

Sonuç (Conclusion): Metal Eklemeli İmalat ve Topoloji Optimizasyonu entegrasyonu, üretimde verimlilik, maliyet azaltımı ve yenilikçi tasarımlar açısından önemli avantajlar sunmaktadır. / The integration of metal additive manufacturing and topology optimization offers significant advantages in terms of efficiency, cost reduction, and innovative designs in production.



Metal Eklemeli İmalatta Topoloji Optimizasyonu Uygulamaları

Büşra ÇALIK^{1*} Gültekin UZUN^{1*}

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

Makale Bilgisi

Research article
Received: 03/09/2024
Revision: 14/10/2024
Accepted: 23/10/2024

Anahtar Kelimeler

Metal Eklemeli İmalat
Topoloji Optimizasyonu
Üretim Verimliliği
Sürdürülebilir Üretim
Yapısal Verimlilik

Öz

Geleneksel çıkarmalı üretim metodolojilerinin aksine metal malzemelerin direkt olarak 3D-CAD verilerinden alınarak katman katman inşa edilmesi süreci olarak tanımlanan metal eklemeli imalat günden güne yoğun bir talep görecik çalışmalara konu olmaktadır. Bu araştırma çabalarından bazıları fizik, istatistiksel veya yapay zekâ odaklı süreç modelleme ve optimizasyonu, yapı-özellik karakterizasyonu, yapısal tasarım optimizasyonu veya maliyetlerin azaltılması ve daha hızlı üretim için ekipman iyileştirmeleriyle ilişkilidir. Özellikle, havacılık gibi, karmaşık geometrili, yüksek ölçü hassasiyetine sahip ve hafif bileşenlerin hızlı bir şekilde üretilmesinin istendiği kritik sektörlerde metal eklemeli imalat ve topoloji optimizasyonu üzerine yapılan çalışmalar giderek yaygınlaşmaktadır. Bu teknoloji, tasarım esnekliği ve malzeme kullanımında optimize edilmiş çözümler sunarken, üretim sürecinde israfı azaltarak sürdürülebilirlik açısından da büyük avantaj sağlamaktadır. Geleneksel yöntemlerle üretilmesi zor olan karmaşık geometrilere sahip yapıların üretimini mümkün kılan metal eklemeli imalat, aynı zamanda daha düşük maliyetli ve daha hafif ürünler sunarak, endüstriyel devrim niteliğinde bir gelişme göstermektedir. Bu çalışma, metal eklemeli imalat ve topoloji optimizasyonunun endüstriyel uygulamalardaki potansiyelini değerlendirmektedir. Aynı zamanda karşılaşılan yüzey pürüzlülüğü, destek yapı gereksinimleri ve üretim sonrası işlemler gibi kısıtlamaları da ele almaktadır. Gelecekte, bu kısıtların üstesinden gelinmesi için gelişmiş malzeme teknolojileri ve yeni optimizasyon algoritmalarının kullanımı sayesinde, bu iki teknolojinin entegrasyonunun daha da yaygınlaşması beklenmektedir. Bu çalışmanın sonucunda eklemeli imalatın endüstriyel tasarımda düşük maliyetli üretimlerin önünü açarak daha yenilikçi ve verimli bir yaklaşıma öncülük etmesi beklenmektedir.

Application of Topology Optimization in Metal Additive Manufacturing

Article Info

Araştırma makalesi
Başvuru: 03/09/2024
Düzeltilme: 14/10/2024
Kabul: 23/10/2024

Keywords

Metal Additive
Manufacturing
Topology Optimization
Manufacturing Efficiency
Sustainable
Manufacturing
Structural Efficiency

Abstract

Metal additive manufacturing which is defined as the process of building metal materials layer by layer directly from 3D-CAD data, in contrast to traditional subtractive manufacturing methodologies, is becoming increasingly popular and a subject of intense study. Some of these research efforts focus on process modeling and optimization through physics-based, statistical, or artificial intelligence approaches, as well as structure-property characterization, structural design optimization, and equipment improvements to reduce costs and enable faster production. Particularly in critical sectors such as aerospace, where the rapid production of complex, high-precision, and lightweight components is essential, studies on metal additive manufacturing and topology optimization are becoming increasingly prevalent. This technology offers optimized solutions in terms of design flexibility and material utilization, while reducing waste in the production process and providing significant advantages for sustainability. Metal additive manufacturing, which enables the production of complex geometries that are difficult to achieve using traditional methods, also delivers lower-cost and lighter products, marking an industrial revolution. This study assesses the potential of metal additive manufacturing and topology optimization in industrial applications, while also addressing constraints such as surface roughness, support structure requirements, and post-processing challenges. In the future, the integration of advanced material technologies and new optimization algorithms is expected to overcome these constraints. Consequently, the widespread adoption of these two technologies is anticipated to further facilitate cost-effective production, positioning additive manufacturing as a more innovative and efficient approach in industrial design.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

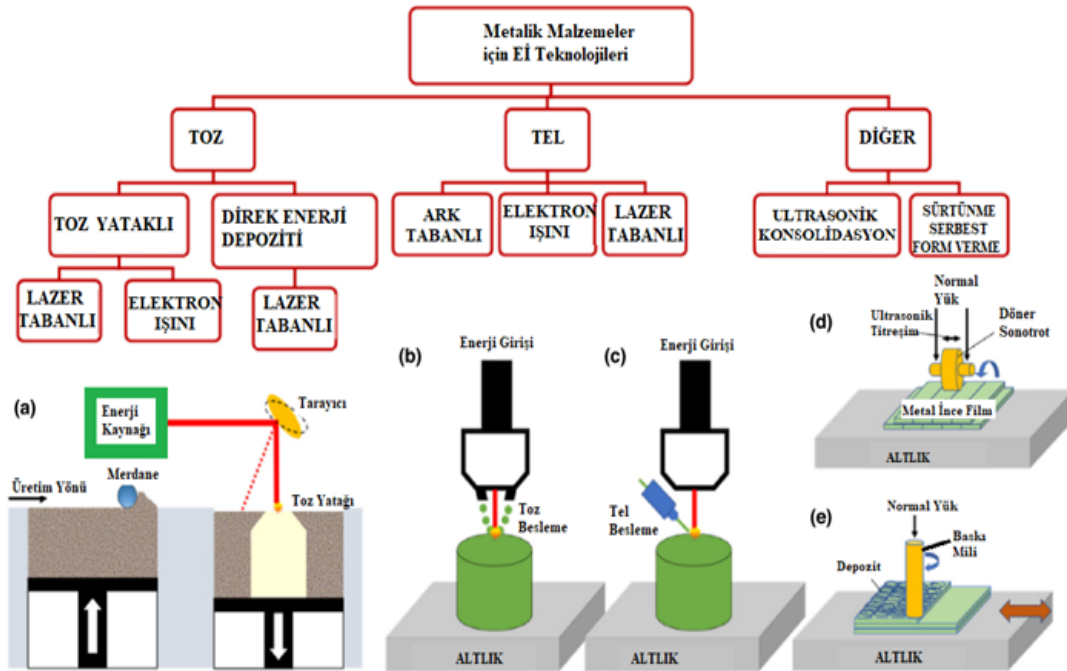
Metal Eklemeli İmalat (MEİ) 3D yazıcılar kullanılarak metal malzemelerin katman katman inşa edilmesi süreci olarak tanımlanmaktadır. MEİ geleneksel çıkarmalı üretim yöntemleri ile üretimi mümkün olmayan fonksiyonel ve karmaşık yapıların hızlı ve verimli bir şekilde üretilmesine olanak tanıyarak atık materyalin azalmasına yardımcı olur. Tasarım özgürlüğü ve hızlı prototipleme imkanı sunarak geleneksel üretim yöntemlerinin kısıtladığı tasarım parametrelerinin sınırlarını ortadan kaldırır. Net şekle yakın üretim ve karmaşık geometri yapıların eklemeli imalat yöntemleri ile üretilebilirliği mümkündür. Üretim sürecinde ekstra takım maliyetleri oluşturmaz. Bu teknolojinin gelişmesi yüksek mukavemetli, hafif yapıların daha yaygın bir şekilde üretilmesine olanak tanır ve bu da bir dizi endüstri için yenilikçi çözüm önerileri sunmaktadır [1-6].

Metal Eklemeli İmalat sistemlerinin sınıflandırılması çeşitli şekillerde yapılmaktadır. En sık kullanılan sınıflandırma yöntemi prosese göre yapılan sınıflandırma iken enerji kaynağına göre, hammaddenin kullanım biçimine göre veya malzemenin birleştirilme yöntemine göre yapılan sınıflandırmalar da mevcuttur. Elektron ışını, lazer vb. kaynaklar enerji kaynağı olarak kullanılır. Hammaddenin kullanım şekli toz, tel veya levha olarak farklılık gösterirken kullanılan malzemenin birleştirilme yöntemi lazer veya bağlayıcı olabilir. Şekil 1'de kullanılan hammadde şekline göre proseslerin sınıflandırılması verilmiştir [3].

Prosesler toz besleme sistemleri, toz yatak sistemleri ve tel besleme sistemleri olarak üç ana başlık altında toplanabilir. Bu sistemler için enerji kaynağı farklılık gösterebilir [1-4].

Toz yatak sistemlerinde oluşturulan toz yatağının üzerine elektron ışını (EBM) veya lazer ışını (SLM, DMLS ya da SLS) enerji kaynakları ile enerji verilerek toz istenilen forma getirilir. Toz besleme sistemlerinde (LENS, DED) tozlar nozul aracılığıyla platform üzerine iletilir ve lazer, tozu istenilen formda eritmek için kullanılır. Tel besleme sistemlerinde ise besleme stoğu teldir ve enerji kaynağı elektron ışını, lazer veya plazma arki olabilir [1-3].

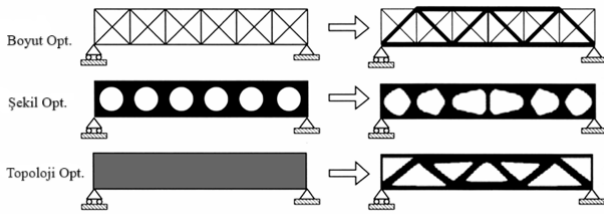
Optimizasyon, bir problem ya da süreç için belirli kısıtlar ve hedefler doğrultusunda en iyi (optimum) çözümü bulma işlemidir. Başka bir deyişle, belirli bir hedefe (örneğin maliyetin düşürülmesi, kaliteyi artırma, hız kazanma) ulaşmak için mevcut kaynakların (zaman, malzeme, enerji vb.) en verimli şekilde kullanılmasıdır. Eklemeli imalat süreçlerinde verimliliği artırmak, malzeme kullanımını ve üretim süresini minimize etmek, maliyetleri düşürmek ve yapısal dayanımı artırmak için optimizasyon teknikleri kullanılır. Bu süreçte en yüksek performansı elde etmek amacıyla kaynakların en etkili şekilde kullanılması hedeflenir [5].



Şekil 1. Metal Eklemeli İmalat sistemleri sınıflandırılması [3] (Classification of Metal Additive Manufacturing Systems)

Ekllemeli İmalat için incelenen üç ana optimizasyon türü artan karmaşıklık ve kapsam sırasına göre Boyut Optimizasyonu, Şekil Optimizasyonu ve Topoloji Optimizasyonu olarak kategorilere ayrılabilir. Topoloji optimizasyonu (TO) Mekanik tasarım ile ilgili problemlerde, bir ürünün boyutu, şekli ve topolojisinin ayrı ayrı veya eş zamanlı olarak optimize edildiği yapısal bir optimizasyon kavramı olarak ortaya çıkmıştır. Bu kavramlar, ürünü geliştirme aşamasında en uygun şekil, boyut ve malzeme dağılımını bulmak için önem içermektedir. Şekil 2'de gösterildiği gibi boyut optimizasyonu, bir nesnenin boyutunun (uzunluk, genişlik veya derinlik) optimizasyonu ile ilgilidir; şekil optimizasyonu ise parçadaki açıklıkların en uygun şeklini bulmaktır; topoloji optimizasyonu ise hem boyut hem de şekil dahil olmak üzere parçanın tüm geometrisinin optimize edilmesiyle ilgilidir. Topoloji Optimizasyonu ve şekil veya boyut optimizasyonu arasındaki temel farklar geometrik konfigürasyon ve değişkenlerin seçimidir, bu da yapısal performansta önemli değişikliklere yol açmaktadır [8-10].

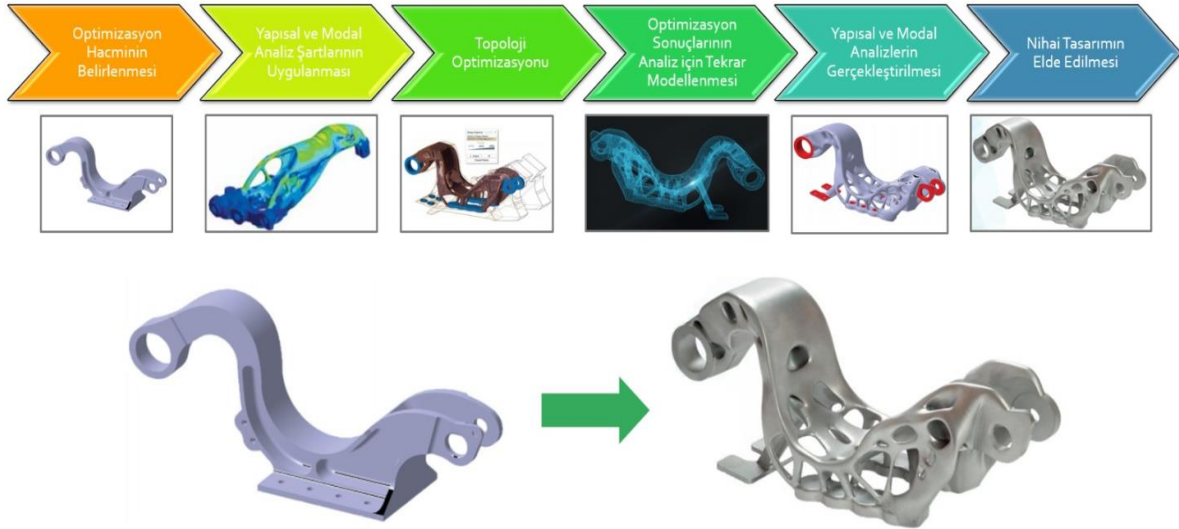
Topoloji Optimizasyonu yapısal performans veya ağırlık ile ilgili kısıtlamaları ihlal etmeden istenilen hedeflere ulaşmak için tasarım değişkenlerini ayarlayarak bir yapının tasarımını iyileştirir. Belirli bir tasarım alanı içindeki malzeme dağılımını belirli bir yük ve sınır koşulları için optimize eden ve belirlenen tasarım ve üretim hedefine ulaşmada kolaylık sağlayan bir yaklaşımdır. Parçanın uygulanan yükleri yeterince desteklemeyen, önemli deformasyona uğramayan ve genel performansına katkıda bulunmayan alanlardan malzemenin kaldırılarak hafifletilmesi amacıyla uygulanır [9]. Topoloji uygulamalarındaki hedef sertliği en üst düzeye çıkarmak, üretilebilirliği sağlamak, stresi azaltmak, hafif yapıların üretimini mümkün kılmak ve üretim maliyetlerini düşürmek olarak sıralanabilir [7-8].



Şekil 2. Boyut, şekil ve topoloji optimizasyonunun karşılaştırmalı gösterimi [8] (Comparative Representation of Size, Shape, and Topology Optimization)

Topoloji optimizasyon yöntemlerinin büyük bir kısmı, Şekil 3'teki topoloji optimizasyon aşamalarında gösterildiği üzere Bilgisayar Destekli Tasarım (CAD) konsepti, Sonlu Elemanlar Analizi (FEA) konsepti ve çeşitli optimizasyon algoritmalarının farklı üretim teknikleri göz önünde bulundurulmuş bir arada kullanılmasıyla gerçekleştirilir. Başlangıç olarak bir 3D CAD modelleme yazılımında orijinal CAD tasarımı çizilir. Daha sonra orijinal tasarım, gerilim ve yer değiştirme dağılımını görmek amacıyla verilen yükleme koşullarıyla yapısal olarak analiz edilir. Gerilme ve yer değiştirme dağılımına bağlı olarak topoloji optimizasyonu ile uygulanan yüklerin taşınmasına önemli ölçüde katkıda bulunmayan alanlardan malzeme kaldırılır. Topoloji optimizasyonu sonucuna göre parça bir CAD yazılımı aracılığıyla yeniden modellenir. Yeni CAD modeli, yükleri taşımak ve tasarım gereksinimlerini karşılamak için FEA ile doğrulanır. Yeni oluşturulan model doğrulamayı karşılıyorsa, fiziksel model doğrulaması, fiziksel prototip oluşturma yöntemlerinden herhangi biri kullanılarak yapılır. Değil ise, doğrulama tamamlanana kadar yeniden modellenir. Nihai tasarım daha sonra nihai katmanlı imalata yönelik hazırlanır [8].

MEİ yoluyla metal parçaların geliştirilmesi, diğer polimer bazlı süreçlerin aksine, tasarım ve süreçle ilgili benzersiz zorluklar ortaya çıkarır. Metal parçaların üretiminde, yüksek sıcaklıkların sebep olduğu malzeme deformasyonları, katmanlar arası yapışma kalitesi ve karmaşık geometrilerde destek yapılarına olan ihtiyaç gibi teknik engeller, bu süreci daha karmaşık hale getirir. Ayrıca, malzeme anizotropisi ve parçanın nihai performansını etkileyen üretim sonrası işlemler gibi ek zorluklar da bulunmaktadır [10]. Bu noktada, topoloji optimizasyonu (TO), bu zorlukların üstesinden gelmek ve malzeme kullanımını en aza indirirken aynı zamanda yapısal dayanımı ve performansı artırmak için uygun bir araç olmuştur [11]. Endüstride ayrılmaz bir ikili haline gelen MEİ ve TO özellikle uzay ve havacılık alanlarında karmaşık yapıların üretilebilirliğini, geleneksel üretim yöntemleriyle mümkün olmayan çoklu yapıların tek yapı altında toplanmasını ve havacılıkta büyük öneme sahip olan hafifletme çalışmalarını mümkün kıldığı için uygulama alanı bulmaktadır [14].



Şekil 3. Topoloji Optimizasyonu süreci [9] (Process of Topology Optimization)

Bu çalışmanın amacı, metal eklemeli imalat (MEİ) ve topoloji optimizasyonu (TO) teknolojilerinin entegrasyonunun endüstriyel uygulamadaki potansiyelini incelemektir. Metal eklemeli imalat, geleneksel üretim yöntemlerine kıyasla daha karmaşık ve fonksiyonel parçaların üretimini mümkün kılarken, topoloji optimizasyonu, malzeme kullanımını minimize ederek yapısal verimliliği artırma yeteneği sunmaktadır [15]. Bu bağlamda çalışmamız, özellikle havacılık, otomotiv ve medikal sektörlerinde bu iki teknolojinin nasıl uygulandığını ve sağladığı avantaj ve dezavantajları değerlendirmektedir. Metal eklemeli imalatın sunduğu esneklik ile topoloji optimizasyonunun sağladığı verimlilik avantajı, sürdürülebilir ve düşük maliyetli çözümler sunarak endüstriyel devrimde önemli bir rol oynamaktadır. Özellikle yüksek performans gerektiren uygulamalarda kullanılan topoloji optimizasyonu, bu teknolojiyi daha stratejik bir üretim aracı haline getirmiştir [16]. Bu çalışma, bu teknolojilerin gelecekteki entegrasyon potansiyelini ortaya koyarak, daha verimli ve yenilikçi üretim süreçleri geliştirme konusundaki önemini vurgulamaktadır.

2. HAVACILIK VE UZAY SEKTÖRÜNDE TOPOLOJİ OPTİMİZASYONU UYGULAMALARI (APPLICATIONS OF TOPOLOGY OPTIMIZATION IN THE AVIATION AND AEROSPACE INDUSTRY)

Havacılık ve uzay sektöründe yapıları hafifletme, verimliliği en üst düzeye çıkarma, karmaşık geometrili yapıların ve hassas ölçülerin üretilebilirliğini sağlama çabaları araştırmacıları topoloji optimizasyonu ile ilgili çalışmalara sevk etmiştir.

Bir çalışmada RUAG şirketi ve Altair tarafından geliştirilen Sentinel-1A ve Sentinel-1B uydularının braketleri geleneksel imalatla karşılaştırılmak üzere MEİ teknikleri kullanılarak EOS 400 model makinede DMLS yöntemiyle AlSi10Mg malzemeden imal edilmiştir. Başlangıçta 1.6 kg olan braket RUAG şirketinin, topoloji optimizasyonu uygulaması sonucunda 940 gr'a düşmüştür. Ağırlıkta %40 azalma görülürken braketin sertliği %30 oranında artmıştır. Braketin optimizasyon öncesi ve üretim sonrası hali Şekil 4'te görülmektedir [12].



Şekil 4. Sentinel-1A ve Sentinel-1B uydularının anten braketinin TO süreci [12] (Topology Optimization Process of the Antenna Bracket for Sentinel-1A and Sentinel-1B Satellites)

Başka bir çalışmada bir İHA tasarımcısı ve üreticisi olan Cobra Aero bir İHA motorunun kütesini azaltmak ve ısı transfer özelliklerini optimize etmek için TO uygulaması yapmışlardır. Minimum destek kullanılacak şekilde başlangıçta altı parçadan oluşan bir motor silindirini tek parça olacak şekilde geliştirmişlerdir. Altı parçadan oluşan hava soğutma silindirinin başlangıçta ağırlığı 80 gr gelmektedir. Cobra Aero, motor silindirinin ağırlığını topoloji optimizasyonu sonrası Eİ yöntemleri ile 420 gr'a düşürmüştür [13-14].

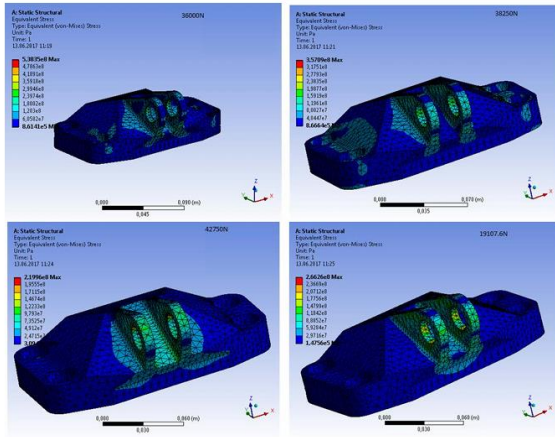


Şekil 5. İHA motorlarının hava soğutmalı silindiri [13] (Air-Cooled Cylinder of UAV Engines)

Diğer bir çalışmada bir jet motoru braketi, topoloji optimizasyonlu tasarım yaklaşımının, katmanlı imalatla birleştirildiğinde bir ürünün ağırlığını azaltma potansiyelini gösteren bir örnek olay çalışması olarak ele alınmıştır. Orijinal braket General Electric (GE) tasarımına dayanmaktadır. Orijinal braketin gerilim dağılımını görmek için orijinal braket üzerinde sonlu elemanlar analizi yapılır. Şekil 6'da gösterilen kontur grafikleri, parçada oluşan tüm yük durumları için Von Mises gerilim dağılımını göstermektedir. Kontur grafiğinde mavi ile gösterilen alanlar malzemenin verimsiz kullanıldığını ve bu alanlardan malzemenin kaldırılabilirliğini göstermektedir.

- Malzeme, oda sıcaklığında (23°C) 904 MPa varsayılan akma dayanımına sahip Ti6Al4V idi.
- Minimum malzeme özelliği boyutu (duvar kalınlığı): 1.13 mm

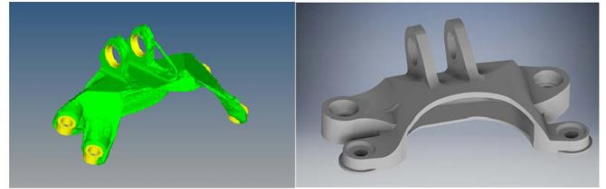
Topoloji optimizasyon aracı, tüm yükler için parça üzerindeki gerilim ve yer değiştirme dağılımını ayrı ayrı hesaplar. Gerilme ve yer değiştirme dağılımına bağlı olarak, daha az yükü destekleyen veya yükün desteklenmesine önemli ölçüde katkıda bulunmayan alanlar kaldırılarak Şekil 7 'de gösterildiği gibi doğal bir geometri elde edilmiştir.



Şekil 6. Orijinal braketin sonlu elemanlar analizi [7] (Finite Element Analysis of the Original Bracket)

Jet motoru braketine TO uygulanmasındaki amaç tüm tasarım gereksinimlerini karşılarken braketin ağırlığını azaltmaktır. Topoloji optimizasyonu için Altair Hypemesh 14 Optistruct ticari yazılımı kullanılmıştır. Motor braketi için tasarım gereksinimleri aşağıda listelenmiştir.

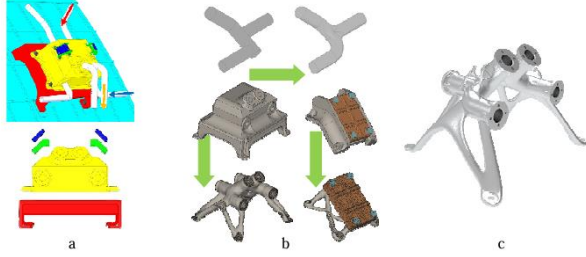
- Optimize edilmiş geometri orijinal parça zarfına sığmalıdır.



Şekil 7. Topoloji uygulanmış braketin görüntüsü [7] (Image of the Topology-Optimized Bracket)

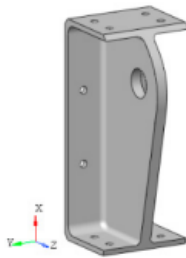
TO uygulaması sonucunda braketin yapısal doğrulama analizi ANSYS R17 Akademik Eğitim aracı üzerinde yapılmıştır. Parçanın MEİ teknikleri ile üretimi yapılarak 2.067 kg'lık orijinal parçadan 0.72 kg'lık nihai parçaya olmak üzere %65 ağırlık azalmasıyla sonuçlanmıştır. Ağırlığın azaltılması, büyük miktarda malzeme ve işleme enerjisinden tasarruf sağlayarak maliyetleri azaltmaktadır. Ayrıca, geleneksel yöntemlerdeki üretim kısıtlamaları artık olmadığından topoloji optimizasyonu yeteneğinin eklemeli üretim teknikleriyle tam olarak kullanılabilirliğini de göstermektedir. Ağırlıkta %65 azalma anlamına gelen örnek olay sonucundan, katmanlı üretim için topolojiyle optimize edilmiş tasarımın kütlelenin büyük bir kısmını azaltabileceği sonucuna varılabilir [8].

Bir diğer çalışmada Şekil 8’de görülen havacılıkta kullanılan bir parçaya TO uygulaması yapılarak geleneksel üretim yöntemleriyle üretimi mümkün olmayan çok sayıda bağlantı elemanı kullanılan bir yirmi parçadan oluşan montaj tek yapı altında toplanarak 5 kat daha hafif bir yapı elde edilmiştir. SLM yöntemiyle üretimi yapılan bileşenin iç kanallarının şekli iyileştirilmiş, kütlesi azaltılmış ve mekanik özellikleri iyileştirilmiştir. Temel parçaların ve bağlantı elemanlarının entegrasyonu sağlanmıştır [17].

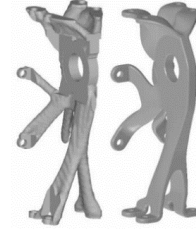


Şekil 8. Topoloji Optimizasyonu uygulanmış bir havacılık parçası [17] (A Topology-Optimized Aerospace Component)

Farklı bir çalışmada Şekil 9’da görülen orijinal olarak 7050-T7451 alüminyum alaşımından üretilen braket TO uygulanarak Ti6Al4V malzemeden imal edilmiştir. Buradaki amaç gerilim seviyelerini korurken ağırlığı azaltmaktır. Optimize edilmiş bileşen nihai tasarımı, gerilim seviyelerini doğrulamak ve gerilim yoğunlaşma bölgelerini veya bazı malzeme takviyesi ihtiyaçlarını kontrol etmek için Sonlu Elemanlar Yöntemi (FEM) kullanılarak analiz edilmiştir. Optimize edilmiş braket SLM yöntemiyle üretilmiştir. Baskıdan sonra optimize edilmiş bileşen, malzemedeki gözenekleri ortadan kaldırmak ve artık gerilimleri ortadan kaldırmak için Sıcak İzostatik Presleme (HIP) işleminden geçmiştir. Çalışma sonucunda Orijinal bileşenin malzeme hacmini %54 oranında azaltmak mümkün olmuştur, bu da malzemenin alüminyumdan titanyum alaşımına dönüştürülmesiyle ağırlıkta %28’lik bir azalma elde edilmesini sağlamıştır. Ayrıca malzeme değişikliği nedeniyle güvenlik faktörü orijinal değerinin iki katı kadar artmıştır [18].



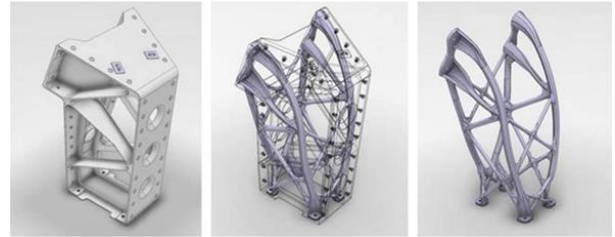
Şekil 9. Orijinal braket [18] (Original Bracket)



Şekil 10. TO uygulaması sonrası braket [18] (Bracket After TO Application)

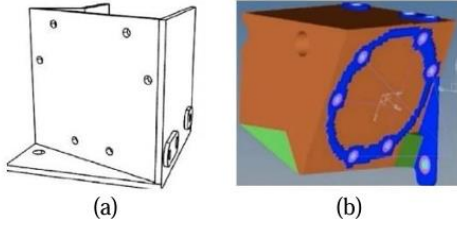
Havacılıkta eklemeli imalat teknolojisinin diğer bir önemli uygulaması, birden fazla bileşenden oluşan montajların birleştirilebilmesidir. Genellikle bu yapılar, parçalar halinde imal edilerek bağlantı elemanları yardımıyla birbirine bağlanır. Bu yöntemin kullanılmasının sebebi, genellikle geleneksel imalat yöntemleri ile montajların tek parça şeklinde kolaylıkla imal edilememesidir. Bununla birlikte, eklemeli imalat teknolojisi ile gerek duyulan bağlantı elemanlarının sayısı azaltılabilir ve bir montajda kullanılan bileşenler tek bir yapı altında toplanabilir [19].

Şekil 11’de gösterilen, Airbus tarafından alüminyum parçalar kullanılarak bağlantı elemanları ile birleştirilen E3000 uydusunun bazı bileşenleri bunun bir örneğidir. Braketler eklemeli imalat teknolojisi ile üretilerek %35 hafiflik kazanmış olup aynı zamanda %40’a kadar sağlamlık kazanmıştır. Alüminyum bileşenlerden meydana gelen ve 44 adet perçin yardımıyla montajı yapılan braket tek bir yapı altında toplanarak üretilmiştir [19].



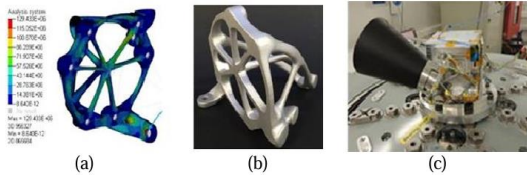
Şekil 11. Eurostar E3000 uydusunun bileşenleri [19] (Components of the Eurostar E3000 Satellite)

Bir diğer çalışmada Surrey Uydu Teknoloji Ltd. Şirketi’nde kullanılan ilk etapta titanyum malzemeden geleneksel üretim yöntemleriyle üretilen yıldız izleyici Şekil 12’de verilen kamera braketini üzerine bir çalışma yapılmıştır. Braket havacılık alanında faaliyet gösteren RUAG firması tarafından AlSi10Mg malzemeden DMLS yöntemi kullanılarak imal edilmiştir. Başlangıçta ağırlığı 425 gr olan braket topoloji optimizasyonu uygulaması sonucu eklemeli imalat yöntemiyle üretilerek 89 gr’a kadar hafifletilmiştir [20].



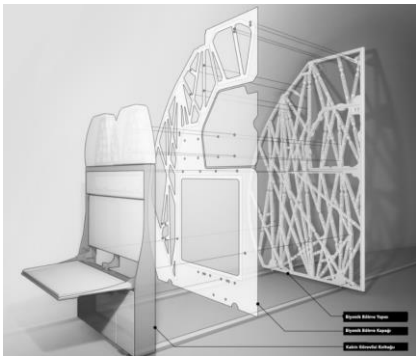
Şekil 12. Orijinal yıldız izleyici kamera braketi [19] (Original Star Tracker Camera Bracket)

Şekil 13’de görülen yıldız izleyici kamera braketi son tasarımı üzerindeki tüm bağlantı noktalarına Altair Optistruct programı aracılığıyla sonlu elemanlar analizi yapılmıştır. Parça imalatı EOS M290 eklemeli imalat yapı platformunda yerleştirilerek gerçekleştirilmiştir [21].



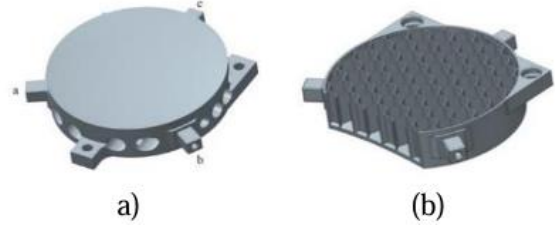
Şekil 13. TO uygulanmış yıldız izleyici kamera brakentinin FEM analizi (a) ve montaj görünümü (b, c) [21] (FEM Analysis of the Topology-Optimized Star Tracker Camera Bracket (a) and Assembly View (b,c))

Farklı bir çalışmada Autodesk Studio kuruluşu olan The Living, Biyonik bölme duvarı projesini geliştirmiştir. Airbus ve APWorks ile ortaklaşa yürüttükleri projede bir panelin yapısal verimliliğini maksimize etmeyi, yakıt tasarrufu sağlamayı ve uçağın ağırlığını azaltmayı hedeflemişlerdir. Biyonik bölme, oturma alanı ile mutfağı birbirinden ayıran bir duvardır. Projedeki amaç bölme duvarının ağırlığını %50 oranında azaltmaktır. Şekil 14’de görülen biyonik bölme duvarı, AlMgSc (Scalmalloy) ve Titanyum (Ti) malzemenen EOS M400 ve Concept Laser M2 model 3B yazıcı aracılığıyla DMLS yöntemi ile imal edilmiştir [22].



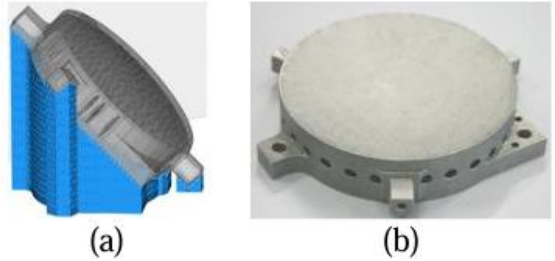
Şekil 14. Eklemeli imalat ile elde edilen biyonik bölme duvarı [22] (Bionic Partition Wall Produced by Additive Manufacturing)

Hilpert ve çalışma arkadaşları teleskoplar ve spektrometreler gibi uzay kaynaklı optik sistemlerde kullanılan metal aynalara TO uygulayarak metal eklemeli imalat yöntemleri ile imal etmişlerdir. Mamulün mekanik dengesini korurken, ağırlığını azaltarak topoloji optimizasyonu sayesinde daha hafif yapılar elde etmeyi hedeflemişlerdir. Şekil 15’te görülen yeni tasarlanmış olan petek aynanın iç kısmı, tüm yüzeyi kaplayacak şekilde her biri 4 mm çapında olan altıgen bir hücrelerden oluşmaktadır [23].



Şekil 15. Metal aynanın CAD modeli (a) ve iç yapısı (b) [23] (CAD Model of the Metal Mirror (a) and its Internal Structure (b))

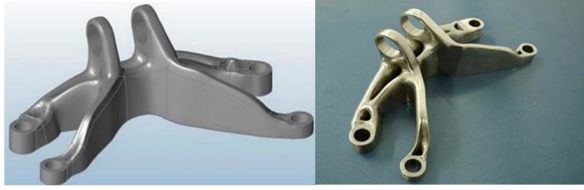
Şekil 16’da eklenen destek yapısı “Materialise Magics” yazılımı aracılığıyla gösterilmektedir. Optimizasyon sonrası ayna AlSi40 ve AlSi12 malzemenen Concept Laser M2 Cusing cihazında SLM yöntemi ile imal edilmiştir [23].



Şekil 16. Destek yapısı uygulanmış ayna tasarımı (a) ve ikincil işlem görmüş metal ayna (b) [23] (Mirror Design with Support Structure Applied (a) and Post-Processed Metal Mirror (b))

Bir diğer çalışmada GE Uçak Motoru braketi, yeniden tasarlanmış ve DMLS yöntemiyle üretilmiştir. Şekil 17’de gösterilen brakentin ağırlığını, Ti6Al4V yerine AISI 15-5PH paslanmaz çelik kullanarak alternatif bir malzeme ile azaltmak hedeflenmiştir. Geometrik kısıtlamalara uygun olarak eklemeli imalat süreci için, TO sırasında minimum özellik boyutu sınırı 9 mm olarak belirlenmiş ve esas tasarımla yakın fonksiyonel gerilme ve deformasyon profillerini korurken %56’lık bir hafifletme çalışması gerçekleştirilmiştir. Ti6Al4V ile karşılaştırıldığında AISI 15-5PH, neredeyse üç kat daha düşük maliyet ve 1.75 kat daha yüksek yoğunlukla benzer mekanik özelliklere

sahiptir. GE Aircraft motor braketini AISI 15-5H ve kaynakçada yer alan yük koşullarını dikkate alarak analiz etmek ve optimize etmek için Solidthinking Inspire ve Optistruct kullanılmıştır. Ayrıca AISI 15-5PH ile optimizasyon yapılmadan kütle azaltımı braket kütlelerinin neredeyse %80'i kadardır. Optimize edilen ve yeniden tasarlanan braket, Şekil 17 (a), EOS M290 makinesinde AISI 15-5PH (EOS PH1) ile oluşturulmuştur. Üretim süreci 29 saat sürmüştür. Şekil 17 (b), eklemeli imalat ve ardıl işlem sonrası sonucu gösterir. Bu optimize edilmiş braketin kütlesi 0.80 kg gelmektedir, yani Ti6Al4V'li orijinal parçanın kütlelerinin yüzde 56'sıdır [24].



Şekil 17. Optimize edilmiş braketin son tasarımı. (b) Optimize edilmiş DMLS aracılığıyla üretilen ardıl işlem sonrası braket [24] (Final Design of the Optimized Bracket. (b) Post-Processed Bracket Produced via Optimized DMLS)

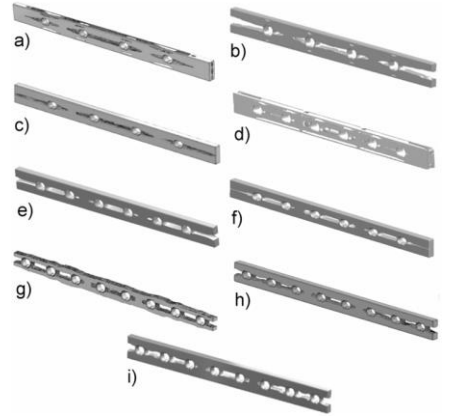
Havacılık ve uzay sektöründe topoloji optimizasyonu uygulamaları, yapıların hafifletilmesi ve verimliliğin artırılması açısından büyük önem taşır. Özellikle uydu ve uçak parçalarında yapılan optimizasyon çalışmaları, malzeme miktarını azaltırken yapısal dayanıklılığı artırmayı hedefler. Bu teknolojiler, yüksek performans gereksinimlerini karşılayarak, geleneksel üretim yöntemleriyle mümkün olmayan karmaşık geometrik yapıların üretimine olanak tanımakta ve sektörün verimlilik odaklı ihtiyaçlarına yanıt vermektedir.

3. MEDİKAL SEKTÖRÜNDE TOPOLOJİ OPTİMİZASYONU UYGULAMALARI (APPLICATIONS OF TOPOLOGY OPTİMİZATION IN THE MEDICAL INDUSTRY)

Medikal alanda, özelleştirilmiş kemik yapıları ve implantlar için Metal Eklemeli İmalat ve Topoloji Optimizasyonu yöntemlerinin entegrasyonu hastalar için özel çözümler sunmakta ve tedavi süreçlerini iyileştirmektedir.

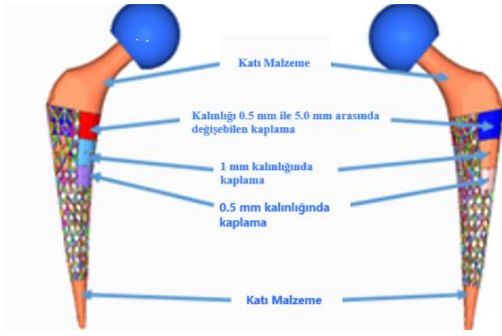
Bir çalışmada, kemik kırıklarının tedavisi için metalik kemik plakalarının tasarımı yeniden optimize edilmiştir. Gerilme koruması ile mücadele etmek ve kortikal kemiğe benzer bir sertlik elde etmek amacıyla plakalara topoloji optimizasyonu

uygulanmıştır. Şekil 18'de verilen optimize edilmiş plakalar, Elektron Demet Ergitme Yöntemi yoluyla Ti6Al4V malzemeden imal edilmiştir. Plakalara gerilme, yüzey pürüzlülüğü ve sertlik gibi özellikleri gözlemek için birkaç karakterizasyon yapılmıştır. Çevreleyen dokularla biyolojik bağın hızını ve kalitesini anlamak için in-vitro testleri yapılmıştır. Testler sonucunda Elektron Demet Ergitme Yöntemi ile üretilen plakaların pürüzlü yüzeylerinin, geleneksel olarak üretilen daha pürüzsüz plakalara oranla bağlanmaya katkıda bulunduğu tespit edilmiştir [25].



Şekil 18. Optimize edilmiş plakalar. Dört Delikli Plakalar a) %75 hacim azalması, b) %45 hacim azalması c) %25 hacim azalması. Altı delikli plakalar d) %75 hacim azalması, e) %45 hacim azalması, f) %25 hacim azalması Sekiz delikli plakalar g) %75 hacim azalması, h) %45 hacim azalması, i) %25 hacim azalması [25] (Optimized Plates. Four-Hole Plates a) 75% Volume Reduction, b) 45% Volume Reduction, c) 25% Volume Reduction. Six-Hole Plates d) 75% Volume Reduction, e) 45% Volume Reduction, f) 25% Volume Reduction. Eight-Hole Plates g) 75% Volume Reduction, h) 45% Volume Reduction, i) 25% Volume Reduction.)

Farklı bir çalışmada, kalça protezindeki gerilme koruması ile mücadele etmek amacıyla TO optimizasyonu ve kafes tasarımının bir kombinasyonu aracılığıyla lazerle toz yatağı füzyonu ile üretilmiş Ti6Al4V kalça protezi imal edilmiştir. Optimizasyon odaklı tasarım süreci sayesinde optimize edilmiş implant, stres korumasını genel implanta kıyasla %50'den fazla azaltmış ve 107'den fazla yaşam döngüsüne dayanmıştır. Şekil 20'de gösterildiği gibi üretilebilirliğini kanıtlamak için EOS M290 yazıcıyla bir Ti6Al4V prototipi basılmıştır [26].

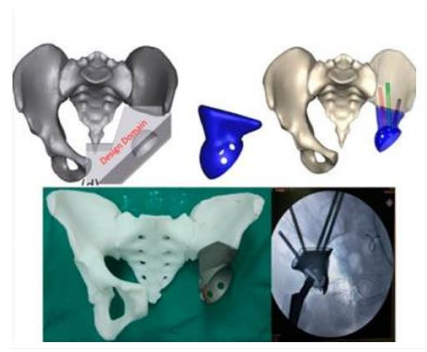


Şekil 19. Katı kafes implant tasarım alanı - yan görünüm [26] (Solid Lattice Implant Design Area - Side Views)



Şekil 20. EOS baskılı titanyum katı kafes kalça implantı [26] (EOS-Printed Titanium Solid Lattice Hip Implant)

Başka bir çalışmada, pelvik implantı tasarlamak amacıyla çok amaçlı bir TO modeli kullanılmıştır. Bu tasarım stratejisi, farklı doku alınması türlerinden elde edilen dört başlangıç tasarım alanı için oluşturulmuştur [27]. Şekil 21'deki implant, Elektron Demet Ergitme Yöntemi ile Ti6Al4V malzemeden üretilmiştir. TO'nun pelvik protez tasarımında uygulanmasındaki amaç, sıfır yük taşıyan bölgeden gereksiz malzemeyi uzaklaştırarak fizyolojik mekanik ortam altında protezin sağlamlığını ve stabilitesini garanti etmenin yanı sıra protezin ağırlığını/hacmini azaltmaktır [28].

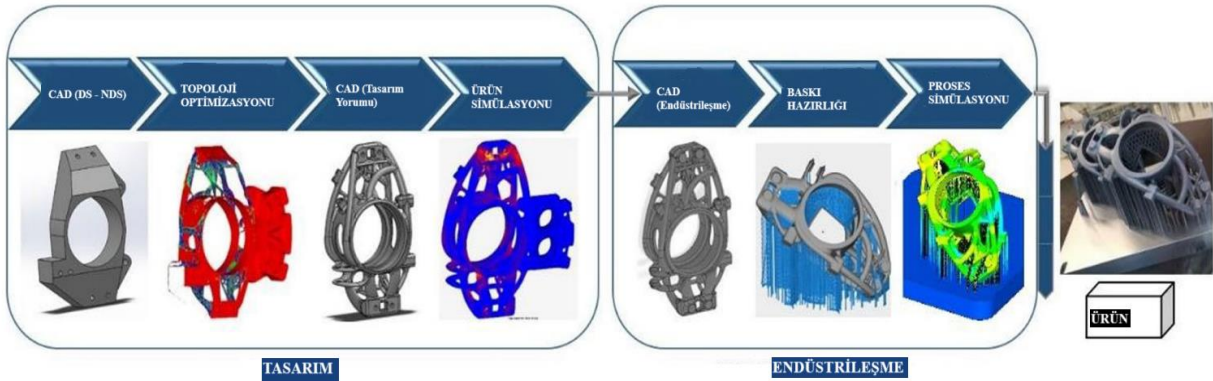


Şekil 21. Optimize edilmiş pelvik ve kalça örneği [28] (Optimized Pelvic and Hip Example)

Medikal sektörde, topoloji optimizasyonu ve metal eklemeli imalatın entegrasyonu, özellikle kişiye özel kemik yapıları ve implantların tasarımında büyük bir ilerleme sağlamıştır. Bu gelişmeler, medikal cihazların hastalara daha hızlı ve etkin çözümler sunmasına olanak tanımakta, tedavi süreçlerini iyileştirmekte ve bireylerin yaşam kalitesini yükseltmektedir.

4. OTOMOTİV SEKTÖRÜNDE TOPOLOJİ OPTİMİZASYONU UYGULAMASI (APPLICATION OF TOPOLOGY OPTIMIZATION IN THE AUTOMOTIVE INDUSTRY)

Son yıllarda otomotiv sektöründe yer alan firmalar yakıt tüketimini azaltmak ve enerji verimliliğini arttırmak için taşıt ağırlığında azaltma yoluna gitmektedirler. Tasarımı yapılan taşıt parçalarında, malzeme dağılımının en etkin şekilde sağlanması amacıyla optimizasyon yöntemleri kullanılmaktadır [29].



Şekil 22. Tekerlek mafsallının optimizasyon süreci [30] (Optimization Process of the Wheel Knuckle)

Bir çalışmada MEİ için topoloji optimizasyonu konusunu göstermek amacıyla Warwick Üniversitesi Formula Öğrenci Ekibi ile bir vaka çalışması düzenlenmiştir. Odak bileşeni, süspansiyon düzeneğinin ana yapısal elemanı olan bir çift arka direktir.

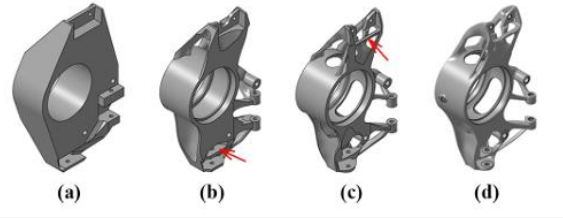
- Tasarım, orijinal işlenmiş alüminyum tasarıma hafif bir alternatif olmalıdır;
- Tasarımın EBM tarafından Ti6Al4V alaşımından üretilmesi gerekmektedir;
- İki arka dikme aynı olmalıdır;
- Tasarımın malzeme kullanımı iyileştirilmelidir.

Nihai tasarımın kütlesi 0.536 kg gelmektedir ve %36 oranında bir azalma sağlanmıştır. Ti6Al4V alaşımından ARCAM A2X EBM makinesi ile 20 saatlik bir süreçte imal edilmiştir. Bileşen, X-ışını Bilgisayarlı Tomografi (CT) kullanılarak incelenmiştir ve aracın bütünlüğünü tehlikeye atabilecek önemli bir boşluk veya katman kaymasına rastlanmamıştır [31].

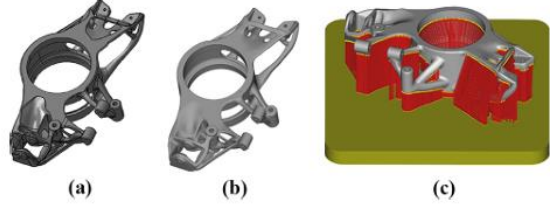


Şekil 23. Süspansiyon düzeneği arka direği [31]
(Rear Strut of the Suspension Assembly)

Başka bir çalışmada The TU Bruno Yarış Takımı Formula yarışları için aks taşıyıcı sisteme TO uygulamışlardır. Şekil özgürlüğü ve etkili malzeme dağıtımı potansiyelinden yararlanmak amacıyla aks taşıyıcısını tasarlamak için bir topoloji optimizasyonu kullanmışlardır. Topoloji uygulanan aks taşıyıcıyı AlSi10Mg malzemeden SLM yöntemi ile imal etmişlerdir. TO uygulaması SolidThinking Inspire yazılımında gerçekleştirilmiştir. Aks taşıyıcının ilk tasarım aşamasındaki ağırlığı 875 gramken optimizasyon sonucu ağırlık 596 grama hafifletilmiştir. İşlem sonrası sırasında bileşen platformdan kesilerek destek yapıları manuel olarak çıkarılmış ve bileşen kumlanmıştır [32].

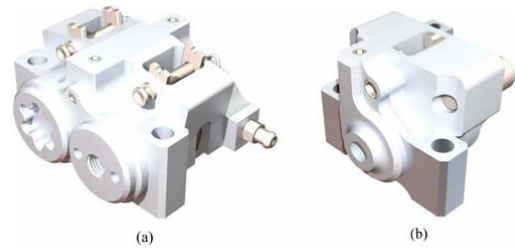


Şekil 24. Aks Taşıyıcı Sistem (a) Tasarım alanı; (b) 1. tasarım aşaması; (c) 3. tasarım aşaması; ve (d) 6. tasarım aşaması (imalat) [32] (Axle Carrier System (a) Design Area; (b) 1st Design Stage; (c) 3rd Design Stage; and (d) 6th Design Stage (Manufacturing))

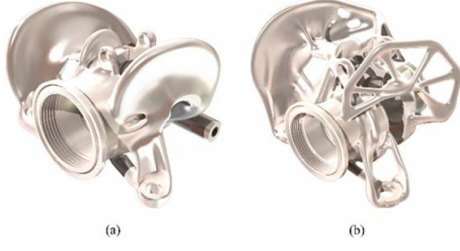


Şekil 25. Step Model (a), STL Model (b), Destek Yapısı ile Üretim Modeli (c) [32] (Step Model (a), STL Model (b), Production Model with Support Structure (c))

Başka bir araştırma makalesindeki yazarlar, ön ve arka fren kaliperinin yuvalarını örnek olay incelemesi olarak kullanarak TO'nun faydalarını ve sınırlamalarını araştırmışlardır. Yuvalar topolojik olarak optimize edilerek kısmen yeniden tasarlanmıştır, 3D baskı için hazırlanarak doğrulanmış ve seçici lazer eritme (SLM) kullanılarak titanyum malzemeden imal edilmiştir. Optimize edilmiş kaliperlerin ağırlığı, ticari kaliperlere kıyasla %41.6 oranında azaltılmıştır. Daha hafif bir otomobilin hızlanması artmakta ve dolayısıyla performansı da artmaktadır. Üstelik bu ağırlık azalması malzeme maliyetini azaltarak yakıt verimliliğini artırmakta ve aracın egzoz emisyonlarını azaltmaktadır. Optimize edilmiş kaliperler, Ti6Al4V'de EOS Lasertec 30 Dual SLM 3D yazıcıda 3D olarak basılmıştır [33].



Şekil 26. Ön kaliper (a), Arka kaliper (b) [33]
(Front Caliper (a), Rear Caliper (b))



Şekil 27. Optimize edilmiş ön kaliper (a), Arka kaliper (b) [33] (Optimized Front Caliper (a), Rear Caliper (b))

Otomotiv sektöründe topoloji optimizasyonu uygulamaları, araçların ağırlık azaltma ve enerji verimliliği artırma hedeflerine ulaşmalarında kritik bir rol oynamaktadır. Bu teknoloji, araç parçalarının daha hafif ve dayanıklı hale getirilmesine olanak tanırken, yakıt tüketiminin ve emisyonların azaltılmasına da katkı sağlar. Bu tür uygulamalar, hem araç performansını artırmakta hem de sürdürülebilirlik hedeflerine katkı sağlamaktadır.

5. SONUÇLAR (RESULTS)

Bu çalışmada ana tema havacılık, uzay, otomotiv ve medikal sektörlerinde metal eklemeli imalat yöntemleri ile üretilen yapıların, bileşenlerin tasarlanmasında topoloji optimizasyonu uygulamalarının kattığı avantaj ve iyileştirmelerdir. Bu avantaj ve iyileştirmeler;

- Eklemeli üretim hem bir tasarım devrimine hem de bir endüstriyel devrime olanak tanımaktadır.
- Fonksiyonların entegrasyonu, daha az sayıda bileşen, ağırlıktan tasarruf, performansın artırılması, farklı malzemelerin aynı yapıda kullanılması, verimliliğin artırılması imkanlarını sağlamaktadır.
- Otomotiv sektöründe topoloji optimizasyonu uygulamaları parçaların ağırlıklarından azaltarak araçların hafifletilmesine, egzoz emisyonlarının azaltılmasına, yol tutuşunun artırılmasına ve böylelikle yakıttan tasarruf edilmesine olanak sağlamaktadır.
- Havacılık sektöründe uçak bileşenlerinin karmaşık geometrilerde imal edilmesine ve hassas ölçülerdeki bileşenlerin daha kısa sürede üretilmesine yol açarak zamandan ve maliyetlerden tasarruf edilmesini mümkün kılmaktadır.

- Medikal sektöründe hastalar için yenilikçi çözümler sunarak doku organ uyumluluğunun artırılmasını sağlamaktadır.

Bu çalışmada metal eklemeli imalat ve topoloji optimizasyonunun entegrasyonunun sunduğu avantajlar ele alınmıştır. Özellikle havacılık, otomotiv ve medikal sektörlerinde sağlanan performans artışları, malzeme tasarrufu ve karmaşık yapıların üretimi açısından bu yöntemler önemli katkılar sunmaktadır. Ancak, bu yöntemin getirdiği bazı kısıtlar da mevcuttur. Bu kısıtlar;

- Metal Eklemeli İmalatta üretim yönüne bağlı olarak parçaların mekanik özellikleri değişebilir. Bu malzeme anizotropisi, performansı olumsuz etkileyebilir ve optimizasyon gerektirmektedir.
- Yüzey pürüzlülüğünün sağlanması adına üretilen parçalar genellikle ek yüzey işlemlerine ihtiyaç duyar ve maliyetleri arttırabilir.
- Karmaşık geometrilerin üretimi sırasında destek yapılarına ihtiyaç duyulur ve bu yapıların çıkarılması süreci zorlaştırmaktadır.
- Kullanılan tozun kalitesi nihai ürünün performansını etkilemektedir. Tozun parçacık boyutu ve yeniden kullanım durumları da üretim verimliliği üzerinde etkili olmaktadır.
- Parçanın minimum boyutları, ince duvarların ve küçük geometrik detayların üretilmesi açısından sınırlıdır. Minimum boyut kısıtlamaları, özellikle karmaşık tasarımlar ve hassas yapılar için tasarım aşamasında dikkat edilmesi gereken bir faktördür. Bu kısıtlamalar, hem üretim hassasiyeti hem de yapısal bütünlük açısından önemlidir.

Sonuç olarak, MEİ ve topoloji optimizasyonu kombinasyonu, gelecekte endüstriyel üretimde devrim yaratacak potansiyele sahiptir. Endüstri 4.0'ın getirdiği dijitalleşme ile birlikte bu teknolojinin önemi daha da artacaktır; bu bağlamda, metal eklemeli imalatın sektörel uygulamaları gelecekte daha geniş bir yelpazeye yayılacaktır. Bu nedenle, hem akademik hem de endüstriyel araştırmaların bu alanlara odaklanması büyük önem taşımaktadır.

MEİ süreçlerinde karşılaşılan malzeme anizotropisi, katmanlar arası yapışma sorunları, yüzey pürüzlülüğü, destek yapıları gibi zorlukların üstesinden gelmek için daha ileri düzeyde

optimizasyon algoritmalarına ve üretim sonrası işlemlerin iyileştirilmesine ihtiyaç duyulmaktadır.

Gelecekte, bu teknolojilerin daha yaygın ve etkin kullanımı için üretim parametrelerinin optimize edilmesi, tasarım araçlarının geliştirilmesi ve yeni malzeme teknolojilerinin entegrasyonu önerilmektedir. Makine öğrenimi ve yapay zeka destekli optimizasyon araçları, bu süreçlerde kullanılabilir ve daha karmaşık tasarımların daha hızlı ve verimli bir şekilde optimize edilmesini sağlayabilir. Aynı zamanda, endüstriyel uygulamalarda süreç modellemesi ve simülasyon tabanlı yaklaşımların kullanılması, bu teknolojilerin üretim aşamasındaki etkinliğini artırabilir.

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)

Büşra ÇALIK: Literatür taraması, araştırma, düzenleme ve yazma sürecini yürütmüştür. / She conducted the literature review, research, editing and writing process.

Gültekin UZUN: Literatür taraması, araştırma ve danışmanlık yapmıştır. / He conducted the literature review, research and consultancy.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

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



KAYNAKLAR (REFERANCES)

- [1] Aumund-Kopp C., Riou A., EPMA Introduction to Additive Manufacturing, 3rd edition 2019, p.5.
- [2] Armstrong, M., Mehrabi, H., & Naveed, N. (2022). An overview of modern metal additive manufacturing technology. *Journal of Manufacturing Processes*, 84, 1001-1029.
- [3] Bandyopadhyay, A., Zhang, Y., & Bose, S. (2020). Recent developments in metal additive manufacturing. *Current opinion in chemical engineering*, 28, 96-104.

- [4] Frazier, W. E. (2014). Metal additive manufacturing: a review. *Journal of Materials Engineering and performance*, 23, 1917-1928.
- [5] Gibson, I., Rosen, D. W., & Stucker, B. (2014). *Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing*. Springer.
- [6] T. Pan, S. Karnati, and F. Liou, "General Rules for Pre-Process Planning in Powder Bed Fusion System—A Review," in *Solid Freeform Fabrication 2018: Proceedings of the 29th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium—an Additive Manufacturing Conference*, SFF 2018, pp. 1161–1173, 2020b.
- [7] A. Bacciaglia, A. Ceruti, and A. Liverani, "Additive Manufacturing Challenges and Future Developments in the Next Ten Years," in *Design Tools and Methods in Industrial Engineering*, pp. 891–902, 2020. doi: 10.1007/978-3-030-31154-4_76.
- [8] Gebisa, A. W., & Lemu, H. G. (2017, December). A case study on topology optimized design for additive manufacturing. In *IOP conference series: materials science and engineering* (Vol. 276, No. 1, p. 012026). IOP Publishing.
- [9] <https://digi-mode.com.tr/eklemeli-imalat/> Son Erişim Tarihi: 31.07.2024
- [10] Jihong, Z. H. U., Han, Z. H. O. U., Chuang, W. A. N. G., Lu, Z. H. O. U., Shangqin, Y. U. A. N., & Zhang, W. (2021). A review of topology optimization for additive manufacturing: Status and challenges. *Chinese Journal of Aeronautics*, 34(1), 91-110.
- [11] Ibhaddode, O., Zhang, Z., Sixt, J., Nsiempba, K. M., Orakwe, J., Martinez-Marchese, A., ... & Toyserkani, E. (2023). Topology optimization for metal additive manufacturing: current trends, challenges, and future outlook. *Virtual and Physical Prototyping*, 18(1), e2181192.
- [12] Blakey-Milner, B., Gradl, P., Snedden, G., Brooks, M., Pitot, J., Lopez, E., ... & Du Plessis, A. (2021). Metal additive manufacturing in aerospace: A review. *Materials & Design*, 209, 110008.
- [13] nTop. Cobra Aero Reimagines the Combustion Engine Cylinder using Multiphysics Simulation & Field Driven Design. Erişim adresi <https://ntop.com/case-studies/cobra-aero-multiphysics-simulation-drone-engine/>
- [14] Evrensel, R., & Ertek, C. (2023). Eklemeli İmalatta Alüminyum ve Alüminyum Alaşımlarının Uygulamaları ve Topoloji Optimizasyonu. *Journal of the Institute of Science and Technology*, 13(3), 2008-2025.

- [15] Kumar, S., & Jain, P. K. (2018). Additive Manufacturing Processes. CRC Press.
- [16] Yi, J., Hsu, K. C., Wu, C., & Rosen, D. W. (2019). "A Hybrid Approach to Optimize Material Distributions for Additive Manufacturing". Additive Manufacturing, 30, 100893.
- [17] Fetisov, K. V., & Maksimov, P. V. (2018, May). Topology optimization and laser additive manufacturing in design process of efficiency lightweight aerospace parts. In Journal of Physics: Conference Series (Vol. 1015, No. 5, p. 052006). IOP Publishing.
- [18] Seabra, M., Azevedo, J., Araújo, A., Reis, L., Pinto, E., Alves, N., ... & Mortágua, J. P. (2016). Selective laser melting (SLM) and topology optimization for lighter aerospace components. Procedia Structural Integrity, 1, 289-296.
- [19] Günaydın, A. C. (2022). Eklemeli imalat prosesinde yapı oryantasyonunun çok-amaçlı optimizasyonu (Doctoral dissertation, Bursa Uludağ University (Turkey)).
- [20] Orme, M., Madera, I., Gschweilt, M., & Ferrari, M. (2018). Topology optimization for additive manufacturing as an enabler for light weight flight hardware. Designs, 2(4), 51.
- [21] Sleger, G. (2019). Minibike features ground-breaking 3D-printed fuel tank. Erişim adresi <https://www.thefabricator.com/additivereport/article/additive/minibike-features-ground-breaking-3d-printed-fuel-tank> Theliving. Bionic Partition. Erişim adresi <http://www.thelivingnewyork.com/>
- [22] Jaimes, D. D. (2016, January 20). The Living's 3D Printed Airplane Partition is Designed to Mimic Bone Structure. [Archdaily] <https://www.archdaily.com/780661/the-livings-parametric-3d-printed-airplane-partition-is-designed-to-mimic-bone-structure>
- [23] Hilpert, E., Hartung, J., Risse, S., Eberhardt, R., & Tünnermann, A. (2018). Precision manufacturing of a lightweight mirror body made by selective laser melting. Precision Engineering, 53, 310-317.
- [24] López-Castro, J. D., Marchal, A., González, L., & Botana, J. (2017). Topological optimization and manufacturing by Direct Metal Laser Sintering of an aeronautical part in 15-5PH stainless steel. Procedia Manufacturing, 13, 818-824.
- [25] A. A. Al-Tamimi et al., "Topology Optimised Metallic Bone Plates Produced by Electron Beam Melting: A Mechanical and Biological Study," The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 104, no. 1–4, pp. 195–210, 2019. doi: 10.1007/s00170-019-03866-0.
- [26] Y. He et al., "Solid-Lattice Hip Prosthesis Design: Applying Topology and Lattice Optimization to Reduce Stress Shielding from Hip Implants," in 2018 Design of Medical Devices Conference. American Society of Mechanical Engineers, 2018. doi: 10.1115/dmd2018-6804.
- [27] Canlıdınç, M. (2023). Topoloji Optimizasyonu ile Metal Eklemeli İmalat Yönteminin Endüstriyel Uygulamaları. Kırklareli Üniversitesi Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi, 9(2), 552-565.
- [28] T. Iqbal et al., "A General Multi-Objective Topology Optimization Methodology Developed for Customized Design of Pelvic Prostheses," Medical Engineering & Physics, vol. 69, pp. 8–16, 2019. doi: 10.1016/j.medengphy.2019.06.008.
- [29] Kahraman, F., & Küçük, M. (2020). Otomotiv endüstrisinde topoloji optimizasyonu ile ağırlık azaltma uygulaması üzerine bir araştırma. Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, (20), 623-631.
- [30] E. Dalpadulo, F. Pini, and F. Leali, "Integrated CAD Platform Approach for Design for Additive Manufacturing of High Performance Automotive Components," International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM), vol. 14, no. 3, pp. 899–909, 2020'a. doi: 10.1007/s12008-020-00684-7.
- [31] D. Walton and H. Moztaazadeh, "Design and Development of an Additive Manufactured Component by Topology Optimisation," Procedia CIRP, vol. 60, pp. 205–210, 2017. doi: 10.1016/j.procir.2017.03.027.
- [32] O. Vaverka, D. Koutny, and D. Palousek, "Topologically Optimized Axle Carrier for Formula Student Produced by Selective Laser Melting," Rapid Prototyping Journal, vol. 25, no. 9, pp. 1545–1551, 2019. doi: 10.1108/rpj-07-2018-0171.
- [33] E. Tyflopoulos, M. Lien, and M. Steinert, "Optimization of Brake Calipers Using Topology Optimization for Additive Manufacturing," Applied Sciences, vol. 11, no. 4, 1437, 2021. doi: 10.3390/app11041437.

Yapay Zekâ Teknikleriyle Yükseköğretim Kurumları Sınavı (YKS) Puanlarının Tahmini

Betül ERSÖZ*  Halil İbrahim BÜLBÜL 

^{1,2} Gazi Üniversitesi, Bilgisayar ve Öğretim Teknolojileri Eğitimi Bölümü, Ankara, Türkiye

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 02/07/2024
Düzeltilme: 30/08/2024
Kabul: 15/12/2024

Anahtar Kelimeler

Yapay zekâ
Makine öğrenme
Üretken yapay zeka
YKS
TYT
AYT

Article Info

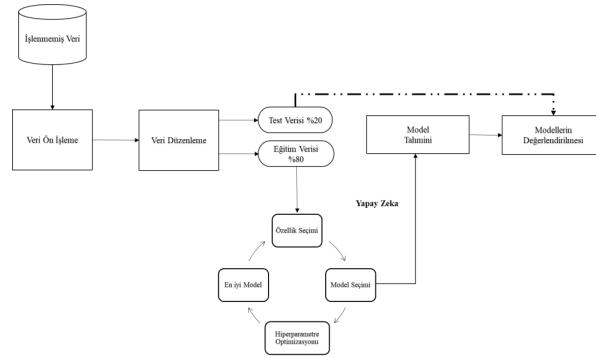
Research article
Received: 02/07/2024
Revision: 30/08/2024
Accepted: 15/12/2024

Keywords

Artificial intelligence
Machine learning
Generative artificial
intelligence
YKS
TYT
AYT

Grafik Özet (Graphical/Tabular Abstract)

Bu çalışmada, Yükseköğretim Kurumları Sınavı (YKS) sınavına giren öğrencilerin deneme sınavı netlerine (doğru/yanlış) göre YYS puanlarının tahmini yapılmıştır. İki aşamalı olan YYS sınavında TYT (Temel Yeterlilik Testi) ve AYT (Alan Yeterlilik Testi) puanlarının tahmin edilmesinde Yapay zekâ (YZ) tekniklerinden, Makine Öğrenme (ML) algoritmalarından Lineer Regresyon (LinReg), Çok Katmanlı Algılayıcı (MLP), K-En Yakın Komşu (KNN), Rastgele Orman (RF) gibi dört farklı model kullanılmıştır. / In this study, YYS scores of students who participated the Higher Education Institutions Examination (YKS) were predicted according to their net exam results (true/false). Four different models such as Linear Regression (LinReg), Multilayer Perceptron (MLP), K-Nearest Neighbor (KNN), Random Forest (RF) from Artificial Intelligence (AI) techniques, Machine Learning (ML) algorithms were used to predict TYT (Basic Proficiency Test) and AYT (Field Proficiency Test) scores in the two-stage YYS exam.



Şekil A: Çalışma Akış Şeması /Figure A: Work Flow Chart

Highlights (Önemli noktalar)

- Makine öğrenme algoritmalarıyla YYS (TYT/AYT) puanlarının tahmin edilmesi/ Predicting YYS (TYT/AYT) scores with machine learning algorithms
- Geliştirilen modelin ticari bir dijital öğrenme platformun üretken yapay zeka aracına entegrasyonu/Integration of the developed model into the generative AI tool of a commercial digital learning platform.
- Öğrencilerin YYS puan tahminlerine yönelik öngörü sunan bir ürün geliştirilmesi/ Developing of a product that provides insight into the students' YYS score predictions

Amaç (Aim): Geliştirilen model, öğrencilerin deneme sınav verilerinden YYS puan (TYT/AYT) sonuçlarını ML teknikleri ile tespit ederek ticari bir dijital öğrenme platformun üretken yapay zeka aracına entegre edilmiştir. / The developed model is integrated into the generative artificial intelligence tool of a commercial digital learning platform by predicting YYS score (TYT/AYT) results from the students' test data with ML techniques.

Özgünlük (Originality): Yapay zekâ yöntemleriyle YYS puanlarını tahmin eden çalışmaların veya uygulamaların bulunmaması ve modelin ürün olarak öğrenme platformuna entegre edilmesidir. / There are no studies or applications that predict YYS scores using artificial intelligence methods, and the model is integrated into the learning platform as a product.

Bulgular (Results): ML algoritmaları içerisinde TYT' de en iyi performans gösteren MLP, R-Kare (0.999), MAE (0.056) ve RMSE (0.447) ve AYT' de en iyi performans gösteren Lineer regresyon R-Kare (0.999), MAE (0.214) ve RMSE (0.0413) değerleri bulunmuştur. / ML algorithms, MLP performed the best for TYT with R-Square (0.999), MAE (0.056) and RMSE (0.447) and Linear regression performed the best for AYT with R-Square (0.999), MAE (0.214) and RMSE (0.0413).

Sonuç (Conclusion): Bu çalışma sonucunda, ticari bir dijital öğrenme platforma entegre edilen yapay zekâ tabanlı YYS puan tahmin modeli geliştirilmiştir./ As a result of this study, an artificial intelligence-based YYS score prediction model integrated into a commercial digital learning platform has been developed.



Yapay Zekâ Teknikleriyle Yükseköğretim Kurumları Sınavı (YKS) Puanlarının Tahmini

Betül ERSÖZ* Halil İbrahim BÜLBÜL

¹Gazi University, Department of Computer and Instructional Technologies Education, Ankara, Türkiye

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 02/07/2024
Düzeltilme: 30/08/2024
Kabul: 15/12/2024

Anahtar Kelimeler

Yapay zekâ
Makine öğrenme
Üretken yapay zeka
YKS
TYT
AYT

Öz

Yükseköğretim programlarına yerleştirmeler öncelikle öğrencilerin akademik başarılarına ve tercihlerine göre belirlenir. Yükseköğretim Kurumları Sınavı (YKS) giren öğrenciler başta YKS puanı, Ortaöğretim Başarı Puanı (OBP) ve tercih sıralamalarına göre kariyer hedeflerine uygun yükseköğretim bölümlerine yerleştirilir. YKS ile yerleşmede en önemli faktör sınav puanıdır. Bu sebeple öğrenciler, sınav öncesi netlerinden puanlarının belirlenmesi için öneri sistemlerine ihtiyaç duymaktadır. Deneme sınavları netlerinden öğrencilerin YKS puanlarını formüller yardımıyla hesaplayarak tahmin eden hâlihazırda çeşitli sistemler mevcuttur. Ancak yapay zekâ yöntemleriyle puanları tahmin eden uygulamalar bulunmamaktadır. Bu çalışmada YKS'ye giren öğrencilerin deneme sınavı netlerine göre YKS puanlarının tahmini yapılmıştır. Araştırmada, iki aşamalı olan YKS sınavında TYT (Temel Yeterlilik Testi) ve AYT (Alan Yeterlilik Testi) puanlarının tahmin edilmesinde Yapay zekâ (YZ) tekniklerinden olan Makine Öğrenme (ML) algoritmalarından Lineer Regresyon (LinReg), Çok Katmanlı Algılayıcı (MLP), K-En Yakın Komşu (KNN), Rastgele Orman (RF) gibi dört farklı model kullanılmıştır. ML algoritmaları içerisinde TYT' de en iyi performans gösteren MLP, R-Kare (0.999), MAE (0.056) ve RMSE (0.447) değerleri bulunmuştur. AYT' de en iyi performans gösteren Lineer regresyon R-Kare (0.999), MAE (0.214) ve RMSE (0.0413) değerleri bulunmuştur. Geliştirilen model, öğrencilerin YKS puan sonuçlarını ML teknikleriyle tespit ederek ticari bir dijital öğrenme platformun üretken yapay zeka aracına entegre edilmiş olup, puan tahminlerinde destek sağlamaktadır.

Prediction of Higher Education Institutions Examination (YKS) Scores with Artificial Intelligence Techniques

Article Info

Research article
Received: 02/07/2024
Revision: 30/08/2024
Accepted: 15/12/2024

Keywords

Artificial intelligence
Machine learning
Generative artificial
intelligence
YKS
TYT
AYT

Abstract

Students' academic success and preferences primarily determine placements in higher education programs. Students who take the Higher Education Institutions Exam (YKS) are placed in higher education departments suitable for their career goals, primarily according to their YKS score, Secondary Education Success Score (OBP), and preference rankings. The most crucial factor in placement with YKS is the exam score. Therefore, students need recommendation systems to determine their net scores before the exam. Similar to this study, various systems calculate students' YKS scores using formulas from net scores of practice exams. However, it has been observed that no application estimates score with artificial intelligence methods. In this study, the YKS scores of students who participated to the YKS are estimated according to their net scores of practice exams. In the study, four different models such as Linear Regression (LinReg), Multilayer Perceptron (MLP), K-Nearest Neighbor (KNN), Random Forest (RF) from Machine Learning (ML) algorithms, which are among the Artificial Intelligence (AI) techniques, were used in estimating the scores of TYT (Basic Proficiency Test) and AYT (Field Proficiency Test) in the two-stage YKS exam. Among the ML algorithms, the best-performing MLP for TYT was found to be R-Square (0.999), MAE (0.056), and RMSE (0.447). The best-performing Linear Regression for AYT was found to be R-Square (0.999), MAE (0.214), and RMSE (0.0413). The developed model is integrated into the generative artificial intelligence tool of a commercial digital learning platform by using ML techniques to predict students' YKS score results and provides assistance in score predictions.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Türkiye’de yükseköğretime geçiş süreci olan Yükseköğretim Kurumları Sınavı (YKS), milyonlarca öğrencinin üniversite eğitimine adım atmasında kritik bir rol oynamaktadır. Öğrenciler, bu sınavdan aldıkları puanlarla hayal ettikleri üniversitelere yerleşmeye çalışırken, tercih sürecinde doğru yönlendirilmek, hem hedeflerine ulaşma açısından hem de başarılı bir eğitim hayatına adım atma bakımından büyük önem taşır. Ancak, tercih süreci karmaşık ve yorucudur. Dolayısıyla öğrencilerin yüzlerce seçenek arasından doğru üniversite ve bölümü seçebilmeleri için rehberlik almaları gereklidir. Bu doğrultuda, Yükseköğretimde eğitime devam etmek isteyen öğrenciler Yükseköğretim Kurumları Sınavına (YKS) girerek Temel Yeterlilik Testi (TYT), Alan Yeterlilik Testi (AYT) ve Yabancı dil olmak üzere üç farklı sınav oturumunda orta öğretimde almış oldukları temel derslerden sınava tabi tutulmaktadır. TYT, tüm adaylar için zorunluken, AYT ve Yabancı dil isteğe bağlı olarak adayın tercih ettiği bölüme göre seçilmektedir. Türkiye’de birçok aile ve öğrenci, iyi bir üniversiteye ve bölüme yerleşmenin gelecekteki başarı ve yaşam standardı için çok önemli olduğuna inanmaktadır. Dolayısıyla, öğrencilerin mesleki hayatlarındaki başarı hedeflerine ulaşmaları için kullandıkları en önemli sınavlardan biridir. Her yıl düzenli olarak yapılan ve ortama üç milyon öğrencinin katılım sağladığı bu sınavlarda öğrencilerin YKS puan sıralamaları, YKS sınavlarında derslere ait testlerdeki net sayılarına ve Ortaöğretim Başarı Puanı (OBP) hesaplanarak yapılmaktadır [1]. Öğrencilerin YKS’de başarısını etkileyen birçok faktör bulunmaktadır. Bu faktörler arasında öğrencinin akademik yeteneği, sınavlara daha iyi hazırlayan eğitim sistemi, sınav teknikleri, soru çözme becerileri, çalışma disiplini, sınavdaki performansını olumsuz etkileyen stres ve kaygı olarak sıralanabilir. Öğrencilerin bu faktörlerin bilincinde olması ve olumlu yönde etkileyecek şekilde çalışması, YKS’de başarı şansını artırabilmektedir. Bu doğrultuda öğrencilerin sınav kaygılarının azalmasında, geldikleri seviyeleri belirlemelerinde ve eksiklerini değerlendirmelerinde bir ölçme aracı olarak deneme sınavları etkin bir şekilde kullanılmaktadır. Deneme

sınavları ile öğrenciler, sınav öncesinde başarılarını ölçmek için sınavlarda yapmış oldukları doğru ve yanlış sorulardan net puanlarını analiz ederek girmek istedikleri yükseköğretim programının yerleştirme puanını hesaplayabilirler [2-4].

Bilim ve teknolojiye hızlı ilerlemeler, ilköğretimden yükseköğretime kadar tüm eğitim kademelerini olumlu yönde etkilemektedir. Bununla birlikte, eğitim teknolojilerinin yaygınlaşmasıyla akıllı telefon, tablet, bilgisayar gibi teknolojik araçların kullanımı öğrenciler tarafından son yıllarda hızla yaygınlaşmıştır [5]. Bu sayede uygulamaları artan eğitim platformları, öğrenci-öğretmen arasında dijital ortamlarda etkileşim, erişilebilirlik ve etkileşimi artırmaktadır. Özellikle son yıllarda, öğretim yönetimi otomasyonu, dil modelleri (ChatGPT, Gemini, Falcon vb.) ile geri bildirim ve değerlendirme, sanal ve artırılmış gerçeklik uygulamaları ve YZ uygulamaları öğrencilerin dijital öğrenme platformlarında oldukça etkin olarak kullanılmaktadır [6, 7]. Son dönemlerde YZ’ nin bir alt dalı olan Makine öğrenme (ML) algoritmaları, büyük miktarda veriler işleyerek anlamlı bilgiler çıkarma ve bu bilgileri tahminlerde bulunmak ve kararlar almak için kullanılmaktadır. Bu sayede öğrenci verilerinden anlamlı çıkarımlar ve modeller öğrenme ortamlarının iyileştirilmesinde destek sağlamaktadır [8]. İlgili literatür incelendiğinde: Yapılan araştırmalarda [9] okullardaki erken aşamalarda öğrencilerin zayıf ve güçlü yönlerini tahmin etmek için (karar ağacı, rastgele orman, destek vektör makinesi) gibi makine öğrenme algoritmalarını kullanarak RF (Rastgele Orman) algoritmasıyla %94 doğruluk oranıyla öğrenci notunu tahmin eden kapsamlı bir web uygulaması oluşturulmuştur. Bir diğer çalışmada [10] her disiplindeki öğrencilerin üniversiteye giriş sınavı puanlarını tahmin etmek için bir makine öğrenmesi algoritması kullanılmış ve öğrencilerin ilgileri, baskıya dayanıklılıkları ve kişilik özellikleri gibi çeşitli etki faktörleri dikkate alınmıştır. RF algoritması ile tahmin doğruluğu % 80’in üzerindeyken Adaboost algoritmasının doğruluğu % 90’ın üzerinde bulunmuştur. Öğrencilerin performansını etkili bir şekilde geliştirmek ve eğitimcilerin öğrencilerin öğrenme durumlarını izlemelerine yardımcı olmak için bir çalışmada [11], öğrencilerin akademik performansını

etkileyen faktörleri araştıran ve akademik performansını tahmin eden sistemde destek vektör makine (DVM) modelinin en kararlı etkiye sahip olduğunu göstermiştir. Yapılan diğer çalışmada [12], üniversitenin akademik itibarı, üniversitenin bulunduğu şehrin olanakları, üniversitenin olanakları ve kültürel olanaklara ilişkin verilere dayanarak öğrenci yerleştirme yüzdesini tahmin etmeye yönelik makine öğrenmesi algoritmaları geliştirilmiştir. Yapılan çalışmada model doğruluğu performans metriklerine göre değerlendirildiğinde Extreme Gradient Boosting (XGBoost) algoritması diğer makine öğrenimi algoritmalarına göre daha yüksek tahmin doğruluğu göstermiştir. Yapılan bir çalışmada [13] lise öğrencilerinin üniversiteye kabul edilebilmek için Matura sınavı ML teknikleriyle değerlendirilmiştir. Bu sınavla ilgili yapılan çalışmada toplam on altı algoritma uygulanmıştır. Sonuçlara göre RepTree algoritması, 0,90 Gerçek Pozitif (TP) oranı ve 0,14 Yanlış Pozitif (FP) oranıyla en iyi performansı göstermiştir. Şanlıurfa ilinde [14] 2018 yılında YKS' ye giren öğrencilerden 12.000 öğrencinin TYT puanları analiz edilmiştir. Doğrusal Regresyon, Destek Vektör Regresyonu ve epsilon parametrelili, Rastgele Orman Regresyonu kullanılmıştır. Tüm regresyon yöntemleriyle Korelasyon Katsayısı değerlerinin TYT puanına etkisi tespit edilmiştir.

Literatürde, YKS yerleştirmeleri ile ilgili oldukça sınırlı sayıda akademik çalışma olduğu görülmektedir. Ancak dershaneler, özel okullar ve bunlara kaynak üreten ticari işletmeler tarafından bir önceki yıllardaki YKS net sayısı, ortalaması, standart sapması gibi istatistiksel veriler hesaplanarak kural tabanlı uygulamalar bulunmaktadır. Yapılan bu çalışmada YZ tabanlı dört ML yöntemi olan Lineer Regresyon (LinReg), Multi-Layer Perceptron (MLP), K-Nearest Neighbors, (KNN), Random Forest (RF) gibi dört farklı Makine Öğrenme (ML) algoritması kullanılarak YKS puan tahmin modeli geliştirilmiştir. Geliştirilen model, öğrencilerin deneme sınav verilerinden YKS puan (TYT/AYT) sonuçlarını ML teknikleri ile tespit edilerek YZ tabanlı ticari bir dijital öğrenme platformun üretken yapay zeka aracına entegre edilmiştir.

2. MATERYAL VE YÖNTEM (MATERIAL AND METHOD)

Bu bölümde veri seti, kullanılan yöntem, geliştirilen modele yönelik bir akış diyagramı, kullanılan araçlar ve modelin eğitim ve test olarak geliştirilmesine yönelik bilgiler verilmiştir.

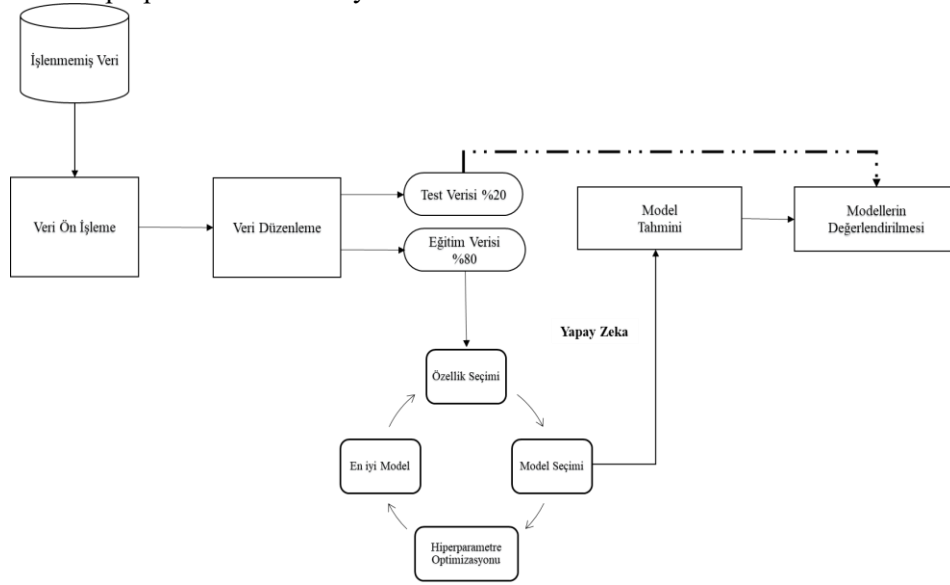
Çalışma kapsamında, veri seti olarak bir firma tarafından üretilen veriler kullanılmıştır. Veri seti 2023-2024 eğitim-öğretim yılında YKS deneme sınavına giren öğrencilere ait 56.000 TYT ve AYT verisinden oluşmaktadır. Veri setindeki hatalı ve eksik veriler yeniden düzenlenerek 40.863 TYT ve AYT veri seti çalışmada kullanılmak üzere yeniden düzenlenmiştir. TYT sınavı Türkçe (40), Sosyal Bilimler (20), Temel Matematik (40) ve Fen Bilimleri (20) sınav sorularından oluşmaktadır. AYT sınavında puan hesaplamalarında bölüm tercihlerine göre, Sayısal (SAY), Eşit Ağırlık (EA) ve Sözel (SÖZ) puan alanları yer almaktadır. AYT sınavı Sayısal puanı için TYT netlerine ek olarak, AYT sınavı soruları Matematik (40), Fizik (14), Kimya (13), Biyoloji (13) netleriyle puan hesaplanmaktadır. Aynı şekilde AYT Eşit ağırlık puanı, TYT netlerine ek olarak, AYT sınavı soruları Türk Dili ve Edebiyatı (24), Tarih-1 (10), Coğrafya-1 (6) ve Matematik (40) netleriyle hesaplanmaktadır. AYT Sözel puanı için, TYT netlerine ek olarak, AYT sınavı soruları, Türk Dili ve Edebiyatı (24), Tarih-1 (10), Coğrafya-1 (6), Tarih-2 (11), Coğrafya-2 (11), Felsefe Grubu (12) ve Din Kültürü ve Ahlak Bilgisi / Ek Felsefe Grubu (6) netleriyle hesaplanmaktadır.

Çalışma kapsamında, işlenmemiş veri seti öncelikle ön işlemden geçirilerek eksik ve hatalı olanlar çıkarılmış olup bazı veriler için boşluklar sıfır (0) ile doldurulmuştur. Veri seti %80 eğitim ve %20 test olarak ayrılmıştır. Yapılan çalışmada, YKS puan tahminlerinde LinReg, MLP, KNN, RF olmak üzere dört farklı ML algoritması kullanılarak modeller geliştirilmiştir. **LinReg**, ML teknikleri içerisinde en temel ve yaygın kullanılan modellerinden biridir. Bu model, giriş ve çıkış değişkenleri arasındaki ilişkiyi modellemek ve giriş değişkeninin değerini diğerine göre tahmin etmek için kullanılır. Basitliği, yorumlanabilirliği ve farklı problemlere uygulanabilirliği nedeniyle yaygın olarak kullanılmaktadır. **MLP**, sinir ağının eğitimi için ileri beslemeli olarak bilinen ANN' nin denetimli bir öğrenme tekniği olarak bilinir. MLP karmaşık problemleri çözmek ve yüksek doğruluk elde etmek

inçin kullanılırlar. **KNN**, benzer özelliklere sahip veri noktalarının gruplandırıldığı sınıflandırma ve regresyon için kullanılan bir algoritmadır. Aynı zamanda denetimli bir öğrenme algoritmasıdır ve verileri en yakın komşusunun hiperparametresine göre sınıflandırmak için de kullanılır. **RF**, birçok karar ağacının bir araya gelerek tahmin yapmasına dayalı bir tahmin yapmaktadır [15-21]. Çalışma, Python programlama diliyle Scikit-Learn, NumPy, Matplotlib, Pandas gibi kütüphaneleri ve Jupyter, Spyder editörleri kullanılarak modeller geliştirilmiştir.

Modeller, deneme sınavı netleri ve puanları arasındaki ilişkiyi öğrenmek için eğitilmiştir. Bu aşamada, modelin hiperparametreleri en iyi sonuca

göre ayarlanmıştır. Veri seti ölçeklendirilmiştir. Çalışmada kullanılan bir yöntem olan K-Fold çapraz doğrulama, ML modellerinin performansını değerlendirmek ve aşırı öğrenme (overfitting) sorununu azaltmak için yaygın olarak kullanılmaktadır. K-Fold, modelin farklı veri bölümleri üzerinde nasıl performans gösterdiğini değerlendirir ve bu sayede modelin genelleme yeteneğini daha iyi ölçmektedir. Modelin doğruluğunu kontrol etmek için, eğitim verisinden ayrı bir test veri kümesi kullanılmaktadır [22, 23]. Modelin performansını ölçmek için R-Kare skoru, MAE ve RMSE metrikleri kullanılmıştır. Yapılan çalışmaya ilişkin akış diyagramı Şekil 1 'de gösterilmiştir.



Şekil 1. Çalışma Akış Şeması (Study Flowchart)

Sayısal bir değerin tahmin edilmesini gerektiren tahmine dayalı regresyon modelinin performansını değerlendirmek ve raporlamak için sıklıkla kullanılan hataların mutlak değerlerinin ortalaması (MAE) hata ölçüsüdür. MAE, bir modelin tahmin edilen ve gerçek değerleri arasındaki hataların mutlak değerlerinin ortalamasını hesaplayan basit ve güçlü bir ölçüm aracıdır. Bir modelin ne kadar iyi genelleştirildiğini ve tahminlerinin gerçek değerlerle ne kadar iyi eşleştiğini değerlendirmektedir. Bu çalışmada deneysel sonuçlara en yakın tahmine dayalı modellemeyi bulmayı, deneysel değerlerden sapmaları görmeyi ve bağımlı değişken ile bağımsız değişken arasındaki ilişkileri yakalamak amacıyla MAE kullanılmıştır. MAE aşağıdaki formülle hesaplanmaktadır [23]:

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |Y_i - Y_{tahmin(i)}| \quad (1)$$

R-Kare (R^2): Modelin giriş değişkenleri tarafından belirlenen çıkış değişkenindeki değişim oranını ölçmektedir. Ayrıca bir modelin bağımlı değişkenindeki toplam varyansın ne kadarını açıkladığını gösteren bir metriktir. Bir regresyon modeli eğitim verilerine iyi uyum sağlayabilir ancak çok fazla bağımsız giriş değişkene sahipse test verilerine uymayabilir. Modele eklenen ek bağımsız değişkenler dikkate alınmaktadır. Gerçek ve tahmin edilen değerler arasındaki ilişkiyi ifade eden R-Kare değeri 0 ile 1 arasında değişmektedir. R^2 değeri 1'e ne kadar yakınsa model o kadar başarılı demektir [24]. Aşağıda R^2 denklem yer almaktadır.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_i^N (Y_{tahmin(i)} - Y_i)^2}{\sum_i^N (Y_i - Y_{mean})^2} \quad (2)$$

Hataların Karesinin Ortalamasının Karekökü (RMSE): MSE' nin kareköküdür. tahmin edilen değerlerle gerçek değerler arasındaki farkların büyüklüğünü ölçmek için kullanılan bir hata metriğidir [25].Aşağıda RMSE denklemi yer almaktadır.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_i^N (Y_i - Y_{tahmin(i)})^2} \quad (3)$$

Burada N toplam veri sayısını, y_i hesaplanan değerler, $Y_{tahmin(i)}$ ise tahmin edilen değerlerdir.

3. BULGULAR (RESULTS)

Bu bölümde istatistiksel analiz ve makine öğrenme yöntemiyle gerçekleştirilen analizlerin sonuçları yer almaktadır.

Tablo 1'de gösterilen istatistiksel analiz sonucunda, her konu için 40.863 gözlemden oluşan örneklem büyüklüğüne dayanarak TYT (Temel Yeterlilik Testi) ve AYT (Alan Yeterlilik Testi) sınavlarında çeşitli konulardaki öğrenci performansına ilişkin istatistiksel bir genel bakış sunmaktadır. TYT ve AYT 'de farklı konulardaki değişen performans seviyeleri ve dağılım özellikleri incelendiğinde: TYT Türkçe, daha yüksek ortalama puanlar ve daha tipik bir dağılım gösterirken, AYT' deki Felsefe ve Coğrafya 2 aşırı çarpıklık ve basıklık sergiliyor, bu da birçok düşük puana ve az sayıda yüksek aykırı değere işaret etmektedir.

Tablo 1. Veri Seti İstatistik Özellikleri (Data Set Statistical Properties)

Sınavlar	Maksimum	Minimum	Ortalama	Standart Sapma	Çarpıklık	Basıklık	Veri seti
Fen Bilimleri TYT	20.0	-4.0	7.69	5.84	0.22	-1.12	40863
Matematik TYT	40.0	-4.0	15.72	10.26	0.35	-0.86	40863
Türkçe TYT	40.0	-6.75	25.35	7.92	-0.87	0.71	40863
Sosyal Bilimler TYT	20.0	-3.75	10.57	4.5	-0.45	-0.32	40863
Türk Dili AYT	24.0	-4.75	3.47	6.05	1.58	1.16	40863
Felsefe AYT	12.0	-3.0	0.32	1.3	4.72	23.7	40863
Coğrafya 1 AYT	6.0	-1.5	0.94	1.75	1.66	1.41	40863
Din Kültürü ve Ahlak Bilgisi AYT	6.0	-1.5	0.36	1.05	3.49	12.35	40863
Matematik AYT	40.0	-5.75	15.66	11.15	0.42	-0.94	40863
Fizik AYT	14.0	-3.5	4.38	4.28	0.54	-0.93	40863
Kimya AYT	13.0	-3.25	4.98	4.53	0.28	-1.37	40863
Cografya2_AYT	11.0	-2.75	0.45	1.61	4.1	17.27	40863
Biyoloji AYT	13.0	-3.25	3.3	3.61	0.81	-0.42	40863
Tarih1 AYT	10.0	-2.5	1.69	2.86	1.39	0.46	40863
Tarih2_AYT	11.0	-2.75	0.49	1.66	3.75	14.28	40863

Tablo 2 'de çalışmada kullanılan TYT veri seti için dört makine öğrenme (ML) modelinin R-Kare, MAE ve RMSE değerleri verilmiştir. En yüksek R-Kare, 0.99996 MAE 0.05635 ve RMSE 0.447350 değerleri ile MLP modelin iken, R-Kare, 0.99885 MAE 1.78563 ve RMSE 2.679079 değerleri ile RF modeli daha düşük bir başarı göstermiştir. Yüksek R-Kare değeri 1 yakınlığı ile birlikte düşük MAE

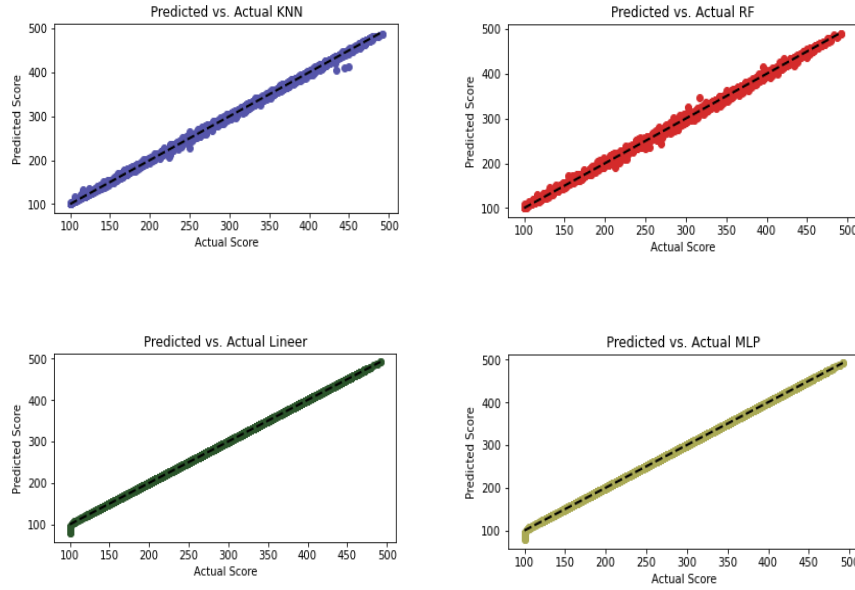
ve RMSE değerleri, modellerin tahminlerinin genel olarak daha doğru ve düşük hata olduğunu gösterir. Bununla birlikte R-Kare, MAE ve RMSE açısından en iyi performansa sahip TYT için MLP modelidir. Bu model, veri setindeki derslere ait net sayıları olan bağımlı değişkenleri en iyi şekilde açıklayabilen ve tahmin edebilen model olarak öne çıkmaktadır.

Table 2. Öğrencilerin YKS (TYT) Deneme Sınavı Netlerinin LinReg,MLP,RF ve KNN Algoritmalarıyla Tahmini (Prediction of Students' YKS (TYT) Test scores with LinReg, MLP, RF and KNN Algorithms)

Model	R-Kare	MAE	RMSE
LinReg	0.99996	0.06090	0.444093
MLP	0.99996	0.05635	0.447350
KNN	0.99923	1.51495	2.193468
RF	0.99885	1.78563	2.679079

Şekil 2’de TYT için R-kare değerlerinin grafiksel gösterimi yer almaktadır. Çalışmada R-kare değerlerinin grafiği incelendiğinde: LinReg ve MLP modelleri, en iyi performansı sergileyen modeller olarak öne çıkmaktadır. Tahmin edilen puanlar, gerçek puanlarla neredeyse mükemmel bir uyum içindedir. KNN ve RF modelleri de iyi performans

sergilemektedir ancak bazı sapmalar mevcuttur. Bu modellerin performansı, doğruluk gerektiren uygulamalarda biraz daha düşük olabilir. Genel olarak, tüm modeller belirli bir doğruluk seviyesinde iyi performans göstermiş, ancak regresyon ve MLP modelleri en yüksek doğruluğu sunmaktadır.



Şekil 2. Öğrencilerin YKS (TYT) Deneme Sınavı Netlerinin LinReg,MLP,RF ve KNN Algoritmalarıyla R^2 Tahmin Grafiği (R^2 Prediction Graph of Students' YKS (TYT) Test scores with LinReg, MLP, RF and KNN Algorithms)

AYT netlerinden puan tahmini incelendiğinde Tablo 3’de gösterildiği üzere veri setindeki bağımlı değişkeni tahmin etmek için en iyi modelin Regresyon olduğu söylenebilir. MLP modeli de oldukça başarılı sonuçlar vermektedir. Ancak, KNN

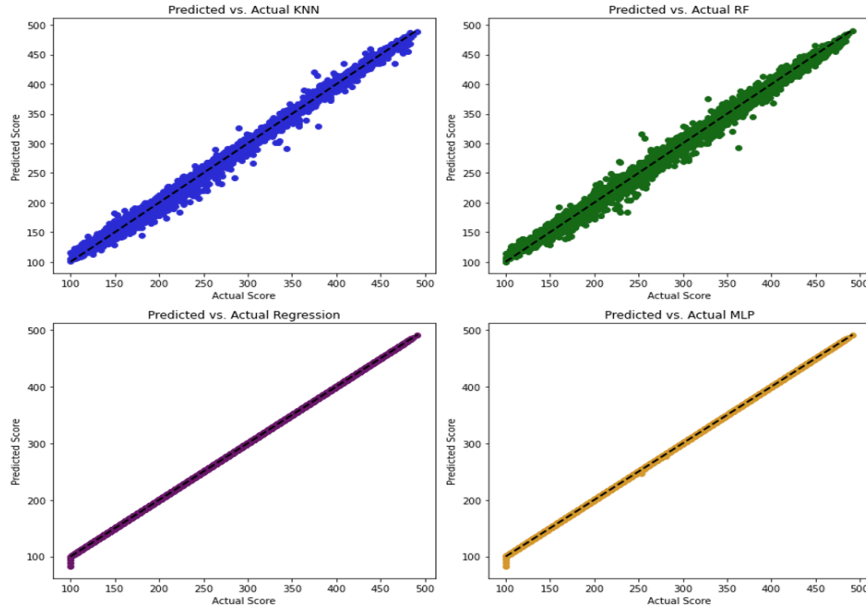
ve RF modelleri, diğer iki modele kıyasla çok daha yüksek hata oranlarına sahip olup, veri seti üzerinde daha az başarılı tahminler yapmaktadırlar. LinReg modeli 0.99998, 0.041368, 0.214139 sırasıyla R-Kare, MAE ve RMSE değerlerine sahiptir.

Table 3. Öğrencilerin YKS (AYT) Deneme Sınavı Netlerinin LinReg,MLP,RF ve KNN Algoritmalarıyla Tahmini (Prediction of Students' YKS (AYT) Test scores with LinReg, MLP, RF and KNN Algorithms)

Model	R-Kare	MAE	RMSE
LinReg	0.99998	0.041368	0.214139
MLP	0.99998	0.055249	0.235580
KNN	0.99052	4.203871	6.031329
RF	0.98619	4.469268	6.780396

Regresyon Modeli, R-Kare, MAE ve RMSE açısından en iyi performansa sahip modeldir. Bu model, veri setindeki bağımlı değişkeni en iyi şekilde açıklayabilen ve tahmin edebilen model olarak öne çıkmaktadır. MLP Modeli, performansı regresyon modeline çok yakındır. KNN ve RF Modelleri performansları Regresyon ve MLP'ye göre daha düşüktür. Özellikle MAE ve RMSE değerleri, bu modellerin tahminlerinde daha fazla

hata yaptığını göstermektedir. Bu sonuçlara göre, veri setindeki bağımlı değişkeni tahmin etmek için en iyi modelin Regresyon olduğu söylenebilir. Diğer modeller (özellikle KNN ve RF) daha yüksek hata oranlarına sahip olup, veri seti üzerinde daha az başarılı tahminler yapmaktadırlar. Şekil 3'de AYT R-kare tahmin edilen ve gerçek değerler grafiği yer almaktadır.



Şekil 3. Öğrencilerin YKS (AYT) Deneme Sınavı Netlerinin LinReg,MLP,RF ve KNN Algoritmalarıyla R^2 Tahmin Grafiği (R^2 Prediction Graph of Students' YKS (AYT) Test scores with LinReg, MLP, RF and KNN Algorithms)

4. SONUÇ (CONCLUSION)

Türkiye'de yükseköğretime geçiş sınavı olan Yükseköğretim Kurumları Sınavı (YKS), öğrencilerin üniversite yerleştirmelerinde belirleyici bir rol oynamaktadır. Öğrencilerin tercih yaparken dikkat ettikleri puan türleri ve sıralamaları, eğitim ve kariyer hedeflerine ulaşmalarında büyük bir önem taşımaktadır. Bu çalışmada, YKS puanlarını dört farklı algoritma ile analiz ederek öğrenciler için öneri geliştiren bir yapay zekâ modelinin tasarımı ve uygulaması gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, her bir algoritmanın YKS tercih sürecine olan katkısını göstermiş ve öğrencilerin üniversite seçimlerinde daha bilinçli kararlar alabilmeleri için bu tür bir modelin faydalı olabileceğini ortaya koymuştur. Bu çalışma kapsamında, ticari bir dijital öğrenme platformuna entegre edilen yapay zekâ tabanlı sınav puan tahmin modeli geliştirilmiştir. Çalışmada,

YKS' ye giren öğrencilerin sınav puanlarından (doğru/yanlış) net puanları elde edilerek TYT ve AYT puan tahminleri yapılmıştır. Standart sapmadan dolayı her yıl öğrencilerin puan tahmini değişmektedir. Geleneksel formüller belirli varsayımlar ve sabit katsayılar kullanmaktadır. Ancak, bu yöntemler her öğrencinin performansını ve sınavın dinamiklerini tam olarak yansıtmayabilir. YZ algoritmaları, daha yüksek doğruluk ve hassasiyet sunarak öğrenci puanlarını daha isabetli bir şekilde tahmin edebilir. YZ, geniş veri setlerini işleyebilme yeteneğine sahiptir. Formüllerle yapılan tahminler eksik ya da fazla puan tahminleri yapmaktadır. Çalışmada LinReg ve MLP algoritmaları gerçek değere en yakın R-Kare değeri ve MAE, RMSE gibi hata metrikleri ile en düşük hata oranlarına sahiptir. Geliştirilen modelin üretken yapay zeka aracıyla entegre olan öğrenme platformuna entegre edilmesi, öğrencilerin puan

tahminlerine destek sağlayarak YZ tabanlı yenilikçi bir yaklaşım sunmaktadır.

5. TARTIŞMA (DISCUSSION)

YZ teknikleriyle öğrencilerin geçmiş performans verilerini, deneme sınav sonuçlarını ve diğer ilgili verileri kullanarak daha kapsamlı analizler yapılabilmektedir. YZ, verilerdeki gizli kalıpları ve eğilimleri ortaya çıkarmaktadır. Bu, öğrenci performansının daha derinlemesine anlaşılmasını sağlamaktadır. Bu çalışmadan farklı olarak, daha farklı yöntemler ve algoritmalarla performans değerlendirmeleri yapılabilir. Yapılan bu çalışmanın devamında öğrencilerin ilerlemesine göre dinamik olarak uyarlanan öğrenme planları ve öneriler sunulabilir. Bu, öğrencilerin ve öğretmenlerin daha hızlı ve verimli kararlar almasını sağlayabilir. Deneme sınavı sonuçları kısa sürede analiz edilerek öğrencilere hızlı geri bildirim sağlanabilmektedir.

Bu model, sadece YKS gibi benzer sınav ve tercih süreçlerinde de rehberlik edici bir araç olarak kullanılabilir potansiyele sahiptir. Modelin geliştirilmesi ve optimize edilmesi, öğrenci yönlendirme sistemlerinde yenilikçi bir yaklaşım sunmakta ve eğitim teknolojilerinde ileri bir adımı temsil etmektedir. Geliştirilen modelin daha geniş kitlelere ulaşması ve farklı sınav türlerine uyarlanarak uygulanması, eğitim ve kariyer danışmanlığı alanında daha iyi bir gelecek için umut vaat etmektedir.

TEŞEKKÜRLER (ACKNOWLEDGMENTS)

Bu çalışma 102275 STB koduyla BK Mobil İletişim Hizmetleri ve Bilişim A.Ş. tarafından Ar-Ge projesi olarak desteklenmiştir. (This study has been supported as an R&D project by BK Mobil İletişim Hizmetleri ve Bilişim A.Ş. with the code 102275 STB.)

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 tarafından eşit şekilde sonuçlar analiz etmiş ve makalenin yazım işlemi gerçekleştirilmiştir. (The results were analyzed equally by the author and the article was written.)

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

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

6. KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] H. Atılgan, "Türkiye'de kademeler arası geçiş: Dünü-bugünü ve bir model önerisi," *Ege Eğitim Dergisi*, vol. 19, no. 1, pp. 1-18, 2018.
- [2] Ş. S. Gacanoğlu and C. Nakiboğlu, "Yükseköğretim Kurumları Sınavında Yer Alan Kimya Sorularının 2018 Yılı Kimya Dersi Öğretim Programı Kazanımlarına Göre Analizi," *Türkiye Kimya Derneği Dergisi Kısım C: Kimya Eğitimi*, vol. 7, no. 2, pp. 217-242, 2022.
- [3] Y. Uzunpolat and A. Çakmak, "Yükseköğretim Kurumları Sınavında Çıkan DKAB Sorularının Ortaöğretim DKAB Öğretim Programı Çerçevesinde Analizi," *Sirnak University Journal of Divinity Faculty/Sirnak Üniversitesi İlahiyat Fakültesi Dergisi*, no. 32, 2023.
- [4] N. Çokişler, "Turist Rehberliği Programlarına Yerleşen Adayların Üniversite Sınavı Başarı İstatistikleri Üzerine Betimsel Bir Analiz (2021)," *Yükseköğretim ve Bilim Dergisi*, vol. 12, no. 3, pp. 621-632, 2022.
- [5] B. Ersöz, H. İ. Bülbül, and Ş. Sağıroğlu, "Using LXP for Green Deal: A New Approach," in *2023 12th International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA)*, 2023: IEEE, pp. 524-529.
- [6] H. Bülbül and B. Ersöz, "Eğitimde yapay zekâ sanal gerçeklik ve sanal evren (Metaverse)," *Yapay zekâ ve büyük veri kitap serisi (4. Baskı, s. 149-183) içinde. Nobel Akademik Yayıncılık*, 2022.
- [7] F. Tahiru, "AI in education: A systematic literature review," *Journal of Cases on Information Technology (JCIT)*, vol. 23, no. 1, pp. 1-20, 2021.
- [8] A. Öter, B. Ersöz, H. İ. Bülbül, and Ş. Sağıroğlu, "Using Generative Artificial Intelligence in Exams: A Research on KPSS with ChatGPT," *International Journal of Educational Research Review*, vol. 9, no. 4, pp. 269-274.
- [9] H. Kirthika, S. Mayasre, and M. Balamurugan, "Score Predicting Web Application Using

- Machine Learning Techniques," in *2022 1st International Conference on Computational Science and Technology (ICCST)*, 2022: IEEE, pp. 157-161.
- [10] Z. Wang and Y. Shi, "Prediction of the admission lines of college entrance examination based on machine learning," in *2016 2nd IEEE International Conference on Computer and Communications (ICCC)*, 2016: IEEE, pp. 332-335.
- [11] D. Wang, D. Lian, Y. Xing, S. Dong, X. Sun, and J. Yu, "Analysis and prediction of influencing factors of college student achievement based on machine learning," *Frontiers in Psychology*, vol. 13, p. 881859, 2022.
- [12] E. Çakıt and M. Dağdeviren, "Predicting the percentage of student placement: A comparative study of machine learning algorithms," *Education and Information Technologies*, vol. 27, no. 1, pp. 997-1022, 2022.
- [13] B. Ujkani, D. Minkovska, and L. Stoyanova, "A machine learning approach for predicting student enrollment in the university," in *2021 XXX International Scientific Conference Electronics (ET)*, 2021: IEEE, pp. 1-4.
- [14] S. Tankuş, "Üniversite sınavına giren öğrencilerin sınav sonuçlarının yapay zeka ile analizi ve değerlendirmesi: 2018 yılı Şanlıurfa ili örneği/Analysis and evaluation of the exam results of the students attending the university examination with artificial intelligence: 2018 Şanlıurfa province," 2020.
- [15] E. Erdem and F. Bozkurt, "A comparison of various supervised machine learning techniques for prostate cancer prediction," *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, no. 21, pp. 610-620, 2021.
- [16] İ. Koyuncu and S. Gelbal, "Comparison of data mining classification algorithms on educational data under different conditions," *Journal of Measurement and Evaluation in Education and Psychology*, vol. 11, no. 4, pp. 325-345, 2020.
- [17] H. Jin, Y.-G. Kim, Z. Jin, A. A. Rushchitc, and A. S. Al-Shati, "Optimization and analysis of bioenergy production using machine learning modeling: Multi-layer perceptron, Gaussian processes regression, K-nearest neighbors, and Artificial neural network models," *Energy Reports*, vol. 8, pp. 13979-13996, 2022.
- [18] M. A. Jassim, "Analysis of the performance of the main algorithms for educational data mining: a review," in *IOP conference series: materials science and engineering*, 2021, vol. 1090, no. 1: IOP Publishing, p. 012084.
- [19] M. A. Baig, S. A. Shaikh, K. K. Khatri, M. A. Shaikh, M. Z. Khan, and M. A. Rauf, "Prediction of Students Performance Level Using Integrated Approach of ML Algorithms," *Int. J. Emerg. Technol. Learn.*, vol. 18, no. 1, pp. 216-234, 2023.
- [20] S. A. Alwarthan, N. Aslam, and I. U. Khan, "Predicting student academic performance at higher education using data mining: a systematic review," *Applied Computational Intelligence and Soft Computing*, vol. 2022, 2022.
- [21] Ö. Ali, "Automatic Detection of Epileptic Seizures from EEG Signals Using Artificial Intelligence Methods," *Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology*, pp. 1-1, 2024.
- [22] M. A. A. Walid, S. M. Ahmed, M. Zeyad, S. S. Galib, and M. Nesa, "Analysis of machine learning strategies for prediction of passing undergraduate admission test," *International Journal of Information Management Data Insights*, vol. 2, no. 2, p. 100111, 2022.
- [23] D. Chicco, M. J. Warrens, and G. Jurman, "The coefficient of determination R-squared is more informative than SMAPE, MAE, MAPE, MSE and RMSE in regression analysis evaluation," *Peerj computer science*, vol. 7, p. e623, 2021.
- [24] U. Verma, C. Garg, M. Bhushan, P. Samant, A. Kumar, and A. Negi, "Prediction of students' academic performance using Machine Learning Techniques," in *2022 International Mobile and Embedded Technology Conference (MECON)*, 2022: IEEE, pp. 151-156.
- [25] T. O. Hodson, "Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE): When to use them or not," *Geoscientific Model Development Discussions*, vol. 2022, pp. 1-10, 2022.

Investigation of the Effect of Mechanical Alloying Time on Microstructure and Mechanical Properties in Hybrid Composites Produced with Fe₃O₄/nanographene Reinforcements in Al7020 Alloy

Taha Alper YILMAZ^{1*} 

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

Article Info

Research article
Received: 06/09/2024
Revision: 30/09/2024
Accepted: 01/10/2024

Keywords

Mechanical Alloying
Hybrid Composite
Tensile Testing
Microstructure
Characterization

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 06/09/2024
Düzeltilme: 30/09/2024
Kabul: 01/10/2024

Anahtar Kelimeler

Mekanik Alaşımlama
Hibrit Kompozit
Çekme Testi
Mikroyapı
Karacterizasyonu

Graphical/Tabular Abstract (Grafik Özet)

In this study, Fe₃O₄ and nanographene were added as reinforcements at 10% and 0.25%, respectively, to the Al7020 alloy, and the effect of mechanical alloying (MA) time (1, 2, 4, and 8 hours) was investigated. / Bu çalışmada Al7020 alaşımına Fe₃O₄ ve nanografen sırasıyla %10 ve 0.25 oranlarında takviye edilerek, mekanik alaşımlama (MA) süresinin (1, 2, 4 ve 8 saat) etkisi araştırılmıştır.

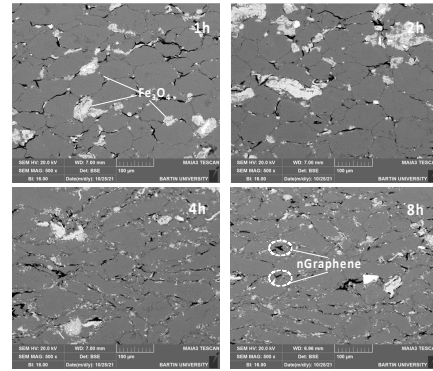
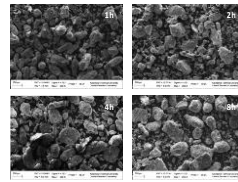
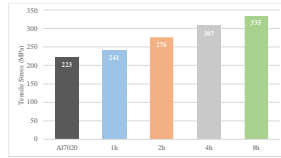


Figure A: Composites produced by reinforced Al7020 with Fe₃O₄ and nanographene /Şekil A: Al7020 Fe₃O₄ ve nanografen takviyesi ile üretilen kompozitler

Highlights (Önemli noktalar)

- The composites were produced by incorporating Fe₃O₄ and nanographene as reinforcement materials into the Al7020 matrix. / Al7020 matris içerisine Fe₃O₄ ve nanografen takviye malzemesi olarak kompozitler üretilmiştir.
- The microstructure and mechanical properties of the composites were examined at different MA durations. / Kompozitlerin farklı MA süreleri ile mikroyapı ve mekanik özellikleri incelenmiştir.
- The highest strength was determined in the metal matrix composite sample processed for 8 hours of MA. / En yüksek dayanımın 8 saat MA işlemi yapılan metal matrisli kompozit numunede olduğu belirlenmiştir.

Aim (Amaç): The study aims to achieve a homogeneous distribution of reinforcements (Fe₃O₄ and nanographene) within the matrix through MA processing at different durations and to enhance the mechanical properties of the Al7020 matrix alloy. / Çalışma, farklı sürelerde MA işlemine tabi tutulan takviyelerin (Fe₃O₄ ve nanografen) matris içerisindeki dağılımı homojen olarak gerçekleştirmek ve Al7020 matris alaşımının mekanik özelliklerini geliştirmeyi amaçlamaktadır.

Originality (Özgünlük): The originality of the study is the production of hybrid metal matrix composites using different reinforcements and the improvement of their mechanical properties. / Çalışmanın özgünlüğünü, farklı takviyeler kullanılarak, hibrit metal matrisli kompozitlerin üretiminin gerçekleştirilmesi ve mekanik özelliklerinin geliştirmesi oluşturmaktadır.

Results (Bulgular): In the produced hybrid composites, the highest hardness (126 HV) and tensile strength (335 MPa) were observed in the sample subjected to 8 hours of MA processing. / Üretilen hibrit kompozitlerde en yüksek sertlik (126 HV) ve çekme dayanımı (335 MPa) 8 saat MA işlemi yapılan numunede olduğu tespit edilmiştir.

Conclusion (Sonuç): To enhance the mechanical and microstructural properties of the Al7020 alloy, it was found that the Fe₃O₄ and nanographene reinforcements improved the mechanical properties at various MA durations. / Al7020 alaşımının mekanik ve mikroyapı özelliklerinin geliştirilmesi için takviye edilen Fe₃O₄ ve nanografen takviyelerin, farklı MA süreleri içerisinde mekanik özellikleri geliştirdiği tespit edilmiştir.



Investigation of the Effect of Mechanical Alloying Time on Microstructure and Mechanical Properties in Hybrid Composites Produced with Fe₃O₄/nanographene Reinforcements in Al7020 Alloy

Taha Alper YILMAZ^{1*}

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

Article Info

Research article
Received: 06/09/2024
Revision: 30/09/2024
Accepted: 01/10/2024

Keywords

Mechanical Alloying
Hybrid Composite
Tensile Testing
Microstructure
Characterization

Abstract

The objective of this work is to enhance the microstructural and mechanical characteristics of Aluminium (Al) 7020 alloys, which are receiving growing application in the aerospace sector. The mechanical properties of Al 7XXX series alloys are at high levels compared to other Al alloys. However, the need for Metal Matrix Composites (MMC) is increasing day by day to increase the mechanical properties to the desired levels. Powder metallurgy (PM) is one of the advanced production techniques for MMCs. It is known that microstructural and mechanical properties are improved by mechanically alloying (MA) and homogeneous mixing of powders in the structure. Therefore, the effects of different mechanical alloying times (1, 2, 4 and 8 hours) on the mechanical and microstructure properties of the composites produced by reinforcing 10% Fe₃O₄ and 0.25% nanographene into Al7020 alloy were investigated. Density, XRD and SEM analyses were performed on all composite samples for characterization purposes. After that, the mechanical characteristics of the hybrid composite samples were determined by accurate hardness and tensile testing methods. The sample who received mechanical alloying for 8 hours achieved the highest tensile strength of 335 MPa.

Al7020 Alaşımı İçerisine Fe₃O₄/nanografen Takviyeleri ile Üretilen Hibrit Kompozitlerde Mekanik Alaşımlama Süresinin Mikroyapı ve Mekanik Özelliklere Etkisinin İncelenmesi

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 06/09/2024
Düzeltilme: 30/09/2024
Kabul: 01/10/2024

Anahtar Kelimeler

Mekanik Alaşımlama
Hibrit Kompozit
Çekme Testi
Mikroyapı
Karakterizasyonu

Öz

Bu çalışmada özellikle havacılık ve uzay endüstrisinde kullanımı artarak devam eden Alüminyum (Al) 7020 alaşımlarının mikroyapısal ve mekanik özellikleri özelliklerinin geliştirilmesi amaçlanmıştır. Al 7XXX serisi alaşımların mekanik özellikleri, diğer Al alaşımlarına kıyasla yüksek seviyelerdedir. Ancak mekanik özelliklerin istenilen seviyelere çıkarılabilmesi için Metal Matrisli Kompozitlere (MMK) olan ihtiyaç gün geçtikçe artmaktadır. MMK'ler için toz metalurjisi (TM) yöntemi ileri düzey üretim teknikleri arasındadır. Tozların mekanik olarak alaşımlandırılması (MA) ve homojen olarak yapı içerisinde karıştırılabilmesi ile mikroyapısal ve mekanik özelliklerin arttığı bilinmektedir. Bu nedenle Al7020 alaşımı içerisine %10 Fe₃O₄ ve %0.25 nanografen takviye edilerek üretilen kompozitlerin farklı mekanik alaşımlama sürelerinin (1, 2, 4 ve 8 saat), mekanik ve mikroyapı özelliklerine olan etkileri araştırılmıştır. Üretilen tüm kompozit numunelere karakterizasyon amaçlı yoğunluk, XRD ve SEM analizleri yapılmıştır. Ardından mekanik özelliklerin belirlenmesi için sertlik ve çekme testleri hibrit kompozit numunelere uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlar neticesinde en yüksek çekme dayanımına 335 MPa'lık değer ile 8 saat mekanik alaşımlama işlemi görmüş numunede elde edilmiştir.

1. INTRODUCTION (GİRİŞ)

Aluminum alloys have widely found application in the engineering sphere owing to a range of superior properties: lightness, high strength, corrosion resistance, and machinability. The main advantage

it offers is in sectors such as aviation, automobiles, and defense; it is critical because it has both low density and very high strength [1]. Al-Zn-Mg or 7XXX aluminum alloys are strengthened primarily by Zn and Mg elements to form high-strength structures. Alloys belonging to the 7XXX class find

extensive application in several industrial sectors, notably on aircraft, due to their exceptional strength-to-weight characteristics. One of the most outstanding members among these series, the Al7020 alloy, is notable for its fine mechanical characteristics, especially high strength, hardness [3]. The high strength properties made this Al7020 light alloy applicable to the aircraft industry. The material has also been increasingly used in automobile and other industrial applications [4]. Development of metal matrix hybrid composites (MMHC) in years has opened new opportunities for improvement in the endurance and microstructural characteristics of these alloys. These composites are developed by incorporating various ceramic, metal oxides, and carbon-based nanomaterials in the aluminum matrix. Such hybrid composites result in major improvements in properties like strength, hardness, wear resistance, and thermal stability [5]. The application of MMHCs with aluminum alloys provides great advantages in high-performance areas such as aerospace, automotive, electronics, and biomedical [6]. The aluminum matrix hybrid composites increase their load-carrying capacity to meet the critical engineering requirements, i.e., weight reduction and energy efficiency [7]. In the production of such materials, the mechanical alloying (MA) method, which is an important production technique especially for powder metallurgy, is important.

The MA is the process of combining one or more basically solid materials in a high-energy grinding medium to produce new, stronger materials. It is widely used in composites, usually metals, ceramics and a combination of both [8]. The MA process, which is a critical production process in powder metallurgy methods, enables the alloying process to be realized together with the plastic deformation applied to the powders repeatedly by high-energy balls. Thus, it is possible to control the internal structure of the material with determined parameters [9].

Elevated efficiency of Fe₃O₄ in improving the microstructural integrity and mechanical performance of aluminum matrix composites has been demonstrated. [10]. Fe₃O₄ is characterized by high hardness and possesses magnetic properties; the properties of this compound make a composite material much harder and more resistant to tensile strength [11]. By increasing the microhardness, the addition of Fe₃O₄ into Al7020 alloy enhances the

mechanical strength of the alloy and guarantees the long-term durability of the composite construction. [12]. The reinforcement by Fe₃O₄ increases the thermal stability of the alloy. There is an improvement in the performance of alloys with increasing temperatures [13].

In carbon-based nanomaterials, including nanographene, the material is highly strong, flexible, and electrically conductive [14]. The use of nanographene as reinforcement in aluminum alloys improves the microstructural integrity and mechanical properties by preventing dislocation motion and consolidating the grain boundaries, respectively [15]. Indeed, nanographene has the ability to enhance the tensile strength and hardness of composite materials, as well as promote the thermal and electrical conductivity characteristics of the alloy. [16]. For instance, the development of hybrid composites reinforced with nanographene and Fe₃O₄ in Al 7020 alloy provides innovative solutions, especially for areas that require high performance such as aerospace [17].

The present work aimed to examine the effects of varying times of Fe₃O₄ and nanographene reinforcement on the mechanical alloying time of Al7020 alloy. Although Al7020 alloy can show high strength properties, the production of hybrid composites is needed to develop the required mechanical characteristics. For this reason, it was aimed to determine the optimum parameters in composite materials after the characterization and mechanical testing processes performed on all produced samples.

2. MATERIALS AND METHODS (MATERIAL VE METOD)

The effect of mechanical alloying times of 1, 2, 4 and 8 hours on hybrid composites with 10% Fe₃O₄ and 0.25% nanographene reinforcement to Al7020 alloy was investigated. The Al7020 alloy used has a comprising the chemical components listed in Table 1.

For the hybrid composite samples, the blended powders were subjected to mechanical alloying with 10 wt% Fe₃O₄ and 0.25 wt% nanographene reinforcement in a 3D high energy milling machine for 1, 2, 4 and 8 hours. The MA process was determined as 200 Rpm in X direction and 500 Rpm in Y direction after preliminary studies. Figure 1 shows SEM images of the initial powder images. It

is seen that the dimensions of Al7020 gas atomized powders are approximately 45µm in size and spherical shape, the size of Fe₃O₄ ceramic particles used as 10% reinforcement is approximately 30µm

in size and in a flat form, and finally the size of the nanographene reinforcement used is 100 nm and in a flaky structure.

Table 1. Chemical composition of Al7020 alloy (Al7020 alaşının kimyasal kompozisyonu)

Elements	Al	Zn	Mg	Ti	Cr	Mn	Fe	Si	Cu
%wt.	Balanced	4,67	1,34	0,3	0,29	0,48	0,09	0,02	0,01

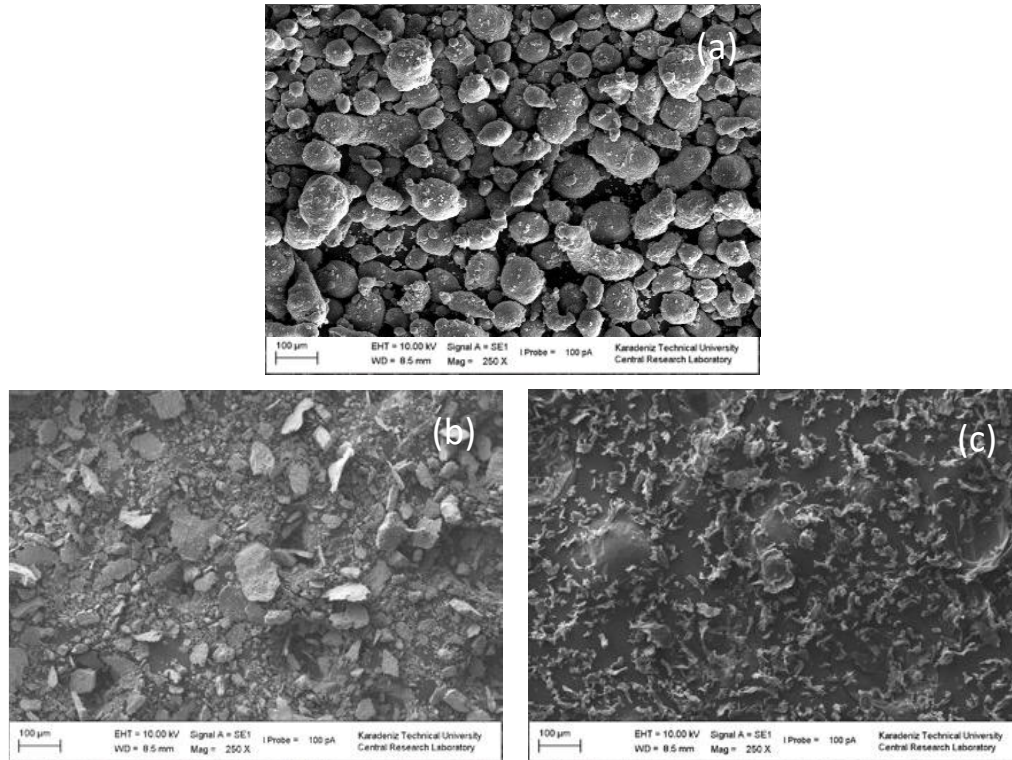


Figure 1. Initial powder images a) Al7020, b) Fe₃O₄, c) nanographene (Başlangıç toz görüntüleri a) Al7020, b) Fe₃O₄, c) nanografen)

The produced hybrid powder composites were pressed with a mold prepared from H13 tool steel at 550 °C temperature for 1 hour in a hot pressing device to prepare them as bulk samples. Then, metallographic processes for microstructural characterization of the composites were carried out in ATM Sapphire 330 device. In the microstructural characterization processes, after sanding at 400, 600, 800 and 1200 grit, the processes were completed with 9, 6 and 3 micron felts prepared with diamond suspension for polishing, respectively. For etching, Keller solution (1mL HF + 200mL H₂O) was used. Density measurements were performed using the Archimed principle (Equation 1) with a Sartorius CP224S device.

$$ps = \frac{(ma)}{(ma)-(mw)} \times (pw) \tag{1}$$

Here ps symbolize the density of the material in grammes per cubic centimeter, pw denotes the volume of water at room temperature, ma represent the mass of the material, and mw denote the weight of the material included in the water.

SEM analysis (ZEISS EVO LS 10) for microstructure images and XRD analysis (Bruker D8 Advance) for crystal structure and phase determination were applied to all composite samples. Determination of mechanical properties microhardness Vickers tests (HV10) were carried out on Emcotest Duravision 200 Universal hardness

tester in accordance with ASTM E92 standards by taking the average values of five measurements horizontally in the center of each sample. Continuous tensile testing was conducted using the Instron 3369 test machine until the specimens fractured.

3. RESULTS AND DISCUSSION (BULGULAR VE TARTIŞMA)

3.1. Effect of Mechanical Alloying Time on Hybrid Composite Powders (Hibrit Kompozit Tozlarına Mekanik Alaşım Süresinin Etkisi)

The powder morphologies of 10% Fe_3O_4 and 0.25% nanographene powders reinforced in Al7020 alloy after 1, 2, 4 and 8 hours MA process are shown in Figure 2.

When the figure is examined, it is seen that the spherical shaped Al7020 matrix alloy gradually takes a flaky form with the MA alloying time.

Especially in the hybrid composite with 1 hour MA treatment, while the spherical form is generally preserved, the transition to the flaky form started with 2 hours of MA treatment. It is seen that the deformation, which continues with MA alloying, passes into full flaky form at the 4th hour. In the 8-hour MA process, it can be said that the deformation has reached saturation, the powders are no longer flattened and the powders broken by cold welding are recombined. In the nature of MA, the effect of mechanical impact forces applied to the powder particles by the balls in the chamber increases the surface area of the particles and provides a homogeneous distribution [18,19]. At 8 hours of MA process, the cold weld formed by the formation of a sufficient amount of plastic deformation between the flattened powder particles enabled them to coalesce at the atomic level. Thus, a strong bond formation can be observed between the hybrid composite powders and the homogeneous internal structure can contribute to microstructurally more equiaxed grain formation [20,21].

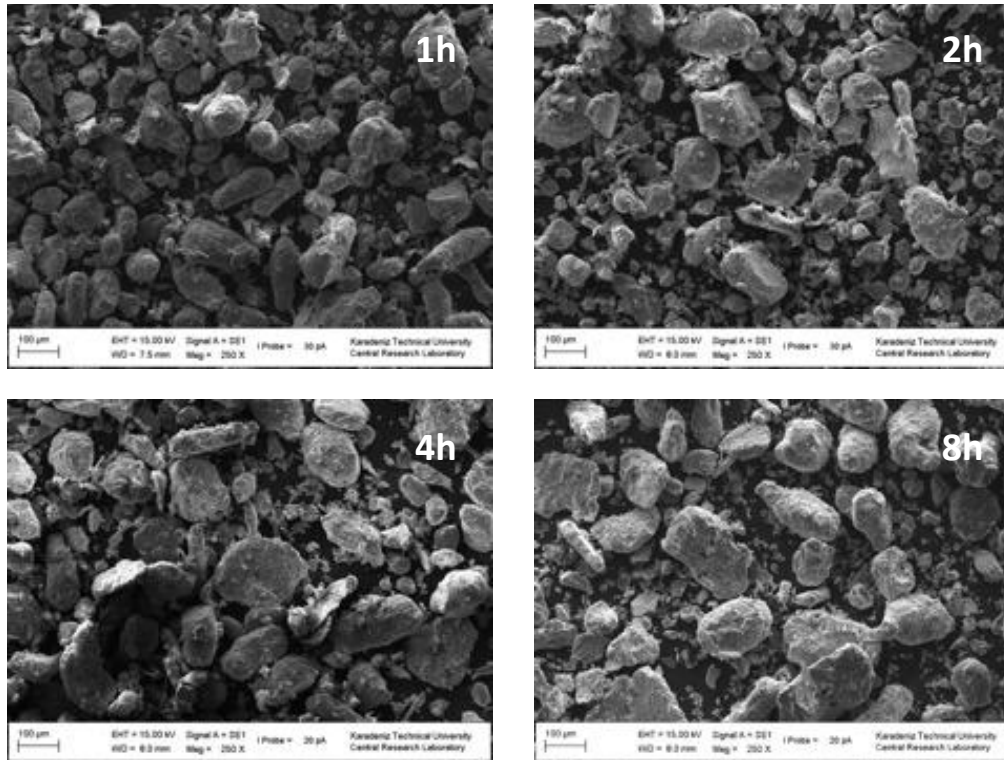


Figure 2. Powder images of hybrid composites with 10% Fe_3O_4 and 0.25% nanographene reinforcement to Al7020 alloy (1, 2, 4 and 8 hours) (%10 Fe_3O_4 ve %0,25 nanografen takviyesi ile Al7020 alaşımına sahip hibrit kompozitlerin toz görüntüleri (1, 2, 4 ve 8 saat))

3.2. Microstructure Analysis (Mikroyapı Analizi)

Figure 3 shows the XRD patterns of hybrid composites with 10% Fe₃O₄ and 0.25% nanographene reinforced in Al7020 alloy. In XRD analysis, the matrix phase Al, the reinforced

ceramic particle Fe₃O₄, the reinforced carbon-based nanographene and finally the intermetallic phase AlMg₄Zn₁₁ in the structure was observed.

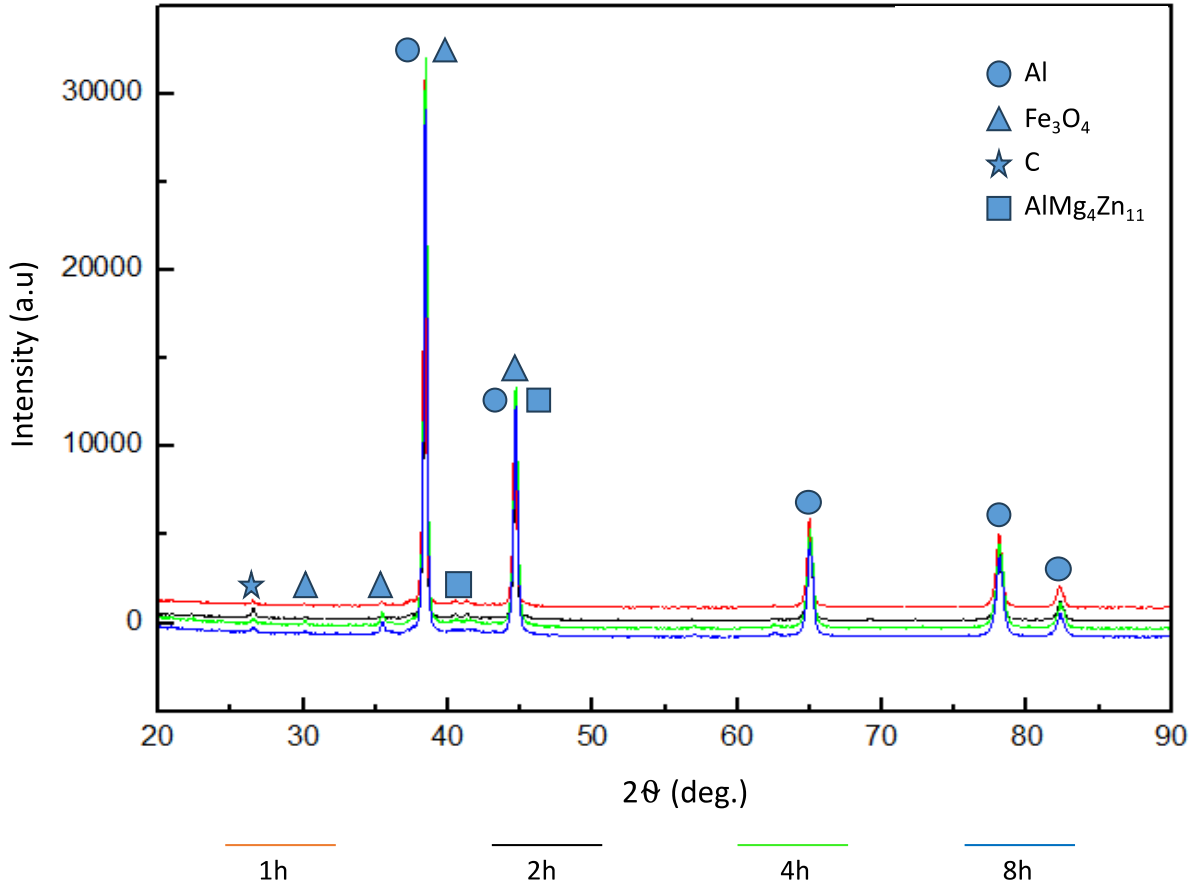


Figure 3. XRD patterns of hybrid composites (Hibrit kompozitlerin XRD paternleri)

When the figure is examined, it is seen that XRD peaks generally appear at the same intensity and degree. Slight shifts in the peaks were observed with the increase in the MA time. These phenomena arise as a result of plastic deformation. As the deformation time increases, the internal stresses occurring in the crystal lattice structure change the distances between the planes, causing the peaks to shift [22,23]. Figure 4 displays the scanning electron microscope (SEM) pictures of hybrid composites following 1, 2, 4, and 8 hours of MA alloying.

SEM images of hybrid composites with 10% Fe₃O₄ and 0.25% nanographene reinforcement to Al7020 alloy with 1, 2, 4 and 8 hours MA treatment are

shown. No major changes in grain size and spherical grain boundaries were observed in the sample with 1 hour MA time. In addition, it was determined that the white Fe₃O₄ ceramic reinforcement was homogeneously distributed in the structure. Upon examination of the sample with an MA time of 2 hours, it was seen that the grains began to elongate at a rather modest rate compared to the initial stage. This can be explained by the fact that the MA process flattens the powder particles during mixing. Similar to the previous image, the light colored regions located at the grain boundaries show Fe₃O₄ ceramic particles and the dark black regions show nanographene reinforcement. With the MA time of 4 hours, it was determined that the deformation effects were further intensified on the powder

particles and the grains were flattened. When the last hybrid composite sample, the sample with 8 hours MA treatment, was examined, it was found

that the grains became much flatter and the grain boundaries and grain boundary angles decreased.

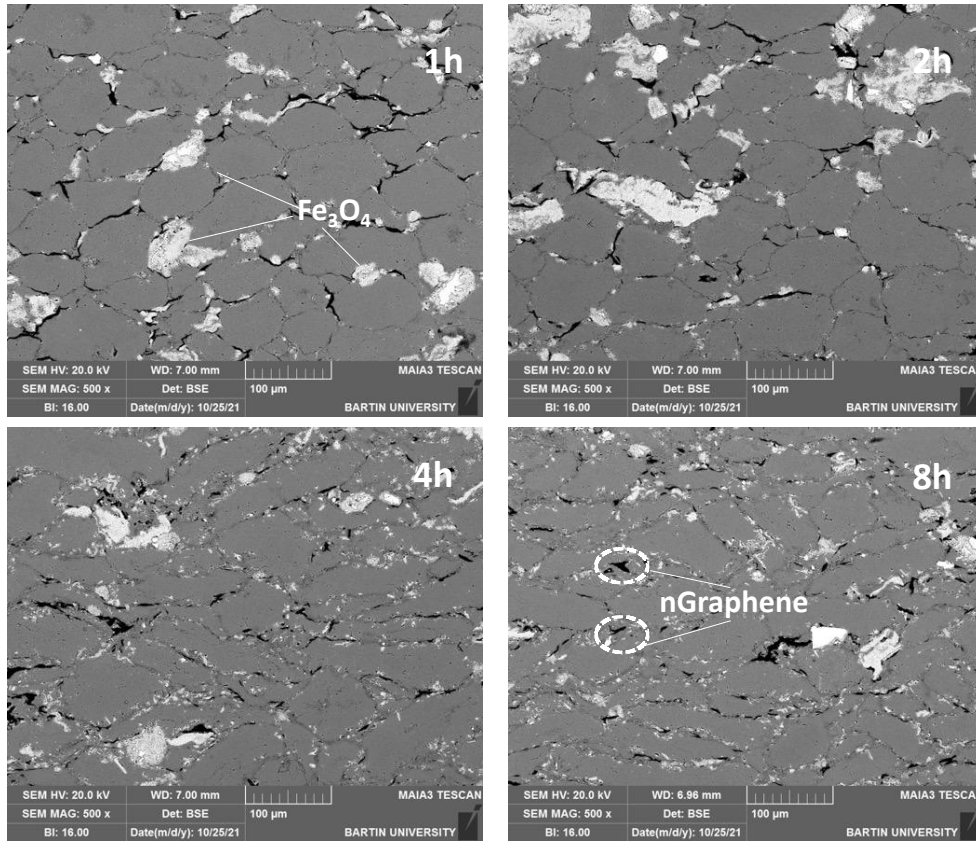


Figure 4. Microstructures of hybrid composites with 10% Fe₃O₄ and 0.25% nanographene reinforced Al7020 alloy (1, 2, 4 and 8 hours) (%10 Fe₃O₄ ve %0,25 nanografen takviyeli Al7020 alaşımlı hibrit kompozitlerin mikro yapıları (1, 2, 4 ve 8 saat)

3.3. Physical and Mechanical Properties

(Fiziksel ve Mekanik Özellikler)

Physical and mechanical properties of samples reinforced with 10% Fe₃O₄ and 0.25% nanographene in Al7020 alloy were determined by hardness and tensile testing after to 1, 2, 4, and 8 hours of MA treatment. The hardness findings of hybrid composites generated by MA treatment with varying durations are shown in Figure 5.

When the figure is examined, it is determined that the average hardness value of the unreinforced Al7020 alloy is 88 HV. With the increase in MA time, it was measured as 95 HV for 1 hour, 101 HV for 2 hours, 115 HV for 4 hours and finally 126 HV

for 8 hours. The highest hardness value was reached by the sample with 8 hours MA treatment. This is a natural result of deformation flattening the grain structure and the Fe₃O₄ and nanographene reinforcements used in the production of hybrid composite samples. On the other hand, Karabulut et al. similarly produced composite samples by cold pressing method by adding 10% Al₂O₃ to pure aluminum by mechanical alloying and stated that the hardness value increased with the increase of mechanical alloying time [24]. These results support the results of increasing hardness with increasing mechanical alloying time.

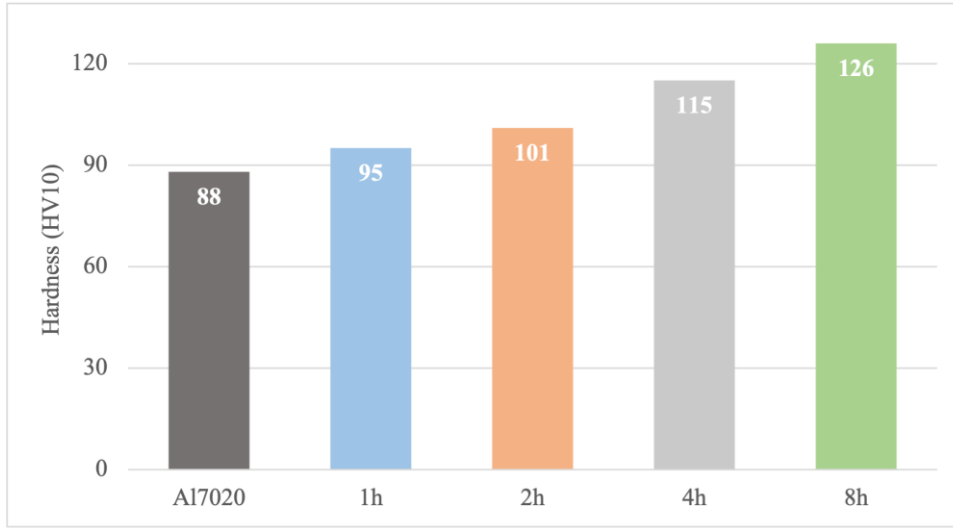


Figure 5. Hardness results of hybrid composites with 10% Fe_3O_4 and 0.25% nanographene reinforcement to Al7020 alloy (1, 2, 4 and 8 hours) (%10 Fe_3O_4 ve %0,25 nanografen takviyesi ile Al7020 alaşımına uygulanan hibrit kompozitlerin sertlik sonuçları (1, 2, 4 ve 8 saat))

Fig. 6 displays the tensile test outcomes of the Al7020 alloy, which was strengthened with 10% Fe_3O_4 and 0.25% nanographene, following 1, 2, 4, and 8 hours of MA heat treatment. Upon analysis of the results, it is evident that the unreinforced Al7020 alloy has the lowest tensile stress, while the sample subjected to 8 hours of MA treatment exhibits the highest tensile stress. The 8 hours MA treated specimen has 9% higher tensile stress than the 4 hours MA alloy, 21% higher than the 2 hours MA treated specimen, 39% higher than the 1 hour MA treated specimen and finally about 50% higher than

the unreinforced Al7020 alloy. Similar to the hardness results, this situation was similar in the tensile test. The growing trend in the test results can be ascribed to the amplified dislocation density resulting from the deformation effect as the MA time increases, together with the homogeneous dispersion of the reinforced ceramic particles in the matrix phase. [25]. Increasing the MA alloying time further will increase the dislocation density too much and will lead to interlocking. For this reason, 8 hours of MA time was deemed sufficient and the next step was not started.

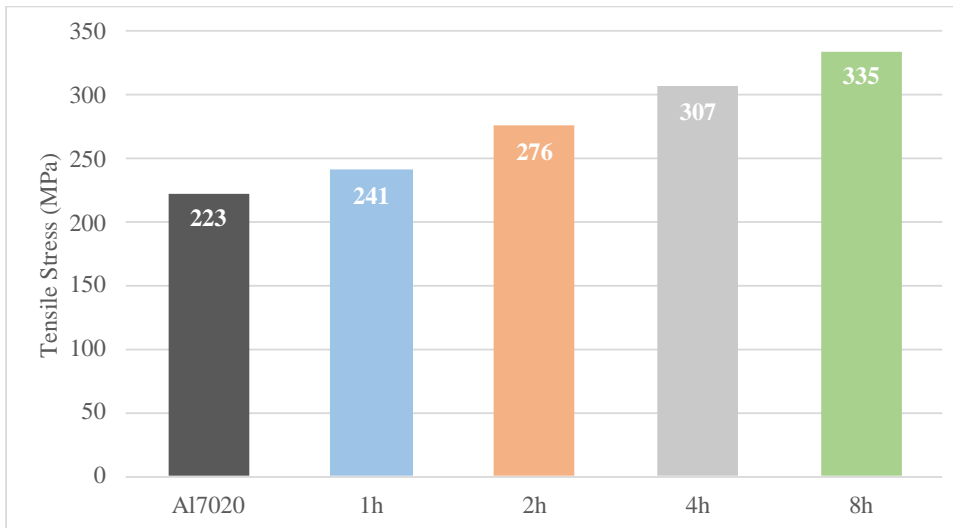


Figure 6. Tensile test results of hybrid composites reinforced with 10% Fe_3O_4 and 0.25% nanographene on Al7020 alloy (1, 2, 4 and 8 hours) (Al7020 alaşımına %10 Fe_3O_4 ve %0.25 nanografen takviyeli hibrit kompozitlerin çekme test sonuçları (1, 2, 4 ve 8 saat))

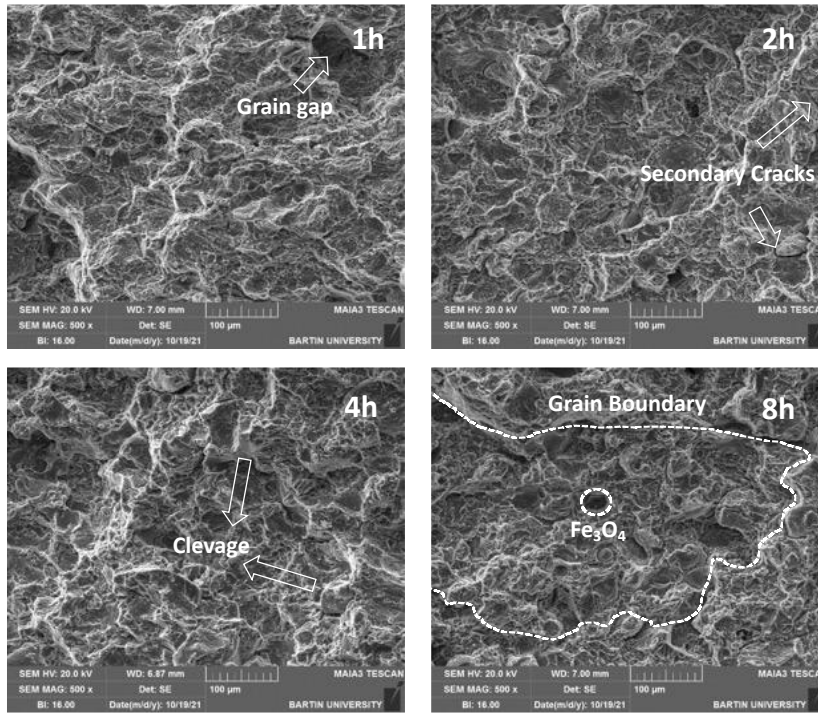


Figure 7. Fracture surfaces of hybrid composites with 10% Fe_3O_4 and 0.25% nanographene reinforced Al7020 alloy after tensile test (1, 2, 4 and 8 hours) (%10 Fe_3O_4 ve %0,25 nanografen takviyeli Al7020 alaşımlı hibrit kompozitlerin çekme deneyinden sonraki kırılma yüzeyleri (1, 2, 4 ve 8 saat))

Figure 7 depicts the fracture surfaces of hybrid composites consisting of 10% Fe_3O_4 and 0.25% nanographene reinforcement after performing tensile testing on Al7020 alloy.

Figure 7 shows the fracture surface images of hybrid reinforced composite materials subjected to MA treatment for 1, 2, 4 and 8 hours. When the fracture surface images were examined, differences in fracture behavior were detected with increasing MA treatment time. In the fracture surface image of the sample subjected to 1 hour MA treatment, ruptures occurred in different layers. Especially the rupture behavior occurred in weak grains. With increasing MA time, secondary cracks were observed in the sample treated for 2 hours. It was determined that the increase in hardness value also reduced the layered rupture behavior. In the 4 and 8 hour MA treated specimens, breaks occurred from cleavage planes due to the increase in the hardness of the materials in the rupture behaviors, and it was determined that the grain boundary rupture behaviors were in large areas in the strength regions of the 8 hour treated specimen.

4. CONCLUSION (SONUÇLAR)

In this study, the effect of MA time on hybrid composite samples was investigated by performing

MA process for 1, 2, 4 and 8 hours with 10% Fe_3O_4 and 0.25% nanographene reinforcement to Al7020 alloy. The results are listed below.

- With the increase of MA time, the hybrid composite powders changed from spherical to flattening due to the effect of deformation. The most prominent formation was observed in samples with 4 and 8 hours of MA.
- When XRD patterns were examined, it was determined that the peaks shifted due to the effect of deformation. In addition to Al, particle reinforcements Fe_3O_4 and carbon forming the matrix phase, AlMg4Zn11 intermetallic phase was detected in the structure.
- In SEM analysis, it was determined that the low MA time did not change the grain size and form, and with increasing time, the grains and grain boundaries formed in the bulk material changed to flat form. In addition, reinforced Fe_3O_4 and nanographene were detected in the surface images.
- When the hardness results of the mechanical properties of the hybrid composites were examined, it was determined that the sample with the highest value was the sample with 8 hours MA with 126 HV.

- When the tensile test results were examined, 335 MPa was obtained in the sample treated with MA for 8 hours.
- When the post-tensile fracture surface images were examined, while ruptures occurred in different layers in the 1 hour MA process, with the increase in the MA time, fractures occurred in the cleavage planes and rupture behavior was observed at the grain boundaries.

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: The author conducted the experiments, analyzed the results and performed the writing process.

Yazar, 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.

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.

REFERENCES (KAYNAKLAR)

[1] Trzepieciński T, Najm SM, Oleksik V, Vasilca D, Paniti I, Szpunar M. Recent Developments and Future Challenges in Incremental Sheet Forming of Aluminium and Aluminium Alloy Sheets. *Metals (Basel)* 2022;12.

[2] Lezaack MB, Simar A. Avoiding abnormal grain growth in thick 7XXX aluminium alloy friction stir welds during T6 post heat treatments. *Materials Science and Engineering: A* 2021;807:140901.

[3] Kumar M, Sotirov N, Chimani CM. Investigations on warm forming of AW-7020-T6 alloy sheet. *J Mater Process Technol* 2014;214:1769–76.

[4] Wu C, Ma K, Zhang D, Wu J, Xiong S, Luo G, et al. Precipitation phenomena in Al-Zn-Mg alloy matrix composites reinforced with B4C particles. *Sci Rep* 2017;7:9589.

[5] Zhou MY, Ren LB, Fan LL, Zhang YWX, Lu TH, Quan GF, et al. Progress in research on hybrid metal matrix composites. *J Alloys Compd* 2020;838:155274.

[6] Bodunrin MO, Alaneme KK, Chown LH. Aluminium matrix hybrid composites: a review of reinforcement philosophies; mechanical, corrosion and tribological characteristics. *Journal of Materials Research and Technology* 2015;4:434–45.

[7] Prasad DS, Shoba C, Ramanaiah N. Investigations on mechanical properties of aluminum hybrid composites. *Journal of Materials Research and Technology* 2014;3:79–85.

[8] Suryanarayana, C. Mechanical Alloying and Milling. *Progress in Materials Science* 2001;46:1–184.

[9] Lloyd, D.J. Particle Reinforced Aluminium and Magnesium Matrix Composites. *International Materials Reviews*. 1994;39:1–23.

[10] Ashrafi N, Ariff AHM, Sarraf M, Sulaiman S, Hong TS. Microstructural, thermal, electrical, and magnetic properties of optimized Fe₃O₄-SiC hybrid nano filler reinforced aluminium matrix composite. *Mater Chem Phys* 2021;258:123895.

[11] Ferreira L-M-P, Bayraktar E, Robert M-H. Magnetic and electrical properties of aluminium matrix composite reinforced with magnetic nano iron oxide (Fe₃O₄). *Advances in Materials and Processing Technologies* 2016;2:165–73.

[12] Karami S, Borhani E, Yousefieh M, Karami S. The effect of ratcheting strain on post-ratcheting tensile test of metal matrix composites (MMCs) reinforced by Fe₃O₄ nanoparticles manufactured by the accumulative roll bonding (ARB) process. *Materials Science and Engineering: A* 2024;903:146691.

[13] Ashrafi N, Azmah Hanim MA, Sarraf M, Sulaiman S, Hong TS. Microstructural, Tribology and Corrosion Properties of Optimized Fe₃O₄-SiC Reinforced Aluminum Matrix Hybrid Nano Filler

Composite Fabricated through Powder Metallurgy Method. *Materials* 2020;13.

[14] Boppana SB, Dayanand S, Anil Kumar MR, Kumar V, Aravinda T. Synthesis and characterization of nano graphene and ZrO₂ reinforced Al 6061 metal matrix composites. *Journal of Materials Research and Technology* 2020;9:7354–62.

[15] Kumar HGP, Xavior MA. Graphene Reinforced Metal Matrix Composite (GRMMC): A Review. *Procedia Eng* 2014;97:1033–40.

[16] Güler Ö, Bağcı N. A short review on mechanical properties of graphene reinforced metal matrix composites. *Journal of Materials Research and Technology* 2020;9:6808–33.

[17] Dadkhah M, Saboori A, Fino P. An Overview of the Recent Developments in Metal Matrix Nanocomposites Reinforced by Graphene. *Materials* 2019;12.

[18] Suryanarayana C. Mechanical alloying and milling. *Prog Mater Sci* 2001;46:1–184.

[19] Koch CC. The synthesis and structure of nanocrystalline materials produced by mechanical attrition: A review. *Nanostructured Materials* 1993;2:109–29.

[20] Prabhu B, Suryanarayana C, An L, Vaidyanathan R. Synthesis and characterization of high volume fraction Al–Al₂O₃ nanocomposite powders by high-energy milling. *Materials Science and Engineering: A* 2006;425:192–200.

[21] Suryanarayana C. Mechanical Alloying: A Novel Technique to Synthesize Advanced Materials. *Research* 2024;2019.

[22] Ortiz AL, Shaw L. X-ray diffraction analysis of a severely plastically deformed aluminum alloy. *Acta Mater* 2004;52:2185–97.

[23] Panigrahi SK, Jayaganthan R, Pancholi V. Effect of plastic deformation conditions on microstructural characteristics and mechanical properties of Al 6063 alloy. *Mater Des* 2009;30:1894–901.

[24] Karabulut H, Çıtak R, Çinici H. Effect of Mechanical Alloying Duration on Transverse Rupture Strength of Al+10% Al₂O₃ Composites. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University* 2013; 28:635-643.

[25] Surappa MK. Aluminium matrix composites: Challenges and opportunities. *Sadhana* 2003;28:319–34.

<https://doi.org/10.1007/BF02717141>



Yeşil Araç Rotalama Problemlerinin Entegre Pisagor Bulanık AHP ve EDAS Yöntemleri ile Analizi

Gözde BAKIOĞLU^{1*}

¹Marmara Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 08/05/2024
Düzeltilme: 19/10/2024
Kabul: 21/10/2024

Anahtar Kelimeler

Yeşil Araç Rotalama
Problemi
Pisagor Bulanık AHP
EDAS
Sürdürülebilirlik

Article Info

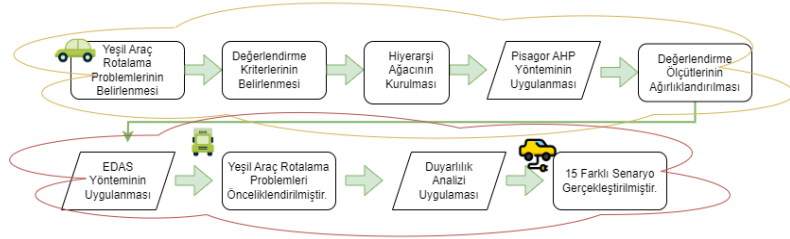
Research article
Received: 08/05/2024
Revision: 19/10/2024
Accepted: 21/10/2024

Keywords

Green Vehicle Routing
Pythagorean fuzzy AHP
EDAS
Sustainability

Grafik Özet (Graphical/Tabular Abstract)

Bu çalışmada yeşil araç rotalama problemleri entegre çok kriterli karar verme yöntemleri kullanılarak önceliklendirilmiş olup, yöntemin kararlılığını test etmek amacıyla duyarlılık analizi gerçekleştirilmiştir. / Green Vehicle Routing Problems are prioritized using hybrid multi-criteria decision-making methods, and sensitivity analysis is conducted to test the stability of the method.



Şekil A: Çalışmanın Amacı / Figure A: Flowchart of research

Önemli noktalar (Highlights)

- Değerlendirme ölçütleri Pisagor bulanık AHP yöntemi kullanılarak ağırlıklandırılmıştır. / The evaluation criteria have been weighted using the Pythagorean fuzzy AHP method.
- EDAS yöntemi uygulanarak yeşil araç rotalama problemleri önceliklendirilmiştir. / The EDAS method has been applied to prioritize green vehicle routing problems.
- 15 farklı senaryo uygulanarak önerilen metodun duyarlılığı test edilmiştir. / The sensitivity of the proposed method has been tested using 15 different scenarios.

Amaç (Aim): Bu çalışmanın amacı, yeşil araç rotalama problemlerini inceleyerek çevre dostu ve sürdürülebilir ulaşım çözümlerini belirlemek ve bu çözümler arasında en uygun seçimi yapmaktır. / The aim of this study is to examine green vehicle routing problems to identify environmentally friendly and sustainable transportation solutions, and to make the most suitable selection among these solutions.

Özgünlük (Originality): Literatürde, yeşil araç rotalama problemlerinin tüm kısıtları ve kriterleri kapsayan sistematik bir modellemeyle sunulmamış olması ve optimizasyon problemlerinin ÇKKV yöntemleri ile değerlendirildiği çalışmaların eksikliği, bu araştırmanın özgünlüğünü ve yenilikçiliğini öne çıkarmaktadır. / The absence of a systematic modeling that encompasses all constraints and criteria of green vehicle routing problems in the literature, along with the lack of studies evaluating optimization problems using multi-criteria decision-making (MCDM) methods, highlights the originality and innovativeness of this research.

Bulgular (Results): Uygulanan yöntem sonucunda, "Düşük Emisyonlu Araç Rotalama Problemi" en yüksek önceliği alırken, "Emisyon Azaltma Potansiyeli" ölçütü de yeşil araç rotalama problemlerinin değerlendirilmesinde birinci sırada yer almıştır. Ayrıca, duyarlılık analizi sonuçları, önerilen entegre bulanık karar verme yönteminin tutarlı olduğunu göstermiştir. / As a result of the applied method, the 'Low Emission Vehicle Routing Problem' received the highest priority, while the 'Emission Reduction Potential' criterion ranked first in the evaluation of green vehicle routing problems. Additionally, the results of the sensitivity analysis demonstrated that the proposed integrated fuzzy decision-making method is consistent.

Sonuç (Conclusion): Önceliklendirilen yeşil araç rotalama problemleri, uzun vadeli sürdürülebilirlik hedeflerine önemli katkılar sağlamaktadır. / The prioritized green vehicle routing problems contribute significantly to long-term sustainability goals.



Yeşil Araç Rotalama Problemlerinin Entegre Pisagor Bulanık AHP ve EDAS Yöntemleri ile Analizi

Gözde BAKIOĞLU^{1*}

¹Marmara Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 08/05/2024
Düzeltilme: 19/10/2024
Kabul: 21/10/2024

Anahtar Kelimeler

Yeşil Araç Rotalama
Problemi
Pisagor Bulanık AHP
EDAS
Sürdürülebilirlik

Öz

Günümüzde, iklim değişikliği, hava kirliliği ve doğal kaynakların tükenmesi gibi çevresel sorunlar, küresel ölçekte artan bir endişe kaynağı olmuştur ve bu sorunlar çevresel sürdürülebilirlik için acil önlemlerin alınmasını gerektirmektedir. Ulaşım endüstrisi, çevresel etkilere önemli ölçüde katkı sağlayan sektörlerden biridir. Yeşil araç rotalama problemleri, düşük emisyonlu ve çevre dostu araçların tercih edilmesiyle çevresel etkileri minimize ederek sürdürülebilir ulaşım sistemlerinin oluşturulmasına katkı sağlamaktadır. Bu çalışmada, yeşil araç rotalama problemleri, çok kriterli karar verme problemi olarak ele alınmış, karar vericilere çeşitli senaryolar ve ağırlıklandırma seçenekleri sunularak karar sürecinin şeffaflığı artırılmıştır. Bu bağlamda, göreceli olarak yeni bir yaklaşım olan Pisagor Bulanık Kümeler ortamında genişletilmiş Analitik Hiyerarşi Prosesi (AHP) ve EDAS (Ortalama Çözüm Uzaklığına Dayalı Değerlendirme) entegre modeli üzerine çalışılmış ve 6 değerlendirme ölçütü ile 5 yeşil araç rotalama problemi arasında seçim yapılmıştır. Bununla birlikte, farklı ölçüt ağırlıkları altında karar verme probleminin nasıl etkilendiğini belirlemek amacıyla duyarlılık analizi gerçekleştirilmiş ve önerilen metodun duyarlılığı 15 farklı senaryo üzerinde test edilmiştir. Bu çalışmanın sonuçları, araştırmacılara çeşitli yeşil araç rotalama senaryolarını değerlendirme ve analiz etme imkânı sağlarken, endüstri profesyonellerine ve lojistik yöneticilerine maliyeti düşüren, operasyonel verimliliği arttıran, çevre dostu çözümleri sunmaktadır.

Analysis of Green Vehicle Routing Problems with Integrated Pythagorean Fuzzy AHP and EDAS Methods

Article Info

Research article
Received: 08/05/2024
Revision: 19/10/2024
Accepted: 21/10/2024

Keywords

Green Vehicle Routing
Pythagorean fuzzy AHP
EDAS
Sustainability

Abstract

Nowadays, environmental issues such as climate change, air pollution and depletion of natural resources are of increasing concern on a global scale and require urgent measures for environmental sustainability. The transportation industry is one of the sectors that contributes significantly to environmental impacts. Green vehicle routing problems facilitate the establishment of sustainable transportation systems by minimizing environmental impacts through the preference of low-emission and eco-friendly vehicles. In this study, green vehicle routing problems are considered as a multi-criteria decision-making problem, enhancing decision-making transparency by providing decision-makers with various scenarios and weighting options. In this context, an extended Analytic Hierarchy Process (AHP) and EDAS (Evaluation Based on Average Distance to Solution) integrated model in Pythagorean Fuzzy Sets environment, which is a relatively new approach, was carried out and 5 green vehicle routing problems were selected with 6 evaluation criteria. Furthermore, sensitivity analysis was conducted to assess how the decision-making problem is influenced by varying criteria weights, and the robustness of the proposed method was tested across 15 different scenarios. The results of this study provide researchers with the opportunity to evaluate and analyze various green vehicle routing scenarios, while providing industry professionals and logistics managers with environmentally friendly solutions that reduce costs and increase operational efficiency.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Araç rotalama problemi, bir veya birden fazla aracın belirli kısıtlar altında, genellikle müşteri noktalarını ziyaret ederek en verimli rotayı belirleme sürecidir. Bu kısıtlar arasında araç kapasitesi, zaman sınırları ve noktalar arası mesafeler yer alır. Bu tür bir optimizasyon, genellikle lojistik, dağıtım ve taşımacılık endüstrilerinde karşılaşılr. İşletmeler, araç rotalama problemlerini çözerek teslimat maliyetlerini azaltabilir, teslimat sürelerini optimize edebilir ve kaynakları daha etkin bir şekilde kullanabilir.

Dünya Enerji Serisinin 2024 raporuna göre, Asya'daki güçlü talebin etkisiyle küresel enerji tüketimi 2024 yılında %1,8 oranında artacağı, yenilenebilir enerjiye olan talebin ise %11 oranında yükseleceği belirtilmektedir [1]. Dijital teknolojilerdeki ilerlemeler ve yenilenebilir enerji kaynaklarında maliyet azaltmaları, bazı enerji güvenliği sorunlarını ortadan kaldırırken, enerji geçişlerinde büyük fırsatlar sunmaktadır. Sürdürülebilir kalkınma senaryolarında hidrojen ve yenilenebilir enerjilerin doğrudan kullanımına ek olarak, 2040'a kadar elektriğin tüketiminde bir artış yaşanacağı öngörülmektedir [2]. Avrupa Komisyonu, sera gazı emisyonlarını 2030'a kadar %40 oranında azaltmayı hedeflemekte olup, ulaştırma sektörünün bu emisyonların %20'sinden sorumlu olduğunu belirtmektedir [3].

Kentlere göçlerin artmasıyla birlikte, şehirlerde hava kalitesi giderek daha fazla önem kazanmaktadır. Bu durum, sürdürülebilir yakıt kullanımı ve emisyon salınımını içeren çözümlerin önemini arttırmaktadır. Yeşil araç rotalama problemleri, çevresel etkilerin azaltılması ve sürdürülebilirlik ilkelerinin entegrasyonuna odaklanan bir alt dal olarak geleneksel araç rotalama problemlerinden türemiştir [4]. Enerji ve yakıt tüketimini, sera gazı salınımını azaltmayı hedefleyen yeşil araç rotalama problemleri, sürdürülebilir ulaşımı teşvik etmeyi amaçlamaktadır.

Araç rotalama problemleriyle ilgili son yıllarda birçok çalışma gerçekleştirilmiştir. Chen vd. [5], bir dağıtım merkezi ile birden fazla ön depo arasındaki taşımacılık rotalarını optimize etmek amacıyla soğuk zincir lojistiğine yönelik bir araç rotalama problemini ele almıştır. Palacio ve Rivera [6], her düğümde malzemenin arz ve talep miktarlarını bilerek, araçların toplam seyahat mesafesini en aza indiren bir rota planı elde etmeyi amaçlayan bir teslimat gezgin satıcı problemini tanıtmıştır. Zhang ve Woensel [7], gerçek zamanlı rotalama

problemlerini büyük ölçekli yol ağlarında incelemiş ve bu bağlamda dinamik ve anlık müşteri taleplerini karşılamak üzere araçların rota değiştirme yeteneğini araştırmışlardır. Son olarak, Li ve Yang [8], çoklu işletmelere yönelik büyük ev eşyalarının son kilometre teslimatını gerçekleştiren bir lojistik hizmet sağlayıcısının karşılaştığı araç rotalama problemini ele almışlardır.

Yeşil araç rotalama problemleriyle ilgili yapılan yazın taramasında, optimizasyon problemlerinde sera gazı emisyonu, yakıt tüketimi, enerji tüketimi ve seyahat karakteristikleri gibi özelliklerde kısıtlamalara rastlanmaktadır. Tablo 1 yazın taraması sonucu öne çıkan yayınları ve kullandıkları kısıtları göstermektedir. Bektaş ve Laporte [9], geleneksel araç rotalama problemlerini genişleterek seyahat süresi ve mesafesinin yanı sıra fosil yakıt tüketimini düşürmek amacıyla yakıt maliyeti ve sera gazı emisyonu gibi faktörleri ele almıştır. Erdogan ve Miller [4], müşteri ve istasyon konumunu aynı anda ele alarak, araç yakıtının tükenme olasılığını en aza indirmek için iki farklı sezgisel yöntem kullanmışlardır.

Tablo 1. Yeşil araç rotalama yazın taraması
(Literature review on green vehicle routing)

Referanslar	Karbon (CO2) Emisyonu	Yakıt Tüketimi	Enerji - Minimum	Seyahat süresi ve mesafesi
Bektaş ve Laporte [5]	✓	✓		✓
Erdogan ve Miller [4]		✓		✓
Kopfer vd. [6]		✓		
Adiba vd. [7]	✓			✓
Psychas vd. [8]		✓	✓	✓
Desaulniers [9]		✓	✓	✓
Ashtineh ve Pishvaei [10]	✓	✓		✓
Amiri vd. [11]		✓	✓	

Kopfer vd. [10], yakıt tüketimini azaltmayı hedefleyerek farklı araç sınıflarına göre, yük ve araç olmak üzere iki ölçütü dikkate almışlardır. Adiba vd. [11], CO2 emisyonlarını geleneksel araç rotalama problemlerine entegre etmek için yeni bir genetik algoritma sunmuşlardır. Psychas vd. [12], enerji minimum araç rotalama problemlerinin çok amaçlı bir versiyonunu önererek seyahat süresi, mesafe ve yakıt tüketimi de dahil olmak üzere üç farklı amaç fonksiyonunu dikkate almışlardır. Desaulniers vd. [13], elektrikli araç rotalama için tam ve kısmi şarj dolumunu, istasyonları ve seyahat zamanını dikkate alarak bir algoritma geliştirmişlerdir. Ashtineh ve Pishvae [14], farklı alternatif yakıtların araç rotalama problemlerindeki performanslarını değerlendirmiş ve yakıt değişiminin; NOx, HC, CO gibi emisyonlarda %37 oranında azalışa sebep olduğunu gözlemlemiştir. Güncel çalışmalara bakıldığında, Amiri vd. [15], dizel ve elektrikli kamyonlar için istasyonların şarj gücü ve yoğunluğunu dikkate alarak yeşil araç rotalama problemine metasezgisel bir çözüm getirdikleri görülmüştür. Lou vd. [16], hız dalgalanmaları, yol koşulları ve zamanı içeren düşük karbonlu araç rotalama problemini tanıtarak, bu sorunu çözmek için adaptif değişken komşuluk araması ile bir hibrit genetik algoritma önermiş ve yöntemlerini Jingzhou, Çin'deki lojistik ve trafik verileri ile doğrulamıştır. Garside vd. [17], 2016 yılından 2023'e kadar 458 çalışmayı kapsayan güncel bir yeşil araç rotalama problemi literatür incelemesi sunarak, metasezgisel ve hibrit yöntemleri incelemiştir.

Yeşil araç rotalama problemlerini çözmek için geliştirilen algoritmaların yanı sıra, Asghari vd. [18], içten yanmalı motorlu araçlar, alternatif yakıtlı araçlar ve hibrit elektrikli araçlar bağlamında rotalama problemleri için yazın taraması yapmıştır. Moghdani vd. [19], derlediği literatür çalışması sonucunda, yeşil araç rotalama problemlerinin yeni bir konu olduğunu ve hala doldurulması gereken alanlar olduğunu belirtmiştir. Sistematik olarak derlenen yazın taraması, kullanılabilir tüm kısıtları içeren ve tüm yeşil araç rotalama problemlerini bir arada sunan bir çalışmanın bulunmadığını göstermektedir. Bunun yanı sıra, çok kriterli karar verme (ÇKKV) yöntemleri kullanılarak modellenen yeşil araç rotalama problemlerinin literatürde bulunmaması, bu çalışmanın motivasyonu olmuştur. Geleneksel olarak, yeşil araç rotalama problemleri optimizasyon problemleri olarak ele alınmaktadır, çünkü bu problemler genellikle maliyet, mesafe

veya emisyonları minimize etmeye odaklanır. Ancak, bu problemlerin uygulanması, yalnızca tek bir optimizasyon kriterine dayanmak yerine, birden fazla ve bazen çelişen kriterin dikkate alınmasını gerektiren karmaşık bir süreçtir. Bu nedenle, bu çalışmanın ana motivasyonu, yeşil araç rotalama problemini bir ÇKKV problemi olarak ele alarak, çeşitli çevresel, ekonomik ve teknolojik kriterleri dengeleyebilecek daha kapsamlı ve sürdürülebilir çözümler sunmaktır. Literatürde bir optimizasyon probleminin ÇKKV yöntemleri ile değerlendirildiği çalışmalara rastlanmaması, bu araştırmanın özgünlüğünü ve yenilikçiliğini de vurgulamaktadır. Bu bağlamda, çalışmanın amacı yeşil araç rotalama problemlerini ortaya çıkartmak ve önerdiğimiz bir yöntemle sıralayarak literatürde bulunan bilgi boşluğunu doldurmaktır. Çalışmanın araştırma soruları şu şekildedir: (i) Sürdürülebilir ulaşım için hangi yeşil araç rotalama probleminin tercih edilmesi gerekmektedir? (ii) Hangi ölçütler, yeşil araç rotalama probleminin seçiminde öncelikli olarak dikkate alınmalıdır? (iii) Farklı senaryolar altında hangi yeşil araç rotalama problemi, sürdürülebilirlik ve verimlilik açısından en uygun seçimdir? Çalışma kapsamında, yeşil araç rotalama problemleri entegre Pisagor bulanık AHP & EDAS yöntemleri kullanılarak önceliklendirilmiş olup, çalışmanın katkıları aşağıdaki şekilde sıralanmıştır:

- Yeşil araç rotalama problemleri, çalışma kapsamında ÇKKV problemi olarak ele alınmış, böylece birbirleriyle çelişen ve etkileşimi olan faktörler arasında denge kurulmuştur. Ayrıca, karar vericilere farklı senaryolar ve ağırlıklandırma seçenekleri sunularak karar süreci daha şeffaf hale getirilmiştir.
- Yeşil araç rotalama problemleri, yazın taraması ve karar verme ekibi tarafından tanımlanmış ve bu problemleri değerlendirmek için çalışma kapsamında çeşitli ölçütler belirlenmiştir.
- Değerlendirme ölçütleri Pisagor bulanık AHP yöntemi kullanılarak ağırlıklandırılmıştır. Bununla birlikte, ikili karar matrisinin ve verilen kararların geçerliliğini ölçmek için tutarlılık analizi gerçekleştirilmiştir.
- Pisagor bulanık AHP yönteminden elde edilen ağırlıklar kullanılarak EDAS yöntemi uygulanmış ve yeşil araç rotalama problemleri önceliklendirilmiştir.
- Farklı ölçüt ağırlıkları altında karar verme probleminin nasıl etkilendiğini belirlemek için duyarlılık analizi gerçekleştirilmiş, 15

farklı senaryo uygulanarak önerilen metodun duyarlılığı test edilmiştir.

Bu çalışmanın sonuçları, araştırmacılara çeşitli yeşil araç rotalama senaryolarını değerlendirme ve analiz etme imkânı sağlarken, endüstri profesyonellerine ve lojistik yöneticilerine maliyeti düşüren, operasyonel verimliliği arttıran, çevre dostu çözümleri sunmaktadır.

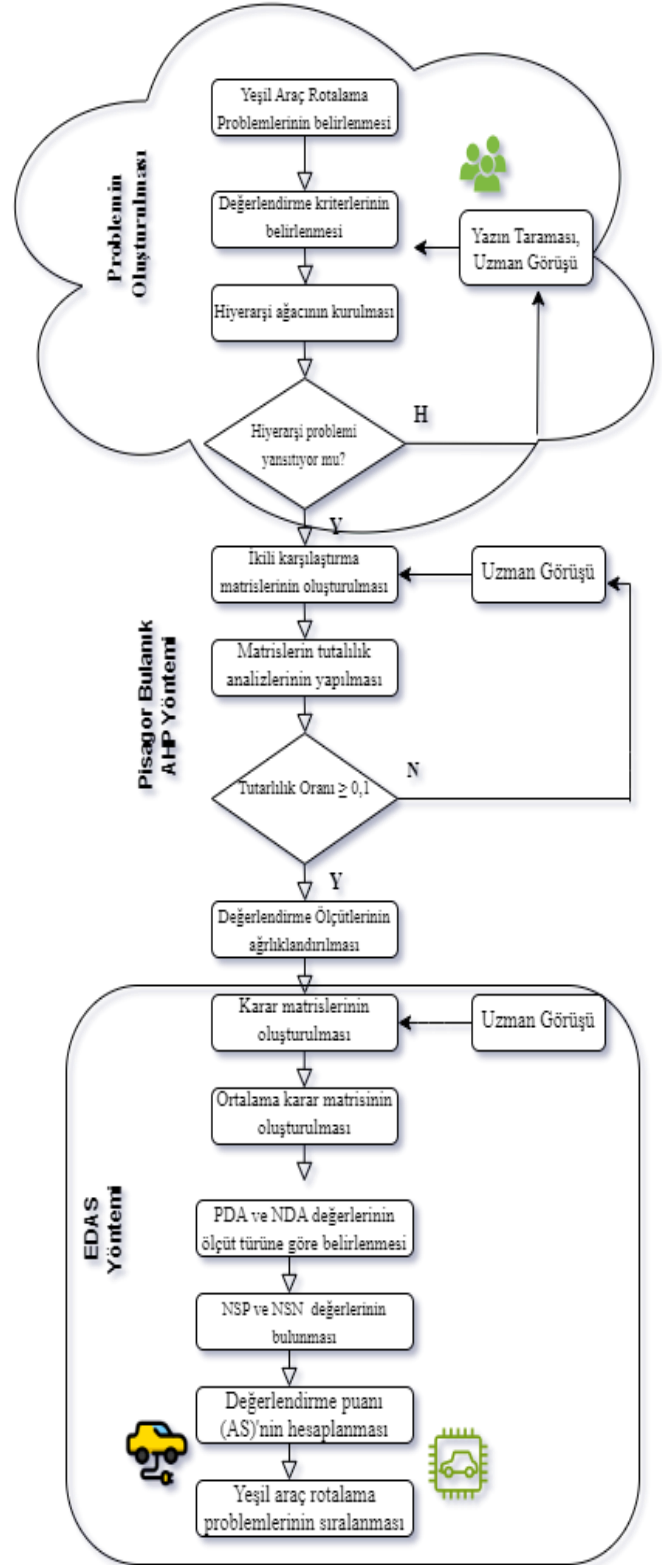
Bu makalenin geri kalan bölümleri şu şekilde organize edilmiştir: İkinci bölümde, çalışma kapsamında tercih edilen Pisagor bulanık kümeler, Pisagor AHP yöntemi ve EDAS yöntemi detaylı bir şekilde açıklanmıştır. Üçüncü bölümde, yeşil araç rotalama problemleri ve değerlendirme kriterleri detaylı bir şekilde açıklanmış ve ardından bu problemler ve kriterler doğrultusunda tercih edilen yöntem uygulanmıştır. Aynı bölümde, yöntemin etkinliğini ve sağlamlığını değerlendirmek amacıyla gerçekleştirilen duyarlılık analizi ve sonuçlara ilişkin tartışmalar sunulmuştur. Son bölümde ise, çalışmanın sonuçları, kısıtlılıkları ve gelecek çalışmalar için öneriler yer almaktadır.

2. MATERYAL VE METOD (MATERIAL AND METHOD)

ÇKKV, karmaşık karar verme problemlerini ele almak için kullanılan bir yaklaşımdır. Bu yaklaşım, birden fazla ölçüt veya alternatifin dikkate alındığı karar verme süreçlerinde tercih edilmektedir. Yeşil araç rotalama problemleri de bu tür karmaşık karar verme problemlerinden biridir. Bu problemlerde, çevresel etkiyi azaltmak, enerji verimliliğini artırmak, seyahat süresini minimize etmek gibi birçok farklı amaç veya ölçüt bir arada değerlendirilir. Bu nedenle, yeşil araç rotalama problemlerinde ÇKKV yöntemlerinin kullanılması, karar verme sürecini daha etkili ve optimize hale getirmektedir.

Bu çalışmada, yeşil araç rotalama problemleri ÇKKV yöntemlerinden olan entegre Pisagor AHP ve EDAS yaklaşımlarıyla ele alınmıştır. Bu sayede çeşitli faktörler arasındaki dengeyi sağlamak ve çelişen ölçütler arasında uyum sağlamak mümkün olmuştur. AHP ve EDAS yöntemlerinin entegre kullanımına dair literatürde, bu yöntemlerin lojistik, ulaşım ve enerji alanlarında öne çıktığı görülmektedir. Stevic vd. [20], AHP ve EDAS yöntemlerini birleştirerek dört farklı şehir lojistiği senaryosunu değerlendirmişlerdir. Karatop vd. [21], Türkiye'deki yenilenebilir enerji yatırımlarını analiz etmek için entegre AHP-EDAS yaklaşımlarını kullanmışlardır. Narad ve Joshi [22] ise biyodizel ve dizel karışımlarını değerlendirmek amacıyla AHP

ve EDAS yöntemlerini uygulamış ve en uygun karışımın %20 dizel katkılı biyodizel olduğunu belirlemişlerdir. Önerilen metoda ilişkin akış şeması Şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1. Çalışma metodunun akış şeması (Flowchart of research method)

2.1. PİSAGOR BULANIK KÜMELER
(PYTHAGOREAN FUZZY SETS)

Karar vericilerin yeşil araç rotalama problemlerini değerlendirmeleri çeşitli belirsizlikleri ve öznellikleri içerir, bu da problemin analizini zorlaştırmaktadır. Belirsiz bilgileri yönetmek ve belirli sonuçlar alabilmek için Zadeh [23], bulanık küme teorisini ve dilsel değişkenleri önermiştir. Literatürde yer alan son çalışmalarda, karar vericilerin görüşlerindeki belirsizliği daha iyi temsil edebilmek için, sezgisel bulanık kümeler ve Pisagor bulanık kümeler gibi genişletilmiş bulanık kümelere yer verilmiştir [24].

Atanassov'un geliştirdiği sezgisel bulanık kümeler, üyelik, üyelik dışı olma ve tereddüt derecelerini içerir; burada üyelik ve üyelik dışı olma derecelerinin toplamı en fazla 1 olmalıdır. Sezgisel bulanık kümeler uygulamada ortaya çıkan karmaşık belirsizliği modellemekte yetersiz kaldığı için, genelleştirilmiş ve Pisagor bulanık kümeler geliştirilmiştir [16]. Burada üyelik ve üyelik dışı olma derecelerinin toplamı 1'i aşabilir ancak karelerin toplamı aşamaz şeklinde kısıt koşulları tanımlanmıştır. Sezgisel bulanık kümeler ile Pisagor bulanık kümelere ait uzayların geometrik olarak karşılaştırmaları yapıldığında, Pisagor bulanık küme uzayının daha büyük bir alanı kapsadığı görülmektedir. Bu nedenle, Pisagor bulanık kümelerin, belirsizlik ve kesin olmama durumlarını sezgisel bulanık kümelere göre daha etkin bir şekilde ifade ettiği anlaşılmaktadır. Pisagor bulanık kümelerin bazı temel tanımları aşağıda verilmiştir:

Tanım 1: X evrensel kümesi içerisinde x bir eleman olsun. X içerisinde yer alan \tilde{P} Pisagor bulanık kümesi Denklem 1'deki gibi gösterilir [25]:

$$\tilde{P} = \{ \langle x, P(\mu_P(x), \nu_P(x)) \rangle \mid x \in X \} \tag{1}$$

Burada $\mu_P(x) \in [0,1]$ üyelik derecesini, $\nu_P(x) \in [0,1]$ üyelik dışı olma derecesini ifade etmektedir. Bu üyelik dereceleri Denklem 2'de verilen koşulu sağlamaktadır:

$$0 \leq (\mu_P(x))^2 + (\nu_P(x))^2 \leq 1. \tag{2}$$

\tilde{P} kümesine ait Pisagor bulanık bir sayının tereddüt derecesi Denklem 3'te evrilmiştir:

$$\pi_P(x) = \sqrt{1 - (\mu_P(x))^2 - (\nu_P(x))^2} \tag{3}$$

Tanım 2: $\tilde{P}_1 = P(\mu_{P_1}, \nu_{P_1})$ ve $\tilde{P}_2 = P(\mu_{P_2}, \nu_{P_2})$ iki Pisagor bulanık sayı ve λ pozitif bir sayı olmak

üzere, Pisagor bulanık kümelerdeki temel işlemler aşağıda gösterilmiştir [26]:

$$\tilde{P}_1 \oplus \tilde{P}_2 = P \left(\sqrt{(\mu_{P_1})^2 + (\mu_{P_2})^2 - (\mu_{P_1})^2(\mu_{P_2})^2}, \nu_{P_1} \nu_{P_2} \right) \tag{4}$$

$$\tilde{P}_1 \otimes \tilde{P}_2 = P \left(\mu_{P_1} \mu_{P_2}, \sqrt{(\nu_{P_1})^2 + (\nu_{P_2})^2 - (\nu_{P_1})^2(\nu_{P_2})^2} \right) \tag{5}$$

$$\lambda \tilde{P}_1 = \left(\sqrt{1 - (1 - (\mu_{P_1})^2)^\lambda}, (\nu_{P_1})^\lambda \right), \lambda > 0, \tag{6}$$

$$(\tilde{P}_1)^\lambda = \left((\mu_{P_1})^\lambda, \sqrt{1 - (1 - (\nu_{P_1})^2)^\lambda} \right), \lambda > 0. \tag{7}$$

Tanım 3: $\tilde{P}_i = P(\mu_i, \nu_i)$, $i = (1, 2, \dots, n)$ bir grup Pisagor bulanık kümesidir. Bu kümenin birleştirilmesi için Denklem 8'de verilen Pisagor bulanık ağırlıklı ortalama (PBAO) formülü kullanılır.

$$PBAO(\tilde{P}_1, \tilde{P}_2, \dots, \tilde{P}_n) = \left((1 - \prod_{i=1}^n (1 - \mu_i^2)^{w_i})^{1/2}, (\prod_{i=1}^n (\nu_i)^{w_i}) \right) \tag{8}$$

Burada $w_i = (w_1, w_2, \dots, w_n)$ ağırlık vektörleridir ve $w_i \in [0, 1]$, $\sum_{i=1}^n w_i = 1$ özelliklerine sahiptirler.

Tanım 4: $\tilde{P}_1 = P(\mu_{P_1}, \nu_{P_1})$ ve $\tilde{P}_2 = P(\mu_{P_2}, \nu_{P_2})$ iki Pisagor bulanık sayı olmak üzere, bu iki sayının kıyaslanması ve sıralanması için skor fonksiyonlarından yararlanılır. Skor fonksiyonu formülü Denklem 9'da gösterilmiştir:

$$s(\tilde{P}_1) = \mu_{P_1} - \nu_{P_1}. \tag{9}$$

2.2. PİSAGOR BULANIK AHP YÖNTEMİ
(PYTHAGOREAN FUZZY AHP METHOD)

Analitik Hiyerarşi Prosesi (AHP), karar vericilerin karmaşık ve genellikle belirsiz olan kararlarını sistematik bir şekilde analiz etmelerine yardımcı olan ikili kıyaslama esasına dayanan ÇKKV yöntemlerinden biridir [27]. AHP, karmaşık problemleri yönetilebilir parçalara bölmesi, farklı boyutlardaki karar verme problemlerine uygulanabilirliği ve kolayca anlaşılabilir olması bakımından çeşitli avantajlara sahiptir. Bununla birlikte, yeşil araç rotalama problemleri karmaşık kriterler içermekte ve bu kriterler değerlendirilirken karar vericiler arasında bazı belirsizlikler ve kesin olmama durumları ortaya çıkmaktadır. Bu durumları daha etkin bir şekilde ele almak için geleneksel AHP yerine Pisagor Bulanık AHP

yönteminin kullanılması daha doğru sonuçlar sağlayabilir. Bu sebeple, çalışma kapsamında, AHP yöntemi Pisagor bulanık kümeler ortamında genişletilmiştir. Yapılan yazın taraması, Pisagor AHP yönteminin ulaşım, tedarik zinciri ve risk yönetimi gibi alanlarda geniş bir uygulama alanına sahip olduğunu göstermektedir. Sarkar ve Biswas [28], Pisagor AHP yöntemini kullanarak dört farklı ulaşım şirketinin yönetimini değerlendirmişlerdir. Zhou ve Chen [29], Pisagor AHP ve Vise Kriterijumska Optimizacija I Kompromisno Resenje (VIKOR) yöntemlerini kullanarak yeşil tedarikçi seçimi üzerine bir çalışma gerçekleştirmiştir. Demir vd. [30], Türkiye demiryolu ulaşım sistemlerini Pisagor AHP ve VIKOR yaklaşımlarını kullanarak analiz etmişlerdir. Farooq [31] ise sürücü davranış kriterlerini Pisagor AHP metodunu uygulayarak incelemiştir. Pisagor Bulanık AHP yönteminin işlem adımları aşağıdaki gibidir:

Adım 1: Karar verme problemiyle ilgili ölçütler ve alternatifler tanımlanır.

Adım 2: Hiyerarşi ağacı oluşturularak, problemin amacı, ölçütleri ve alternatifleri hiyerarşik yapı üzerinde belirtilir.

Adım 3: Dilsel terimler kullanılarak ikili karşılaştırma matrisleri $R = (r_{ik})_{m \times m}$ oluşturulur.

Adım 4: Fark matrisleri $D = (d_{ik})_{m \times m}$ Denklem 10 ve Denklem 11 kullanılarak hesaplanır.

$$d_{ikL} = \mu_{ikL}^2 - v_{ikU}^2 \quad (10)$$

$$d_{ikU} = \mu_{ikU}^2 - v_{ikL}^2 \quad (11)$$

Adım 5: İçsel çarpım matrisi $S = (s_{ik})_{m \times m}$ Denklem 12 ve 13 yardımıyla bulunur.

$$s_{ikL} = \sqrt{1000d_L} \quad (12)$$

$$s_{ikU} = \sqrt{1000d_U} \quad (13)$$

Adım 6: Denklem 14 kullanılarak belirlilik değeri $\tau = (\tau_{ik})_{m \times m}$ hesaplanır.

$$\tau_{ik} = 1 - (\mu_{ikU}^2 - \mu_{ikL}^2) - (v_{ikU}^2 - v_{ikL}^2) \quad (14)$$

Adım 7: Ağırlık matrisi $T = (t_{ik})_{m \times m}$, belirlilik değeri $\tau = (\tau_{ik})_{m \times m}$ ve içsel çarpım matrisinin $S = (s_{ik})_{m \times m}$ çarpımı ile Denklem 15'te gösterildiği gibi elde edilir:

$$t_{ik} = \left(\frac{s_{ikL} + s_{ikU}}{2} \right) \tau_{ik} \quad (15)$$

Adım 8: Normalize edilmiş kriter ağırlıkları ω_i Denklem 16 yardımıyla hesaplanır.

$$\omega_i = \frac{\sum_{j=1}^m \omega_{ij}}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m \omega_{ij}} \quad (16)$$

2.2.1. TUTARLILIK ANALİZİ (CONSISTENCY ANALYSIS)

Karar vericilerin verdiği kararların geçerliliğini ölçmek ve karar matrisinin içerdiği tutarsızlıkları ve çelişkileri belirlemek için tutarlılık analizi gerçekleştirilir. Tutarlılık oranı (CR) adı verilen ölçüt hesaplanarak ikili karşılaştırma matrislerinin tutarlı olup olmadığı tespit edilir. Denklem 17 kullanılarak tutarlılık oranı hesaplanmaktadır.

$$CI = \frac{\lambda_{max} - k}{k - 1}, \quad CR = \frac{CI}{RI} \quad (17)$$

Burada, k matris elemanlarının sayısı, λ_{max} en büyük özdeğer, CI tutarlılık endeksi ve RI rastgele endeksi temsil etmektedir. Tutarlılık oranının maksimum değeri Saaty tarafından 0,1 olarak belirlenmiştir. Matrislere ait CR değerleri bu eşik değer üzerinde çıkması durumunda, matrisin tutarsız olduğu sonucuna ulaşılmaktadır. Böyle bir durumda karar vericilerden ölçütler hakkında tekrar değerlendirme yapılması istenir.

2.3. EDAS YÖNTEMİ (EDAS METHOD)

EDAS (Evaluation Based on Distance from Average Solution) metodu Keshavarz Ghorabae ve diğ. tarafından 2015 yılında önerilmiştir. EDAS yöntemi, TOPSIS ve VIKOR gibi diğer geleneksel ÇKKV yöntemlerinden farklılık göstermektedir [32]. Optimal çözümü elde etmek için, geleneksel yöntemlerin aksine, EDAS yöntemi, alternatiflerin her bir ölçüte ortalama çözüm mesafesini hesaplamaktadır. Ardından, ortalama değerden pozitif ve negatif uzaklıklar hesaplanır ve optimal sonuca ulaşılır. Bu yaklaşım, pozitif ideal ve negatif ideal çözümlere mesafe hesaplaması yapmadığı için daha pratik ve etkili bir hesaplama süreci sunar. Bu nedenle, yeşil araç rotalama problemini ele alırken EDAS yöntemini kullanmak uygun bulunmuştur. Literatürde, özellikle sürdürülebilir ulaşım üzerine yapılan çalışmalarda EDAS yönteminin yaygın olarak uygulandığı görülmektedir. Simić vd. [33] EDAS yaklaşımını kullanarak petrol taşımacılığında sürdürülebilir rotaları tespit etmişlerdir. Benzer şekilde, okul kampüsleri için sürdürülebilir ulaşım stratejilerinin değerlendirildiği bir çalışmada da EDAS yöntemi tercih edilmiştir [34]. Ayrıca, Krishankumar vd. [35], sürdürülebilir kentsel hareketlilik için sıfır karbon tedbirlerini EDAS yöntemi ile

önceliklendirmişlerdir. EDAS yöntemine ait işlem adımları aşağıdaki gibidir:

Adım 1: $C_j(j = 1, 2, \dots, n)$ ölçütler, $x_i(i = 1, 2, \dots, m)$ alternatifler olmak üzere, karar matrisi $D = (C_j(x_i))_{m \times n}$ Denklem 18'de görüldüğü şekilde oluşturulur.

$$D = (C_j(x_i))_{m \times n} = \begin{matrix} & C_1 & \dots & C_n \\ \begin{matrix} x_1 \\ \vdots \\ x_m \end{matrix} & \begin{bmatrix} P_{11} & \dots & P_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{m1} & \dots & P_{mn} \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (18)$$

Adım 2: Ortalama çözüm matrisi Denklem 19 yardımıyla hesaplanır.

$$AV = [AV_j]_{1 \times n} = \left[\frac{\sum_{i=1}^m C_j(x_i)}{m} \right]_{1 \times n} \quad (19)$$

Adım 3: Tüm ölçütler için, ölçüt türüne bağlı olarak, ortalamadan pozitif mesafe (PDA) ve ortalamadan negatif mesafe (NDA) matrisleri hesaplanır. Ölçütlerin türü fayda şeklindeyse Denklem 20 ve Denklem 21 kullanılarak PDA ve NDA hesaplanır; kriterler maliyet türünden ise Denklem 22 ve Denklem 23 yardımıyla PDA ve NDA bulunmaktadır.

$$PDA_{P_{ij}} = \frac{\max\left(0, \left((C_j(x_{ij})) - (AV_j)\right)\right)}{(AV_j)} \quad (20)$$

$$NDA_{P_{ij}} = \frac{\max\left(0, \left((AV_j) - (C_j(x_{ij}))\right)\right)}{(AV_j)} \quad (21)$$

$$PDA_{P_{ij}} = \frac{\max\left(0, \left((AV_j) - (C_j(x_{ij}))\right)\right)}{(AV_j)} \quad (22)$$

$$NDA_{P_{ij}} = \frac{\max\left(0, \left((C_j(x_{ij})) - (AV_j)\right)\right)}{(AV_j)} \quad (23)$$

Adım 4: SP_i ve SN_i olarak adlandırılan ağırlıklı toplam PDA ve NDA değerleri Denklem 24 ve Denklem 25 kullanılarak hesaplanır. Burada, ω_j ölçütlerin ağırlıklarını temsil etmektedir.

$$SP_i = \sum_{j=1}^n \omega_j PDA_{P_{ij}} \quad (24)$$

$$SN_i = \sum_{j=1}^n \omega_j NDA_{P_{ij}} \quad (25)$$

Adım 5: SP_i ve SN_i değerleri Denklem 26 ve Denklem 27 yardımıyla normalize edilir.

$$NSP_i = \frac{SP_i}{\max(SP_i)} \quad (26)$$

$$NSN_i = 1 - \frac{SN_i}{\max(SN_i)} \quad (27)$$

Adım 6: Tüm alternatifler için Denklem 28 kullanılarak değerlendirme puanı (AS) hesaplanır.

$$AS_i = \frac{1}{2} (NSP_i + NSN_i) \quad (28)$$

Adım 7: Hesaplanan AS değerlerine göre alternatifler azalan şekilde sıralanır. İlk sırada yer alan alternatif, en optimum seçenek olarak kabul edilmektedir.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

Araç rotalama problemleri, lojistik ve taşımacılık sektörlerinde karşılaşılan temel optimizasyon problemlerinden biridir. Bu problemler, bir dizi müşteriye hizmet sunmak için en verimli araç rotalarını belirleme ihtiyacını ele alır. Optimizasyon, işletme maliyetlerini azaltmak, teslimat sürelerini iyileştirmek ve kaynak kullanımını optimize etmek için kritik öneme sahiptir.

Yeşil araç rotalama problemleri, çevresel etkilerin azaltılması ve sürdürülebilirlik ilkelerinin entegrasyonu üzerine odaklanan bir alt dal olarak geleneksel araç rotalama problemlerinden ayrılmıştır. Bu tür problemlerde, elektrikli, hibrit veya düşük emisyonlu araçlar gibi çevre dostu taşıma araçları tercih edilerek veya düşük emisyonlu rotalar belirlenerek karbon emisyonları ve diğer çevresel etkilerin azaltılması amaçlanır. Temel hedef, çevresel etkileri minimize etmek, doğal kaynakları korumak ve sürdürülebilir bir ulaşım sistemine katkıda bulunmaktır. Yeşil araç rotalama problemlerinin tanımlanması ve sıralanması, çevre dostu taşıma yöntemlerinin benimsenmesini teşvik ederken çevresel etkilerin azaltılmasına ve sürdürülebilir bir ulaşım sistemine geçişin hızlanmasına yardımcı olur. Bu nedenle, çalışma kapsamında yeşil araç rotalama problemleri, literatür taraması ve uzman görüşleri doğrultusunda tanımlanmıştır.

Enerjiyi Minimize Eden Araç Rotalama Problemi (A1): Bu problemde, enerji tüketiminin minimize edilmesi, çevresel etkilerin azaltılması ve işletme maliyetlerinin optimize edilmesi amaçlanmaktadır. Rotalar planlanırken yolun eğimi, trafik koşulları ve seyahat hızı gibi enerji verimliliğini etkileyecek parametreler göz önünde bulundurulur. Amaç fonksiyonunda kullanılmak üzere araçların ağırlığı, seyahat süresi ve taşıma kapasiteleri gibi faktörler

kısıt olarak alınabilir [36]. Genellikle matematiksel optimizasyon yöntemleri veya meta sezgisel algoritmalar kullanılarak, verilen kısıtlar altında en iyi çözüm bulunmaya çalışılır.

Düşük Emisyonlu Araç Rotalama Problemi (A2): Bu problem fosil yakıtlı araçların yerine düşük emisyonlu araçların tercih edilmesini sağlayarak, karbon emisyonları ve çevresel kirliliğin azaltılmasını hedeflemektedir. Düşük emisyonlu araç rotalama probleminin çözümü için marka, model, motor yapısı, yakıt tüketimi, araçların emisyon düzeyleri gibi araç türü kısıtları amaç fonksiyonu içerisinde yer almalıdır [9]. Bu rotalama problemi, hidrojen yakıt hücresi ve doğalgaz gibi az karbon emisyonu üreten, aynı zamanda azot oksit (NOx) ve partikül madde emisyonlarını azaltan araçlar için ihtiyaç duydukları altyapıya göre optimum bir ortalama çözümü sağlamaktadır.

Elektrikli Araç Rotalama Problemi (A3): Bu problemde belirli sayıda elektrikli araçla belirli sayıda müşteriyi ziyaret ederek hizmet taleplerini karşılayan en uygun rotaların belirlenmesi amaçlanır. Problemin çözümü için araç rotalarının optimize edilmesi, şarj istasyonlarının stratejik bir şekilde yerleştirilmesi ve seyahat zamanlarının optimize edilmesi yer alabilir [13]. Bununla birlikte, amaç fonksiyonunda kullanılması gereken kısıtlar arasında, elektrikli araçların menzil sınırlamaları, şarj süreleri, şarj istasyonlarının kapasiteleri, müşteri ziyaret zamanları ve rota uzunlukları gibi faktörler dikkate alınır.

Toplu Taşıma Entegrasyonlu Rotalama Problemi (A4): Bu problemde hem bireysel araç rotaları hem

de toplu taşıma rotaları bir arada ele alınarak çevresel etkilerin azaltılması ve toplu taşıma sistemlerinin verimliliğinin artırılması hedeflenmektedir. Problemin çözümü için bireysel araç rotalarının toplu taşıma hatlarıyla senkronize edilmesi, yolcuların transfer noktalarında kolaylıkla geçiş yapabilmesi için uygun transfer noktalarının belirlenmesi ve araç rotalarının toplu taşıma rotalarıyla entegrasyonunu sağlayacak bütünlük bir rota planlama stratejisinin geliştirilmesi yer alabilir.

Yeşil Bölge Rotalama Problemi (A5): Bu problemde çevresel etkilerin azaltılması ve yeşil altyapının korunması gözetilerek, belirli sayıda araçla yeşil bölgeler arasında en verimli rotaların belirlenmesi hedeflenir. Problemin çözümü için, yeşil alanlara erişimi en iyi şekilde sağlayacak rota planlarının tasarlanması ve yeşil altyapıya sahip bölgelerde araç trafiğinin minimize edilmesi yer alabilir. Yeşil alanlardan geçen rotalar, karbon emisyonlarını azaltarak hava kalitesini iyileştirir ve çevresel etkileri minimize eder. Ayrıca, yeşil alanlara yönlendirme ile şehir içi ulaşım daha akıcı hale getirilerek trafik kazaları ve gecikmeler azaltılabilir.

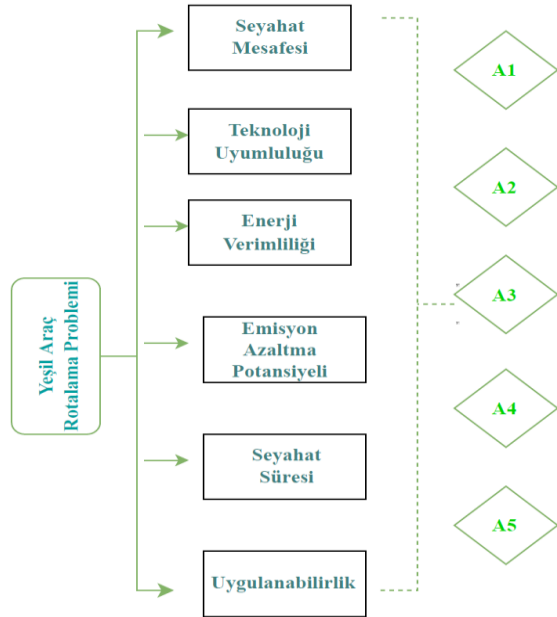
Yeşil araç rotalama problemleri ilk defa bu çalışma kapsamında ortaya çıkartılmıştır. Rotalama problemlerinin değerlendirilmesi ve önerdiğimiz metod ile sıralanması için yazın taraması yapılmış ve değerlendirme ölçütleri Tablo 2’de gösterildiği şekilde belirlenmiştir.

Tablo 2. Değerlendirme ölçütleri ve açıklamaları (Evaluation criteria and descriptions)

Ölçütler	Açıklamalar	Referanslar
Seyahat Mesafesi (K1)	Rotalama planının, toplam seyahat mesafesini minimize etmesi, yakıt tüketimini azaltması ve operasyonel maliyetleri düşürmesi değerlendirir.	Sarkar ve Biswas [28]; Psychas vd. [12]
Teknoloji Uyumluluğu (K2)	Yeşil araç rotalama problemlerinde kullanılan teknolojik çözümlerin mevcut altyapı ve araç teknolojileri ile uyumlu olma derecesini değerlendirir. Mevcut teknolojiye uyumlu olan rotalama planları, çevresel etkinin artırılmasında önemli bir rol oynamaktadır.	Moghdani vd. [36]
Enerji Verimliliği (K3)	Yeşil araç rotalama problemlerinde kullanılan araçların ve rotaların enerji tüketimini minimize etme kabiliyetini değerlendirir.	Psychas vd. [12]; Desaulniers vd. [13]

Emisyon Azaltma Potansiyeli (K4)	Düşük emisyonlu araçların tercih edilmesi ve emisyonların minimize edilmesi yoluyla çevresel sürdürülebilirliğin artırılma potansiyelini değerlendirir.	Bektaş ve Laporte [9]
Seyahat süresi (K5)	Optimal rotaları belirleyen ve mümkün olduğunca kısa seyahat sürelerini sağlayan rotalama problemleri değerlendirilir.	Lou vd. [16]; Desaulniers vd. [13]
Uygulanabilirlik (K6)	Rotalama problemlerinin gerçek dünya koşullarına uygunluğu, pratikte uygulanabilir olup olmadığı, operasyonel gereksinimlere ve kısıtlara ne kadar uygun olduğu değerlendirilir.	Moghdani vd. [19]

Yeşil araç rotalama problemi için değerlendirme kriterleri ve alternatifler belirlendikten sonra hiyerarşik yapının gösterilmesi için hiyerarşi ağacı oluşturulur. Hiyerarşi ağacı, bir karar verme sürecindeki karmaşıklığı azaltmak ve alternatiflerin değerlendirilmesini yapılandırmak için kullanılan bir araçtır. Şekil 2’de yeşil araç rotalama problemi için oluşturulmuş hiyerarşi ağacı görülmektedir.



Şekil 2. Yeşil araç rotalama problemi için hiyerarşik ağacı (Hierarchy tree for the green vehicle routing problem)

3.1. UYGULAMA (APPLICATION)

Yeşil araç rotalama problemlerinin değerlendirilebilmesi için, çalışma kapsamında entegre Pisagor bulanık AHP ve EDAS yöntemleri kullanılacaktır. İlk aşamada değerlendirme ölçütleri Pisagor bulanık AHP yöntemiyle sıralanacak, bunun için Tablo 3’de yer alan dilsel terimlerden yararlanılmaktadır.

Tablo 3. Pisagor bulanık sayılar ve dilsel terimler (Pythagorean fuzzy numbers and linguistic terms)

Dilsel Terimler	Aralıklı Pisagor Bulanık Sayılar			
Kesin Düşük Önem (KD)	0	0	0,9	1
Çok Düşük Önem (ÇD)	0,1	0,2	0,8	0,9
Düşük Önem (D)	0,2	0,35	0,65	0,8
Ortalama Altı Önem (OA)	0,35	0,45	0,55	0,65
Ortalama Önem (O)	0,45	0,55	0,45	0,55
Eşit Önem (E)	0,5	0,5	0,5	0,5
Ortalama Üstü Önem (OÜ)	0,55	0,65	0,35	0,45
Yüksek Önem (Y)	0,65	0,8	0,2	0,35
Çok Yüksek Önem (ÇY)	0,8	0,9	0,1	0,2
Kesin Yüksek Önem (KY)	0,9	1	0	0

Ulaştırma alanında çalışan akademisyen ile ulaştırma sektöründe çalışanlardan oluşan karar verme ekibi Tablo 3’de yer alan dilsel terimlerden yararlanarak Tablo 2’de bulunan ölçütleri değerlendirmişlerdir. Ölçütlerin karar vericiler tarafından değerlendirildiği ikili karşılaştırma matrisi Tablo 4’te gösterilmiştir. Sonraki adıma geçmeden önce, Denklem 17 yardımıyla ikili karşılaştırma matrisinin tutarlılık oranı hesaplanmış ve 0,05 değeri bulunmuştur. Bu değer eşik değer olan 0,1 değerinden küçük olmasından dolayı ikili karşılaştırma matrisinin tutarlı olduğu sonucuna ulaşılmaktadır.

Tablo 4. Ölçütlerin dilsel ifadelerle değerlendirilmesi (Evaluation of criteria with linguistic terms)

	Seyahat Mesafesi (K1)	Teknoloji Uyumluluğu (K2)	Enerji Verimliliği (K3)	Emisyon Azaltma Potansiyeli (K4)	Seyahat süresi (K5)	Uygulanabilirlik (K6)
Seyahat Mesafesi (K1)	E	Y	Y	OA	O	Y
Teknoloji Uyumluluğu (K2)	D	E	D	ÇD	D	D
Enerji Verimliliği (K3)	D	Y	E	D	D	OA
Emisyon Azaltma Potansiyeli (K4)	OÜ	ÇY	Y	E	OÜ	Y
Seyahat süresi (K5)	O	Y	Y	OA	E	Y
Uygulanabilirlik (K6)	D	Y	OÜ	D	D	E

Şekil 1’de gösterilen akış şemasında bulunan tüm adımlar takip edilmiş, Denklem 10 ve Denklem 15 arasındaki eşitlikler kullanılarak fark matrisleri,

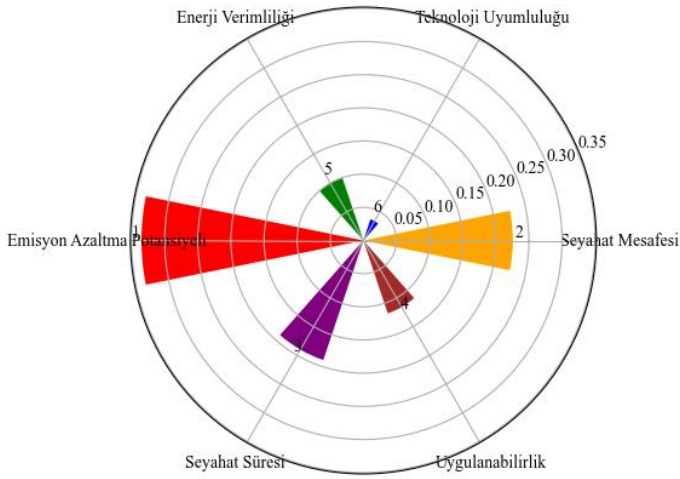
işsel çarpım matrisi, belirlilik değeri ve ağırlık matrisi bulunmuştur. Denklem 15 yardımıyla bulunan ağırlık matrisi Tablo 5’te gösterilmektedir.

Tablo 5. Ölçütlere ait ağırlık matrisi (Weight matrix for the criteria)

	Seyahat Mesafesi (K1)	Teknoloji Uyumluluğu (K2)	Enerji Verimliliği (K3)	Emisyon Azaltma Potansiyeli (K4)	Seyahat süresi (K5)	Uygulanabilirlik (K6)
Seyahat Mesafesi (K1)	1,000	4,654	4,654	0,553	1,060	4,654
Teknoloji Uyumluluğu (K2)	0,273	1,000	0,273	0,108	0,553	0,273
Enerji Verimliliği (K3)	0,273	4,654	1,000	0,273	0,553	0,553
Emisyon Azaltma Potansiyeli (K4)	2,031	10,231	4,654	1,000	2,031	4,654
Seyahat süresi (K5)	1,060	4,654	4,654	0,553	1,000	2,031
Uygulanabilirlik (K6)	0,273	4,654	2,031	0,273	0,730	1,000

Denklem 16 kullanılarak hesaplanan ölçütlere ait ağırlıklar Şekil 3’de gösterilmektedir. Yeşil araç rotalama problemlerini değerlendirmek için kullanılacak ölçütler, Pisagor bulanık AHP yöntemi uygulanarak ağırlıklandırılmıştır. Buna göre, “Emisyon Azaltma Potansiyeli (K4)” ölçütü 0,335

ağırlığı ile birinci sırada yer alırken; “Seyahat Mesafesi (K1)” ölçütü 0,226 değeri ile ikinci sırada, “Seyahat süresi (K5)” ölçütü 0,190 ağırlığıyla üçüncü sırada yer almaktadır. Bununla birlikte, “Teknoloji Uyumluluğu (K2)” ölçütü 0,034 değeri ile son sırada yer aldığı görülmektedir.



Şekil 3. Pisagor bulanık AHP sonucu ölçütlere ait ağırlıklar (Criteria weights obtained from Pythagorean fuzzy AHP)

Yeşil araç rotalama problemi için değerlendirme ölçütlerinin Pisagor bulanık AHP yöntemiyle ağırlıklandırılması ile ilk aşama tamamlanmıştır. İkinci aşamada EDAS yöntemi kullanılarak yeşil araç rotalama problemleri önceliklendirilecektir. Bunun için ilk aşamada elde edilen ölçütlere ait ağırlık değerleri kullanılmaktadır. Değerlendirme ölçütlerinden “seyahat mesafesi” ve “seyahat süresi” maliyet türünden ölçütler iken; “teknoloji uyumluluğu”, “enerji verimliliği” ve “uygulanabilirlik” fayda türünden ölçütlerdir. Karar verme ekibi, yeşil araç rotalama problemlerini ölçütlere göre değerlendirmiş ve bu değerlendirmeyi 1 ile 5 arasında puanlayarak uygulamışlardır. Tablo 6’da yer alan karar matrisinde, Denklem 19 yardımıyla elde edilen ortalama çözüm (AV) ve ölçütlere ait ağırlıklar gösterilmiştir.

Tablo 6. Karar matrisi ve ortalama çözüm (Decision matrix and average solution)

Ağırlıklar	0,226	0,034	0,100	0,335	0,190	0,116
Yeşil Araç Rotalama Problemi/Ölçütler	Seyahat Mesafesi (K1)	Teknoloji Uyumluluğu (K2)	Enerji Verimliliği (K3)	Emisyon Azaltma Potansiyeli (K4)	Seyahat süresi (K5)	Uygulanabilirlik (K6)
Enerjiyi Minimize Eden Araç Rotalama Problemi (A1):	4	3	5	4	4	4
Düşük Emisyonlu Araç Rotalama Problemi (A2):	3	4	4	5	3	4
Elektrikli Araç Rotalama Problemi (A3):	4	5	5	5	5	3
Toplu Taşıma Entegrasyonlu Rotalama Problemi (A4):	3	5	4	5	4	3
Yeşil Bölge Rotalama Problemi (A5):	5	4	3	3	5	3
<i>Ortalama Çözüm (AV)</i>	3.8	4.2	4.2	4.4	4.2	3.4

Tüm ölçütler için, ölçüt türüne bağlı olarak, ortalamadan pozitif mesafe (PDA) ve ortalamadan negatif mesafe (NDA) değerleri Denklem 20 ve

Denklem 23 arasındaki tüm eşitlikler kullanılarak hesaplanmıştır. Tablo 7’de, yeşil araç rotalama problemlerine ait PDA ve NDA değerleri gösterilmektedir.

Tablo 7. Yeşil araç rotalama problemlerine ait PDA ve NDA değerlerini (PDA and NDA values of green vehicle routing problems)

Alternatifler	Seyahat Mesafesi (K1)		Teknoloji Uyumluluğu (K2)		Enerji Verimliliği (K3)		Emisyon Azaltma Potansiyeli (K4)		Seyahat süresi (K5)		Uygulanabilirlik (K6)	
	PDA	NDA	PDA	NDA	PDA	NDA	PDA	NDA	PDA	NDA	PDA	NDA
Enerjiyi Minimize Eden Araç	0,000	0,053	0,000	0,286	0,190	0,000	0,000	0,091	0,048	0,000	0,176	0,000

Rotalama Problemi (A1):												
Düşük Emisyonlu Araç Rotalama Problemi (A2):	0,211	0,000	0,000	0,048	0,000	0,048	0,136	0,000	0,286	0,000	0,176	0,000
Elektrikli Araç Rotalama Problemi (A3):	0,000	0,053	0,190	0,000	0,190	0,000	0,136	0,000	0,000	0,190	0,000	0,118
Toplu Taşıma Entegrasyonlu Rotalama Problemi (A4):	0,211	0,000	0,190	0,000	0,000	0,048	0,136	0,000	0,048	0,000	0,000	0,118
Yeşil Bölge Rotalama Problemi (A5):	0,000	0,316	0,000	0,048	0,000	0,286	0,000	0,318	0,000	0,190	0,000	0,118

SP_i ve SN_i olarak adlandırılan ağırlıklı toplam PDA ve NDA değerleri Denklem 24 ve Denklem 25 kullanılarak, ardından NSP ve NSN değerleri Denklem 26 ve Denklem 27 yardımıyla hesaplanmıştır. Değerlendirme puanı (AS), Denklem 28 yardımıyla hesaplanır ve elde edilen

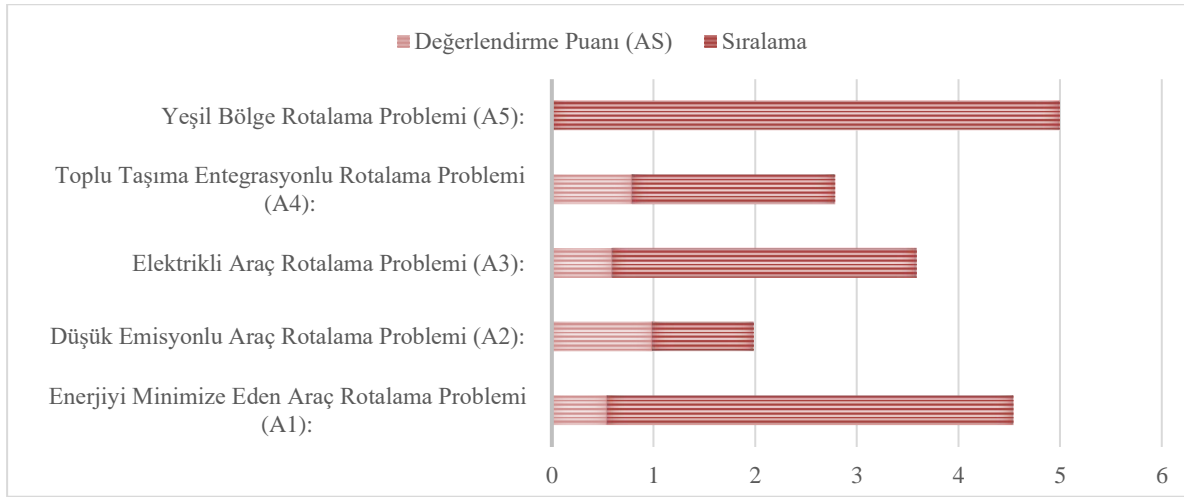
sonuçlara göre yeşil araç rotalama problemleri sıralanır. Pisagor bulanık AHP yönteminden elde edilen ölçüt ağırlıkları kullanılarak hesaplanan EDAS yöntemine ait sonuçlar Tablo 8’de gösterilmiştir.

Tablo 8. EDAS yöntemi sonuçları (EDAS method results)

Yeşil Araç Rotalama Poblemleri	SP	SN	NSP	NSN	Değerlendirme Puanı (AS)	Sıralama
Enerjiyi Minimize Eden Araç Rotalama Problemi (A1):	0,048	0,052	0,288	0,798	0,543	4
Düşük Emisyonlu Araç Rotalama Problemi (A2):	0,168	0,006	1,000	0,975	0,988	1
Elektrikli Araç Rotalama Problemi (A3):	0,071	0,062	0,423	0,761	0,592	3
Toplu Taşıma Entegrasyonlu Rotalama Problemi (A4):	0,109	0,018	0,647	0,929	0,788	2
Yeşil Bölge Rotalama Problemi (A5):	0,000	0,258	0,000	0,000	0,000	5

Şekil 4, EDAS yöntemi sonucunda elde edilen değerlendirme puanını ve yeşil araç rotalama problemlerinin sıralamasını göstermektedir. Entegre Pisagor bulanık AHP ve EDAS yöntemleri sonucunda, “Düşük Emisyonlu Araç Rotalama Problemi” birinci sırada yer alırken, “Toplu Taşıma

Entegrasyonlu Rotalama Problemi” ikinci sırada yer aldığı görülmektedir. Ardından sırasıyla, “Elektrikli Araç Rotalama Problemi”, “Enerjiyi Minimize Eden Araç Rotalama Problemi” ve “Yeşil Bölge Rotalama Problemi” önceliklendirilmiştir.



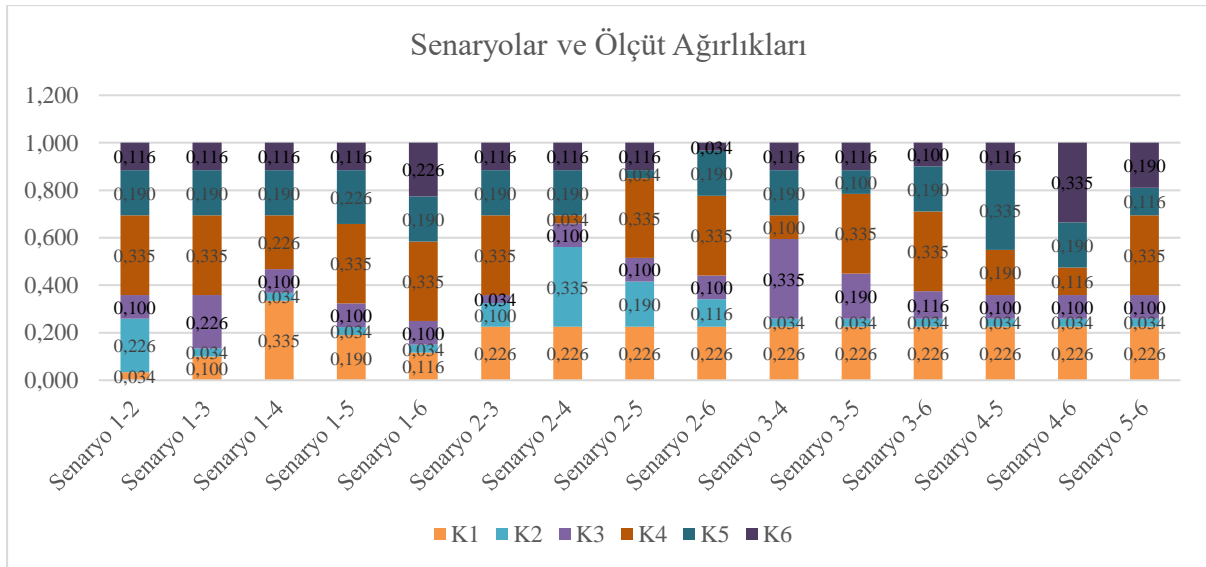
Şekil 4. EDAS sonucu değerlendirme puanı (AS) ve sıralama (Appraisal score and ranking)

3.2. DUYARLILIK ANALİZİ (SENSITIVITY ANALYSIS)

Duyarlılık analizi, farklı ölçüt ağırlıkları altında karar verme probleminin nasıl etkilendiğini belirlemek için kullanılmaktadır. Karar vericiler, ölçütlere ait ağırlıkların değişimleriyle karar verme sürecinin nasıl değiştiğini bu analiz ile gözlemleyebilmektedir. Bununla birlikte, karar verme problemi için önerilen yöntemin, ölçüt ağırlıklarındaki değişikliklere karşı ne kadar duyarlı olduğunu veya olmadığını göstermesine yardımcı olmaktadır. Kriter ağırlıklarında yapılan herhangi bir değişiklik, ölçütlerin sıralama düzeninde değişikliğe yol açtığında, sonucun duyarlı olduğu kabul edilmektedir.

gerçekleştirilmiştir. Bu analizde, ölçütlere ait ağırlıklar birbirleriyle değiştirilerek entegre Pisagor bulanık AHP-EDAS sonuçları her senaryo için yeniden hesaplanmıştır. Örneğin, Senaryo 1-2’de birinci kriter ağırlık değeri ile ikinci kriter ağırlık değeri yer değiştirilmiştir. Benzer şekilde, Senaryo 2-3’te ise ikinci ölçüte ait ağırlık değeri ile üçüncü ölçüte ait ağırlık değeri yer değiştirilmiştir. Her bir senaryo için, yer değiştirilen ağırlık değerleri kullanılarak EDAS yöntemi tekrar uygulanmıştır. Ölçüt ağırlıklarının değiştirilmesiyle elde edilen 15 farklı senaryoda bulunan her bir kriter ağırlık değeri Şekil 5’te gösterilmiştir.

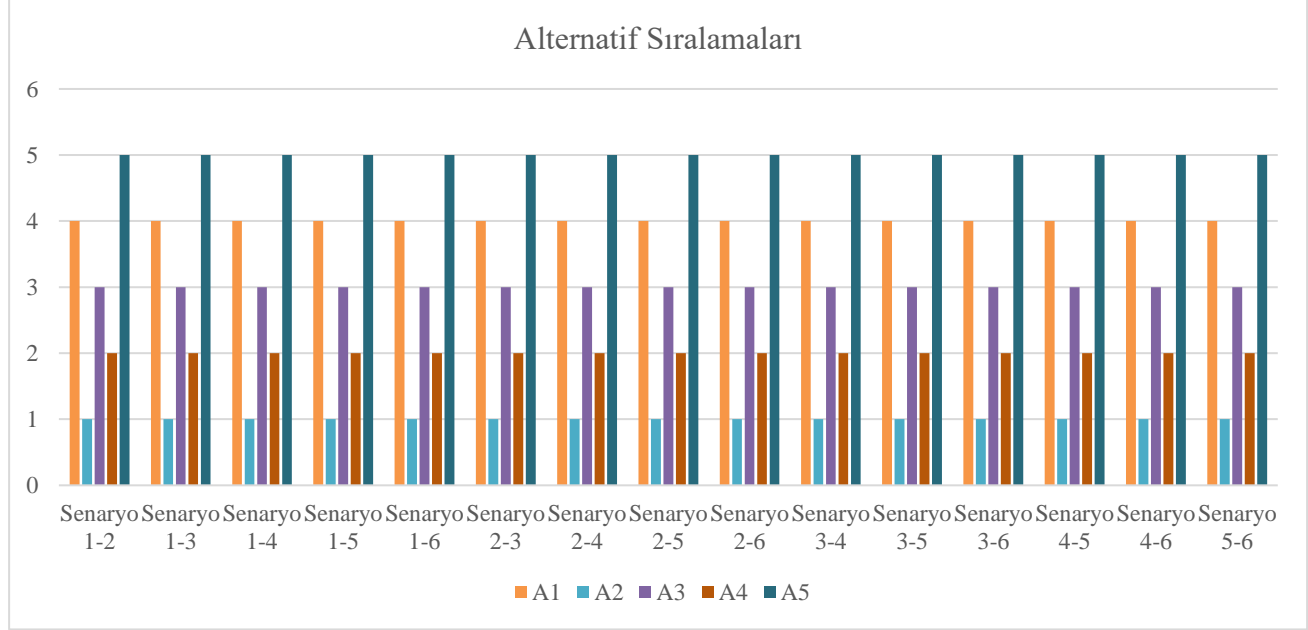
Yeşil araç rotalama problemi için önerdiğimiz entegre Pisagor bulanık AHP ve EDAS yöntemi kapsamında bir duyarlılık analizi



Şekil 5. On beş farklı senaryoda yer alan ölçütlere ait ağırlıklar (Weights of criteria in 15 different scenarios)

Duyarlılık analizi kapsamında 15 farklı senaryo uygulanmış ve yeşil araç rotalama problemlerinin bu senaryolar altında sıralama değişimleri gözlemlenmiştir. Tüm kriter ağırlıkları 15 senaryonun her birinde değişiklik göstermesine karşın yeşil araç rotalama problemlerinin sıralamasında herhangi bir değişiklik olmadığı

gözlemlenmiştir. Şekil 6'da duyarlılık analizi sonucunda, yeşil araç rotalama problemlerinin aldığı sıralamalar gösterilmektedir. Analiz sonucunda, "Düşük Emisyonlu Araç Rotalama Problemi (A2)" ilk sırada yer alırken, "Yeşil Bölge Rotalama Problemi (A5)" son sırada yer aldığı anlaşılmaktadır.



Şekil 6. Duyarlılık analizi sonuçları (Sensitivity analysis results)

3.3. TARTIŞMA (DISCUSSION)

Çevresel kaygıların ve sürdürülebilirlik hedeflerinin öne çıktığı bir dönemde, bu çalışmanın bulguları büyük önem taşımaktadır. Çalışma kapsamında önerilen alternatifler, kriterler ve yöntemlerle yeşil araç rotalama problemleri çözülmekte, daha çevre dostu ve enerji bakımından daha verimli rotalar belirlenerek, emisyon azaltımı ve kaynakların daha etkin kullanımı gibi sürdürülebilirlik hedeflerine katkı sağlanmaktadır.

Yeşil araç rotalama problemleri entegre Pisagor bulanık AHP ve EDAS yöntemi uygulanarak önceliklendirilmiş ve "Düşük Emisyonlu Araç Rotalama Problemi" birinci sırada yer almıştır. Hidrojen yakıt hücresi ve doğalgaz gibi az karbon emisyonu üreten aynı zamanda azot oksit (NOx) ve partikül madde emisyonlarını azaltan araçlar, içten yanmalı motorlu araçlara kıyasla daha az emisyon yaymaktadır. Literatürde bulunan bazı çalışmalar bu bulguyu destekler niteliktedir. Ashtineh ve Pishvae [14], alternatif-yakıtlı araç rotalama problemlerinin çevresel performansını değerlendirerek, biyodizel kullanımı ile sera gazı emisyonlarında %37'lik bir azalma sağlanabileceğini ortaya koymuşlardır. Benzer şekilde, Adiba vd. [11], klasik kapasiteli araç rotalama problemini CO₂ emisyonlarını minimize

edecek şekilde ele alarak, sera gazı emisyonlarının azaltılmasının çevre üzerindeki olumsuz etkileri azaltmada önemli olduğunu vurgulamışlardır. Bu problem ile düşük emisyonlu araç kullanımı teşvik edilebilir. Düşük emisyonlu araç kullanımının desteklenmesi için ayrıca vergi indirimleri ve sınırlamalar gibi politika önlemleri getirilebilir. Karar vericiler, düşük emisyonlu araç rotalama problemlerine odaklanarak, karbon ayak izini azaltma, hava kirliliğini ve çevresel etkileri minimize etme konusunda daha etkili politikalar ve stratejiler geliştirebilirler.

Önerilen metodun uygulanması sonucunda "Toplu Taşıma Entegrasyonlu Rotalama Problemi" ikinci sırada yer almıştır. Toplu taşıma sistemleri entegrasyonunun karmaşık bir planlama ve optimizasyon süreci gerektirmesi ve buna bağlı hesaplama zorlukları sebebiyle ikinci sırada yer aldığı görülmektedir. Belediye yöneticileri ve yerel yönetimler bu problemin çözümüne odaklanıp aktarma sürelerini minimuma indirip seyahat sürelerini optimize ederek sürdürülebilir ulaşım stratejileri geliştirebilirler. Yazın taramasında yer alan güncel çalışmalar toplu taşıma entegrasyonlu rotalama probleminin sürdürülebilir ulaşım üzerindeki olumlu etkileri vurgulanmıştır. Polimeni ve Vitetta [37], toplu taşıma sistemlerinin

entegrasyonunu içeren karmaşık planlama ve optimizasyon süreçleri için entegre bir yaklaşım önermiştir. Bu çalışma, ağ tasarımı ve araç rotalama süreçlerinin bir arada ele alınmasıyla, şehir içi ulaşım maliyetlerinin ve ağ üzerindeki tıkanıklıkların azaltılabileceğini ortaya koymaktadır. Schmidt [38] ise toplu taşıma ağında yolcu verilerinin planlama sürecine entegre edilmesinin, yolcuların toplam seyahat süresini minimize ederek toplu taşıma sistemlerinin optimizasyonunda önemli bir rol oynadığını göstermiştir.

"Elektrikli Araç Rotalama Problemi" ise, modelleme sonucunda üçüncü sırada yer aldığı görülmektedir. Mevcut altyapı eksikliği, teknolojik kısıtlamalar ve henüz elektrikli araçların geniş çapta kullanılmaya başlanmaması gibi sebepler, bu problemin üçüncü sırada yer almasını sağlamıştır. Bu problemin üst sıralarda yer alması, karar vericilere elektrikli araçlar ve şarj altyapısı için yatırım yapmanın sürdürülebilir ulaşım ve çevresel koruma hedeflerine ulaşmada etkili bir strateji olabileceğini göstermektedir. Desaulniers vd. [13], elektrikli araç rotalama probleminin mevcut altyapı ve teknolojik kısıtlamalar nedeniyle karmaşık bir süreç olduğunu, ancak rotalama maliyetlerini ve kullanılan araç sayısını azaltmak için çoklu ve kısmi şarj imkânlarının etkili stratejiler olabileceğini vurgulamıştır. Amiri vd. [15], elektrikli araçların şarj altyapısının iyileştirilmesiyle taşıma maliyetlerinin %5 oranında düşürülebileceğini ve sera gazı emisyonlarının %18 oranında azaltılabileceğini göstererek, elektrikli araç rotalama probleminin önemini vurgulamaktadır.

Bu çalışmada, Pisagor bulanık AHP yöntemi kullanılarak, yeşil araç rotalama problemlerini değerlendirmek amacıyla kullanılan ölçütler ağırlıklandırılmıştır. Modelleme sonucunda ilk üç sırada sırasıyla "Emisyon Azaltma Potansiyeli" ölçütü, "Seyahat Mesafesi" ölçütü ve "Seyahat Süresi" ölçütü yer almaktadır. "Emisyon Azaltma Potansiyeli" ölçütü, yeşil araç rotalama problemlerinde en önemli hedeflerden biri olan çevresel etkinin ölçümünü sağlamaktadır. Bu nedenle, bu ölçütün en yüksek ağırlığa sahip olması beklenir. Psychas vd. [12], araç rotalama problemlerinde "seyahat süresi", "seyahat mesafesi" ve "yakıt tüketimi" gibi ölçütlerin, taşıma süreçlerinde zaman ve maliyet optimizasyonu açısından kritik öneme sahip olduğunu vurgulamaktadır. Benzer şekilde, Bektaş ve Laporte [9], araç rotalama problemlerinde emisyon azaltma potansiyelinin, taşıma maliyetleri ve çevresel etkiler üzerinde önemli bir rol oynadığını ve bu faktörlerin değerlendirilmesinin çevre dostu stratejilerin

geliştirilmesinde kritik olduğunu ortaya koymaktadır. "Seyahat Mesafesi" ve "Seyahat Süresi" ise operasyonel etkinlik ve maliyet açısından önemli olmakla birlikte, doğrudan çevresel etkiye odaklanan "Emisyon Azaltma Potansiyeli" ölçütü kadar belirleyici olmayabilir. "Seyahat Mesafesi" ve "Seyahat Süresi" ölçütleri, "Emisyon Azaltma Potansiyeli" ölçütünün gerisinde kalmasına karşın; sürdürülebilirlik, maliyet etkinliği ve hizmet kalitesi gibi farklı perspektifleri temsil etmesi açısından önemini korumaktadır.

Bu çalışma kapsamında belirlenen ölçütler ile yeşil araç rotalama problemlerinin nasıl değerlendirileceği konusu aydınlatılmaya çalışılmıştır. Bununla birlikte, yeşil araç rotalama problemlerinin ortaya çıkarılması, enerji verimliliğini artırmak, emisyonları azaltmak ve operasyonel maliyetleri düşürmek gibi hedeflere daha etkili bir şekilde ulaşılmasına olanak tanımaktadır. Önceliklendirilen yeşil araç rotalama problemleri, uzun vadeli sürdürülebilirlik hedeflerine önemli katkılarda bulunurken, düşük emisyonlu araçların kullanımı veya daha etkili rota planlaması gibi önlemlerle operasyonel maliyetleri düşürebilir ve teslimat sürelerini optimize edebilmektedir.

4. SONUÇ (CONCLUSION)

Yeşil araç rotalama problemleri, karbon emisyonlarının azaltılması, hava kalitesinin artırılması ve sürdürülebilir ulaşım sistemleri açısından büyük önem taşımaktadır. Yapılan yazın taraması, yeşil araç rotalama problemlerini kapsayan ve tüm kısıtları içeren bir çalışmanın mevcut olmadığını, ayrıca bu problemlerin ÇKKV yöntemleriyle modellenmesine dair literatürde eksiklikler olduğunu ortaya koymaktadır. Bu durum, çalışmanın temel motivasyonunu oluşturmaktadır.

Ulaşım sektörü çalışanları ile akademisyenlerin görüşü ve yapılan literatür taraması sonucunda 6 farklı değerlendirme ölçütü ve 5 yeşil araç rotalama problemi ortaya çıkartılmıştır. Pisagor bulanık AHP yöntemi kullanılarak değerlendirme ölçütlerinin ağırlıkları belirlendikten sonra, yeşil araç rotalama problemleri EDAS yöntemiyle önceliklendirilmiştir. Bununla birlikte, farklı ölçüt ağırlıkları altında karar verme probleminin nasıl etkilendiğini belirlemek amacıyla duyarlılık analizi gerçekleştirilmiş ve önerilen metodun duyarlılığı 15 farklı senaryo üzerinde test edilmiştir.

Çalışmanın bulguları, yönetimsel ve pratik anlamda önemli katkılar sunmaktadır. Düşük emisyonlu araç

rotalama probleminin ilk sırada yer alması, şirketlerin karbon emisyonlarını azaltarak çevresel sorumluluklarını yerine getirmelerine ve yasal düzenlemelere uyum sağlamalarına yardımcı olacağı düşünülmektedir. Düşük emisyonlu araçların entegrasyonu, uzun vadeli sürdürülebilirlik stratejilerinin temel bir bileşeni olarak değerlendirilebilir ve bu da gelecekteki çevresel düzenlemelere ve toplumsal beklentilere karşı hazırlıklı olmayı sağlayacaktır. Araçların emisyon düzeylerine göre optimize edilen rotalama çözümleri, gerekli altyapı yatırımlarını belirleyerek, hidrojen yakıt hücresi ve doğalgazlı araçlar için gerekli olan şarj istasyonları ve bakım merkezlerinin planlanmasına yardımcı olacaktır.

Toplu taşıma entegrasyonlu rotalama probleminin ikinci sırada yer alması, sürdürülebilir ulaşım stratejilerinin geliştirilmesinde önemli bir adım olarak değerlendirilmektedir. Bu bulgu, toplu taşıma sistemlerinin bireysel araç rotalarıyla uyumlu bir şekilde entegrasyonunu vurgulamaktadır. Yönetimsel olarak, belediye yöneticileri ve yerel yönetimler, aktarma sürelerini azaltarak ve seyahat sürelerini optimize ederek toplu taşıma sistemlerinin verimliliğini artırabilirler. Ayrıca, uygun transfer noktalarının belirlenmesi ve araç rotalarının toplu taşıma hatlarıyla senkronize edilmesi, yolcuların toplu taşıma sistemini daha etkin bir şekilde kullanmalarını sağlayacaktır. Pratik açıdan, bu entegrasyon yolcu memnuniyetini artırabilir ve toplu taşıma sistemlerinin daha tercih edilebilir hale gelmesine katkıda bulunabilir. Bunun yanı sıra, toplu taşıma sistemlerinin etkin yönetimi, trafik sıkışıklığını azaltarak çevresel etkilerin minimize edilmesine yardımcı olacaktır.

Elektrikli araç rotalama probleminin üçüncü sırada yer alması, elektrikli araçların ve şarj altyapısının geliştirilmesinin sürdürülebilir ulaşım stratejileri açısından önemini ortaya koymaktadır. Yönetimsel olarak, bu bulgu karar vericilere ve endüstri profesyonellerine, elektrikli araçlar ve şarj altyapısına yapılacak yatırımların çevresel koruma hedeflerine ulaşmada etkili bir strateji olabileceğini göstermektedir. Elektrikli araç rotalama probleminin çözümü, araç rotalarının optimize edilmesi, şarj istasyonlarının stratejik olarak yerleştirilmesi ve seyahat sürelerinin minimize edilmesi gerekliliğini vurgulamaktadır. Bu, aynı zamanda mevcut altyapının geliştirilmesi, teknolojik yeniliklerin benimsenmesi ve geniş çapta elektrikli araç kullanımının teşvik edilmesi gibi pratik uygulamaları desteklemektedir. Dolayısıyla, bu bulgu, elektrikli araçların daha etkin kullanımı ve şarj altyapısının iyileştirilmesi yoluyla operasyonel

verimliliğin artırılmasına ve çevresel etkilerin azaltılmasına katkıda bulunacaktır.

Yeşil araç rotalama problemlerini değerlendirmek için "Emisyon Azaltma Potansiyeli", "Seyahat Mesafesi" ve "Seyahat Süresi" ölçütleri ilk sıralarda yer almaktadır. Yönetimsel açıdan, "Emisyon Azaltma Potansiyeli" ölçütünün en yüksek ağırlığa sahip olması, çevresel etkilerin öncelikli olarak ele alınması gerektiğini vurgulamaktadır. Bu, karar vericilere yeşil araç rotalama stratejilerinde çevresel performansın öncelikli hedef olarak belirlenmesi gerektiğini göstermektedir. Ayrıca, "Seyahat Mesafesi" ve "Seyahat Süresi" ölçütlerinin de dikkate alınması, operasyonel verimlilik ve maliyet yönetimi açısından önemlidir. Bu ölçütler, araç rotalarının planlanmasında sürdürülebilirlik ve hizmet kalitesini artırma hedefleri doğrultusunda dengeli bir yaklaşım sağlayacaktır. Pratikte, bu sıralama, yeşil araç rotalama stratejilerinin uygulanması sırasında hangi kriterlerin öncelikli olarak değerlendirileceği konusunda net bir rehber sunacak, böylece operasyonel süreçlerin ve maliyetlerin optimize edilmesine yardımcı olacaktır.

Bu çalışma, çeşitli yeşil araç rotalama senaryolarının incelenmesini sağlarken, endüstriyel profesyonellere ve lojistik yöneticilere maliyet-etkin ve çevre dostu çözümler sunmaktadır. Ayrıca, yeşil araç rotalama problemlerinin tanımlanması, enerji verimliliğinin artırılması ve operasyonel maliyetlerin düşürülmesi gibi sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmada önemli bir adım olarak öne çıkmaktadır. Çalışma kapsamında ortaya çıkartılan yeşil araç rotalama problemleri, verilen kısıtları göz önüne alarak bir optimizasyon problemine dönüştürülüp, gelecek çalışmalarda kullanılabilir.

Bu çalışmanın kısıtlılıkları, güvenilirliğini ve uygulanabilirliğini artırmak için dikkate alınması gereken önemli noktalar. İlk olarak, çalışma kapsamında tercih edilen kriterler arasındaki etkileşim dikkate alınmamıştır. Gerçek dünyadaki karar verme süreçlerinde, kriterler genellikle birbirleriyle bağımlıdır ve bu bağımlılıklar sıralama sonuçlarını önemli ölçüde etkileyebilir. Ayrıca, kriterlerin ağırlıklandırılması ve yeşil araç rotalama problemlerinin değerlendirilmesi için sınırlı sayıda uzmana danışılmıştır. Karar verici sayısının artırılması, özellikle farklı bölümlerden uzman ve akademisyenlerin dâhil edilmesi, değerlendirme sürecinin daha kapsamlı olmasına katkı sağlayacaktır. Gelecek araştırmalarda, bu çalışma kapsamında tanımlanan her bir yeşil araç rotalama problemi, sürdürülebilir ulaşım ve lojistik alanlarında karar verme problemi olarak ele alınıp incelenebilir. Çalışmada tercih edilen Pisagor

bulanık AHP ve EDAS yöntemleri, paylaşımlı ve otonom ulaşım gibi konularda uygulanabilir. Ayrıca, sonraki çalışmalarda TOPSIS, VIKOR gibi farklı ÇKKV yöntemleri kullanılarak, bu metotlar tip-2 bulanık kümeler veya kaba kümeler ortamında genişletilebilir.

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)

Gözde BAKIOĞLU: Literatür, yöntem, analiz, görselleştirme, tartışma ve makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

She conducted the processes of literature review, methodology, analysis, visualization, discussion, 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] World energy outlook, 2024; <https://www.eiu.com/n/campaigns/energy-in-2024/#:~:text=Global%20energy%20consumption%20will%20grow,energy%20will%20rise%20by%2011%25>
- [2] Höök, M, Li, J, Johansson, K, Snowden, S. Growth rates of global energy systems and future outlooks. *Nat. Resour. Res.* 2012; 21: 23–41.
- [3] European Commission. Report from the Commission to the European Parliament and the Council – Progress towards Achieving the Kyoto and EU2020 Objectives. European Commission. 2014
- [4] Erdogan, S, Miller-Hooks, E. A green vehicle routing problem. *Transp. Res. E Logist. Transp. Rev.* 2012; 48 (1): 100–114.
- [5] Chen, J, Liao, W, Yu, C. Route optimization for cold chain logistics of front warehouses based on traffic congestion and carbon emission. *Computers & Industrial Engineering.* 2021; 161: 107663.
- [6] Palacio, J. D, Rivera, J. C. A multi-start evolutionary local search for the one-

- commodity pickup and delivery traveling salesman problem. *Annals of Operations Research.* 2022; 316(2): 979-1011.
- [7] Zhang, J, Van Woensel, T. Dynamic vehicle routing with random requests: A literature review. *International Journal of Production Economics.* 2023; 256: 108751.
- [8] Li, Y, Yang, J. The last-mile delivery vehicle routing problem with handling cost in the front warehouse mode. *Computers & Industrial Engineering.* 2024; 190: 110076.
- [9] Bektaş, T, Laporte, G. The pollution-routing problem. *Transp. Res. Part B Methodol.* 2011; 45 (8): 1232-1250.
- [10] Kopfer, H,W, Schönberger, J, Kopfer, H. Reducing greenhouse gas emissions of a heterogeneous vehicle fleet. *Flex. Serv. Manuf. J.* 2014; 26 (1): 221-248.
- [11] Adiba, E, E, Aahmed, E, A, Youssef, B. The green capacitated vehicle routing problem: optimizing of emissions of greenhouse gas. In: 2014 International Conference on Logistics Operations Management. 2014; 161-167.
- [12] Psychas, I-D, Marinaki, M, Marinakis, Y. A Parallel Multi-Start NSGA II Algorithm for Multiobjective Energy Reduction Vehicle Routing Problem. Springer International Publishing, Cham. 2015; 336-350.
- [13] Desaulniers, G, Errico, F, Irnich, S, Schneider, M. Exact algorithms for electric vehicle-routing problems with time windows. *Oper. Res.* 2016; 64 (6): 1388–1405.
- [14] Ashtineh, H, Pishvae, M,S. Alternative fuel vehicle-routing problem: a life cycle analysis of transportation fuels. *J. Clean. Prod.* 2019; 219: 166-182.
- [15] Amiri, A, Amin, S. H, Zolfagharinia, H. A bi-objective green vehicle routing problem with a mixed fleet of conventional and electric trucks: Considering charging power and density of stations. *Expert Systems with Applications.* 2023; 213: 119228.
- [16] Lou, P, Zhou, Z, Zeng, Y, Fan, C. Vehicle routing problem with time windows and carbon emissions: a case study in logistics distribution. *Environmental Science and Pollution Research.* 2024; 1-21.
- [17] Garside, A. K, Ahmad, R., Muhtazaruddin, M, N, B. A Recent Review of Solution Approaches for Green Vehicle Routing Problem and its variants. *Operations Research Perspectives.* 2024; 100303.
- [18] Asghari, M, Al-e, S, M, J, M. Green vehicle routing problem: A state-of-the-art review. *International Journal of Production Economics.* 2021; 231: 107899.

- [19] Moghdani, R, Salimifard, K, Demir, E, Benyettou, A. The green vehicle routing problem: A systematic literature review. *Journal of Cleaner Production*. 2021; 279: 123691.
- [20] Stević, Ž, Tanackov, I, Vasiljević, M, Vesković, S. Evaluation in logistics using combined AHP and EDAS method. In *Proceedings of the XLIII international symposium on operational research*. Belgrade, Serbia. 2016; 20-23.
- [21] Karatop, B, Taşkan, B, Adar, E, Kubat, C. Decision analysis related to the renewable energy investments in Turkey based on a Fuzzy AHP-EDAS-Fuzzy FMEA approach. *Computers & Industrial Engineering*. 2021; 151: 106958.
- [22] Narad, A, Josh, M. Selection of Optimum Fuel Blend Using AHP and EDAS Analysis. Available at SSRN 3712853. 2020.
- [23] Zadeh, L.A. Fuzzy sets, *Inf. Control*. 1965; 8 (3): 338–353.
- [24] Zhang, X. Multicriteria pythagorean fuzzy decision analysis: a hierarchical qualiflex approach with the closeness index-based ranking methods, *Inform. Sci*. 2016; 330: 104–124.
- [25] Yager, R, R. Pythagorean fuzzy subsets, in: *IFSA World Congress and NAFIPS Annual Meeting (IFSA/NAFIPS)*, IEEE. 2013; 57–61.
- [26] Zeng S, Chen, J, Li, X. A hybrid method for Pythagorean fuzzy multiplecriteria decision making, *Int. J. Inf. Technol. Decis. Mak*. 2016; 15 (02): 403–422.
- [27] Saaty, T, L, Bennett, J, P. A theory of analytical hierarchies applied to political candidacy. *Behavioral Science*. 1977; 22: 237-245.
- [28] Sarkar, B, Biswas, A. Pythagorean fuzzy AHP-TOPSIS integrated approach for transportation management through a new distance measure. *Soft Computing*. 2021; 25(5): 4073-4089.
- [29] Zhou, F, Chen, T, Y. An integrated multicriteria group decision-making approach for green supplier selection under Pythagorean fuzzy scenarios. *IEEE Access*. 2020; 8: 165216-165231.
- [30] Demir, E, Ak, M, F, Sari, K. Pythagorean fuzzy based AHP-VIKOR integration to assess rail transportation systems in Turkey. *International Journal of Fuzzy Systems*. 2023; 25(2): 620-632.
- [31] Farooq, D. Application of pythagorean fuzzy analytic hierarchy process for assessing driver behavior criteria associated to road safety. *Journal of Soft Computing and Decision Analytics*. 2024; 2(1): 144-158.
- [32] Ghorabae, M, K, Zavadskas, E K, Olfat, L., Turskis, Z. Multi-criteria inventory classification using a new method of Evaluation Based on Distance from Average Solution (EDAS). *Informatica*. 2015; 26(3): 435–451.
- [33] Simić, V, Milovanović, B, Pantelić, S, Pamučar, D, Tirkolae, E, B. Sustainable route selection of petroleum transportation using a type-2 neutrosophic number based ITARA-EDAS model. *Information Sciences*. 2023; 622: 732-754.
- [34] Bakioğlu, G. Selection of sustainable transportation strategies for campuses using hybrid decision-making approach under picture fuzzy sets. *Technological Forecasting and Social Change*. 2024; 206: 123567.
- [35] Krishankumar, R, Pamucar, D, Devenci, M, Ravichandran, K. S. Prioritization of zero-carbon measures for sustainable urban mobility using integrated double hierarchy decision framework and EDAS approach. *Science of The Total Environment*. 2021; 797: 149068.
- [36] Moghdani, R, Salimifard, K, Demir, E, Benyettou, A. The green vehicle routing problem: A systematic literature review. *Journal of Cleaner Production*. 2021; 279: 123691.
- [37] Polimeni, A, Vitetta, A. Network design and vehicle routing problems in road transport systems: Integrating models and algorithms. *Transportation Engineering*. 2024; 16: 100247.
- [38] Schmidt, M, E. *Integrating routing decisions in public transportation problems*. New York: Springer. 2014.

Estimation of Discharge Energy of Lithium-ion Battery for Different Temperatures by FOX-Bidirectional Recurrent Neural Network Method

Göksu TAŞ^{1*} 

¹Manisa Celal Bayar University, Mechatronics Engineering, 45400, Manisa, Turkey

Article Info

Research article
Received: 31/07/2024
Revision: 09/09/2024
Accepted: 16/09/2024

Keywords

Electric Vehicles
Lithium-ion Battery
FOX optimization
Bi-RNN
Energy Estimation

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 31/07/2024
Düzeltilme: 09/09/2024
Kabul: 16/09/2024

Anahtar Kelimeler

Elektrikli Araçlar
Lityum-iyon Batarya
FOX Optimizasyonu
Bi-RNN
Enerji Tahmini

Graphical/Tabular Abstract (Grafik Özet)

The discharge energy of lithium-ion battery under DST drive cycle and different temperature conditions is estimated by FOX-BiRNN method. The performance of different deep sampling methods is compared. /Lityum-iyon bataryanın DST sürüş çevrimi ve farklı sıcaklık koşullarında deşarj enerjisi FOX-BiRNN yöntemiyle tahmin edilmiştir. Farklı derin öğrenme yöntemlerinin performansı karşılaştırılmıştır.

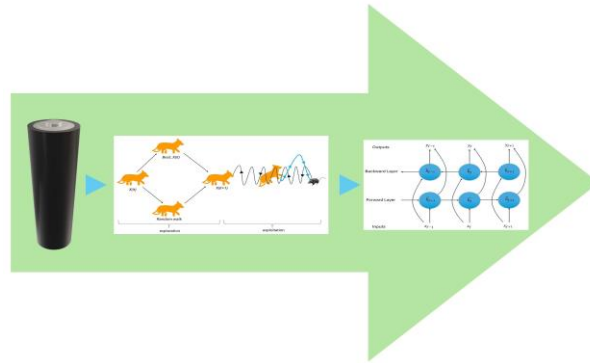


Figure A: Flow chart of discharge energy estimation of lithium-ion battery under different temperature conditions. / **Şekil A:** Lityum-iyon bataryanın farklı sıcaklık koşullarında deşarj enerjisi tahminin akış diagramı

Highlights (Önemli noktalar)

- Estimation of lithium-ion battery discharge energy under DST driving cycle and different temperature conditions/Lityum-iyon bataryanın deşarj enerjisinin DST sürüş çevrimi ve farklı sıcaklık koşullarında tahmini,
- The estimation performance of BiGRU, BiLSTM, BiRNN and FOX-BiRNN methods for discharge energy estimation is compared /Deşarj enerjisi tahmini için BiGRU, BiLSTM, BiRNN ve FOX-BiRNN yöntemlerinin tahmin performansı karşılaştırılmıştır
- Hyperparameter values of the BiRNN method were determined with FOX optimization./FOX optimizasyonu ile BiRNN yönteminin hiperparametre değerleri belirlenmiştir.

Aim (Amaç): The aim of this study is to estimate the discharge energy of lithium-ion battery under DST driving cycle and different temperature conditions with FOX-BiRNN method and different deep learning methods. / Bu çalışmanın amacı, lityum-iyon bataryanın deşarj enerjisini DST sürüş çevrimi ve farklı sıcaklık koşullarında FOX-BiRNN yöntemi ve farklı derin öğrenme yöntemleriyle tahmin etmektir.

Originality (Özgünlük): The most successful discharge energy estimation was obtained by applying the hyperparameter values determined by the FOX optimization to the BiRNN method. / FOX optimizasyonu ile belirlenen hiperparametre değerlerinin BiRNN yöntemine uygulanmasıyla en başarılı deşarj enerjisi tahmini elde edilmiştir.

Results (Bulgular): The FOX-BiRNN method achieved 99.4186% prediction success at 0 °C according to the R² metric, 99.6080% at 25 °C according to the R² metric, and 99.4148% at 45 °C according to the R² metric. / FOX-BiRNN yöntemi, R² metriğine göre 0 °C 'de %99.4186, R² metriğine göre 25 °C 'de %99.6080 ve R² metriğine göre 45 °C 'de %99.4148 tahmin başarıları elde etmiştir.

Conclusion (Sonuç): While estimating the discharge energy of the lithium-ion battery, the hyperparameter value of the BiRNN method was determined quickly by FOX optimization and the most successful results were obtained. / Lityum-iyon bataryanın deşarj enerjisi tahmini yapılırken FOX optimizasyonu tarafından BiRNN yönteminin hiperparametre değeri hızlı bir şekilde belirlenerek en başarılı sonuçlar elde edilmiştir.



Estimation of Discharge Energy of Lithium-ion Battery for Different Temperatures by FOX-Bidirectional Recurrent Neural Network Method

Göksu TAŞI*

¹Manisa Celal Bayar University, Mechatronics Engineering, 45400, Manisa, Turkey

Article Info

Research article
Received: 31/07/2024
Revision: 09/09/2024
Accepted: 16/09/2024

Keywords

Electric Vehicles
Lithium-ion Battery
FOX optimization
Bi-RNN
Energy Estimation

Abstract

In this study, the discharge energy of the lithium-ion battery was estimated by using the FOX-Bidirectional Recurrent Neural Network (Bi-RNN) method for the Dynamic Stress Test (DST) driving cycle method and different temperatures. For lithium-based batteries, discharge energy estimation is critical for long-term use, while problems such as overheating are major problems. For this reason, in this study, the discharge energy of lithium-ion batteries under different temperature conditions was estimated using bidirectional-based deep learning methods. In addition, the hyperparameter values of the BiRNN method were determined with FOX optimization, and the FOX-BiRNN method was proposed. The discharge energy estimations of FOX-BiRNN, BiRNN, Bidirectional Gated Recurrent Unit (Bi-GRU), and Bidirectional Long-short term (Bi-LSTM) methods were compared. The obtained estimation results were compared using the most commonly used battery parameter estimation metrics in the literature for performance comparison. The estimation success of the proposed method was presented using many comparison metrics and graphics. The FOX-BiRNN method was the most successful method for discharge energy estimation by obtaining values of %99.4186 at 0 °C according to the R² metric, %99.6080 at 25 °C according to the R² metric, and %99.4148 at 45 °C according to the R² metric.

Farklı Sıcaklıklar için Lityum-iyon Bataryanın Deşarj Enerjisinin FOX-Çift Yönlü Tekrarlayan Sinir Ağı Yöntemi ile Tahmini

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 31/07/2024
Düzeltilme: 09/09/2024
Kabul: 16/09/2024

Anahtar Kelimeler

Elektrikli Araçlar
Lityum-iyon Batarya
FOX Optimizasyonu
Bi-RNN
Enerji Tahmini

Öz

Bu çalışmada, lityum-iyon pilin deşarj enerjisi, Dinamik Stres Testi (DST) sürüş çevrimi yöntemi ve farklı sıcaklıklar için FOX- Çift Yönlü Tekrarlayan Sinir Ağı (Bi-RNN) yöntemi kullanılarak tahmin edilmiştir. Lityum bazlı bataryalar için, deşarj enerjisi tahmini uzun süreli kullanım için kritik öneme sahipken, aşırı ısınma gibi sorunlar büyük problemlerdir. Bu nedenle, bu çalışmada, lityum-iyon pillerin farklı sıcaklık koşullarındaki deşarj enerjisi, çift yönlü tabanlı derin öğrenme yöntemleri kullanılarak tahmin edilmiştir. Ayrıca, BiRNN yönteminin hiperparametre değerleri FOX optimizasyonu ile belirlenmiş ve FOX-BiRNN yöntemi önerilmiştir. FOX-BiRNN, BiRNN, Çift Yönlü Kapılı Tekrarlayan Birim (Bi-GRU) ve Çift Yönlü Uzun-Kısa Dönem (Bi-LSTM) yöntemlerinin deşarj enerjisi tahminleri karşılaştırılmıştır. Elde edilen tahmin sonuçları, performans karşılaştırması amacıyla literatürde en sık kullanılan batarya parametre tahmin metrikleri kullanılarak karşılaştırılmıştır. Önerilen yöntemin tahmin başarısı birçok karşılaştırma metrikleri ve grafikler kullanılarak sunulmuştur. FOX-BiRNN yöntemi, R² metriğine göre 0 °C'de %99.4186, R² metriğine göre 25 °C'de %99.6080 ve R² metriğine göre 45 °C'de %99.4148 değerleri elde ederek deşarj enerjisi tahmini için en başarılı yöntemdi.

1. INTRODUCTION (GİRİŞ)

Nearly 28% of all carbon dioxide (CO₂) emissions are attributed to the transport sector, with road transport accounting for more than 70% of these emissions, according to a research by the European Union. In order to reduce the concentration of air pollutants like CO₂ and other greenhouse gases, the

governments of the majority of industrialized nations are promoting the usage of electric vehicles (EVs) [1]. Energy storage is one of the key technical developments for the development of new energy electric vehicles and smart networks. Of all the existing chemical and physical solutions, the lithium-ion battery is the type of energy storage [2] technology that is evolving at the fastest rate due to

the rapid development of new energy electric cars. Because there have been so many electric car fires lately, people's opinions about them have shifted. Additionally, this has created obstacles and elevated expectations for battery management solutions [3], [4]. For this reason, the discharge energy state estimation of lithium-based batteries is of critical importance. In terms of energy management and safety, accurate estimation of lithium-based battery parameters is very important [5]. For this reason, there are many studies in the literature to determine battery parameters. Because State of Health (SOH) [6], [7], [8], [9] measures a battery's residual capacity relative to its initial value, it has gained popularity as an additional indication of battery deterioration in recent years [10]. The latest techniques for estimating lithium battery parameters include both hybrid and data-driven algorithms [11]. Therefore, data-driven techniques have been receiving more and more attention as battery operating data becomes more widely available. Gaussian process regression (GPR) is a commonly used technique for estimating SOH among them [12]. In a study, it was shown that GPR has the best performance in SOH estimation among four typical data-driven methods (linear regression, support vector machine, relevance vector machine and GPR) [13]. In order to estimate SOH, deep learning techniques like deep convolutional neural networks, long short-term memory neural networks, and prior knowledge-based neural networks were also used [14]. However, when estimating parameters such as SOH, State of Energy (SOE), and capacity of lithium-based batteries using machine learning, determining the appropriate hyperparameter values is a very important problem. Along with SOH estimation on a long time scale and State of Charge (SOC) estimation on a short time scale, model-based dual-time SOH and SOC combined estimation approaches were also presented [15]. In a study, a new method was proposed for energy state estimation in experiments conducted at different temperatures for lithium-ion batteries. Energy state estimation was successfully performed with the Particle Filter-Extended Kalman filter method [16]. In another study, Adaptive FOX optimization and RNN method were used to predict Crude Oil Prices [17]. In another study, the use of Bi-RNN method in confidence estimation provided significant improvement [18]. In deep learning methods, determining hyperparameters appropriately is critical for making appropriate predictions due to reasons such as time, speed, and success. Since

determining these hyperparameter values is based on long-term trial-and-error methods, determining them quickly with metaheuristic optimization methods is a very important development. This study was carried out to solve the hyperparameter search problem by estimating the discharge energy of lithium-ion battery under different temperatures and DST driving cycle data with FOX optimization-BiRNN method. In addition, estimating the battery discharge energy in a healthy and reliable way is of critical importance due to energy management in the use of electric vehicles. In this study, discharge energy was estimated for each of the different temperatures. With this study, it was presented that FOX optimization can be used in deep learning-based lithium battery parameter estimation. In addition, it was concluded that FOX optimization, a new metaheuristic optimization method in the literature, found very effective results in the hyperparameter search process.

2. MATERIALS AND METHODS (MATERİYAL VE METOD)

In this study, deep learning training was performed on a personal computer with an i7 processor and an Ubuntu operating system. In addition, the hyperparameter search process of the Bi-RNN method was performed using the code written in the Python programming language using the FOX optimization with a population number of 20. Deep learning training was performed by converting the data to .csv format for the use of the dataset.

2.1. Experimental Data (Deneyisel Veri)

The data used in this study is a publicly available dataset. A publicly available dataset consisting of experimental data at 0 °C, 25 °C, and 45°C and the DST driving cycle was used [19]. Batteries were tested at low temperature (0 °C), room temperature (25 °C) and high temperature (40 °C). In general, testing batteries at these temperatures is to examine temperature changes that affect their performance and life. Additionally, when this battery dataset was examined, it was seen that the Arbin BT2000 Battery Test System was used to test the battery. In the battery dataset used in this study, the test samples were subjected to dynamic stress testing to determine the model parameters. DST applies a dynamic discharge regime to a lithium battery. The battery behavior is tested according to the current profile of DST. Although DST takes into account regenerative charging and uses a series of current steps with varying amplitudes and durations, it is a

simplification of the real battery charging conditions [20]. The characteristics of the INR 18650-20R lithium-ion battery used in charge-discharge experiments and test drive profiles during the preparation of the public data set used in this study are given in Table 1 [21].

The properties of the dataset used in this study are given in Figure 1. Graphs are presented for different temperature values. The dataset was created using batteries for 80% battery level and 50% battery level

driving methods were used, only the data used for the DST driving method was used for this study. In addition, data with separate data files for all temperature values and a battery level of 50% were used. Figure 1-a shows the data obtained at 0°C temperature conditions, Figure 1-b shows the results obtained at 25°C temperature conditions, and Figure 1-c shows the results obtained during the operation of the lithium battery at 45°C temperature conditions. Figure 1 shows the graphical representation of the input data and output data

Table 1. Lithium-ion battery features (Lityum-iyon batarya özellikleri)

Parameters	Specifications
Capacity Rating	2000mAh
Cell Chemistry	LNMC/Graphite
Max current (A)	22
Cut-off voltage	2.4/4.2
Max. Voltage	4.2V ± 0.05V

for testing. In addition, the effect of temperature change on performance was examined under three different temperature conditions and the data was recorded. In the dataset where many different

values of deep learning models for three different temperature values. The dV/dT value of these data features indicates the change in the voltage value over time and is very important for battery

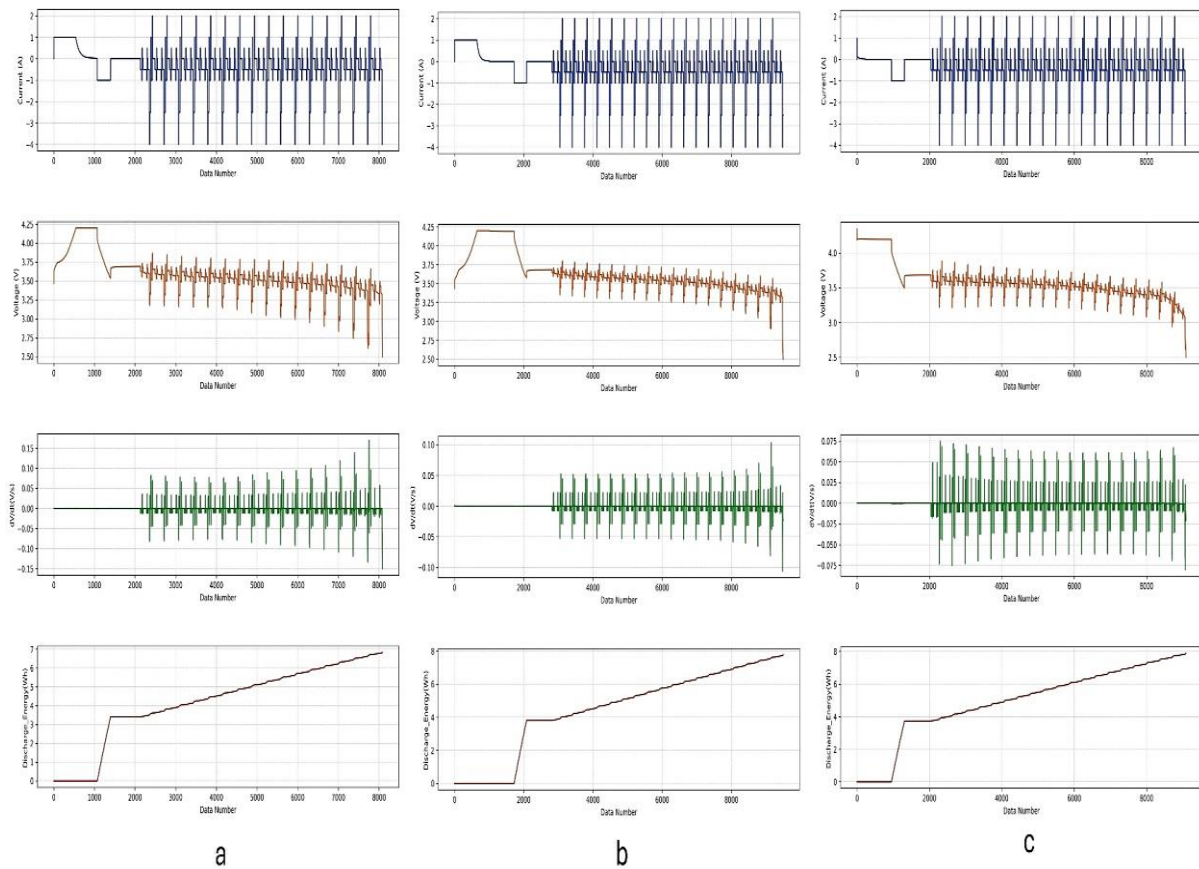


Figure 1. Dataset properties, a-0 °C, b-25 °C, and c-45°C (Veriseti özellikleri, a-0 °C, b-25 °C, and c-45°C)

performance and health. While the Voltage value indicates the voltage value in the battery, the Current value indicates the change in the current in the DST driving mode applied to the battery. The Discharge Energy value indicates the change in the internal energy while the battery is being discharged. While the Voltage, Current, and dV/dT values are the input data, the Discharge Energy value is the value that should be estimated by deep learning. The data was prepared as a result of measuring the Voltage, Current, and dV/dT values of the battery at different temperature values under the DST driving mode of the battery. The Discharge Energy value of the lithium battery at different temperatures was estimated using the data in the graph in this study.

2.2. FOX Optimization (FOX Optimizasyonu)

A fox may survive in an environment with low productivity and few species. Although foxes come in various colors, white and red are the most prevalent hues. The red fox and the arctic fox are the

the snow to hunt its prey [22]. The arctic fox is highly skilled at hunting its prey from both above and below. To find prey, the red fox initially roams the search area at random. It uses the prey's ultrasonic sound to locate its prey. The red fox may hear the sound of its prey while it seeks. The red fox is at the exploitation stage after detecting the noise. The sound of the prey takes some time to reach the red fox because it is capable of hearing ultrasonic sounds. In an attempt to decide whether to jump against the prey, the red fox advances the target. As a result, the red fox attempts to leap in response to how long it takes for prey to become visible. The red fox's hunting habits are shown in Figure 2. In addition, the coefficients c_1 and c_2 specified in Table 2 represent the jumping coefficients of the red fox. In addition, the number of epochs in deep learning models and the number of epochs - iterations in the optimization method are determined as 10. FOX first initializes the population, often known as the X matrix. The location of red foxes is an X . Next, each search agent's fitness is determined for each iteration using conventional benchmark functions.

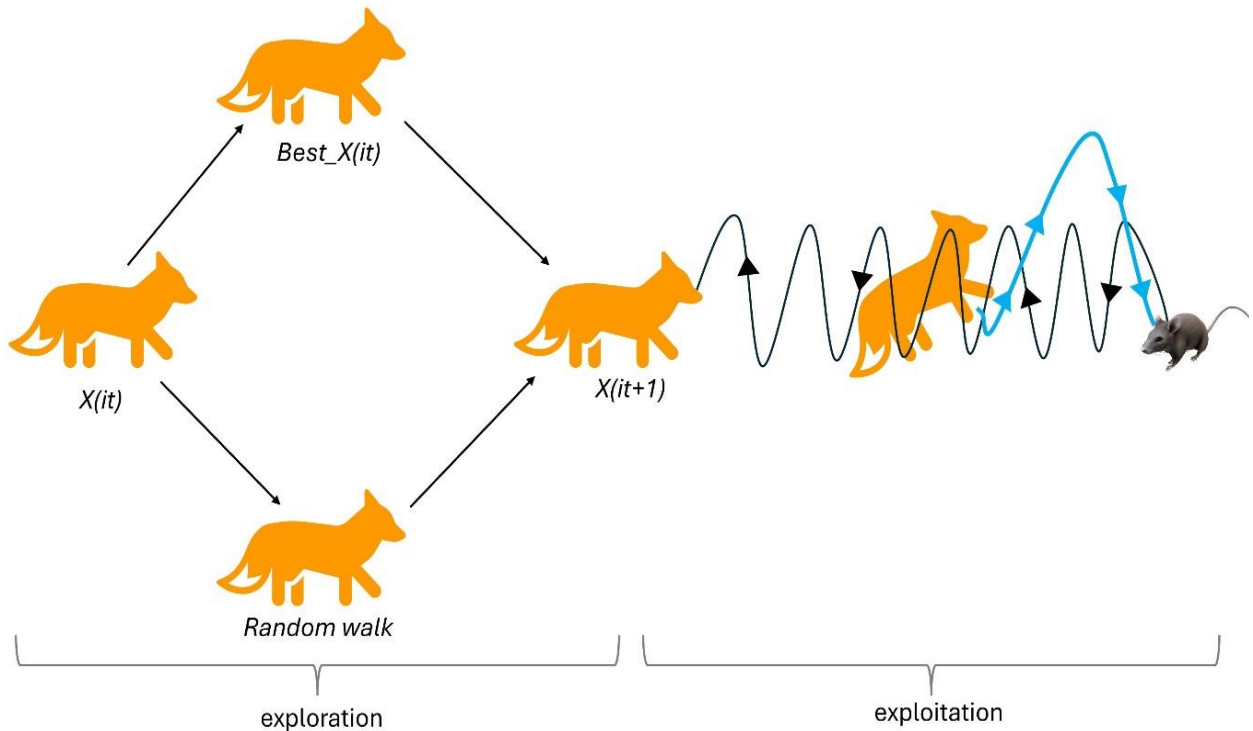


Figure 2. FOX population search for prey (FOX popülasyonunun av arayışı)

two most prevalent species of fox. The most common animal is the red fox, which has expanded to cities across the USA, Europe, Canada, Japan, Australia, and Europe. The FOX algorithm mimics the hunting behavior of a red fox when it dives into

The fitness value of each search agent (each row in an X matrix) is compared to the fitness of other agents (other rows) in order to determine the optimal location ($BestX$) and best fit ($BestFitness$). In order to compare the fitness of the current row

($fitness_{i+1}$) to the fitness of the preceding row ($fitness_i$) throughout the course of iterations, $BestFitness$ and $BestX$ are performed using a condition. There is a condition on the possibility of killing the prey during the exploitation phase.

The random variable p has a value between 0 and 1. Consequently, it is necessary to determine the red fox's new location if the random number p is larger than 0.18. In order to determine a new location, one must compute the distance sound travels $Dist_S_T_{it}$, the red fox's distance from the prey $Dist_Fox_Prey_{it}$, and the leaping value $Jump_{it}$. Consequently, the sound travel time $Time_S_T_{it}$ is assigned a random integer between 0 and 1. By multiplying the speed of sound in the air (Sp_S) by the time sound travels (T_{it}), one may get the distance of the sound from the red fox. Equation (1) is used to find the distance traveled by the sound, which means distance

$$Dist_S_T_{it} = Sp_S * Time_s_T_{it} \quad (1)$$

The ideal resolution the discovery process is significantly impacted by $BestX_{it}$ that has been discovered. Equation (2) illustrates the fox's exploration strategy for locating a new location in the search space $X_{(it+1)}$ [23].

2.3. Bidirectional Recurrent Neural Networks

(Çift Yönlü Yinelenen Sinir Ağı)

Bidirectional RNNs were initially introduced in 1997. The concept involves connecting two recurrent networks that have been trained in opposing directions, meaning they are trained by reading the input sequence once from the left and once from the right, and then feeding into the same output layer. Unlike unidirectional RNN, the network with this design collects more information since it knows everything about the neighboring points before and after each data point [24]. The working diagram of a Bi-RNN architecture is given in Figure 3.

Mathematics is used to specify the network in Equations 3-5. Iterating the forward layer from $f=1$ to F yields the forward hidden sequence, \vec{h}_f^l . Iterating the backward layer from $f=I$ to F yields the backward hidden sequence, \overleftarrow{h}_f^l . The weight matrices that are input are $W_{x\vec{h}}^l$, $W_{x\overleftarrow{h}}^l$, the hidden weight matrices are $W_{\vec{h}\vec{h}}^l$, $W_{\overleftarrow{h}\overleftarrow{h}}^l$, and the bias terms for the forward and backward hidden layers are $b_{\vec{h}}^l$, $b_{\overleftarrow{h}}^l$, respectively. A deep bidirectional RNN may be created by stacking many bidirectional RNN layers. The input for each hidden layer comes from the

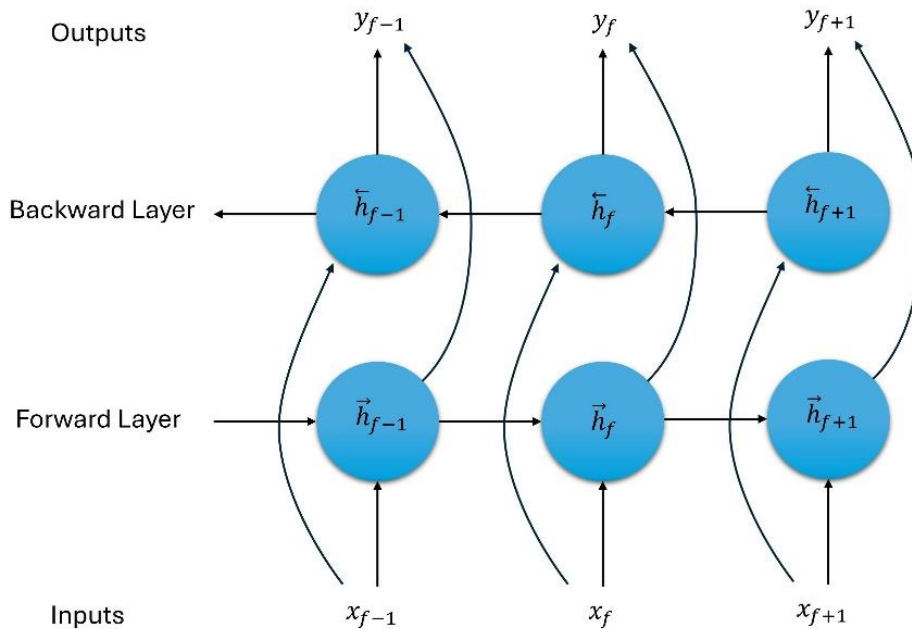


Figure 3. Bi-RNN architecture (Bi-RNN mimarisi)

$$X_{(it+1)} = BestX_{it} * rand(1, dimension) * MinT * a \quad (2)$$

forward and backward layers that came before it, or from \vec{h}_{f-1}^l and $\overleftarrow{h}_{f-1}^l$. Equation-5 states that the hidden activations \vec{h}_f^{L-1} and $\overleftarrow{h}_f^{L-1}$ f of the final

hidden layer $L-1$ are used to update the output layer y_f . The output weight matrices are denoted by $W_{\vec{h}_y}$ and $W_{\vec{h}_x}$, and by the output bias term [25].

$$\vec{h}_f^l = g(W_{x\vec{h}}^l x_f^l + W_{\vec{h}\vec{h}}^l \vec{h}_{f-1}^l + b_{\vec{h}}^l) \quad (3)$$

$$\vec{h}_f^l = g(W_{x\vec{h}}^l x_f^l + W_{\vec{h}\vec{h}}^l \vec{h}_{f-1}^l + b_{\vec{h}}^l) \quad (4)$$

$$y_f = m(W_{\vec{h}_y} \vec{h}_f^{L-1} + W_{\vec{h}_y} \vec{h}_f^{L-1} + b_y) \quad (5)$$

Figure 4 shows the process of determining the hyperparameter values of the deep learning method of the FOX optimization method. In this study, deep learning models were first created. Among the models with the same parameter numbers, the hyperparameter values of the BiRNN method were found with the FOX optimization method and candidate solutions. As can be seen in the figure, the deep learning model was created and the learning rate and Beta_1 hyperparameter value were tried to be found with the FOX optimization. The hyperparameter values were updated according to

prediction performance of the new deep learning models was tested. Finally, the BiRNN model was obtained according to the appropriate hyperparameter values.

3. RESULTS (BULGULAR)

In this study, the discharge energy estimation of lithium-ion batteries was performed for different temperature conditions with deep learning methods. Hyperparameter values of the Bi-RNN method were determined by searching in a wide range with the FOX optimization method. Figure 5 shows the hyperparameter search sought in the deep learning method. While estimating the discharge energy of the lithium-ion battery using the BiRNN method, the determination of hyperparameter values was made using FOX optimization. The most important hyperparameters in the BiRNN method include the learning rate and Beta_1 hyperparameters. The Beta_1 hyperparameter value indicates the rate at which past gradient values will be taken into account, while the learning rate is the term related to the updating of the model weights. Figure 4 represents the application of candidate values and

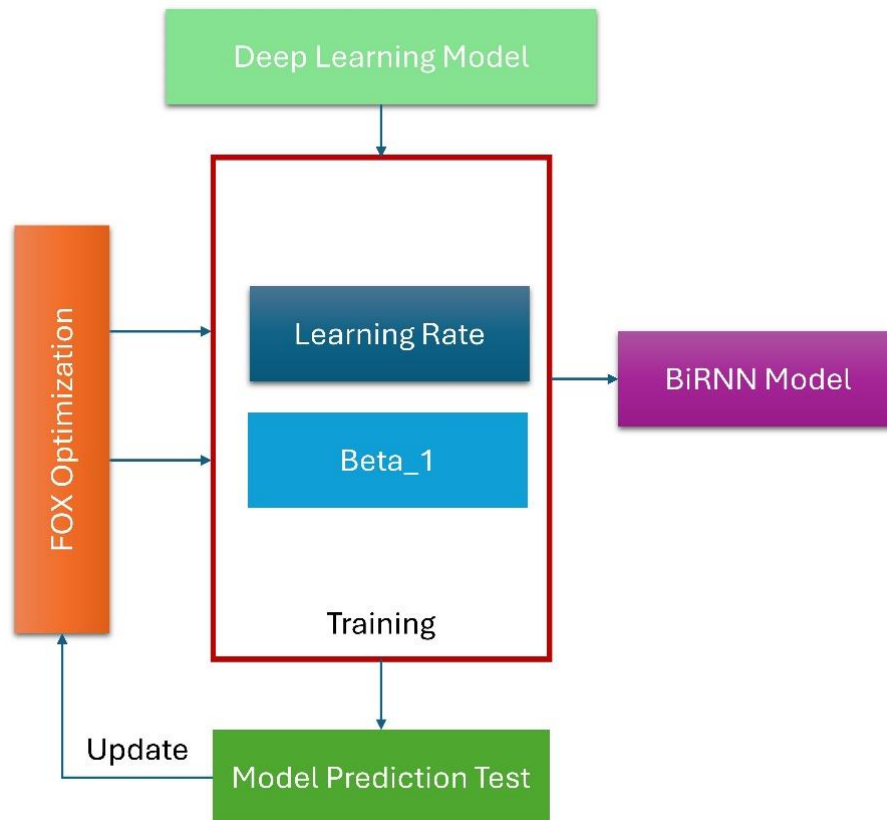


Figure 4. Determining hyperparameters of deep learning method by FOX optimization method (FOX optimizasyon yöntemi ile derin öğrenme yönteminin hiperparametrelerinin belirlenmesi)

the fitness value up to the epoch value and the the updating of these values according to the result

while determining the appropriate hyperparameter value with FOX optimization. The features of the method was determined as 20, the c values for the jumps coefficient values of the population members

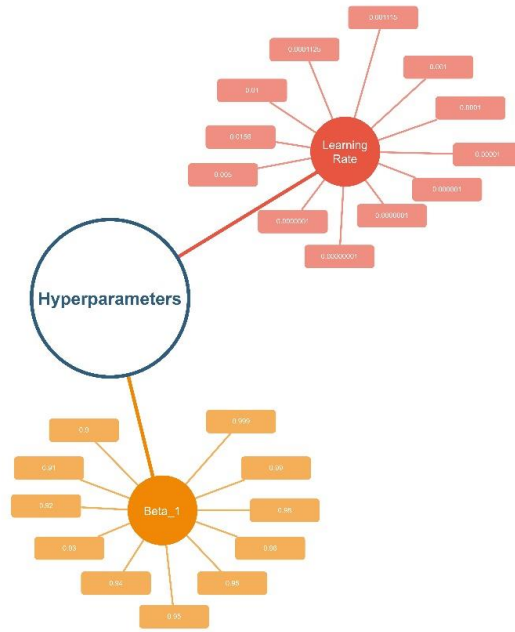


Figure 5. Hyperparameters different search (Hiperarametrelerin farklı aranması)

Table 2. FOX optimization method’s parameters (FOX optimizasyon yönteminin parametreleri)

Parameter	Detail
pop_size	20
c ₁	0.5
c ₂	0.5

FOX optimization method are given in Table 1. While the population size of the FOX optimization were determined as 0.5 and successful results were obtained. FOX optimization parameter values are

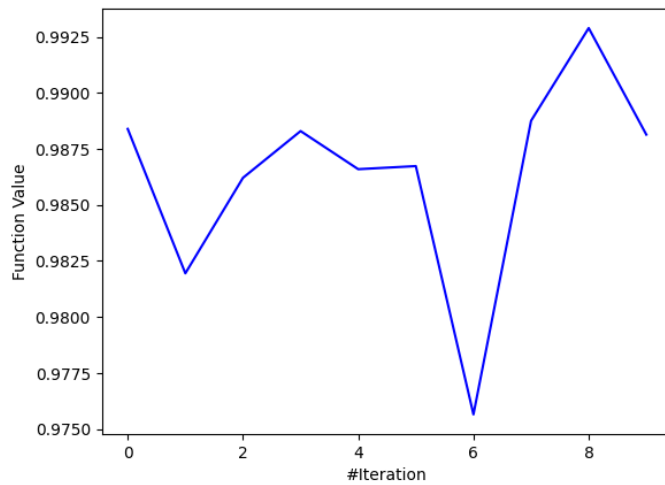


Figure 6. Fitness value obtained while searching for suitable parameters with the optimization method. (Optimizasyon yöntemi ile uygun parametreler aranırken elde edilen uygunluk değeri)

given in Table 2. The change of fitness value over time in the deep learning hyperparameter determination process using FOX optimization is given in Figure 6. In deep learning methods, the hyperparameter, which is considered the first parameter to be adjusted in overfitting and underfitting problems, is the learning rate hyperparameter. For this reason, in this study, a wide range was used while determining the learning rate and beta_1 hyperparameter value with the FOX optimization method. Table 3 shows the hyperparameter values searched with the FOX optimization method in the Bi-RNN method in this study. The fitness value of the appropriate values found by searching these two hyperparameter values together in the FOX optimization is 0.995412.

estimation results of the lithium-ion battery of the FOX-BiRNN, Bi-RNN, Bi-LSTM, and Bi-GRU methods were given, and experiments were carried out for different temperature values. The deep learning experiment results are given in Table 4. According to the results given in Table 3, the worst estimation performance as a result of the training carried out using 0 °C data was obtained by the Bi-LSTM method with the value of 0.076318 according to the MSE metric. The Bi-RNN method reached the second most unsuccessful estimation result at this temperature value and this value was 0.059190 according to the MSE metric. The most successful method was the FOX-BiRNN method, which made an error in estimation with the value of 0.023992 with the MSE metric. As a result of deep learning trainings performed using 25 °C data at a different temperature value, the least successful

Table 4. FOX optimization method's search areas (FOX optimizasyon yönteminin arama alanları)

Hyperparameter	Search Area	Found
learning rate	0.0000001- 0.01	0.004011210229063557
beta_1	0.9- 0.999	0.9876397443378757

Table 3. Deep learning experimental results (Derin öğrenme deneysel sonuçları)

Temperature	Model	MSE	RMSE	MAE	R ²
0 °C	Bidirectional LSTM	0.076318	0.276257	0.166312	0.981507
	Bidirectional RNN	0.059190	0.243290	0.111000	0.985657
	Bidirectional GRU	0.030730	0.175299	0.086079	0.992554
	FOX-BiRNN	0.023992	0.154893	0.061595	0.994186
25 °C	Bidirectional LSTM	0.098343	0.313597	0.184775	0.984295
	Bidirectional RNN	0.026196	0.161851	0.059866	0.995817
	Bidirectional GRU	0.034208	0.184955	0.094992	0.994537
	FOX-BiRNN	0.024546	0.156670	0.059706	0.996080
45 °C	Bidirectional LSTM	0.103336	0.321460	0.214098	0.978626
	Bidirectional RNN	0.041659	0.204104	0.114284	0.991383
	Bidirectional GRU	0.048836	0.220988	0.148079	0.989899
	FOX-BiRNN	0.028295	0.168210	0.094473	0.994148
Average	Bidirectional LSTM	0.092666	0.303771	0.188395	0.981476
	Bidirectional RNN	0.042348	0.203082	0.095050	0.990952
	Bidirectional GRU	0.037924	0.193747	0.109716	0.992330
	FOX-BiRNN	0.025611	0.159924	0.071925	0.994805

After determining the hyperparameter values of the Bi-RNN method using FOX optimization, the FOX-BiRNN method was obtained by applying these values to the Bi-RNN method. The discharge energy

method was the Bi-LSTM method with a value of 0.098343 according to the MSE metric and made the most error in prediction. FOX-BiRNN method became the most successful method by reaching the value of 0.024546 according to the MSE metric and

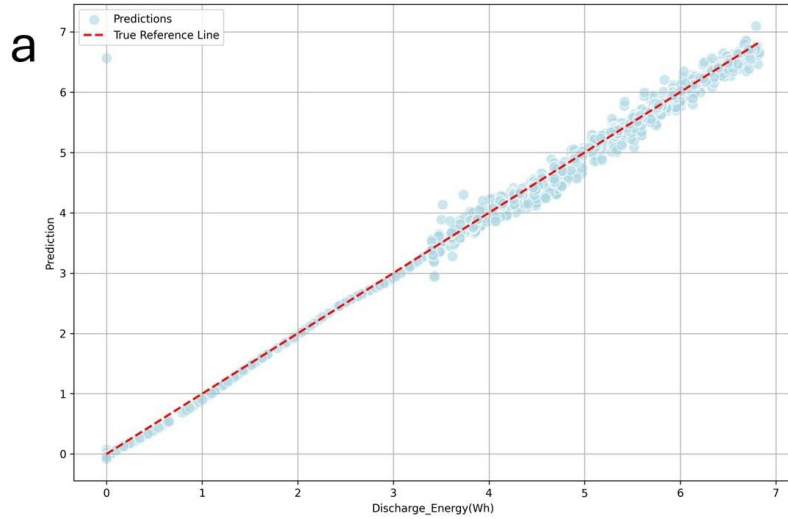


Figure 7.a. FOX-BiRNN estimation results for 0 °C (FOX-BiRNN 0 °C için tahmin sonuçları)

making the least error in prediction. In the training performed using 45 °C data at a different temperature value, the Bi-LSTM method became the least successful method by making the error in prediction with the value of 0.103336 according to the MSE metric. In the training performed at the same temperature value, the FOX-BiRNN method achieved success by making the least error in prediction with the value of 0.028295 according to the MSE metric.

4. CONCLUSIONS (SONUÇLAR)

As the importance of comfort and healthy use in electric vehicles has increased, the healthy, long-term, and safe use of lithium-based batteries that provide the energy needs of electric vehicles has

become very important. The healthy use of lithium-based batteries depends on accurate, fast, and reliable estimation of battery parameters. In addition, it is critical to know the behavior of lithium batteries under different temperature conditions and different drive cycles. In this study, discharge energy estimation of lithium-ion batteries was successfully performed with four deep learning methods using a publicly available dataset with the data obtained at 0 °C, 25 °C, and 45 °C in the DST driving method. Since one of the most important problems in the process of determining the parameters of lithium batteries based on artificial intelligence is the determination of hyperparameters, the hyperparameter values of the Bi-RNN method were determined by using FOX

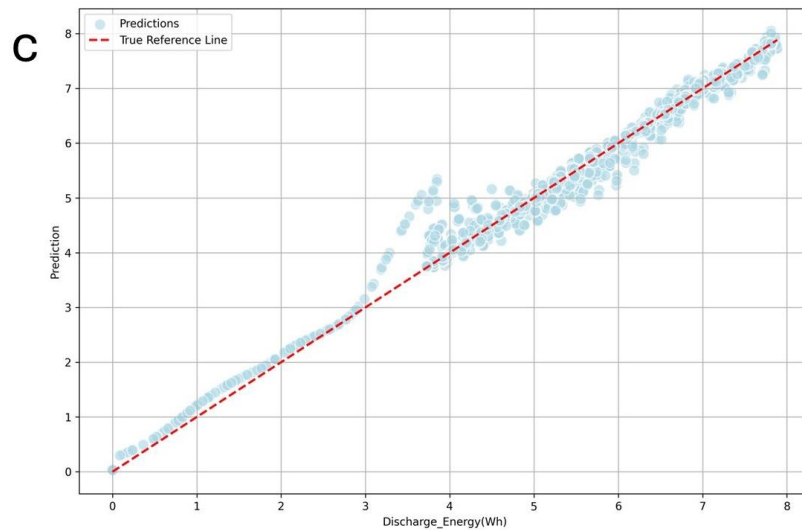


Figure 7.c. FOX-BiRNN estimation results for 45 °C (FOX-BiRNN 45 °C için tahmin sonuçları)

optimization in this study. In addition, the prediction performance of four deep learning methods, Bi-LSTM, Bi-RNN, Bi-GRU, and FOX-BiRNN methods are compared. The discharge energy prediction results of the lithium-ion battery were evaluated by using the most commonly used prediction metrics in the literature. According to the results obtained, the FOX-BiRNN method was proposed by making the most successful prediction with a value of 99.4805% according to the R² metric when averaged over all experiments. The prediction of the discharge energy of the lithium battery by the proposed method is presented as a result of graphics and tables with different prediction metrics. The obtained results will provide intuition for solving other problems in real life. The author intends to estimate the parameters of lithium-based batteries by comparing the success of different optimization methods in further studies.

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)

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

Deneyle yapılmış, 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] J. A. Sanguesa, V. Torres-Sanz, P. Garrido, F. J. Martinez, and J. M. Marquez-Barja, "A Review on Electric Vehicles: Technologies and Challenges," *Smart Cities*, vol. 4, no. 1, Art. no. 1, Mar. 2021, doi: 10.3390/smartcities4010022.
- [2] A. Boyar, Y. Kabalcı, and E. Kabalcı, "Grey Wolf Optimization Algorithm-Based Hybrid Energy Storage System Controller Design for Electric Vehicles," *Gazi Univ. J. Sci. Part C Des. Technol.*, pp. 1–1, doi: 10.29109/gujsc.1475819.
- [3] Y. Wang *et al.*, "A comprehensive review of battery modeling and state estimation approaches for advanced battery management systems," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 131, p. 110015, Oct. 2020, doi: 10.1016/j.rser.2020.110015.
- [4] K. Kaysal, F. O. Hocaoglu, and A. Kaysal, "Pasif Batarya Yönetim Sisteminin ARM Tabanlı Mikroişlemciler Kullanılarak Tasarımı ve Deneysel Uygulaması," *Gazi Univ. J. Sci. Part C Des. Technol.*, vol. 9, no. 1, Art. no. 1, Mar. 2021, doi: 10.29109/gujsc.811313.
- [5] G. Taş, C. Bal, and A. Uysal, "Performance comparison of lithium polymer battery SOC estimation using GWO-BiLSTM and cutting-edge deep learning methods," *Electr. Eng.*, vol. 105, no. 5, pp. 3383–3397, Oct. 2023, doi: 10.1007/s00202-023-01934-z.
- [6] G. Lee, D. Kwon, and C. Lee, "A convolutional neural network model for SOH estimation of Li-ion batteries with physical interpretability," *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 188, p. 110004, Apr. 2023, doi: 10.1016/j.ymsp.2022.110004.
- [7] C. Zhang *et al.*, "Battery SOH estimation method based on gradual decreasing current, double correlation analysis and GRU," *Green Energy Intell. Transp.*, vol. 2, no. 5, p. 100108, Oct. 2023, doi: 10.1016/j.geits.2023.100108.
- [8] F. Wang, Z. Zhao, Z. Zhai, Z. Shang, R. Yan, and X. Chen, "Explainability-driven model improvement for SOH estimation of lithium-ion battery," *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, vol. 232, p. 109046, Apr. 2023, doi: 10.1016/j.res.2022.109046.
- [9] J. Obregon, Y.-R. Han, C. W. Ho, D. Muraliraman, C. W. Lee, and J.-Y. Jung, "Convolutional autoencoder-based SOH estimation of lithium-ion batteries using electrochemical impedance spectroscopy," *J. Energy Storage*, vol. 60, p. 106680, Apr. 2023, doi: 10.1016/j.est.2023.106680.
- [10] M. Berecibar, I. Gandiaga, I. Villarreal, N. Omar, J. Van Mierlo, and P. Van den Bossche, "Critical review of state of health estimation methods of Li-ion batteries for real applications," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 56, pp. 572–587, Apr. 2016, doi: 10.1016/j.rser.2015.11.042.
- [11] X. Hu, L. Xu, X. Lin, and M. Pecht, "Battery Lifetime Prognostics," *Joule*, vol. 4, no. 2, pp. 310–346, Feb. 2020, doi: 10.1016/j.joule.2019.11.018.

- [12] M. Cheng, X. Zhang, A. Ran, G. Wei, and H. Sun, "Optimal dispatch approach for second-life batteries considering degradation with online SoH estimation," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 173, p. 113053, Mar. 2023, doi: 10.1016/j.rser.2022.113053.
- [13] Z. Deng, X. Hu, X. Lin, L. Xu, Y. Che, and L. Hu, "General Discharge Voltage Information Enabled Health Evaluation for Lithium-Ion Batteries," *IEEEASME Trans. Mechatron.*, vol. 26, no. 3, pp. 1295–1306, Jun. 2021, doi: 10.1109/TMECH.2020.3040010.
- [14] Y. Che *et al.*, "State of health prognostics for series battery packs: A universal deep learning method," *Energy*, vol. 238, p. 121857, Jan. 2022, doi: 10.1016/j.energy.2021.121857.
- [15] X. Hu, H. Yuan, C. Zou, Z. Li, and L. Zhang, "Co-Estimation of State of Charge and State of Health for Lithium-Ion Batteries Based on Fractional-Order Calculus," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 67, no. 11, pp. 10319–10329, Nov. 2018, doi: 10.1109/TVT.2018.2865664.
- [16] X. Lai, Y. Huang, X. Han, H. Gu, and Y. Zheng, "A novel method for state of energy estimation of lithium-ion batteries using particle filter and extended Kalman filter," *J. Energy Storage*, vol. 43, p. 103269, Nov. 2021, doi: 10.1016/j.est.2021.103269.
- [17] H. ALRahhal and R. Jamous, "RNN-AFOX: adaptive FOX-inspired-based technique for automated tuning of recurrent neural network hyper-parameters," *Artif. Intell. Rev.*, vol. 56, no. 2, pp. 1981–2011, Nov. 2023, doi: 10.1007/s10462-023-10568-3.
- [18] Q. Li, P. M. Ness, A. Ragni, and M. J. F. Gales, "Bi-directional Lattice Recurrent Neural Networks for Confidence Estimation," in *ICASSP 2019 - 2019 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, May 2019, pp. 6755–6759. doi: 10.1109/ICASSP.2019.8683488.
- [19] "Battery Data | Center for Advanced Life Cycle Engineering." Accessed: Jul. 30, 2024. [Online]. Available: <https://calce.umd.edu/battery-data>
- [20] F. Zheng, Y. Xing, J. Jiang, B. Sun, J. Kim, and M. Pecht, "Influence of different open circuit voltage tests on state of charge online estimation for lithium-ion batteries," *Appl. Energy*, vol. 183, pp. 513–525, Dec. 2016, doi: 10.1016/j.apenergy.2016.09.010.
- [21] M. El Marghichi, M. Bouzi, and N. Ettalabi, "Robust Parameter Estimation of an Electric Vehicle Lithium-Ion Battery Using Adaptive Forgetting Factor Recursive Least Squares," *Int. J. Intell. Eng. Syst.*, vol. 13, Aug. 2020, doi: 10.22266/ijies2020.1031.08.
- [22] J. Červený, S. Begall, P. Koubek, P. Nováková, and H. Burda, "Directional preference may enhance hunting accuracy in foraging foxes," *Biol. Lett.*, vol. 7, no. 3, pp. 355–357, Mar. 2011, doi: 10.1098/rsbl.2010.1145.
- [23] H. Mohammed and T. Rashid, "FOX: a FOX-inspired optimization algorithm," *Appl. Intell.*, vol. 53, no. 1, pp. 1030–1050, Jan. 2023, doi: 10.1007/s10489-022-03533-0.
- [24] G. S. Chadha, A. Panambilly, A. Schwung, and S. X. Ding, "Bidirectional deep recurrent neural networks for process fault classification," *ISA Trans.*, vol. 106, pp. 330–342, Nov. 2020, doi: 10.1016/j.isatra.2020.07.011.
- [25] E. Messner, M. Zöhrer, and F. Pernkopf, "Heart Sound Segmentation—An Event Detection Approach Using Deep Recurrent Neural Networks," *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, vol. 65, no. 9, pp. 1964–1974, Sep. 2018, doi: 10.1109/TBME.2018.2843258.

The Effect of Various Text Representation Methods for Sentiment Analysis on Movie Review Data with Different Machine Learning Methods

Veysel GÖÇ¹  Muhammet Sinan BAŞARSLAN^{1*} 

¹Istanbul Medeniyeti University, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Department of Computer Engineering, Istanbul, Turkey

Article Info

Research article
Received: 09/06/2024
Revision: 22/09/2024
Accepted: 06/10/2024

Keywords

Machine Learning
Movie Review
Sentiment Analysis
Text Representation

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 09/06/2024
Düzeltilme: 22/09/2024
Kabul: 06/10/2024

Anahtar Kelimeler

Makine Öğrenimi
Film Revie
Duygu Analizi
Metin Gösterimi

Graphical/Tabular Abstract (Grafik Özet)

In this study, we investigate the potential of machine learning (ML) models after different text representation methods on the balanced IMDB dataset. After data cleaning and text representation, sentiment analysis classification is performed. In the SVM model, the highest performance was observed with BERT: ACC 0.9033, F1 0.9308, R 0.9015, P 0.9072, AUC 0.9638. The results show that BERT offers high performance in text classification. / Bu çalışmada, dengeli IMDB veri kümesinde farklı metin temsil yöntemleri sonrası makine öğrenmesi (ML) modellerinin potansiyeli incelenmiştir. Veri temizleme ve metin temsil aşamalarının ardından, duygu analizi sınıflandırması yapılmıştır. SVM modelinde, BERT ile elde edilen en yüksek performans gözlemlenmiştir: ACC 0.9033, F1 0.9308, R 0.9015, P 0.9072, AUC 0.9638. Sonuçlar, BERT'in metin sınıflandırmada yüksek performans sunduğunu göstermektedir.

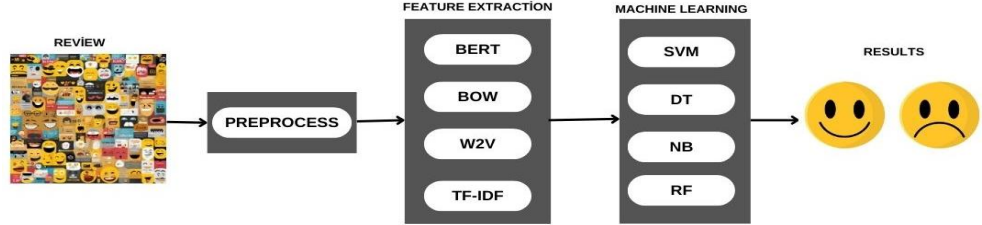


Figure A: Graphical abstract / Şekil A: Özet grafik

Highlights (Önemli noktalar)

- Sentiment analysis was performed for ML models with different text representation methods on the IMDB dataset/ IMDB veri kümesinde farklı metin temsil yöntemleriyle ML modelleri için duygu analizi gerçekleştirilmiştir
- BERT-based text extraction provided the highest performance among all the models, with SVM being particularly successful/ BERT tabanlı metin çıkarımı, tüm modeller arasında en yüksek performansı sağlamış; özellikle SVM modelinde başarı elde edilmiştir
- Classifications with BERT offer high accuracy and reliability in NLP tasks/ BERT ile yapılan sınıflandırmalar, NLP görevlerinde yüksek doğruluk ve güvenilirlik sunmaktadır

Aim (Amaç) The aim of this study is to evaluate the sentiment analysis performance of machine learning models with different text representation methods on the IMDB dataset. In particular, it aims to identify the highest performing models by examining the impact of BERT-based feature extraction. The results aim to demonstrate the effectiveness and reliability of these methods in NLP applications/Bu çalışmanın amacı, IMDB veri kümesinde farklı metin temsil yöntemleriyle makine öğrenmesi modellerinin duygu analizi performansını değerlendirmektir. Özellikle, BERT tabanlı öznelik çıkarımının etkisini inceleyerek en yüksek performans sağlayan modelleri belirlemeyi hedeflemektedir. Sonuçlar, NLP uygulamalarında bu yöntemlerin etkinliğini ve güvenilirliğini göstermeyi amaçlamaktadır

Originality (Özgünlük): It highlights the impact of BERT-based feature extraction in sentiment analysis by comparing the performance of various ML models with different text representation methods on the IMDB dataset. The study offers a new perspective to the field by examining the use of BERT with different ML models in NLP tasks/ IMDB veri kümesinde farklı metin temsil yöntemleriyle çeşitli ML modellerinin performansını karşılaştırarak, BERT tabanlı öznelik çıkarımının duygu analizindeki etkisini vurgulamasında yatmaktadır. Çalışma, BERT'in NLP görevlerinde farklı ML modelleriyle kullanımını inceleyerek alana yeni bir bakış açısı sunmaktadır

Results (Bulgular): It shows that BERT-based feature extraction on the IMDB dataset significantly improves sentiment analysis performance, especially when combined with the SVM model/ IMDB veri kümesinde BERT tabanlı öznelik çıkarımının özellikle SVM modeliyle birleştirildiğinde duygu analizi performansını önemli ölçüde artırdığını göstermektedir

Conclusion (Sonuç): The emphasizes that Transformer models offer high accuracy and reliability in NLP tasks/ Transformer modellerinin NLP görevlerinde yüksek doğruluk ve güvenilirlik sunduğunu vurgulamaktadır



The Effect of Various Text Representation Methods for Sentiment Analysis on Movie Review Data with Different Machine Learning Methods

Veysel GÖÇ¹ Muhammet Sinan BAŞARSLAN^{1*}

¹Istanbul Medeniyeti University, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Department of Computer Engineering, Istanbul, Turkey

Article Info

Research article
Received: 09/06/2024
Revision: 22/09/2024
Accepted: 06/10/2024

Keywords

Machine Learning
Movie Review
Sentiment Analysis
Text Representation

Abstract

In this study, we explore the potential of machine learning (ML) models after different text representation methods on the balanced Internet Movie Database (IMDB) dataset, which is widely considered as the gold standard in sentiment analysis, one of the Natural Language Processing (NLP) tasks. On the open-source IMDB movie reviews dataset, we first undertake data cleaning and text representation with data preprocessing steps. Then, we apply sentiment classification using different ML models. To evaluate the models, we used Accuracy (ACC), precision (P), Recall (R), F1-score (F1), and area under curve score (AUC), as well as receiver operating characteristic (ROC) Curve. It is worth noting that text feature extraction with Bidirectional Encoder Representations from Transformers (BERT) provided the highest performance in all models, with the SVM model offering particularly promising results. In this model, we observed the following results: ACC 0.9033, F1 0.9308, R 0.9015, P 0.9072, AUC 0.9638, and ROC Curve 0.96. These findings suggest that NLP techniques, particularly ML models that employ BERT may offer high levels of ACC and reliability in text classification problems. It would be beneficial for future studies to validate these findings using BERT on different NLP tasks. This would help to evaluate the effectiveness and applicability of the models in practice.

Farklı Makine Öğrenmesi Yöntemleri ile Film Yorumları Üzerine Duygu Analizi için Çeşitli Metin Temsil Yöntemlerinin Etkisi

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 09/06/2024
Düzeltilme: 22/09/2024
Kabul: 06/10/2024

Anahtar Kelimeler

Makine Öğrenimi
Film eleştirisi
Duygu Analizi
Metin Gösterimi

Öz

Bu çalışmada, Doğal Dil İşleme (NLP) görevlerinden biri olan duygu analizinde yaygın olarak altın standart olarak kabul edilen dengeli İnternet Film Veritabanı (IMDB) veri kümesi üzerinde farklı metin temsil yöntemlerinden sonra makine öğrenimi (ML) modellerinin potansiyelini araştırıyoruz. Açık kaynak kodlu IMDB film yorumları veri kümesi üzerinde ilk olarak veri ön işleme adımları ile veri temizleme ve metin gösterimi gerçekleştiriyoruz. Ardından, farklı makine öğrenimi modelleri kullanarak duygu sınıflandırması uyguluyoruz. Modelleri değerlendirmek için Doğruluk (ACC), kesinlik (P), Hatırlama (R), F1-skoru (F1) ve eğri altındaki alan (AUC) skorunun yanı sıra alıcı işletim karakteristiği (ROC) Eğrisini kullandık. Transformatorlerden Çift Yönlü Kodlayıcı Temsilleri (BERT) ile metin özelliği çıkarmanın tüm modellerde en yüksek performansı sağladığını ve SVM modelinin özellikle umut verici sonuçlar sunduğunu belirtmek gerekir. Bu modelde aşağıdaki sonuçları gözlemledik: ACC 0.9033, F1 0.9308, R 0.9015, P 0.9072, AUC 0.9638 ve ROC Curve 0.96. Bu bulgular, NLP tekniklerinin, özellikle de BERT kullanan ML modellerinin metin sınıflandırma problemlerinde yüksek düzeyde ACC ve güvenilirlik sunabileceğini göstermektedir. Gelecekteki çalışmaların bu bulguları farklı NLP görevlerinde BERT kullanarak doğrulaması faydalı olacaktır. Bu, modellerin uygulamadaki etkinliğini ve uygulanabilirliğini değerlendirmeye yardımcı olacaktır.

1. INTRODUCTION (GİRİŞ)

Today, large datasets on the Internet provide access to a variety of information sources, and analyzing this data is becoming an important tool for understanding user trends and preferences. Text data, a subset of this data, is particularly prevalent

on social media platforms, online shopping sites, and movie review sites. Analyzing this text data requires the use of NLP techniques to understand users' emotional states and create an overall perception. These techniques are designed to detect, understand, and infer emotional expressions in text. At this point, however, it is important to ask why

businesses need technologies such as artificial intelligence (AI) and NLP. As technology advances, companies are faced with more and more data that needs to be effectively analyzed. In particular, data from consumers' online interactions plays an important role in determining marketing strategies and product development. Therefore, it is inevitable for companies to apply NLP techniques to understand customer feedback, emotional reactions, and overall perceptions.

In this context, this study on the IMDB movie reviews dataset [1] is also very important. This dataset contains user reviews of different movies and these reviews may reflect positive or negative emotions. Therefore, this study aims to analyze these reviews using NLP techniques and develop a method to understand emotional reactions to movies. The findings can be extremely valuable not only in the film industry, but also for companies looking to improve their marketing strategies. This analysis can help filmmakers evaluate the feedback and provide an important guide to understanding the preferences of potential viewers and shape their future projects.

In conclusion, this study provides a framework for how NLP can be used in sentiment analysis, illustrating why companies need technologies such as AI and NLP and why this study is important. The results of this study can help companies make better decisions and develop customer-centric strategies.

The main contribution of the study is to investigate the contribution of text representation to model performance in sentiment analysis, an NLP task. For this purpose, frequency-based representation methods such as Bag of Words (BoW), Term Frequency-Inverse Document Frequency (TF-IDF), and the embedding method Word2Vec (W2V) were used. In addition, a groundbreaking transformer architecture in NLP such as BERT was also used. These methods were trained on a publicly available dataset using Naïve Bayes (NB), Decision Tree (DT), Support Vector Machine (SVM), and Random Forest (RF), which are the first methods that come to mind when it comes to ML methods. The best model is also compared with the literature in the conclusion and discussion section. Figure 1 shows a visualization of the process of the study.

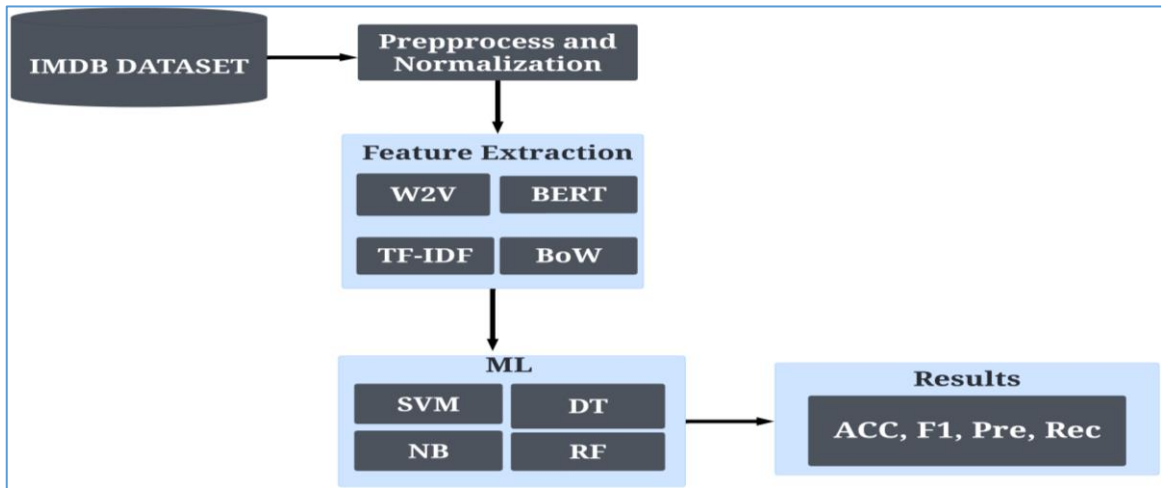


Figure 1. Process of the study (Çalışma süreci)

2. LITERATURE REVIEW (LİTERATÜR ARAŞTIRMASI)

Studies on sentiment analysis on IMDB movie reviews [1] using NLP techniques have attracted great interest in recent years. In this section, we will describe what kind of work has been done in the literature to perform sentiment analysis from IMDB reviews.

Shaukat et al. obtained 0.8667 ACC rate with a multi-layer perceptron (MLP) model using BoW approach on IMDB data. This study shows that the combination of BoW and MLP can be effective for sentiment analysis [2]. Kaynar et al. achieved an

ACC of 0.8610 using TF-IDF. [3]. Similarly, Amulya et al. achieved an ACC of 0.88 using TF-IDF and Recurrent Neural Network (RNN) on IMDB data [4]. These studies show that text features extracted using TF-IDF are highly suitable for sentiment analysis. Misini et al. achieved an ACC of 0.8667 with MLP using BoW [5]. This result confirms that the combination of BoW and MLP is a frequently preferred and effective method in the literature. Basarslan and Kayaalp obtained an ACC of 0.8821 using Keras embedding representation and Bidirectional Long Short-Term Memory (BiLSTM) [6]. This study shows that deep learning methods are effective in improving the performance of sentiment analysis. Mohaiminul and

Sultana applied TF-IDF followed by NB, SVM, RF, and Stochastic Gradient Descent (SGD) algorithms and obtained 0.8366 ACC with RF [7]. These results provide important data for comparing the sentiment analysis performance of different ML algorithms. Başa and Basarslan preprocessed the data before performing word vectorization with TF-IDF on IMDB data, and then achieved 0.90 ACC with the SVM algorithm [8]. This study shows that the combination of SVM and TF-IDF can provide strong performance. Pang et al. proposed an approach for sentiment analysis on IMDB comments and classified positive and negative emotions using text mining techniques. This work provided a basic framework for assessing the emotional tone of IMDB comments [9]. Subsequent work has suggested that deep learning techniques can improve the performance of sentiment analysis. Kim et al. performed sentiment analysis on IMDB movie reviews using deep neural networks and achieved higher ACC than traditional methods. This study demonstrated that deep learning models are effective in sentiment analysis [10]. Similarly, the use of word embedding can also improve sentiment analysis performance. Maas et al. [1] investigated how distributional representations such as W2V can be used for sentiment analysis on IMDB reviews.

Similarly, the use of word embedding can also improve sentiment analysis performance. Maas et al. [1] investigated how distributional representations such as W2V can be used for sentiment analysis on IMDB reviews. This study showed that word-level representations can improve sentiment analysis performance. In this context, this study aims to investigate how NLP techniques can be used for sentiment analysis on IMDB movie reviews and

how they can contribute to the existing literature. This study can extend the results of previous studies, introduce new methods, and fill existing gaps in the field of sentiment analysis.

Sentiment analysis studies on the IMDB dataset [1] have been conducted using different text feature extraction methods and ML algorithms. These studies compared the performance of models built using different text representation methods.

3. MATERIALS AND METHODS (MATERİYAL VE METOD)

This section is a description of the text representation, the dataset, and the ML algorithms used in this study.

3.1 Text Representation (Kelime Temsilleri)

It aims to convert text data into a digital format and put it into a format that the computer can understand. This is usually realized as word vectors or document vectors. BeautifulSoup is a popular HTML and XML parser library in Python [11]. It is widely used in text mining projects to extract and preprocess data from web pages.

In this study, frequency-based (TF-IDF, BoW), embedding (W2V), and transformer (BERT) methods were used to investigate their contribution to classification models. These methods will be described in this section. W2V is one of the word embedding techniques and is used to compute word vectors [12]. In this method, a vector representing the meaning of a word is obtained. W2V methods are shown in Figure 2.

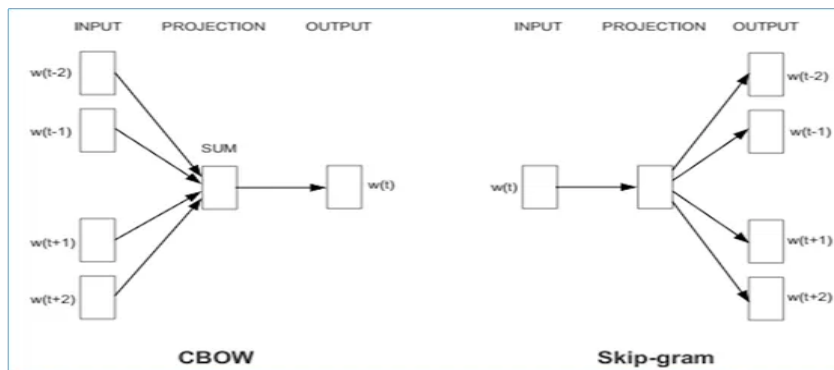


Figure 2. W2V demonstration (W2V gösterimi) [12]

TF-IDF is a statistical measure used to determine the importance of a term in a document. It calculates the ratio between the frequency of a term in a document (TF) and its rarity in all documents (IDF). TF is given in equation (1), IDF in equation (2), and TF-IDF in equation (3) [8].

$$TF(t, d) = \frac{\text{number of } t \text{ terms in } d \text{ documents}}{\text{total number of terms in document } d} \quad (1)$$

$$IDF = \log\left(\frac{N}{DF(t)}\right) \quad (2)$$

$$TF-IDF = TF(t, d) * IDF(t) \quad (3)$$

BoW is a model for representing the frequency of words in a document. In this model, each word in a

document is put into a bag and only its presence is considered, regardless of its frequency in the document. That is, the content of the document is not considered as ordered, but only as a set [13]. The BoW model is widely used in natural language processing applications such as text classification and sentiment analysis. This model can be used to represent the content of documents in a numerical vector format and can be used as input data for ML algorithms.

BERT is an NLP model created by Google. BERT works by examining the context of sentences bidirectionally (both left-to-right and right-to-left) to better understand the meaning of language. This allows it to build more accurate and meaningful representations of language, taking into account information from words on both sides of the text. A representation of the BERT architecture is shown in Figure 3 [14].

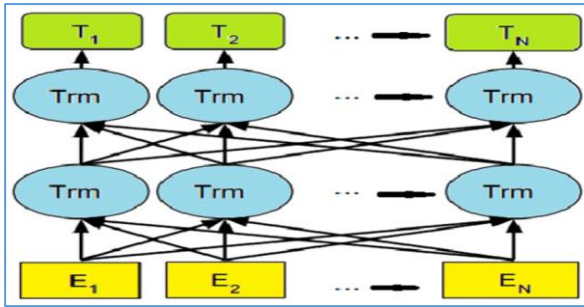


Figure 3. BERT demonstration (BERT gösterimi) [13]

3.2 Dataset (Veri Seti)

In this section, we describe the details of the dataset collected by Maas et al [1]. The dataset consists of two attributes: review and sentiment. The sentiment attribute contains a total of 50.000 comments in two classes, positive and negative.

4. MACHINE LEARNING (MAKİNE ÖĞRENMESİ)

ML is a branch of AI that enables computer systems to improve themselves by analyzing data and using algorithms to perform specific tasks [14]. This type of algorithm allows computers to solve complex problems through the process of learning from data. ML models often gain their experience through data and make future decisions using the knowledge learned from that data. It can be used in a variety of tasks such as classification, regression, clustering, and pattern recognition. ML is increasingly used to solve complex problems involving large amounts of data and computing power. Its main goal is to make computer systems capable of learning from data to produce solutions without human intervention [15].

In this study, NB, DT, RF, SVM were used. These algorithms will be described in this section.

NB is a statistical classification algorithm. It is often used in classification tasks and is based on Bayes' theorem. It assumes the independence of each feature. Equation (4) shows the equation of the Naive Bayes theorem [16].

$$P(A|B) = \frac{P(B|A) * P(A|B)}{P(B)} \tag{4}$$

SVM is a supervised ML algorithm used for classification and regression analysis. The main goal of SVM is to find a hyperplane that provides the best discrimination when classifying data. Figure 4 shows a visualization of SVM [13].

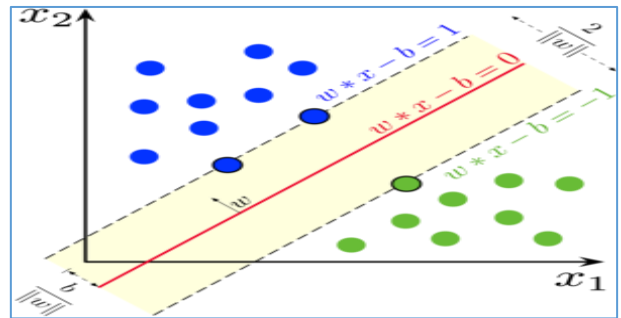


Figure 4. Demonstration of the SVM method (SVM yönteminin gösterimi) [14]

LR is a classification algorithm and makes probability estimates using the logistic function. It is widely used in binary classification problems. Figure 5 shows a visualization of LR [17].

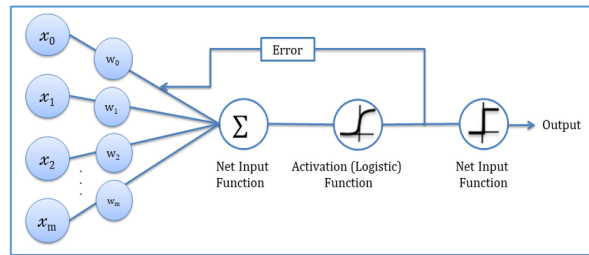


Figure 5. Demonstration of the LR method (LR yönteminin gösterimi) [17]

DT is a model used in classification and regression problems. It organizes the dataset into a tree-like structure based on features and uses this structure to perform classification or prediction [18]. Figure 6 shows a visualization of DT.

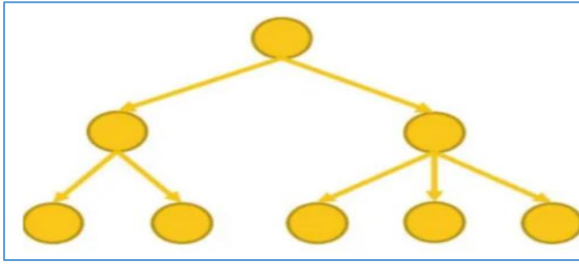


Figure 6. Demonstration of the DT method (DT yönteminin gösterimi) [19]

RF is a decision tree-based classification and regression method. It is created by combining multiple decision trees and is used to provide more accurate and balanced results [20]. Figure 6 shows a visualization of RF.

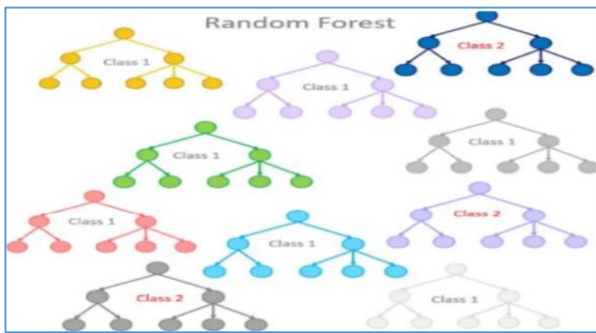


Figure 7. Demonstration of the RF method (RF yönteminin gösterimi) [19]

5. EXPERIMENT SETUP (DENEYSEL KURULUM)

In the study, text cleaning and normalization operations were applied to the comments in the IMDB dataset [1]. Then, an 80%-20% holdout training test separation was performed and text representation was extracted using wor2vec, TF-IDF, BoW, and BERT. Then the models were built with ML models SVM, RF, DT, NB. The whole study was written on Google Colab using Python libraries.

5.1. Performance Metrics (Performans Metrikleri)

ACC, P, R, F1, which are used to calculate the performance metrics of ML models for sensitivity

analysis, are given in equation (5) and equation (8), respectively [21-23]. These metrics are obtained from the complexity matrix. This matrix contains the true values and the model predicts correctly or incorrectly and the false values and the model predicts correctly or incorrectly. These are True Positive (TP), True Negative (TN), False Positive (FP), and False Negative (FN).

$$ACC = \frac{Tp+Tn}{Tp+Tn+Fp+Fn} \quad (5)$$

$$P = \frac{Tp}{Tp+Fp} \quad (6)$$

$$R = \frac{Tp}{Tp+Fn} \quad (7)$$

$$F1 = \frac{P*R}{R+P} \quad (8)$$

The metrics given in equations (5) to (8) are obtained from the complexity matrix. The other performance metric used in the study is ROC Curve. ROC Curve is a graphical representation used to evaluate the performance of classification models. The area under the ROC graph is called the ROC Curve. This curve shows the relationship between the true positive rate and the false positive rate of the model. These two rates help us understand how the model performs at different thresholds. The area under the ROC Curve (AUC) summarizes the overall performance of the model. The AUC value is between 0 and 1 [20]:

- AUC = 0.5: indicates that the model predicts at random. The ROC Curve is a line with a 45-degree angle [23].
- AUC > 0.5: Indicates that the model is better than random prediction. The model can discriminate between classes.
- AUC = 1: Indicates that the model performs perfectly and can discriminate classes without error.

6. EXPERIMENT RESULTS (DENEY SONUÇLARI)

The study was written in Python sci-kit learn library. The parameter details of all the models are given in Table 1. These parameters and models were created using Python sci-kit learn library.

Table 1. Model parameter details (Model parametre detayları)

Model	Parameters	Parameter Details
SVM	Kernel	Linear
	C	1
NB	alpha	1.0
	fit_prior	True
	class_prior	None
DT	max_depth	None
RF	n_estimators	100

random_state	0
--------------	---

The parameters listed in Table 1 are used as reported in the literature or with default values. Parameter optimization will be discussed in detail and applied

in future studies. Table 2 shows the results of the models built with SVM, NB, DT, RF according to the text representation.

Table 2. Results of the ML model (ML model sonuçları)

	SVM				NB			
	BoW	TF-IDF	W2V	BERT	BoW	TF-IDF	W2V	BERT
Acc	0.8194	0.8434	0.8793	0.9033	0.8631	0.7474	0.8422	0.8458
F1	0.8220	0.8436	0.8798	0.9308	0.8641	0.7502	0.8457	0.8483
R	0.8101	0.8423	0.8765	0.9015	0.8578	0.7421	0.8273	0.8346
P	0.8342	0.8449	0.8831	0.9072	0.88706	0.7585	0.8649	0.8625
AUC	0.8897	0.9185	0.9496	0.9638	0.9383	0.8256	0.9038	0.9256
ROC	0.89	0.92	0.95	0.96	0.94	0.83	0.90	0.93
	DT				RF			
	BoW	TF-IDF	W2V	BERT	BoW	TF-IDF	W2V	BERT
Acc	0.7254	0.7115	0.7177	0.7797	0.8466	0.8168	0.8515	0.8626
F1	0.7263	0.7130	0.7194	0.7789	0.8479	0.8166	0.8531	0.8625
R	0.7238	0.7094	0.7152	0.7818	0.8408	0.8174	0.8440	0.8635
P	0.7288	0.7166	0.7237	0.7760	0.8552	0.8157	0.8624	0.8614
AUC	0.7253	0.7115	0.7177	0.7796	0.92	0.89	0.92	0.93
ROC	0.73	0.71	0.72	0.78	0.92	0.90	0.93	0.94

Table 2 According to the results, the SVM model performed the best, especially when BERT feature extraction was used. The AUC value obtained with BERT-based feature extraction is 0.9638, which shows that the model performs very well. The W2V and TF-IDF methods also performed well. On the other hand, the BoW method underperformed compared to the other methods.

According to Table 2, the NB model performed best when BoW feature extraction was used. The AUC value obtained with BoW is 0.9383. In contrast, the TF-IDF method performed poorly compared to the other feature extraction methods. This shows that TF-IDF is not as effective as BoW in NB models.

The DT model presented in Table 2 showed the highest performance with BERT-based feature extraction. The AUC value obtained with this feature extraction method is 0.7796, which shows that BERT is a highly effective feature extraction method for DT models. The lower performance of other feature extraction methods compared to BERT shows the superiority of BERT for this type of model.

The RF model presented in Table 2 performs best with the BERT feature extraction method. The AUC value obtained with BERT is 0.93. In addition, the

BoW and W2V feature extraction methods also performed quite well. This shows that RF models can be flexible and perform well with different feature extraction methods.

Considering the results of the models in all the tables together, the SVM model performed best when BERT feature extraction was used, and the AUC obtained was quite high at 0.9638. W2V and TF-IDF methods also provide high performance in SVM models, while BoW method shows lower performance compared to other methods. NB models achieved the best performance with BoW feature extraction and the AUC value was 0.9383. However, the TF-IDF method showed lower performance in NB models. DT models also performed best with BERT feature extraction and the AUC was 0.7796. RF models performed best with an AUC of 0.93 using BERT. BoW and W2V methods also performed well on RF models.

In general, BERT and SVM achieved better results compared to the other methods used in the project. These results show that feature extraction methods play an important role in model performance. The ROC Curve of the generated models are shown in Figure 8.

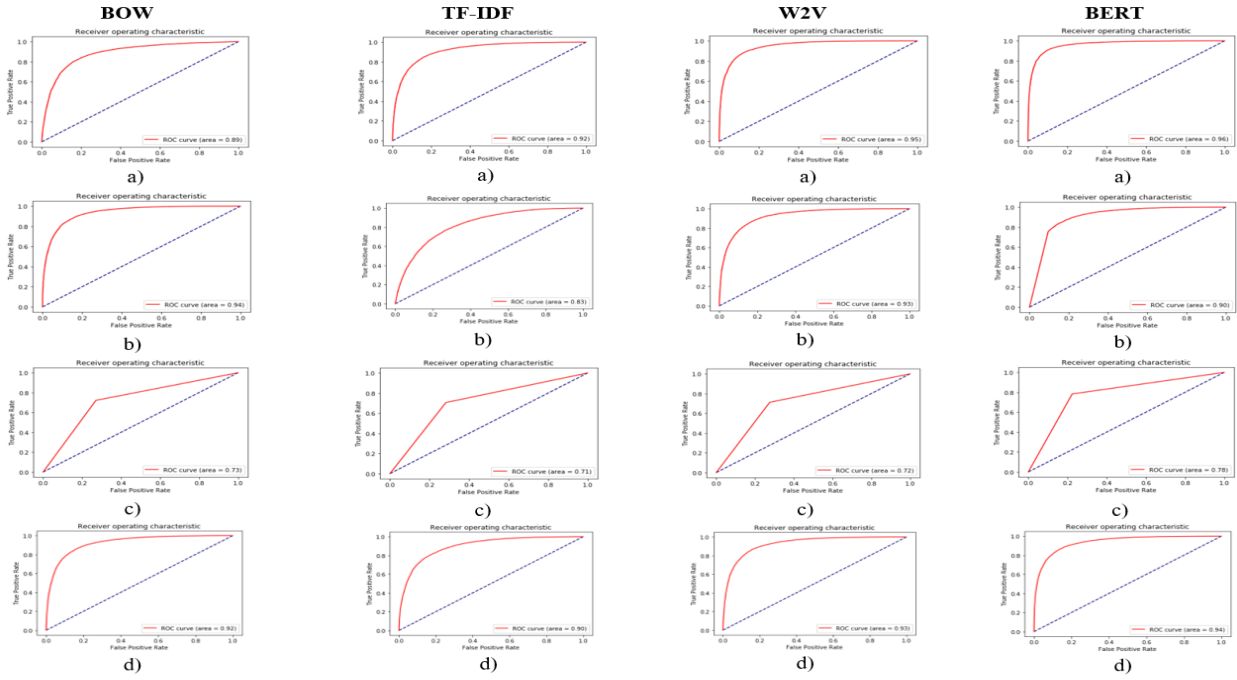


Figure 8. ROC Results of a) SVM b) NB c) DT d) RF Models (a) SVM b) NB c) DT d) RF Modellerinin ROC Sonuçları)

As illustrated in Figure 8, the area under the curve (AUC) values for all models fall within the range of 0.71 to 0.96. This indicates that the models exhibit excellent performance.

7. CONCLUSION AND DISCUSSION (SONUÇ VE TARTIŞMA)

In this study, we applied NLP techniques to perform emotional analysis on the comments of a balanced dataset collected from IMDB. The comments were classified as positive and negative. The results of this study show that BERT is the best performing text feature extraction method for text classification problems. Although BoW and W2V showed competitive results in some models, TF-IDF showed lower overall performance. Similar studies on word representation with similar content and ML-generated models are shown in Table 3.

Table 3. Similar studies on the IMDB dataset (IMDB veri kümesi üzerinde benzer çalışmalar)

	ML Methods	Text Representation	ACC
[2]	MLP	BoW	0.8667
[3]	MLP	TF-IDF	0.8610
[4]	RNN	TF-IDF	0.88
[5]	MLP	TF-IDF	0.8867
[6]	BiLSTM	Embedding	0.8821
[7]	RF	TF-IDF	0.8366
[8]	SVM	TF-IDF	0.90
The present	SVM	BERT	0.9033

As can be seen in Table 3, the BERT method used in our study achieved the highest result with an accuracy rate of 0.9033, which is higher than other studies, when compared to studies with similar content in the literature. This success was especially achieved with the SVM model. Other text feature extraction methods such as BoW, TF-IDF, and W2V also showed high performance, but were not as effective as this method. These results show that the method provides superior performance in sentiment analysis problems and is more successful in text classification problems compared to other methods.

The results obtained show that the methods used are highly effective. Text feature extraction with BERT gave the highest performance in all models and especially the SVM model gave the best results (AUC = 0.9638). This shows that NLP techniques and especially ML models used in combination with BERT provide high accuracy and reliability in text classification problems.

However, using larger datasets for similar studies in the future and experimenting with different NLP techniques may help to further improve the results. In particular, methods such as BoW, TF-IDF, and W2V were found to be effective in certain scenarios. To increase the generalizability of the model, it may be useful to investigate different datasets, for example, datasets specific to different movie genres or language groups.

This study highlights ML techniques and shows that NLP techniques can be used effectively in emotion analysis. These techniques have the potential to be a valuable tool in industrial applications. At the same time, the results of this study provide practical implications that can be used in academic research and commercial applications.

In addition to the superior performance of BERT, it was observed that other feature extraction methods can be effective in certain models. This suggests that each model and method combination should be carefully evaluated in specific application areas. For example, the better performance of BoW in NB models proves that simpler methods can also work in certain situations.

In conclusion, this study shows that BERT and SVM perform well in text classification and that NLP techniques can be very powerful tools when combined with the right model and feature extraction methods. These results lay the foundation for future work and pave the way for more in-depth research in the field of text analysis.

It is crucial for future studies to validate these findings using different NLP models and more diverse datasets. It would also be useful to study how these methods perform in real-world applications, such as customer feedback analysis or social media sentiment analysis. This will be crucial in assessing the effectiveness and applicability of the models in practice.

DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS (ETİK STANDARTLARIN BEYANI)

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

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

AUTHORS' CONTRIBUTIONS (YAZARLARIN KATKILARI)

Veysel GÖÇ: Preprocessing the dataset, data analysis, experiments and evaluations, manuscript draft preparation.

Veri setinin ön işlenmesi, veri analizi, deneyler ve değerlendirmeler, makale taslağının hazırlanması.

Muhammet Sinan BAŞARSLAN: Defining the methodology, conceptualization, evaluations of the results and draft editing.

Metodolojinin tanımlanması, kavramsallaştırma, sonuçların değerlendirilmesi ve taslak 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] A. L. Maas, R. E. Daly, P. T. Pham, D. Huang, A. Y. Ng, and C. Potts, "Learning word vectors for sentiment analysis," *ACL-HLT 2011 - Proceedings of the 49th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics: Human Language Technologies*, vol. 1, pp. 142–150, 2011.
- [2] Z. Shaukat, A. A. Zulfiqar, C. Xiao, M. Azeem, and T. Mahmood, "Sentiment analysis on IMDB using lexicon and neural networks," *SN Appl Sci*, vol. 2, no. 2, p. 148, Feb. 2020, doi: 10.1007/s42452-019-1926-x.
- [3] O. Kaynar, Y. Görmez, M. Yldz, and A. Albayrak, "Makine öğrenmesi yöntemleri ile Duygu Analizi," in *International Artificial Intelligence and Data Processing Symposium (IDAP'16)*, 2016, pp. 17–18.
- [4] K. Amulya, S. B. Swathi, P. Kamakshi, and Y. Bhavani, "Sentiment Analysis on IMDB Movie Reviews using Machine Learning and Deep Learning Algorithms," in *2022 4th International Conference on Smart Systems and Inventive Technology (ICSSIT)*, IEEE, Jan. 2022, pp. 814–819. doi: 10.1109/ICSSIT53264.2022.9716550.
- [5] A. Misini, A. Kadriu, and E. Canhasi, "Albanian Authorship Attribution Model," in *2023 12th Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO)*, IEEE, Jun. 2023, pp. 1–5. doi: 10.1109/MECO58584.2023.10155046.
- [6] M. S. Basarslan and F. Kayaalp, "Sentiment Analysis with Various Deep Learning Models on Movie Reviews," in *2022 International Conference on Artificial Intelligence of Things (ICAIoT)*, IEEE, Dec. 2022, pp. 1–5. doi: 10.1109/ICAIoT57170.2022.10121745.
- [7] M. Mohaiminul and N. Sultana, "Comparative Study on Machine Learning Algorithms for Sentiment Classification," *Int J Comput Appl*, vol. 182, no. 21, pp. 1–7, Oct. 2018, doi: 10.5120/ijca2018917961.

- [8] S. N. Başa and M. S. Başarslan, "Sentiment Analysis Using Machine Learning Techniques on IMDB Dataset," in 2023 7th International Symposium on Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies (ISMSIT), IEEE, Oct. 2023, pp. 1–5. doi: 10.1109/ISMSIT58785.2023.10304923.
- [9] B. Pang, L. Lee, and S. Vaithyanathan, "Thumbs up? Sentiment Classification using Machine Learning Techniques," May 2002.
- [10] Y. Kim and O. Zhang, "Credibility Adjusted Term Frequency: A Supervised Term Weighting Scheme for Sentiment Analysis and Text Classification," May 2014.
- [11] L. Richardson, "Beautiful Soup Documentation Release 4.4.0," 2019.
- [12] J. Mikolov, T., Sutskever, I., Chen, K., Corrado, G. S., & Dean, "Distributed representations of words and phrases and their compositionality," in *Advances in Neural Information Processing Systems*, 2013. [Online]. Available: <https://proceedings.neurips.cc/paper>
- [13] M. S. Başarslan and F. Kayaalp, "Sentiment analysis of coronavirus data with ensemble and machine learning methods," *Turkish Journal of Engineering*, vol. 8, no. 2, pp. 175–185, Apr. 2024, doi: 10.31127/tuje.1352481.
- [14] M. B. Çakı and M. S. Başarslan, "Classification of fake news using machine learning and deep learning", *Journal of Artificial Intelligence and Data Science*, vol. 4, no. 1, pp. 22–32, 2024.
- [15] P. P. Shinde and S. Shah, "A Review of Machine Learning and Deep Learning Applications," in 2018 Fourth International Conference on Computing Communication Control and Automation (ICCUBEA), IEEE, Aug. 2018, pp. 1–6. doi: 10.1109/ICCUBEA.2018.8697857.
- [16] S. Saifullah, R. Dreżewski, F. A. Dwiyanto, A. S. Aribowo, Y. Fauziah, and N. H. Cahyana, "Automated Text Annotation Using a Semi-Supervised Approach with Meta Vectorizer and Machine Learning Algorithms for Hate Speech Detection," *Applied Sciences*, vol. 14, no. 3, p. 1078, Jan. 2024, doi: 10.3390/app14031078.
- [17] M. Granik and V. Mesyura, "Fake news detection using naive Bayes classifier," in 2017 IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON), IEEE, May 2017, pp. 900–903. doi: 10.1109/UKRCON.2017.8100379.
- [18] M. P. LaValley, "Logistic Regression," *Circulation*, vol. 117, no. 18, pp. 2395–2399, May 2008, doi: 10.1161/circulationaha.106.682658.
- [19] M. H. L. Louk and B. A. Tama, "Dual-IDS: A bagging-based gradient boosting decision tree model for network anomaly intrusion detection system," *Expert Syst Appl*, vol. 213, p. 119030, Mar. 2023, doi: 10.1016/j.eswa.2022.119030.
- [20] L. Breiman, "Random Forests," *Mach Learn*, vol. 45, no. 1, pp. 5–32, 2001, doi: 10.1023/A:1010933404324.
- [21] M. Z. Khaliki and M. S. Başarslan, "Brain tumor detection from images and comparison with transfer learning methods and 3-layer CNN," *Sci Rep*, vol. 14, no. 1, p. 2664, Feb. 2024, doi: 10.1038/s41598-024-52823-9.
- [22] T. Öztürk, Z. Turgut, G. Akgün, and C. Köse, "Machine learning-based intrusion detection for SCADA systems in healthcare," *Network Modeling Analysis in Health Informatics and Bioinformatics*, vol. 11, no. 1, p. 47, Dec. 2022, doi: 10.1007/s13721-022-00390-2.
- [23] H. A. Ardaç and P. Erdoğan, "Question answering system with text mining and deep networks," *Evolving Systems*, May 2024, doi: 10.1007/s12530-024-09592-7.



Kardiyovasküler Hastalıkların Derin Öğrenme Algoritmaları İle Tanısı

Ali VIRIT^{1*} Ali ÖTER²

¹Kahramanmaraş Sütçü İmam University, Institute of Science, Department of Information Systems, Kahramanmaraş, Türkiye

²Kahramanmaraş Sütçü İmam University, Vocational School of Technical Sciences, Department of Electronics and Automation, Kahramanmaraş, Türkiye

Article Info

Research article
Received: 30/06/2024
Revision: 15/08/2024
Accepted: 10/10/2024

Keywords

Cardiovascular
Diseases
Deep Learning
Explainable AI

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 30/06/2024
Düzeltilme: 15/08/2024
Kabul: 10/10/2024

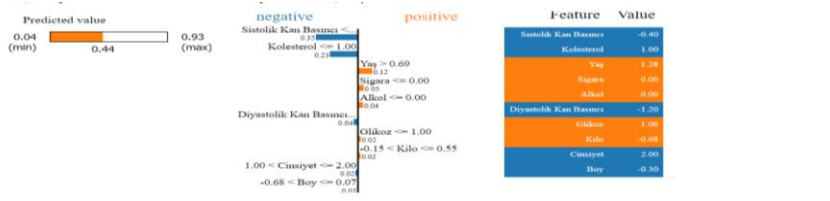
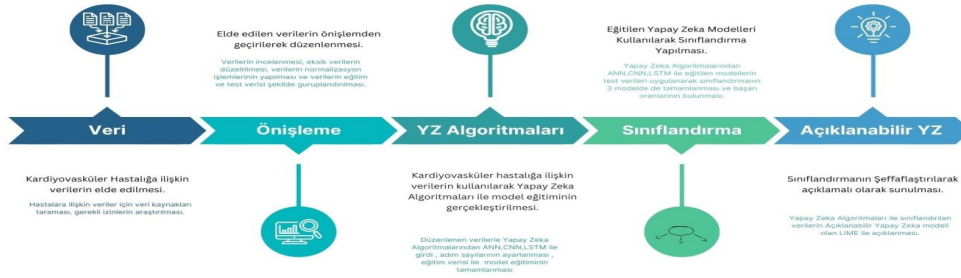
Anahtar Kelimeler

Kardiyovasküler
Hastalıklar
Derin Öğrenme
Açıklanabilir yapay
zeka

Grafik Özet (Graphical/Tabular Abstract)

Bu çalışmada, Yapay Zekâ algoritmaları kullanılarak Kardiyovasküler hastalıkların tanısı yapılarak Açıklanabilir Yapay Zeka ile yorumlanmıştır. / In this study, the diagnosis of cardiovascular diseases was made using Artificial Intelligence algorithms and interpreted with Explainable Artificial Intelligence.

Çalışma Adımları



Şekil A: Kardiyovasküler hastalıkların tanısı ve yorumlanması / Figure A: Diagnosis and interpretation of cardiovascular diseases

Önemli noktalar (Highlights)

- Kardiyovasküler hastalıkların otomatik tanısı / Automatic diagnosis of cardiovascular diseases
- YZ modelleri ile Kardiyovasküler hastalıklara tanı konulması / Diagnosing cardiovascular diseases with AI models
- Açıklanabilir YZ modelleri ile hastalık tanılarının yorumlanması / Interpreting disease diagnoses with explainable AI models

Amaç (Aim): Kardiyovasküler hastalıkların YZ yöntemleri ile tanısı ve Açıklanabilir YZ ile sonuçların şeffaflaştırılması. / Diagnosis of cardiovascular diseases with AI methods and making the results transparent with Explainable AI.

Özgünlük (Originality): Kardiyovasküler hastalıklarının tanı sonuçlarının görsel olarak yorumlanması / Visual interpretation of diagnostic results of cardiovascular diseases

Bulgular (Results): Kullanılan üç YZ modelinde benzer sonuçlar elde edilmiştir. CNN modeli %73,5 en yüksek doğruluk oranı bulunmuştur. / Similar results were obtained in the three AI models used. The CNN model was found to have the highest accuracy rate of 73.5%.

Sonuç (Conclusion): Açıklanabilir YZ ile de daha şeffaf sonuçlar oluşturarak erken tanı ile tedavi süreçlerine katkı sağlayabileceği öngörülmüştür. / It is envisaged that explainable AI can create more transparent results and contribute to early diagnosis and treatment processes.



Kardiyovasküler Hastalıkların Derin Öğrenme Algoritmaları İle Tanısı

Ali VIRT^{1*} Ali ÖTER²

¹Kahramanmaraş Sütçü İmam University, Institute of Science, Department of Information Systems, Kahramanmaraş, Türkiye

²Kahramanmaraş Sütçü İmam University, Vocational School of Technical Sciences, Department of Electronics and Automation, Kahramanmaraş, Türkiye

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 30/06/2024
Düzeltilme: 15/08/2024
Kabul: 10/10/2024

Anahtar Kelimeler

Kardiyovasküler
Hastalıklar
Derin Öğrenme
Açıklanabilir yapay zeka

Öz

Kardiyovasküler hastalıklar dünyada en ölümcül hastalıkların başında gelmektedir. Riski azaltmada erken teşhis oldukça önemlidir. Bu çalışmada Yapay Zekâ (YZ) algoritmaları kullanılarak Kardiyovasküler hastalıkların erken teşhisindeki etkisi araştırılmaktadır. Çalışmada derin öğrenme algoritmalarından ANN, CNN ve LSTM algoritmaları kullanılarak, Kardiyovasküler Hastalıkların teşhis edilmesi ve açıklanabilir YZ ile sınıflandırmanın daha şeffaf olarak sunulması amaçlanmıştır. Yapılan çalışmada bu üç yöntemin de benzer sonuçlar verdiği ve açıklanabilir YZ ile de neden hasta veya hasta olmadığına ilişkin bilgiler ortaya konulmuştur. Kullanılan üç YZ modelinde benzer sonuçlar elde edilmiştir. CNN modeli %73,5 en yüksek doğruluk oranı bulunmuştur. Bu bulgular, YZ modellerinin Hastalık teşhislerinde etkin bir araç olarak kullanılabileceğini ve Açıklanabilir YZ ile de daha şeffaf sonuçlar oluşturarak erken tanı ile tedavi süreçlerine katkı sağlayabileceğini ortaya koymaktadır.

Diagnosis of Cardiovascular Diseases with Deep Learning Algorithms

Article Info

Research article
Received: 30/06/2024
Revision: 15/08/2024
Accepted: 10/10/2024

Keywords

Cardiovascular Diseases
Deep Learning
Explainable AI

Abstract

Cardiovascular diseases are one of the deadliest diseases in the world, and early diagnosis is essential. This study investigates the effect of Artificial Intelligence algorithms on the early diagnosis of Cardiovascular Diseases. The aim of the study is to diagnose cardiovascular diseases by using artificial intelligence algorithms (ANN, CNN, and LSTM) and to present the classification more transparently with explainable artificial intelligence. Similar results were obtained in the three AI models used. The CNN model was found to have the highest accuracy rate of 73.5%. This study revealed that these three methods gave similar results, and with Explainable Artificial Intelligence, information was revealed about why the patient was or was not sick. These findings reveal that Artificial Intelligence models can be used as effective tools in disease diagnosis and that artificial intelligence can create more transparent results and contribute to early diagnosis and treatment processes.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Kardiyovasküler hastalıklar (KVH) ülkemizde ve tüm dünyada çok yaygın görülen ve dünyada ölümcül hastalıkların başında gelen bir hastalıktır[1]. Dünya Sağlık Örgütü'nün(WHO) 2019 verilerine göre ortalama 17.9 milyon insanın bu hastalıktan hayatını kaybetmesine neden olan ve tüm ülkelerde vefat eden insanların sayısının %38'ine karşılık geldiği hesaplanmaktadır[2]. KHV'da ölümcül olma nedeni genellikle damarlardaki tıkanıklıklardan meydana gelen kanın beyne ve kalbe ulaşımında yaşanan sorunlardır. Bu tıkanıklıkların en önemli nedeni damarların iç duvarlarında yağ birikerek damarı tıkamasıdır.

Ayrıca KHV' da yoksulluk, stres ve genetik etkenler de önem arz etmektedir[3]. Tıkanan damarların hemen açılması ve dolaşım sisteminin sağlıklı yürümesi gerekmektedir aksi hallerde ise kalp krizi, beyin kanaması gibi durumlar ortaya çıkabilmekte, felç kalma ve hayatını kaybetme durumları oluşmaktadır. Bu yüzden erken tanı ve teşhis oldukça önemlidir [4].

Son yıllarda bu hastalıkların teşhis ve tedavi süreçlerinde Yapay zekâ (YZ) teknikleri olan makine öğrenimi (ML) algoritmalarının uygulanması savunulmaktadır, ML denklemlerinin doğrudan yöntemle iyi uyum sağladığı bulunmuştur [5-7]. Şengur ve arkadaşları tarafından ML ile temel

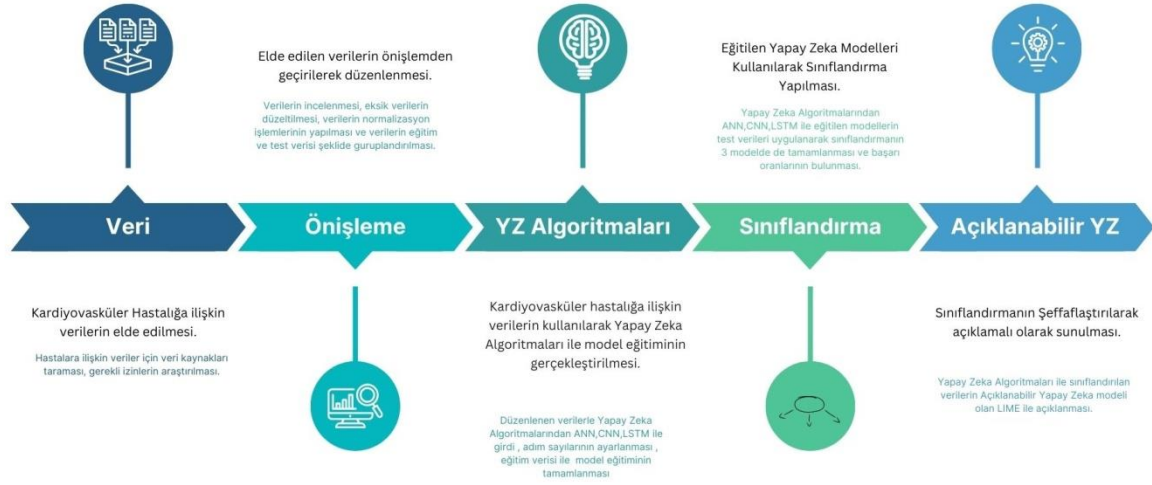
bileşen analizi (PCA), K-en yakın komşu (KNN) algoritmaları kullanılarak kalp seslerini analiz ederek kalp kapakçıklarının sağlığını belirleyen sınıflandırma çalışmasında a % 95.9 duyarlılık ve % 96 özgüllük oranı elde edilmiştir [8]. Çilhoroz tarafından yürütülen Kardiyovasküler hastalıktan ölümü etkileyen faktörlerin tanımlanması için OECD ülkeleri üzerine bir çalışma başlıklı araştırmada en küçük kareler yöntemi kullanılmıştır. Çalışmalarında sigara içme ve içki içme gibi zararlı alışkanlıklarının KVH'ye bağlı ölümler üzerinde olumlu bir etkisi olduğunu belirlemiştir [9]. Veri madenciliği yöntemleriyle kalp ve damar hastalıkları tahmini konulu yapılan başka bir çalışmada yöntemlerin performans karşılaştırması yapılmıştır. Bu çalışmada sınıflandırıcı performansı Hidden Naive Bayes (HNB) algoritmasının %84,8 başarı oranı ile en iyi performansı gösterdiği sonucuna ulaşılmıştır[10]. Kaba ve diğerleri tarafından yazılan kardiyovasküler hastalık tahmininde makine öğrenmesi sınıflandırma algoritmalarının karşılaştırıldığı çalışmada Lojistik regresyon(LR) analizi performansı %86,76 doğrulukla rastgele orman algoritmasından sonra başarılı sonuçlar elde edilmiştir[11]. Ancak belirtilen bu çalışmalarda derin öğrenme (DL) tekniklerine çok az sayıda rastlanmıştır. DL teknikleri günümüzde pek çok farklı alanda kullanılmaktadır [12-14]. Özellikle işaret ve görüntü işleme, doğal dil işleme, robotik ve ses tanıma gibi alanlarda derin öğrenme algoritmalarının etkinliği kanıtlanmıştır. İşaret işleme, doğadaki ve insan yapımı sistemlerden gelen işaretleri analiz etmekle ilgilenir. Bu işaretler, ses, görüntü, video veya diğer veri türleri olabilir. Bu işaretlerden bilgi çıkarmak için matematiksel ve istatistiksel hesaplama yöntemleri kullanılarak işaret işleme gerçekleştirilir. Bir işaretin veya verinin hangi kategoriye ait olduğunun tahmin edilerek sınıflandırılması, bozulmuş bir işaretin düzeltilmesi, bir işaretin boyutunun artırılması veya azaltılması yaygın işaret işleme teknikleridir. Son gelişmeler özellikle DL tarafından tahminde elde edilen hızlı gelişmeler bu teknolojilerin bilimsel keşifleri hızlandıracağına dair bir iyimserlik dalgası oluşturmuştur[15, 16]. DL modellerinin son yıllarda açıklanabilir YZ modelleri kullanılarak yorumlanması birçok bilim alanında yaygınlaşmaya başlamıştır [17-19]. Açıklanabilir YZ, herhangi bir sektördeki veri setini kullanılarak YZ modellerini uygulanması kullanıcıların güven ve özgüven oluşturması açısından belirleyici olmaktadır.

İnsanlar; çarpıntı, göğüste ağrı, nefes darlığı, çarpıntı, kolda uyuşma gibi şikâyetlerle doktora başvurup bu belirtilerin neden olduğu hastalığın teşhisine ulaşmaya çalışmaktadırlar. Doktorların hastanedeki yoğunluk nedeniyle kısa zamanda hastalara teşhis koymaları gerekmekte bu durum hastaların yanlış teşhisine neden olabilmektedir. Bundan dolayı KHV'nin YZ tabanlı yöntemler kullanılarak karar destek sistemleri oluşturulması doktorlara teşhis aşamasında fayda sağlayacaktır. Bu amaçla üç farklı DL yöntemi kullanılarak başarı oranları karşılaştırılmış, en yüksek başarı oranı veren yöntem tespit edilerek, daha şeffaf sonuçlar elde edilmesi için Açıklanabilir YZ ile görsel olarak sonuçların yorumlandığı bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmada, üç farklı CNN, RNN ve LSTM modeli gibi DL tekniği kullanılarak KVH için tahmin modeli geliştirilmiştir. Modellere ait tahmin performansları LIME tekniği ile görsel olarak yorumlanmıştır. Literatürden ve yukarıdaki açıklamalardan YZ yöntemleri kullanılarak Kardiyovasküler hastalıkların hızlı teşhis ve tanısını sağlamak için günümüzde oldukça hızlı gelişen teknoloji yardımıyla hekimlere destek sağlamaktır. Aynı zamanda olası hatalarını önlemek adına Açıklanabilir YZ kullanılarak sonuçların şeffaflaştırılması ile kullanılan YZ modellerinin güvenilirliği artırılarak karar süreçlerinde hekim değerlendirmelerine önemli bir avantaj oluşturacaktır.

2. MATERYAL VE METOD (MATERIALS AND METHODS)

Bu çalışmada açık erişimli kaggle sitesinden KVH veri seti kullanılarak YZ yöntemleri ve sınıflandırma ve sonuçların yorumlanması yapılmıştır. Yapılan çalışmaya ilişkin işlem basamakları Şekil 1'de ayrıntılı olarak gösterilmiştir. İlk işlem basamağı olarak kaggle sitesinden veri seti elde edilmiştir. Daha sonra YZ modellerinde kullanılması için ön işlemden geçirilerek veriler hazır hale getirilmiştir. Çalışmanın üçüncü basamağında YZ yöntemlerinden ANN, CNN, LSTM ile modelleri için eğitimler gerçekleştirilmiştir. Dördüncü basamakta ise test verileri ile sınıflandırmalar yapılmış ve değerlendirme kriterlerine göre başarı oranları elde edilmiştir. Son olarak modellerin sınıflandırma başarıları açıklanabilir YZ yöntemlerinden LIME ile yorumlanmıştır.

Çalışma Adımları



Şekil 1. Akış şeması (Flow chart)

2.1. Veri Seti (Data Set)

Çalışmada kullanılan veri seti, (<https://www.kaggle.com/code/sefakocakalay/cardiovascular-disease-prediction-tr/input>) web sitesinden alınmıştır. Veri setinde gerçek bilgiler,

tıbbi muayenenin sonuçları ve hasta tarafından verilen bilgiler olmak üzere 12 özneliğin bulunduğu 70.000 örnek hasta verisi bulunmaktadır. Tablo 1'de veri setindeki özneliklerin adı tipi ve içerikleri ile ilgili bilgiler detaylı olarak verilmiştir.

Tablo 1. Kardiyoloji veri setinin temel bilgileri (Basic information of cardio dataset)

Sıra No	Öznelik	Tipi	İçeriği
1	Yaş	Sayısal	10798-23713 (Gün)
2	Boy	Sayısal	55-250 (cm)
3	Kilo	Sayısal	10-200 (Kg)
4	Cinsiyet	Kategorik	Kadın(1)/Erkek(2)
5	Sistolik Kan Basıncı	Sayısal	-150-16020
6	Diastolik Kan Basıncı	Sayısal	-70-11000
7	Kolesterol	Kategorik	Normal(1) Normalin Üstünde(2) Normalin Çok Üstü(3)
8	Glikoz	Kategorik	Normal(1) Normalin Üstünde(2) Normalin Çok Üstü(3)
9	Sigara	Kategorik	Evet(0)/Hayır(1)
10	Alkol	Kategorik	Evet(0)/Hayır(1)
11	Fiziksel Aktivite	Kategorik	Evet(0)/Hayır(1)
12	KHV var mı yok mu?)	Kategorik	Evet(0)/Hayır(1)

2.2. Yöntemler (Methods)

YZ alanında bir alt dal olan DL insan beyninden esinlenen Yapay sinir ağı (YSA) yapısını örnek alır. Bu ağlar giriş, gizli ve çıkış katmanları olmak üzere

temel üç katmandan oluşmaktadır. Kullanılan DL tekniğine göre gizli katmandaki katman sayılarında farklılıklar olmaktadır [20, 21].

Yapay Sinir Ağı (YSA): dünyadaki en gelişmiş sistemlerin başında insan beyni gelmektedir. Bilim insanları beyinin yapısını örnek alarak bir algoritma geliştirmeye çalışmışlardır. İnsan beyninin yapısına benzeyen bir model olarak YSA oluşturmuşlardır [22]. YSA, birbirlerine bağlanmış birçok sinir hücresinden oluşan matematiksel sistemlerdir. Bir sinir hücresi, genellikle transfer fonksiyonu olarak anılan bir denklemdir. Sinir hücresi, diğer işlem birimlerinden işaretleri alır, bunları birleştirir, dönüştürür ve sayısal bir sonuç ortaya çıkartır. Sinir hücrelerinin ağ içinde birbirlerine bağlanması ile YSA yapısı oluşturulur. Birçok YSA uygulamasında benzer karakteristiğe sahip sinir hücreleri tabakalar halinde yapılandırılarak transfer fonksiyonları eş zamanlı olarak çalıştırılır. En basit bir YSA modelinde yukarıda da bahsedildiği gibi giriş, gizli ve çıkış katmanını üç katman bulunur [23].

Konvolüsyonel Sinir Ağları (Convolution Neural Network-CNN): CNN çok katmanlı, ileri beslemeli bir YSA ağıdır. CNN’de giriş bilgisi konvolüsyon çekirdekleri adı verilen küçük filtreler kullanarak işlenir, işlenen bu bilginin boyutunu küçültmek ve önemli bilgileri korumak için havuzlama adı verilen bir işlem uygulanır. Son olarak giriş bilgilerine göre sınıflandırma veya tahminlerde bulunmak için bağlantı ya da çıkış katmanını kullanılarak istenen işlemler gerçekleştirilir [24, 25].

Uzun Kısa Vadeli Hafıza Ağları (LSTM) Bu metod sıralı verileri işleyen Tekrarlayan Sinir Ağı (RNN)’nin sınırlılığı olan kısa bellek problemini çözmek için geliştirilmiştir. RNN’ler önceki hesaplamaları hafızalarında tutarlar ve bunları çıktı ile eşleştirirler bu yüzden girdiler arasındaki ilişkiler önemlidir ve kısa süreli olarak hatırlar ve bir sonraki adımı yürütür [26]. LSTM ise daha uzun süreli hatırlama olanağı sağlar. LSTM yapısı giriş, unutma ve çıkış olmak üzere 3 kapı, blok girişi, Sabit Hata Döngüsü, çıkış aktivasyon fonksiyonu ve gözetleme (peephole) bağlantılarından oluşmaktadır. Nöronun çıktısı tekrar tekrar nöronun girişine ve tüm kapılarına bağlanır. LSTM’in kendi durumunu sıfırlamak için unutma kapısı, kesin zamanlamaları öğrenmeyi kolaylaştırmak için ise gözetleme bağlantıları eklenmiştir [27].

Açıklanabilir YZ (XAI): ML ve DL modellerinin karar süreçlerini kolay okunabilir ve kavranabilir hale getirmeyi amaçlayan bir yapay zekâ alt alanıdır [28]. Geleneksel olarak, YZ modelleri, çıktılarının nasıl ve neden üretildiğini detaylı bir şekilde açıklamaz ve bu durum sistemin sır olarak kalmasına neden olur. Açıklanabilir YZ, bu karmaşık modellerin mantıksal işleyişini daha anlaşılır hale getirerek, YZ modellerinin karar

verme süreçlerini şeffaf ve anlaşılabilir hale getirmeyi amaçlamaktadır. Açıklanabilir YZ algoritmaları kullanılarak YZ modellerinin çıkış değerlerinin girişi değerlerine göre sayısal veya görsel olarak açıklaması yapılmaktadır. Açıklanabilir YZ modelleri içerisinde en yaygın kullanılanı LIME (Local Interpretable Model-Agnostic Explanations) yöntemidir. Bu yöntem, karmaşık YZ modellerinin nasıl karar verdiğini anlamamızı ve güvenilirliğini değerlendirmemizi sağlar [29, 30].

LIME modeli AYZ’nin verdiği kararların şeffaflığına odaklanan ve yorumlanabilirliğini arttıran bir yöntemdir. Bu modelde YZ’ya girdi olarak girilen verilerin çıkış verisini nasıl değiştirdiğini izleyerek bir yorumlama sağlamaya çalışmaktadır. LIME modelden bağımsız olarak çalışarak örnek veri noktalarını bozar ve yeni örnekler oluşturur ve ilk modelin kararlarına benzer tahmin yaparak değişkenlerin tahmin üzerindeki etkisini gösterir [30, 31].

2.3. Değerlendirme Kriterleri (Evaluation Criteria)

YZ modellerinin eğitim performanslarını değerlendirirken birçok metrik kullanılmaktadır [1]. Bu çalışmada eğitim performansları Ortalama karesel hata (MSE) kullanılarak değerlendirilmiştir. MSE, tahmin edilen değerler ile gerçek değerler arasındaki ortalama kare farkını ölçen bir istatistiksel ölçüdür. YZ modellerinin performansını değerlendirmek için yorumlamayı kolaylaştıran ve sıklıkla kullanılan bir hata metriğidir.

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_i^N (Y_i - Y_{tahmin(i)})^2 \quad (1)$$

Burada N toplam veri sayısıdır, Y_i hedef değerlerdir, Y_{tahmin} ise tahmin edilen değerlerdir.

Çalışmada modellerin sınıflandırma performanslarını Doğruluk, Kesinlik, Duyarlılık, F1-Skor ölçütleri kullanılarak değerlendirilmiştir. Verilerin doğru şekilde sınıflandırılma oranı doğruluk, verilerdeki olumlu tahminlerin ne kadar doğru olduğu duyarlılık, doğru sınıflandırmasının kesinlik oranını kesinlik, Kesinlik ve duyarlılığın harmonik ortalamasıdır F1 skoru göstermektedir [33, 34].

Metotların Confusion Matrisi çıkartılarak Doğruluk, Kesinlik, Duyarlılık, F1 Skor değerleri aşağıdaki formüllere göre hesaplanmıştır.

$$Doğruluk = \frac{TP+TF}{TP+TF+FP+FN} \quad (2)$$

$$Kesinlik = \frac{TP}{TP+FN} \quad (3)$$

$$\text{Duyarlılık} = \frac{TP}{TP+FP} \quad (4)$$

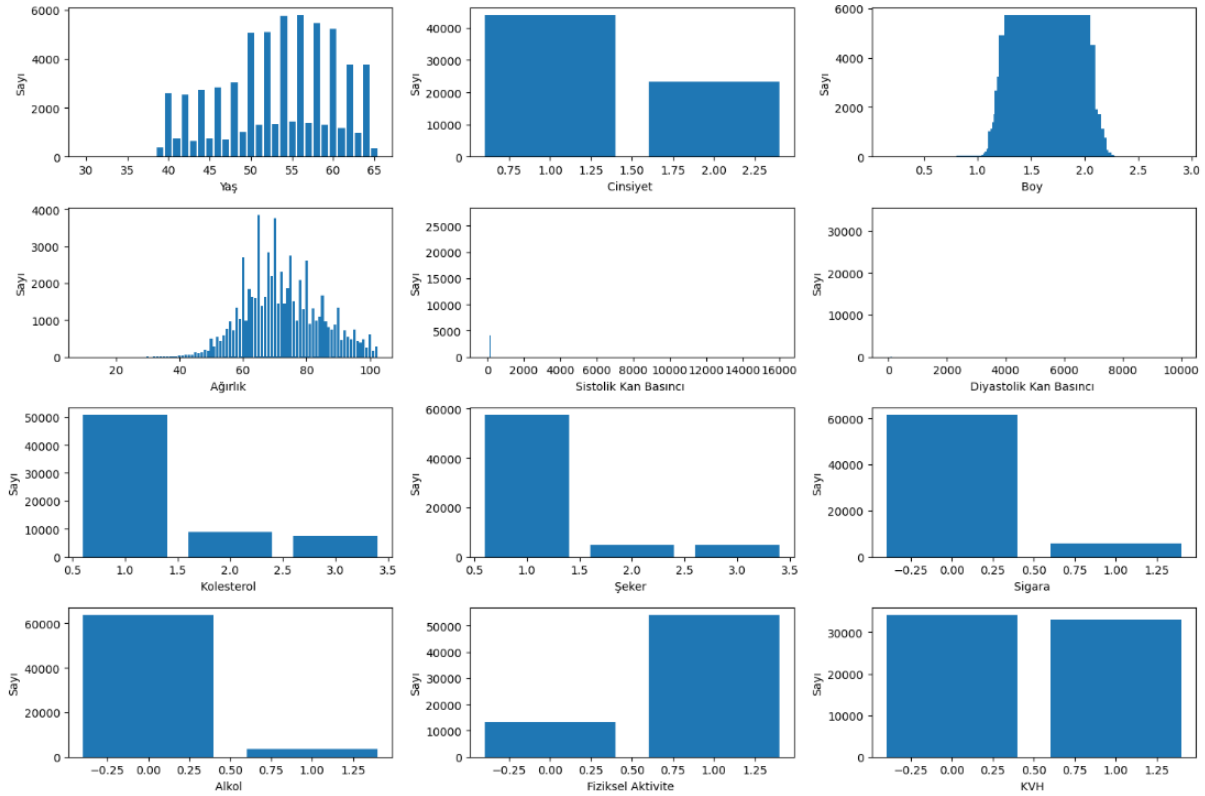
$$F1\text{Skor} = \frac{2 * \text{Kesinlik} * \text{Duyarlılık}}{\text{Kesinlik} + \text{Duyarlılık}} \quad (5)$$

Denklemlerde TP(doğru pozitif), FP(yanlış pozitif), TN(doğru negatif), FN(yanlış negatif) şeklinde aşağıdaki gibi kullanılmıştır.

3. BULGULAR (RESULTS)

Veri setinde eksik veri ya da boş veri bulunmamaktadır. Verilerin dağılımları incelendiğinde bazı verilerin uç değerlerde olduğu görülmekte ve bu değerlerin performansı

etkileyeceğinden bu aykırı değerler çıkartılmıştır. 70000 hastaya ilişkin verilerin bulunduğu veri setindeki giriş değişkenlerinin istatistiksel dağılımları incelenerek aykırı veriler çıkarılmıştır. İstatistiksel işlemlerde değişkenlerin ortalama değer, standart sapma (std), çarpıklık ve basıklık durumları incelenmiştir. Kilo, Sistolik kan basıncı, Diyastolik kan basıncı değişkenlerindeki değerler için $\text{ortalama} \pm 3 * \text{Std}$ hesaplanarak güven aralığı belirlenen 67189 hastaya ait veri çalışmada kullanılmıştır. Kullanılan veri setinin değişkenlerin dağılımları kabaca Şekil 2’de verilmiştir.



Şekil 2. Değişkenlerin istatistiksel dağılımı (Statistical distribution of variables)

Yaş değişkeninin dağılımını gösteren grafikte, 45-65 yaş aralığındaki bireyler yoğun olarak yer almaktadır. 40 yaş altı ve 60 yaş üstünde oldukça az sayıda hasta bulunmaktadır. Kullanılan veri setinin orta yaş ve ileri yaş grubunun daha fazla temsil edildiği görülmektedir. Kadın (1) ve Erkek (2) temsil edildiği ikinci grafikte kadın hastaların daha fazla sayıda olduğu görülebilir. Üçüncü grafikte boy ve dördüncü grafikte ağırlık değişkeninin dağılımını gösterildiği grafik, normal dağılıma benzer bir eğilim sergilemektedir. Beşinci ve altıncı grafikler, sistolik ve diyastolik kan basıncının dağılımını göstermektedir. Yedinci grafikte kolesterol

sevizinci grafikte şeker seviyelerinin dağılımını gösterilmektedir. Normal(1), Normalin üstünde(2) ve Normalin çok üstü(3) olmak üzere sınıflandırılan hastalara ait verilerin genellikle normal veya hafif yüksek kolesterol seviyelerine sahip olduğunu gösterir. Son dört grafikte ise Sigara, Alkol, Fiziksel aktivite ve KVH verileri Evet (0) ve Hayır (1) şeklinde kategorik olarak sınıflandırılmıştır.

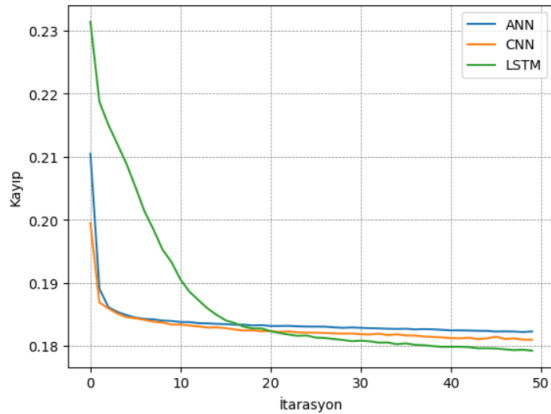
Veri setimiz %80 eğitim ve %20 test verisi rastgele olacak şekilde YZ algoritmalarında kullanılmak üzere ikiye bölünmüştür. Model, kalp hastalıkları ile parametreler arasındaki ilişkiyi öğrenmek için

eğitilmiştir. Kullanılan modelin hiperparametreleri parametreleri tablo 2’de detaylı şekilde en iyi sonuca göre ayarlanmıştır. Model gösterilmiştir.

Tablo 2. YZ yöntemlerinde kullanılan parametreler (Parameters used in AI methods)

ANN	CNN	LSTM
Filters =32, Kernel size = 3 Activation = relu Activation=sigmoid optimizer =adam loss = mse Epochs=50	Filters = 32, Kernel size = 3 Activation = relu Activation=sigmoid optimizer =adam loss = mse Epochs=50	Filters = 32, Kernel size = 3 Activation=relu Activation=sigmoid optimizer =adam loss = mse Epochs=50

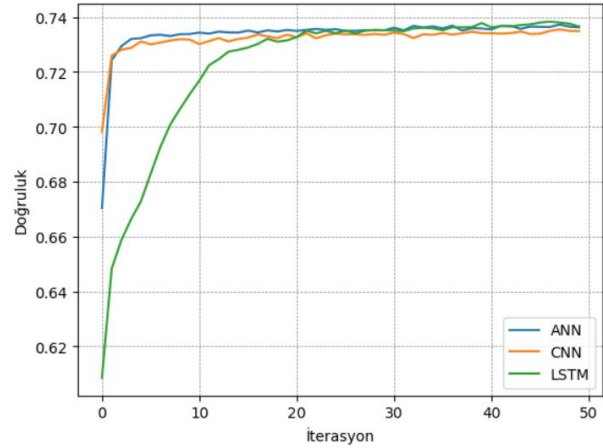
Yapılan çalışma da ANN, CNN, LSTM modelleri için Tablo 2’deki parametreler kullanılarak model eğitimleri yapılmıştır. MSE’nin kayıp fonksiyonu olarak kullanılarak her üç modelde en iyi sonuç 0,18 ile LSTM de elde edilmiştir. ANN ve CNN modellerinde de LSTM modeline yakın sonuç elde edilmiştir. Her üç modelin eğitim süreçlerindeki kayıp değerlerini ait kayıp eğrileri şekil 3’de gösterilmiştir. Her üç modelin de ilk iterasyonlarda yüksek kayıp değerlerine sahip olduğu ve ilk 10 iterasyonda kayıplarda belirgin bir düşüş gözlenmektedir. ANN ve CNN modellerinin benzer performans gösterdiği kayıp değerleri yavaşlayarak 0.18 civarında sabitlenmektedir. LSTM modeli başlangıçta daha hızlı bir düşüş göstermiş, sonrasında diğer modellerle benzer bir performans sergilemiştir.



Şekil 3. ANN, CNN, LSTM modelleri kayıp eğrisi (ANN, CNN, LSTM models loss curve)

Seçilen veri setine uygulanan ANN, CNN, LSTM modelleri ile yapılan çalışmada elde edilen kayıp

veri değerleri Şekil 3’de, doğruluk değerleri Şekil 4’de verilmiştir. ANN ve CNN modelleri yaklaşık olarak %74 doğruluk seviyesine hızlıca ulaşırken, LSTM modeli başlangıçta daha düşük bir doğrulukla başlamakta, ancak daha sonra diğer modellerle benzer bir performans sergilemektedir. 20. iterasyondan sonra, tüm modellerin doğruluk değerleri benzer bir şekilde yaklaşık %74 seviyesinde seyretmiştir. DL modellerinin eğitim sürecinde performanslarının iyileştiği ve belirli bir iterasyon sonrasında kararlı bir doğruluk seviyesinde olduğu görülmektedir.



Şekil 4. ANN, CNN, LSTM modelleri doğruluk eğrisi (ANN, CNN, LSTM models accuracy curve)

Doğruluk duyarlık Kesinlik ve F1 skoru için denklem 2, 3, 4, 5 kullanılarak YZ modellerinin test başarıları ölçülmüştür. ANN, CNN, LSTM ile yapılan modellerin Doğruluk, Duyarlılık, Kesinlik ve F1 Skor değerleri Tablo 3 de verilmiştir.

Tablo 3. Model performansları (Model performances)

Modeller	Doğruluk	Duyarlılık	Kesinlik	F1 Skor
ANN	0.734	0.735	0.734	0.734
CNN	0.735	0.735	0.735	0.734
LSTM	0.732	0.732	0.732	0.732

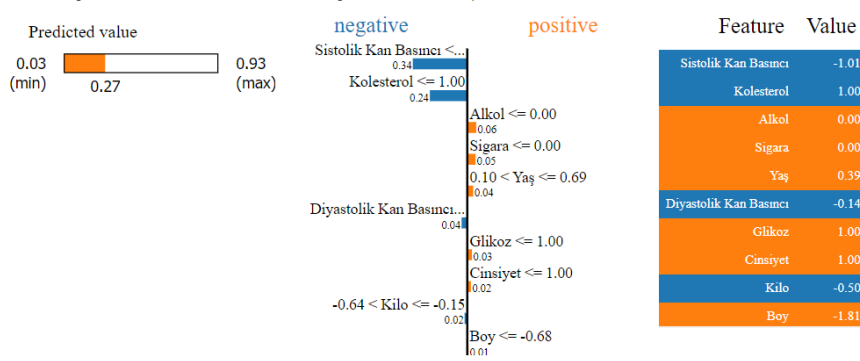
ANN ile yapılan çalışmada AYZ metotlarından LIME uygulanmış ve örnek seçilen 2 hastaya ilişkin veriler Şekil 5 ve Şekil 6 da verilmiştir.

ANN ile yapılan çalışmada açıklanabilir YZ metotlarından LIME uygulanmış ve örnek seçilen 2 hastaya ilişkin veriler Şekil 5 ve Şekil 6 da verilmiştir.

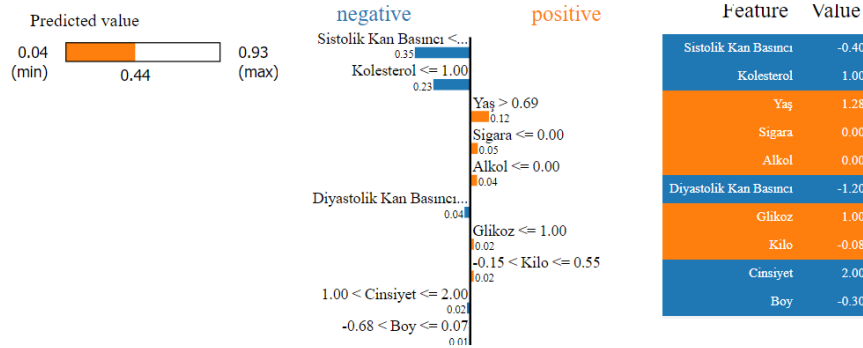
Şekil 5’da sol tarafta, modelin tahmin ettiği değer 0.03 ile 0.93 aralığında değiştiğini ve 0.27 olarak tahmin edildiğini gösterilmektedir. Şeklin orta kısmında ANN ile yapılan tahminde Sistolik Kan Basıncı 0.34 ile negatif yönde, Kolesterol değeri

0.24 ile negatif yönde, yani tahmini azaltan bir etkiye sahipken Alkol değeri 0.06, Sigara değeri 0.05 ve Glikoz değeri 0.03 ile pozitif olarak tahmini artıran bir etkiye sahiptir.

Şekil 6’da sol tarafta, modelin tahmin ettiği değer 0.04 ile 0.93 aralığında değiştiğini ve 0.44 olarak tahmin edildiğini göstermektedir. Şeklin orta kısmında ANN ile yapılan tahminde Sistolik Kan Basıncı değeri 0.35, Kolesterol değeri 0.23, Diyastolik Kan Basıncı 0.04 ile negatif yönde, yani tahmini azaltan bir etkiye sahipken Yaş değeri 0.12, Sigara değeri 0,05 ve Alkol değeri 0.04 ile pozitif olarak tahmini artıran bir etkiye sahiptir.



Şekil 5. 10. Hastanın ANN ile yapılan hastalık tahminin LIME ile açıklaması (Explanation of the disease prediction of the 10th indexed patient made with ANN using LIME)



Şekil 6. 20. Hastanın ANN ile yapılan hastalık tahminin LIME ile açıklaması (Explanation of the disease prediction of the 20th indexed patient made with ANN using LIME)

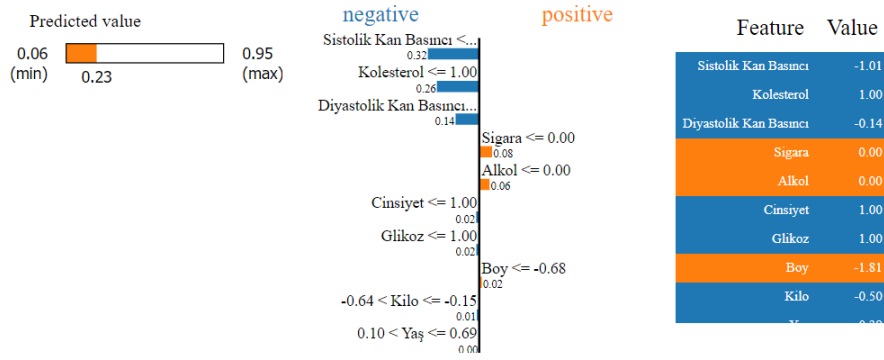
CNN ile yapılan çalışmada açıklanabilir YZ metotlarından LIME uygulanmış ve örnek seçilen 2 hastaya ilişkin veriler Şekil 7 ve Şekil 8 da verilmiştir.

Şekil 7’da sol tarafta, modelin tahmin ettiği değer 0.06 ile 0.95 aralığında değiştiğini ve 0.23 olarak tahmin edildiğini göstermektedir. Şeklin orta kısmında CNN ile yapılan tahminde Sistolik Kan Basıncı değeri 0.32 ile negatif yönde, Kolesterol değeri 0.26, Diyastolik Kan Basıncı 0.14 ile negatif

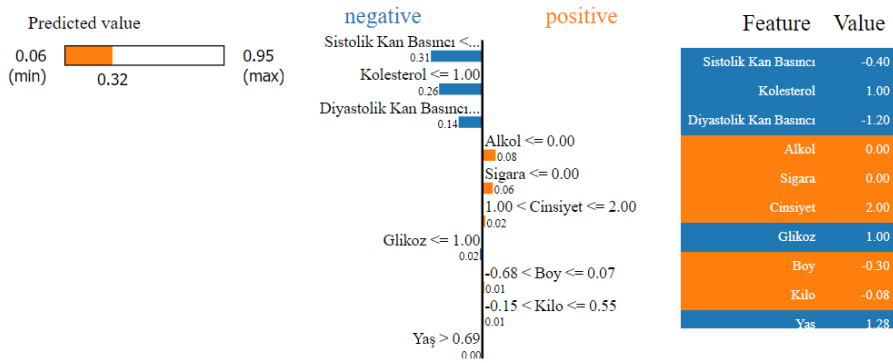
yönde, yani tahmini azaltan bir etkiye sahipken Sigara değeri 0.08 ve Alkol değeri 0.06 ile pozitif olarak tahmini artıran bir etkiye sahiptir.

Şekil 8’da sol tarafta, modelin tahmin ettiği değer 0.06 ile 0.95 aralığında değiştiğini ve 0.32 olarak tahmin edildiğini göstermektedir. Şeklin orta kısmında de Sistolik Kan Basıncı değeri 0.31 ile negatif yönde, Kolesterol değeri 0.26, Diyastolik Kan Basıncı 0.14 değeri ile negatif yönde, yani tahmini azaltan bir etkiye sahipken Sigara değeri

0.06 ve Alkol değeri 0.08 ile pozitif olarak tahmini artıran bir etkiye sahiptir.



Şekil 7. 10. Hastanın CNN ile yapılan hastalık tahmininin LIME ile açıklaması (Explanation of the disease prediction of the 10th indexed patient made with ANN using LIME)



Şekil 8. 20 Hastanın CNN ile yapılan hastalık tahmininin LIME ile açıklaması (Explanation of the disease prediction of the 20th indexed patient made with ANN using LIME)

Açıklanabilir YZ ile yorumlanan bu tür bir görsel, DL modelinin kararlarını anlamak ve yorumlamak için önemli bir araçtır. Bu sayede, değerlendiricilerin modelin hangi özelliklere dayanarak karar verdiği daha iyi anlamasına ve gerektiğinde modelin doğruluğu veya güvenilirliği konusunda daha başarılı değerlendirmeler yapmalarına imkân sağlamaktadır.

4. SONUÇLAR ve TARTIŞMA (CONCLUSIONS and DISCUSSION)

Kardiyovasküler hastalıklar dünyada ve ülkemizde oldukça tehlikeli bir hastalıktır. Hasta verileri hastalıkların erken teşhisinde oldukça önemli bir yere sahiptir. Kardiyovasküler hastalıkların tespitinde kan değerlerinin değerlendirilmesi teşhiste önemli bir yol olmaktadır. Bu çalışmada 70 bin hastanın verileri kullanılmıştır. Amaçlanan araştırmayı yapmak için Python dili kullanılarak derin öğrenme ile veri işleme araçlarından Keras, Numpy ve Pandas kütüphaneleri kullanılarak düzenlemiş olduğumuz verileri DL yöntemlerinden olan ANN, CNN, LSTM teknikleri kullanılmıştır.

Veriler normalize edildikten sonra %80 eğitim %20 test verisi olarak ayrılmıştır. Çalışılan modellerin tahminlerdeki başarı performansları Python dilinde yazılmış kodlar ve kütüphaneler kullanılarak doğrulukları hesaplanmıştır.

ANN, CNN, LSTM ile yapılan bu öğrenmeler sonucunda Açıklanabilir YZ ile çıkarılan sonuçların hangi veriler ile elde edildiği şeffaf bir şekilde açıklanmıştır. Bu bulgular ile hekime karar verme sürecinde daha şeffaf daha başarılı sonuçlar alması sağlanacaktır. Yapılan çalışmada elde edilen doğruluk, hassasiyet, kesinlik, F1 skor değerlerine bakılarak kardiyovasküler hastalıkların tespitinde ANN, CNN, LSTM gibi yöntemlerin kullanılabileceği Açıklanabilir YZ ile de bu sonuçların neden elde edildiği açıklanarak hekimlerin yapacağı tespit daha doğru ve daha hızlı sonuçlar oluşturabileceği sonucuna varılmıştır. DL modelleri ile yapmış olduğumuz çalışmada oldukça iyimser sonuçlar ortaya çıkmış ve elde ettiğimiz bu verilere göre her üç DL yöntemin doğruluk oranlarının hemen hemen aynı oranda başarı elde edildiği gözlemlenmiştir.

Tablo 4. Akademik alanlarda yer alan çalışmalar (Studies in academic fields)

Çalışmayı Yapanlar	Çalışma Konusu	Kullanılan Yöntemler	Sonuçlar
[35] Yan ve Diğ. (2006)	Kalp hastalığı teşhisi için çok katmanlı algılayıcı tabanlı tıbbi karar destek sistemi	Çoklu Algılama Karar Destek Sistemi	%90 Doğruluk
[8] Şengur (2007)	Temel bileşen analizi, yapay bağışıklık sistemi ve bulanık mantık tabanlı bir uzman sistemik-KNN kalp kapak hastalıklarının tanısı	Temel Bileşen Analizi(PCA) K-En Yakın Komşu(KNN)	%95,9 Duyarlılık %96 Özgünlük
[36] Palaniappan ve Diğ. (2008)	Veri madenciliği tekniklerini kullanan akıllı kalp hastalığı tahmin sistemi	Karar Ağacı Naive Bayes	%86 Doğruluk NaviBayes % 80,4 Karar Ağacı
[37] Shao ve Diğ. (2014)	Kalp hastalığı sınıflandırması için hibrit akıllı modelleme şemaları	Hibrit Modelleme	%83,93 Doğruluk
[38] Priyanka ve Diğ. (2017)	Kalp hastalıklarını tahmin etmede veri madenciliği tekniklerinin kullanımı	Naive Bayes Karar Ağacı	%98 Doğruluk Karar Ağacı %83 Doğruluk Naive Bayes

Genel olarak KVH hastaları ile ilgili veri setindeki, istatistiksel dağılımlar demografik ve sağlık verilerinin geniş bir yelpazede dağıldığını ve belirli özelliklerde yoğunlaştığını göstermektedir. Bu veriler, sağlık politikalarının ve müdahalelerinin hedeflenmesinde önemli ipuçları sunmaktadır.

Kardiyovasküler hastalıkların teşhisinde Tablo 4’de ayrıntılı şekilde verilen literatürdeki birçok çalışmada kullanılan yöntemler ve başarımlar oranları verilmiştir. Çalışmada kullandığımız YZ yöntemlerinden olan CNN, ANN, LSTM algoritmaları veri setinde bulunan 70000 bin veriyi işleyerek sonuçları ortaya koymuştur. Sonuçların literatürdeki diğer çalışmaların aksine bulguların açıklanabilir YZ ile şeffaflaştırılması önemli bir etken oluşturmaktadır.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

Çalışma araştırma kurumu veya fonu tarafından desteklenmemiştir. / The study was not supported by any research institution or fund.

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)

Ali VIRIT: Verileri inceleyerek YZ modellerini kurmuş, sonuçlarını analiz ederek, makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

Ali VIRIT: He established the AI models by examining the data, analyzed the results and completed the writing process of the article.

Ali ÖTER: YZ modellerini incelenmesi, sonuçların analiz edilmesi, maklenin yazım işlemi ve denetimini gerçekleştirmiştir.

Ali ÖTER: Examined the AI models, analyzed the results, and completed the writing and supervision 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] Ö. P. Özkan, S. K. Büyükuinal, Z. Yiğit, Y. İnci, F. Ş. Şakar, and D. Ö. Ersü, "Kardiyovasküler hastalık tanısı almış hastaların sağlıklı yaşam biçimi davranışlarının değerlendirilmesi," *Mersin Üniversitesi Sağlık Bilimleri Dergisi*, vol. 12, no. 1, pp. 22-31, 2019.
- [2] G. S. WHO, "Global status report on noncommunicable diseases 2010," 2014.
- [3] H. Arıcı, and S. T. Kavradım, "Kardiyovasküler Hastalıklarda Konfor," *Akdeniz Hemşirelik Dergisi*, vol. 2, no. 1, pp. 32-39, 2023.
- [4] B. Kolukisa, V. C. Gungor, and B. B. Gungor, "An ensemble feature selection methodology that incorporates domain knowledge for cardiovascular disease diagnosis." pp. 1-4.
- [5] M. M. Ahsan, and Z. Siddique, "Machine learning-based heart disease diagnosis: A systematic literature review," *Artificial Intelligence in Medicine*, vol. 128, pp. 102289, 2022.
- [6] F. I. Alarsan, and M. Younes, "Analysis and classification of heart diseases using heartbeat features and machine learning algorithms," *Journal of big data*, vol. 6, no. 1, pp. 1-15, 2019.
- [7] P. Rubini, C. Subasini, A. V. Katharine, V. Kumaresan, S. G. Kumar, and T. Nithya, "A cardiovascular disease prediction using machine learning algorithms," *Annals of the Romanian Society for Cell Biology*, pp. 904-912, 2021.
- [8] A. Sengur, "An expert system based on principal component analysis, artificial immune system and fuzzy k-NN for diagnosis of valvular heart diseases," *Computers in biology and medicine*, vol. 38, no. 3, pp. 329-338, 2008.
- [9] İ. A. Çilhoroz, and Y. Çilhoroz, "Kardiyovasküler Hastalıklara Bağlı Ölümleri Etkileyen Faktörlerin Belirlenmesi: OECD Ülkeleri Üzerinde Bir Araştırma," *Acibadem Sağlık Bilimleri Dergisi*, vol. 12, no. 2, 2021.
- [10] S. Erkuş, "Veri madenciliği yöntemleri ile kardiyovasküler hastalık tahminin yapılması," Bahçeşehir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. İstanbul., 2015.
- [11] G. Kaba, and S. B. Kalkan, "Kardiyovasküler Hastalık Tahmininde Makine Öğrenmesi Sınıflandırma Algoritmalarının Karşılaştırılması," *İstanbul Ticaret Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, vol. 21, no. 42, pp. 183-193, 2022.
- [12] M. Swathy, and K. Saruladha, "A comparative study of classification and prediction of Cardio-Vascular Diseases (CVD) using Machine Learning and Deep Learning techniques," *ICT Express*, vol. 8, no. 1, pp. 109-116, 2022.
- [13] S. Ahmad, M. Z. Asghar, F. M. Alotaibi, and Y. D. Alotaibi, "Diagnosis of cardiovascular disease using deep learning technique," *Soft Computing*, vol. 27, no. 13, pp. 8971-8990, 2023.
- [14] T. Sharean, and G. Johncy, "Deep learning models on Heart Disease Estimation-A review," *Journal of Artificial Intelligence*, vol. 4, no. 2, pp. 122-130, 2022.
- [15] C. Y. Cheung, D. Xu, C.-Y. Cheng, C. Sabanayagam, Y.-C. Tham, M. Yu, T. H. Rim, C. Y. Chai, B. Gopinath, and P. Mitchell, "A deep-learning system for the assessment of cardiovascular disease risk via the measurement of retinal-vessel calibre," *Nature biomedical engineering*, vol. 5, no. 6, pp. 498-508, 2021.
- [16] Z. Alkayyali, S. A. B. Idris, and S. S. Abu-Naser, "A Systematic Literature Review of Deep and Machine Learning Algorithms in Cardiovascular Diseases Diagnosis," *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*, vol. 101, no. 4, pp. 1353-1365, 2023.
- [17] M. Pawlicki, A. Pawlicka, R. Kozik, and M. Choraś, "Advanced insights through systematic analysis: Mapping future research directions and opportunities for xAI in deep learning and artificial intelligence used in cybersecurity," *Neurocomputing*, pp. 127759, 2024.
- [18] W. Saeed, and C. Omlin, "Explainable AI (XAI): A systematic meta-survey of current challenges and future opportunities," *Knowledge-Based Systems*, vol. 263, pp. 110273, 2023.
- [19] A. M. Groen, R. Kraan, S. F. Amirkhan, J. G. Daams, and M. Maas, "A systematic review on the use of explainability in deep learning systems for computer aided diagnosis in radiology: Limited use of explainable AI?," *European Journal of Radiology*, vol. 157, pp. 110592, 2022.
- [20] F. DOĞAN, and İ. TÜRKÖĞLU, "Derin öğrenme modelleri ve uygulama alanlarına ilişkin bir derleme," *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, vol. 10, no. 2, pp. 409-445, 2019.

- [21] A. Şeker, B. Diri, and H. H. Balık, "Derin öğrenme yöntemleri ve uygulamaları hakkında bir inceleme," *Gazi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, vol. 3, no. 3, pp. 47-64, 2017.
- [22] B. Ataseven, "Yapay sinir ağları ile öngörü modellemesi," *Öneri Dergisi*, vol. 10, no. 39, pp. 101-115, 2013.
- [23] A. Öter, O. Aydoğan, and D. Tuncel, "Automatic sleep stage classification using Artificial Neural Networks with Wavelet Transform," *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, vol. 8, no. 1, pp. 59-68, 2019.
- [24] M. Karakurt, and İ. İşeri, "Patoloji görüntülerinin derin öğrenme yöntemleri ile sınıflandırılması," *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, no. 33, pp. 192-206, 2022.
- [25] J. Egger, C. Gsaxner, A. Pepe, K. L. Pomykala, F. Jonske, M. Kurz, J. Li, and J. Kleesiek, "Medical deep learning—A systematic meta-review," *Computer methods and programs in biomedicine*, vol. 221, pp. 106874, 2022.
- [26] P. Dhruv, and S. Naskar, "Image classification using convolutional neural network (CNN) and recurrent neural network (RNN): A review," *Machine learning and information processing: proceedings of ICMLIP 2019*, pp. 367-381, 2020.
- [27] A. Sherstinsky, "Fundamentals of recurrent neural network (RNN) and long short-term memory (LSTM) network," *Physica D: Nonlinear Phenomena*, vol. 404, pp. 132306, 2020.
- [28] B. Ersöz, Ş. Sağiroğlu, and H. İ. Bülbül, "A Short Review on Explainable Artificial Intelligence in Renewable Energy and Resources." pp. 247-252.
- [29] R. Dwivedi, D. Dave, H. Naik, S. Singhal, R. Omer, P. Patel, B. Qian, Z. Wen, T. Shah, and G. Morgan, "Explainable AI (XAI): Core ideas, techniques, and solutions," *ACM Computing Surveys*, vol. 55, no. 9, pp. 1-33, 2023.
- [30] J. M. Darias, B. Díaz-Agudo, and J. A. Recio-Garcia, "A Systematic Review on Model-agnostic XAI Libraries." pp. 28-39.
- [31] S. Sezer, A. Oter, B. Ersoz, C. Topcuoglu, H. İ. Bulbul, S. Sagiroglu, M. Akin, and G. Yilmaz, "Explainable artificial intelligence for LDL cholesterol prediction and classification," *Clinical Biochemistry*, pp. 110791, 2024.
- [32] A. Öter, B. Ersöz, Z. Berktaş, H. İ. Bülbül, E. Orhan, and Ş. Sağiroğlu, "An artificial intelligence model estimation for functionalized graphene quantum dot-based diode characteristics," *Physica Scripta*, vol. 99, no. 5, pp. 056001, 2024/03/29, 2024.
- [33] N. E. Campione, and D. C. Evans, "The accuracy and precision of body mass estimation in non-avian dinosaurs," *Biological Reviews*, vol. 95, no. 6, pp. 1759-1797, 2020.
- [34] A. Öter, "Automatic Detection of Epileptic Seizures from EEG Signals Using Artificial Intelligence Methods," *Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology*, pp. 1-1, 2024.
- [35] H. Yan, Y. Jiang, J. Zheng, C. Peng, and Q. Li, "A multilayer perceptron-based medical decision support system for heart disease diagnosis," *Expert Systems with Applications*, vol. 30, no. 2, pp. 272-281, 2006.
- [36] S. Palaniappan, and R. Awang, "Intelligent heart disease prediction system using data mining techniques." pp. 108-115.
- [37] Y. E. Shao, C.-D. Hou, and C.-C. Chiu, "Hybrid intelligent modeling schemes for heart disease classification," *Applied Soft Computing*, vol. 14, pp. 47-52, 2014.
- [38] N. Priyanka, and P. R. Kumar, "Usage of data mining techniques in predicting the heart diseases—Naïve Bayes & decision tree." pp. 1-7.

Ağır Hizmet Araçlarında Kullanılan Fren Disklerinde Mikroyapının Çatlak Dayanımına Etkisi

Zehra ÇINARCIK^{1*}  Bora GÜNTAY¹ 

¹Ege Fren Sanayii ve Ticaret A.Ş. 35060 Kemalpaşa Mah. 7405/2 Sokak No:4 Pınarbaşı Bornova/İZMİR

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 08/07/2024
Düzeltilme: 03/09/2024
Kabul: 09/09/2024

Anahtar Kelimeler

Ağır Ticari Araçlarda Fren
Diski
Mikroyapı Kusurları
Azot Boşluğu
Yorulma Testi
Lamel Garfülü Dökme
Demir
Gri Dökme Demir

Article Info

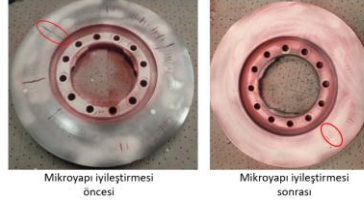
Research article
Received: 08/07/2024
Revision: 03/09/2024
Accepted: 09/09/2024

Keywords

Heavy-Duty Vehicle Brake
Disc
Microstructural Defects
Nitrogen Porosity
Fatigue Test
Lamellar Graphite Cast
Iron
Gray Cast Iron

Grafik Özet (Graphical/Tabular Abstract)

Ağır hizmet araçlarında kullanılan fren disklerinin mikroyapısının iyileştirilmesi yoluyla çatlak dayanımının artırılabilceğini ve bu süreçte malzeme homojenliği ile üretim süreci optimizasyonlarının kritik rol oynadığını ortaya koymaktadır. / This study demonstrates that improving the microstructure of brake discs used in heavy-duty vehicles can enhance crack resistance, highlighting the critical role of material homogeneity and production process optimization in achieving this outcome.



Şekil A: Fren diski numuneleri çatlak boyları / Figure A: The crack lengths of the brake disc samples

Önemli noktalar (Highlights)

- Mikroyapı analizi ile malzeme içindeki hata modlarının tespit edilmesi. / Identification of defect modes within the material through microstructural analysis.
- Döküm işlemi sırasında besleyici giriş sayısının artırılması, yolluk tasarımının iyileştirilmesi ve zirkonlu aşılama gibi önlemler alınması. / Implementation of corrective measures such as increasing the number of feeder inputs during the casting process, improving the gating system design, and applying zircon inoculation.
- Atalet dinamometresi testlerinde, iyileştirici önlemler uygulanan fren diskinin daha yüksek çatlak dayanımı göstermesi. / Inertia dynamometer tests showing higher crack resistance in the brake disc with applied corrective measures.

Amaç (Aim): Bu çalışma, ağır hizmet araçlarında kullanılan fren disklerinin mikroyapısının ve mekanik özelliklerinin çatlak dayanımına olan etkisini atalet dinamometresi kullanarak doğrulamayı ve mikroyapısal iyileştirmelerin bu etkilerini araştırmayı amaçlamaktadır. / This study aims to verify the effect of the microstructure and mechanical properties of brake discs used in heavy-duty vehicles on crack resistance using an inertia dynamometer and to investigate how microstructural improvements influence these effects.

Özgünlük (Originality): Makalenin özgün yönü, ağır hizmet araçlarına yönelik fren disklerinin mikroyapısal özelliklerinin çatlak dayanımına olan etkisinin literatürde yeterince incelenmemiş olması ve atalet dinamometresi ile yapılan deneysel doğrulamalarla bu ilişkinin daha kapsamlı bir şekilde anlaşılmasına katkı sağlamasıdır. / The originality of the paper lies in the fact that the effect of the microstructural properties of brake discs for heavy-duty vehicles on crack resistance has not been sufficiently studied in the literature, and this research contributes to a more comprehensive understanding of this relationship through experimental validations using an inertia dynamometer.

Bulgular (Results): Fren diskinin, çatlak dayanımını iyileştirmek ve mikroyapı kusurlarını önlemek amacıyla, besleyici giriş sayısı artırılması, yolluk tasarımı iyileştirmesi ve zirkonlu (Zr) aşılama uygulaması süreç geliştirmeleri yapılmış bu iyileştirmelerin sonucunda, mikroyapısının iyileştiği ve çatlak dayanımının arttığı görülmüştür. / To improve crack resistance and prevent microstructural defects in the brake disc, process improvements were made by increasing the number of feeder inputs, optimizing the runner design, and applying zircon (Zr) inoculation. As a result of these enhancements, the microstructure was improved, and crack resistance increased.

Sonuç (Conclusion): Bu çalışma, ağır ticari araçlar için fren disklerinin malzeme özelliklerinin ve üretim süreci iyileştirmelerinin mikroyapının homojenliğini artırarak çatlak dayanımını önemli ölçüde geliştirdiğini göstermektedir. / This study demonstrates that the material properties and production process improvements of brake discs for heavy commercial vehicles significantly enhance crack resistance by increasing the homogeneity of the microstructure.



Ağır Hizmet Araçlarında Kullanılan Fren Disklerinde Mikroyapının Çatlak Dayanımına Etkisi

Zehra ÇINARCIK^{1*} Bora GÜNTAY¹

¹Ege Fren Sanayii ve Ticaret A.Ş. 35060 Kemalpaşa Mah. 7405/2 Sokak No:4 Pınarbaşı Bornova/İZMİR

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 08/07/2024
Düzeltilme: 03/09/2024
Kabul: 09/09/2024

Anahtar Kelimeler

Ağır Ticari Araçlarda
Fren Diski
Mikroyapı Kusurları
Azot Boşluğu
Yorulma Testi
Lamel Garfıtlı Dökme
Demir
Gri Dökme Demir

Öz

Bu çalışma, ağır hizmet araçlarında kullanılan fren disklerinin mikroyapısının, çatlak dayanımına olan etkisini detaylı bir şekilde incelemeyi ve bu dayanımı iyileştirmeyi hedeflemektedir. İlk aşamada, atalet dinamometresi testinde beklenenden daha erken çatlak oluşumu gösteren bir fren diski numunesi incelenmiştir. Mikroyapısal analiz sonucunda, malzeme içindeki homojen olmayan yapı ve azot boşlukları gibi çeşitli hata modları tespit edilmiştir. Bu hata modlarının fren diskinin çatlak dayanımını olumsuz yönde etkilediği görülmüştür. Hata modlarını gidermek ve malzemenin mikroyapısal bütünlüğünü artırmak amacıyla bir dizi iyileştirici önlem uygulanmıştır. Bunlar arasında, döküm işlemi sırasında besleyici giriş sayısının artırılması, yolluk tasarımının iyileştirilmesi ve zirkonlu aşılama uygulamaları bulunmaktadır. Besleyici girişlerinin artırılması ve yolluk tasarımının iyileştirilmesi, malzeme akışını iyileştirerek daha homojen bir yapının elde edilmesini sağlamış, zirkonlu aşılama uygulaması ise mikroyapısal kusurların azaltılmasına yardımcı olmuştur. Bu iyileştirici aksiyonlar sonrasında ikinci bir fren diski numunesi üretilmiştir. Yeni numunenin, atalet dinamometresi testlerinde, çatlak dayanımının belirgin bir şekilde arttığı gözlemlenmiştir. Yapılan mikroyapısal analizler, uygulanan önlemlerin malzeme içerisindeki homojenliği artırdığını ve azot boşluklarını büyük ölçüde giderdiğini göstermiştir. Sonuç olarak, ikinci numunenin mikroyapısının iyileştiği ve çatlak dayanımının arttığı doğrulanmıştır. Bu çalışma, fren disklerinin mikroyapısal özelliklerinin mekanik performans üzerindeki kritik etkisini vurgulamakta ve mikroyapısal iyileştirmelerin çatlak dayanımını nasıl artırabileceğini göstermektedir. Çalışmada, fren disklerinin güvenilirliğini artırmak için mikroyapısal kontrollerin ve üretim süreci iyileştirmelerinin önemi ortaya koyulmuştur.

Microstructural Impact on Crack Resistance in Heavy-Duty Vehicle Brake Discs

Article Info

Research article
Received: 08/07/2024
Revision: 03/09/2024
Accepted: 09/09/2024

Keywords

Heavy-Duty Vehicle Brake
Disc
Microstructural Defects
Nitrogen Porosity
Fatigue Test
Lamellar Graphite Cast
Iron
Gray Cast Iron

Abstract

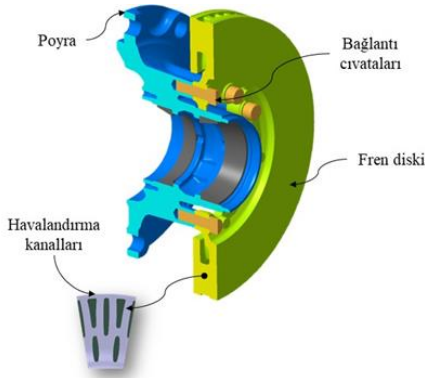
This study aims to comprehensively examine the microstructure of brake discs used in heavy-duty vehicles and its impact on crack resistance, with the goal of enhancing this resistance. In the initial phase, a brake disc sample exhibiting premature crack formation during inertia dynamometer testing was analyzed. Microstructural analysis revealed various defect modes such as non-homogeneous structure and nitrogen porosity within the material. These defect modes were found to adversely affect the crack resistance of the brake disc. To address these issues and improve the microstructural integrity of the material, a series of corrective measures were implemented. These included increasing the feeder inlet numbers during the casting process, optimizing the gating system design, and applying zirconium inoculation. Increasing feeder inlets and improving gating system design improved material flow, resulting in a more homogeneous structure, while zirconium inoculation helped reduce microstructural defects. Following these corrective actions, a second brake disc sample was produced. Observations during inertia dynamometer tests indicated a significant improvement in crack resistance for the new sample. Microstructural analyses confirmed that the implemented measures enhanced material homogeneity and largely eliminated nitrogen porosities. Consequently, the improved microstructure and increased crack resistance of the second sample were verified. This study highlights the critical impact of microstructural characteristics of brake discs on mechanical performance and demonstrates how microstructural improvements can enhance crack resistance. It underscores the importance of microstructural controls and process enhancements in increasing the reliability of brake discs.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Her aracın, değişen yol ve trafik koşullarına göre durması veya hızını ayarlaması için bir fren sistemine ihtiyacı vardır. Fren sistemlerinde kullanılan temel prensip, bir aracın kinetik enerjisini başka bir enerji formu olan ısıya dönüştürmektir. Yaygın olarak kullanılan disk fren ve kampanalı fren olmak üzere iki tür fren sistemi bulunmaktadır [1]. Disk frenler, kampanalı frenlere göre daha geniş bir yüzey alanına sahiptirler ve daha fazla hava akışına maruz kalırlar bu nedenle daha hızlı bir şekilde soğumaktadırlar [1].

Disk frenler, 1890'larda İngiltere'de geliştirilmiştir. Karayolu araçları için ilk fren diski patenti, Frederick William Lanchester tarafından 1902'de sunulmuş ve bu frenler 1950'lerde popüler hale gelmiştir. Günümüz fren diskleri ile 1980'lerdeki fren disklerinin temel çalışma prensipleri ve ana bileşenleri aynıdır. Diskler, iyi termal iletkenlik, düşük gürültü seviyeleri ve uzun ömür gibi birçok avantajı nedeniyle gri dökme demirden (GDD, lamel grafitli dökme demir) üretilmektedir [2-4].

Fren diskleri (Şekil 1), aksa bir poyra yardımı ile sabitlenir, böylece tekerlek ile aynı hızda dönmektedir. Bir disk freninin frenleme gücü, balata ile disk arasındaki sürtünme kuvvetleri nedeniyle kinetik enerjinin ısıya dönüştürme hızına bağlıdır. Verimli bir fren tasarımı için, ısı mümkün olduğunca hızlı bir şekilde dağıtılmalıdır; aksi takdirde disk sıcaklığı artabilir ve disk freninin performansı negatif etkilenebilir. Bu nedenle, uygulamalarda daha yüksek performans elde etmek için fren disklerine havalandırma kanatçıkları eklenir ve bu da diskin soğuma hızını artırmaktadır [4-6].

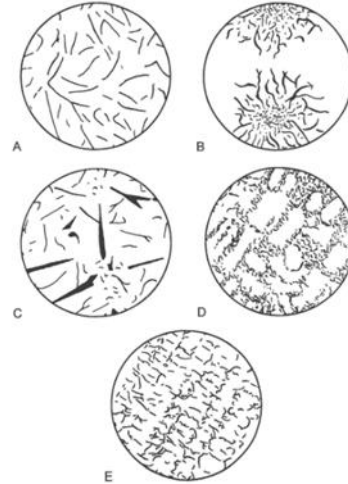


Şekil 1. Bütünleşik fren diski ve poyra çifti [5]
(Integrated brake disc and hub pair)

Gri dökme demir, %2,11 ile %6,67 arası karbon içeren demir-karbon alaşımlarına verilen genel bir isimdir [7]. GDD, yüksek titreşim sönümlenme

kapasitesi, ergime noktası, termal iletkenlik ve ısı depolama kapasitesi gibi termofiziksel özellikleri nedeniyle, aşırı ısınmayı ve fren gürültüsünü önlemektedir [1, 8]. Bunların yanı sıra, GDD, düşük maliyeti ve kolay döküm işlemi nedeniyle tercih edilmektedir [9].

Gri dökme demirin mekanik özelliklerini, grafitin miktarı, şekli, uzunluğu ve dağılımı önemli ölçüde belirlemektedir. Grafit formları, ISO 945-1:2008 standardına göre, A, B, C, D ve E olmak üzere Şekil 2'de gösterildiği gibi beş sınıfa ayrılmaktadır [10, 11]. A tipi grafit içeren dökme demirler, genellikle yüksek perlit içeriğine sahiptir. Bu durum, malzemenin dayanıklılığını ve aşınma direncini artırmaktadır [10, 12]. B tipi grafit, hızlı soğutulmuş hiperötektik gri dökme demirlerde ortaya çıkmaktadır [10, 12]. C tipi grafit, kiş grafit olarak da adlandırılır, sadece karbon eşdeğerinin çok yüksek olduğu, ötektik üstü (hiperötektik) dökme demirlerde ortaya çıkmaktadır. Grafitin yüksek miktarda bulunması, dökme demirin ısı iletkenliğini önemli ölçüde artırmaktadır. C tipi grafit, yüksek ısı iletimi gerektiren uygulamalarda bu özelliği nedeniyle tercih edilmektedir. Ancak büyük ve kalın tabaka yapısı nedeniyle dökme demirin mekanik özelliklerini olumsuz şekilde etkilemektedir. D ve E tipi grafitler, hızlı soğumanın olduğu durumlarda, 1500°C derecenin üzeri sıcaklıktaki dökümlerde özellikle ince kesitlerinde ortaya çıkmaktadır. D ve E tipi mikroyapısı genellikle ferritiktir [12, 13].



Şekil 2. ISO 945-1:2019 standardına göre dökme demirlerde grafit formlarının gösterimi [14]
(Graphite forms in cast irons according to ISO 945-1:2019)

Gri dökme demirin mekanik özellikleri, mikroyapısındaki grafit miktarı, boyutu, morfolojisi ve lamellerin dağılımına; mikroyapısı ise kimyasal bileşimine ve özellikle soğuma koşullarına bağlıdır [15]. Dökülen parçanın çeşitli bölgelerinde farklı

soğuma hızları olması homojen olmayan mikroyapı oluşmasına sebep olabilmektedir [15].

Dökme demirler genellikle çeşitli yapısal kusurlar içermektedir. Bunlar arasında, en yaygın olanları gaz kusurları, gözenekler, azot çatlakları ve boşlukları, metal penetrasyon kusuru ve büzülme gözeneği kusurlarıdır [16-21]. Bu kusurların giderilmesi ve malzemeye etkileri literatürde geniş bir şekilde incelenmiştir. Örneğin, Kambayashi ve arkadaşları (2007), gözenek kusurunun oluşum faktörlerini ve önlemlerini belirlemişlerdir [22]. Patil ve arkadaşları (2015), metal döküm sürecinde gaz boşluklarının oluşumunu önlemek amacıyla kalıbın sıcaklığının düşük tutulması, kalıp ve maçalarının yeterli havalandırılması, besleyici ve giriş sisteminin iyileştirilmesi ve döküm tasarımının değiştirilmesi gibi uygulamalar önermiştir [23]. Javahery ve arkadaşı çalışmalarında (2019), kalıpta katılma sırasında oluşabilecek büzülme gözeneği kusurlarını önlemek amacıyla besleme ve yolluk tasarımlarının sıvı akışı, ısı transferi ve katılma üzerindeki etkilerini incelemişlerdir [24]. Ray Elliot (1988), maçanın yetersiz kurutulması, ıslak maça gazı veya döküm sırasında yüksek azot içeriği sağlayan bir bağlayıcının gözenek kusuruna neden olduğunu gözlemlemiştir. Bu kusuru engellemek için, maçaların iyi kurutulması ve yeterli havalandırılması gerekliliğini vurgulamıştır [25].

Lin ve arkadaşları (2022), azotun gri dökme demirin mikroyapısı ve mekanik özellikleri üzerindeki etkisini incelemiş ve azot içeriği arttıkça grafit yapısında belirgin değişiklikler olduğunu bulmuşlardır [26]. J. Linder ve arkadaşları (2006) ise gözeneklilik miktarının yorulma mukavemetini %25'e kadar azalttığını göstermiştir [27]. Soiński ve arkadaşları (2011), gri dökme demirlerde zirkonlu aşılamanın, malzemenin mekanik özelliklerine etkisini araştırmışlardır. Çalışmalarında, zirkonlu aşılama öncesinde mikroyapıda D ve E tipi grafitlerin yoğun olduğunu, ancak aşılama işlemi sonrasında grafit lamellerinin, daha homojen ve ince bir yapıya sahip olan A tipi olduğunu gözlemlemişlerdir [28].

Her diskte bir miktar bulunan bu malzeme hataları ve diskin geometrik tasarımı, araç üzerindeki kullanım ömrünü etkilemektedir. Diskler zaman içerisinde ısınma ve soğuma kaynaklı iç gerilmelerin etkisiyle yorulmakta ve yüzeylerinde çatlaklar oluşmaktadır. Bu çatlakların büyüklüğü ve oluşma süresi aracın kullanım şartlarına bağlı olup daha sıcak koşullarda kullanılan disklerin daha erken çatladığı gözlenmektedir [29]. Disklerin, sahadaki ömürlerini ön görebilmek için laboratuvar

ortamında, atalet dinamometresi test üniteleri ile çatlak dayanım testleri yapılmaktadır.

Bu çalışma, ağır hizmet araçlarında kullanılan fren disklerinin mikroyapısının ve mekanik özelliklerinin çatlak dayanımına olan etkisini atalet dinamometresi kullanarak doğrulamayı ve mikroyapısal iyileştirmelerin bu etkilerini araştırmayı amaçlamaktadır. Mevcut literatürde, ağır hizmet araçlarına yönelik fren disklerinin mikroyapısının çatlak dayanımına olan etkisi yeterince incelenmemiştir. Özellikle, atalet dinamometresi ile yapılan doğrulamalar literatürde sınırlı yer bulmaktadır. Bu araştırma, bu önemli boşluğu doldurarak, fren disklerinin mikroyapısal özelliklerinin, çatlak dayanım performansı üzerindeki etkilerini daha iyi anlamayı sağlamaktadır.

Çalışmanın materyal ve yöntem bölümünde, test edilen numune diskler tanıtılmış, üretim metodunda yapılan iyileştirici önlemler açıklanmış, numunelerin geometrik yapısı ve malzeme özellikleri tanımlanmıştır. Ayrıca saha kullanımını temsil eden atalet dinamometresi test ünitesinin yapısı ve koşulan testin sınır şartları tanıtılmış ve inceleme yöntemi açıklanmıştır. Bulgular bölümünde ise, numunelerin detaylı incelemesi ve karşılaştırılması yapılmıştır.

2. MATERYAL VE METOD (MATERIALS AND METHODS)

Çalışmanın devamında, mevcut imalat yöntemi ile üretilen fren diski Numune 1 ve süreçte iyileştirme yapılarak üretilen fren diski Numune 2 olarak adlandırılmıştır. Bu bölümde, disklerin geometrik ve malzeme özellikleri tanıtılmış, Numune 2 üretilirken yapılan süreç iyileştirmeleri açıklanmış ve iki diskin farkları vurgulanmıştır. Ayrıca test düzeneği, test koşulları, inceleme metotları ve parametreleri hakkında detaylı bilgiler paylaşılmıştır.

2.1. Numune Tanıtımı (Sample Introduction)

Fren diskleri, 22,5" jant ölçüsüne uygun, Ø430 mm dış çap ve 45 mm kalınlık ölçüsüne sahip havalandırılmalı disklerdir. Diskler EN-GJL-150 eşdeğeri GDD malzemedan üretilmiştir. Lamel grafitli dökme demirlerde mekanik özellikleri etkileyen en önemli faktörler grafit miktarı ve şeklidir. Dökme demirin kimyasal bileşiminde bulunan ve mekanik özellikleri etkileyen ana elementler; C (Karbon), Si (Silisyum), P (Fosfor), S (Kükürt), Mn (Mangan)'dır [30]. Kükürt (S) ve fosfor (P) elementlerinin oranları sırasıyla maksimum %0,11 ve %0,10 ile sınırlandırılmıştır.

Kükürt ve fosfor genellikle metalürjik işlemlerde safsızlık olarak kabul edilmektedir, çünkü bu elementler alaşımın kırılgenliğini artırabilmekte ve mekanik özelliklerini olumsuz yönde etkileyebilmektedir [31-34].

Tablo 1’de, DIN EN 1561 standartlarına göre EN-GJL-150 gri dökme demir malzemenin, çekme dayanımı ve sertliği verilmiştir [35]

Tablo 1. Diskin mekanik özellikleri (The mechanical properties of the disc)

	Çekme (Mpa)	Sertlik (HB)
Minimum değer	130	160
Maksimum değer	-	200

2.2. Deneysel Çalışma (Experimental Study)

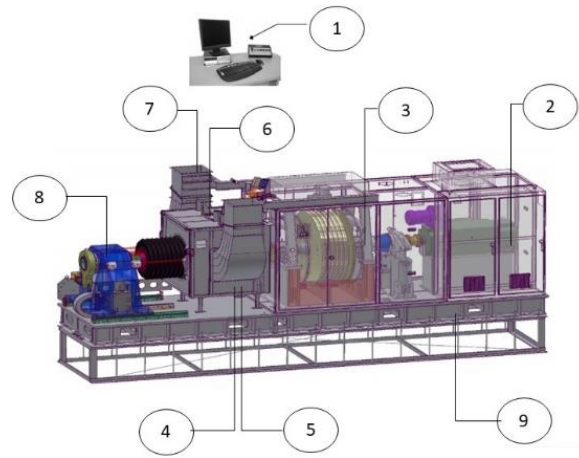
Günümüzde araç üzerinde yapılan birçok performans ve dayanım testi, laboratuvar ortamında, daha güvenli, kontrollü ve düşük maliyet ile dinamometre test ünitelerinde yapılabilmektedir. Laboratuvar ortamında sınır koşulları daha kolay ayarlanabildiği için frenler üzerindeki balata ve disklerin performans, aşınma, yorulma, çatlama vb. parametreleri atalet dinamometresi ile test edilebilmektedir. Dinamometreler, fren sistemi üzerindeki yükü ve stresi simüle ederek, farklı hız, sıcaklık ve yükler altında nasıl davrandığını inceleyebilmektedir [36]. Şekil 3’de, Link firmasına ait bir ticari araç dinamometresi örneği gösterilmektedir.



Şekil 3. Ağır ticari araç dinamometresi (Model 6900) [37] (Heavy commercial vehicle dynamometer)

Atalet dinamometresi Şekil 4’de görüldüğü gibi dokuz bölümden oluşmaktadır. Motor (2) tarafından

döndürülen atalet volanları (3), aracın yüklü ağırlığını temsil etmektedir. Fren, reaksiyon aparatlandırmasına (8) yataklanmış dingil ucu parçalarına bağlıdır ve kapalı bir kabinin (6) içerisinde çalışmaktadır. Frenin üzerinden tork, hava basıncı, sıcaklık, devir hızı bilgilerini kayıt eden bir veri toplama ünitesi (5) bulunmaktadır. Basıncı hava sistemi ve valf (4) aracılığı ile belirlenen sınır şartlarına uygun olarak frenleme yapılabilmektedir. Frenin bulunduğu kabinin sıcaklığı, ortam şartını temsil etmekte olup, bir havalandırma sistemi (7) yardımı ile şartlandırılmaktadır. Tüm sistem yerden, sönümleyici bir şasi (9) yardımı ile yalıtılmış durumdadır. Bir kontrol bilgisayarı (1) yardımı ile veriler canlı olarak izlenebilmektedir.



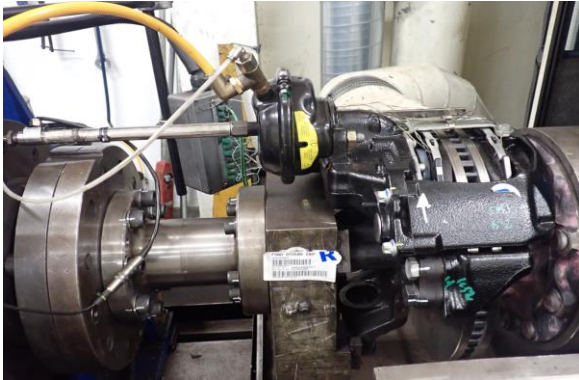
Şekil 4. Link (Model 6900) Atalet dinamometresi test düzeneği; (1) Kontrol bilgisayarı, (2) Motor, (3) Atalet volanları, (4) Basıncı hava sistemi ve valf, (5) Veri toplama ünitesi, (6) Kabin, (7) Havalandırma sistemi, (8) Reaksiyon aparatı, (9) Şasi [37] (Link (Model 6900) Inertia dynamometer test setup; (1) Control computer, (2) Engine, (3) Inertia flywheels, (4) Pressurized air system and valve, (5) Data acquisition unit, (6) Cabin, (7) Ventilation system, (8) Reaction device, (9) Chassis)

Test sırasında fren sıcaklıkları Şekil 8’de görüldüğü gibi iç ve dış balata baskı yüzeylerinden ve ayrıca iç ve dış balatalar üzerinden ölçülmüştür. Tüm ölçüm noktalarında 0-900 °C aralığına kalibre edilmiş K tipi termokupullar kullanılmıştır. Disk yüzeylerinden ölçüm alan termokupulların uçlarının sürtünme ile bozulmaması için Şekil 5’de görüldüğü gibi kızak parçaları kullanılmıştır.



Şekil 5. K tipi termokupulların ölçüm sistemi üzerindeki yerleşimi (Placement of type K thermocouples on the measurement system)

Frenleme basıncı, bir oransal valf ile kontrol edilmekte olup, ayrıca bir basınç sensörü ile geri besleme yapılmakta ve sınır şartları geri besleme sensörüne göre kontrol edilmektedir. Sensör, frenin körüğüne yakın konumlandırıldığı için fren hortumlarında ve borularında kaybedilen basınç hatasının elenmesini sağlamaktadır. Frenleme torku, Şekil 6'da görüldüğü gibi, şasiye bağlı sabit yataklama aparatı ile fren arasında seri bağlı şekilde duran bir tork sensörü ile ölçülmektedir.



Şekil 6. Test düzeneği (Test setup)

Araç hızı, diskin dönüş hızı ile temsil edilmektedir ve disk deviri ile tekerlek çevresi çarpılarak hesaplanmaktadır. Araç hızı, diskin dönüş hızı ile temsil edilmektedir ve aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$V = \theta \cdot C \quad (1)$$

V : diskin dönüş hızını (m/s)

θ : disk deviri (rad/s)

C : tekerlek çevresi (m)

Test sınır şartları diskin kullanıldığı ağır ticari aracın kütlesine göre seçilmiştir. Kullanılacak atalet değeri, Formül 2'ye $1389 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ olarak hesaplanmıştır.

$$I = \frac{G \cdot r^2}{2} \quad (2)$$

I : atalet değerini ($\text{kg}\cdot\text{m}^2$)

G : aks ağırlığını (kg)

r : tekerlek yarıçapı (m)

Frenler öncelikle disk ve balatanın birbirine alışması için 100°C frenleme başlangıcı sıcaklığında ve 3 Bar basınç ile 100 defa tahrik edilmiştir.

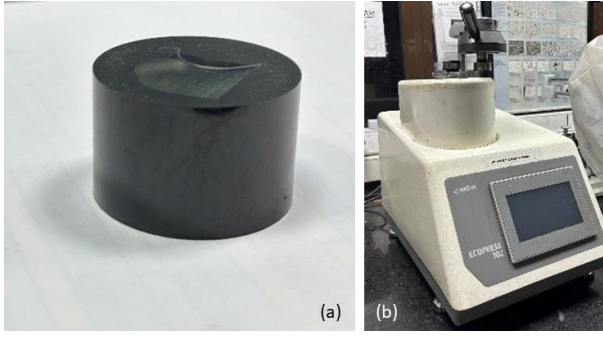
Daha sonra, test boyunca ilk altısı 100, sonuncusu 50 frenleme olacak şekilde, 7 blok şeklinde, toplam 750 frenleme yapılmıştır. Bu frenlemelerde hava basıncı, frenleme torkunun 2800 Nm olmasını sağlayacak şekilde ayarlanmıştır. 2800 Nm, aracın $1,1 \text{ m/s}^2$ yavaşlama ivmesine ulaşacağı frenleme değeridir. Frenleme başlangıcı için teker hızı 85 km/saat seçilmiş olup, frenleme boyunca hızın sabit kalması için disk, motor ile sürekli olarak tahrik edilmiştir. Bu durum bir aracın yokuş aşağı inerken hızını sabit tutması için kısmi olarak fren yapmasını temsil etmektedir.

Frenlemelerin hepsinde başlangıç sıcaklığı 50°C olarak seçilmiştir. Frenleme esnasında erişilen sıcaklık tepe noktaları veri olarak kaydedilmiştir.

2.3. Numuneleri İncelemek İçin Kullanılan

Metot (Method Used For Examining The Samples)

Testten çıkan numuneler, farklı boyutlarda parçalara bölünerek testere ile kesilmiş ve mikroyapı, çekme deneyi ve sertlik testi numuneleri hazırlanmıştır. Kesilen numunelere ilk önce bakalit ile sıcak kalıplama yapılmıştır. İncelenecek numunelerin boyutlarının küçük olması veya düz bir zeminde duramayacak kadar karmaşık bir şekle sahip olması gibi durumlarda bakalitleme yöntemi kullanılmaktadır [38].



Şekil 7. (a) Bakalitlenmiş numune (b) Numune kalıplama cihazı ((a) Embedded sample (b) Sample molding device)

Numuneler, mikroskopta daha iyi incelenebilmesi amacıyla yüzeyleri 2000 kum zımpara ile parlatılarak düzgün hale getirilmiştir. Metalin tane sınırlarını mikroskopta görünür hale getirebilmek için %2 nital karışımı ile dağlama işlemi yapılmıştır. Mikroyapı görüntüleri, Nikon MA100 marka optik mikroskop kullanılarak x100 büyütme ile incelenmiştir.

Çekme deneyi için her iki disk parçasından dörder adet numune TS EN ISO 6892-1 standardına uygun olarak imal edilmiştir [39]. Çekme testleri için 100 kN kapasiteli hidrolik çekme deney cihazı kullanılmıştır. Çekme testleri oda sıcaklığında, TS EN ISO 6892-1 standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir.

Sertlik ölçümleri BMS 3000-OB Brinell Sertlik Cihazında (Şekil 8) 3000 kg yükte yapılmıştır. Sertlik testi her iki disk numunesinin, farklı bölgeleri temsil edecek şekilde dörder adet numuneye uygulanmıştır.



Şekil 8. BMS 3000-OB Brinell sertlik cihazı (BMS 3000-OB Brinell hardness tester)

2.4. Numune 1'in İncelenmesi Ve Bulgular

(Examination And Results Of Sample 1)

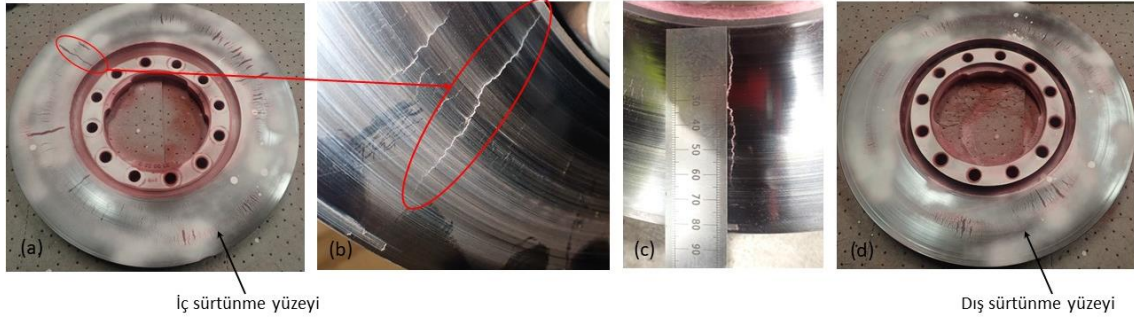
Numune 1'de, atalet dinamometresi testlerinde beklenenden daha erken çatlak oluşumu görülmüş ve çatlakların disk üzerinde hızla ilerlediği gözlemlenmiştir. Şekil 9'da dinamometre testi sonrası çatlak incelemesi yapılan Numune 1 gösterilmiştir. Disk üzerindeki çatlak oluşumunu tespit edebilmek amacıyla numune, tahribatsız muayene tekniklerinden biri olan penetrant sıvısı testine tabi tutularak incelenmiştir. Yapılan görsel incelemede iki balata sürtünme yüzeyinde de çatlaklar tespit edilmiş olup, iç balata sürtünme yüzeyinde, dış balata sürtünme yüzeyine göre daha yoğun ve uzun çatlaklar görülmüştür. Test sonunda fren diski sürtünme yüzeyi genişliğinin, %75'inden daha kısa çatlak boyları beklenmektedir. Diskin sürtünme yüzeyi genişliği 83 mm'dir. İç balata sürtünme yüzeyinde gözlenen maksimum çatlak uzunluğu yaklaşık 65 mm olarak ölçülmüştür, bu da sürtünme yüzeyinin %78'ine denk gelmektedir. Bu durum, çatlak uzunluğunun kabul edilebilir sınırların üzerinde olduğunu göstermektedir.

Numune 1'den kesilen dörder adet numuneye çekme dayanımı testi ve sertlik ölçümleri yapılmıştır. Sonuçların, DIN EN 1561 standardında belirtilen değer aralığında olduğu görülmüştür. Aşağıda Tablo 2'de Numune 1'e ait çekme dayanım ve sertlik ölçüm sonuçları verilmiştir.

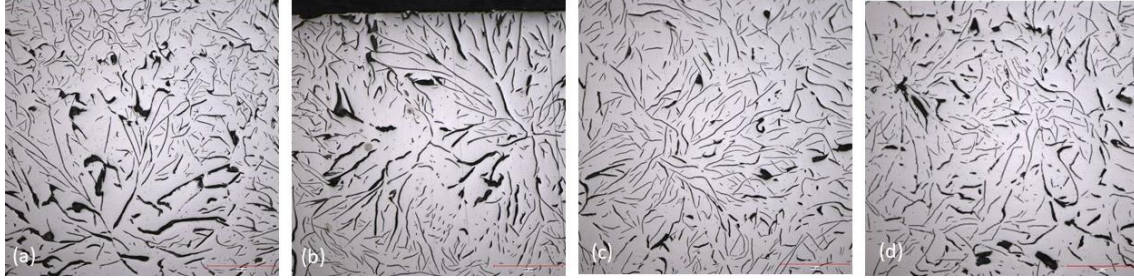
Tablo 2. Numune 1 – Çekme dayanımı ve sertlik ölçüm sonuçları (Sample 1 – Tensile strength and hardness measurement results)

Numune 1	Çekme (MPa)	Sertlik (HB)
1	171,83	204,51
2	169,42	202,94
3	172,25	227,87
4	172,10	229,90

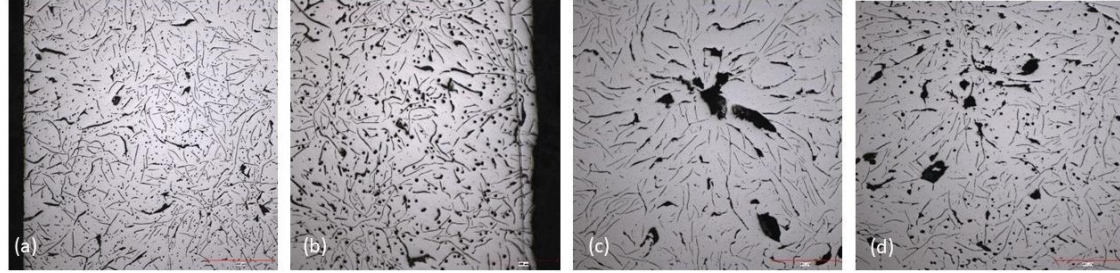
Optik mikroskop ile Numune 1'in mikroyapısı incelenmiştir. Şekil 9'da (a, b), diskin iç ve dış balata sürtünme yüzeylerinden alınan mikroyapı örnekleri gösterilmiştir. Şekil 9 (a) incelendiğinde, numunede ISO 945-1 standardına göre A, C ve D tipi grafit formları görülmüş ve homojen olmayan bir mikroyapı tespit edilmiştir. C ve D tipi grafit formları mikroyapıda istenmeyen özelliklerdir [11,12].



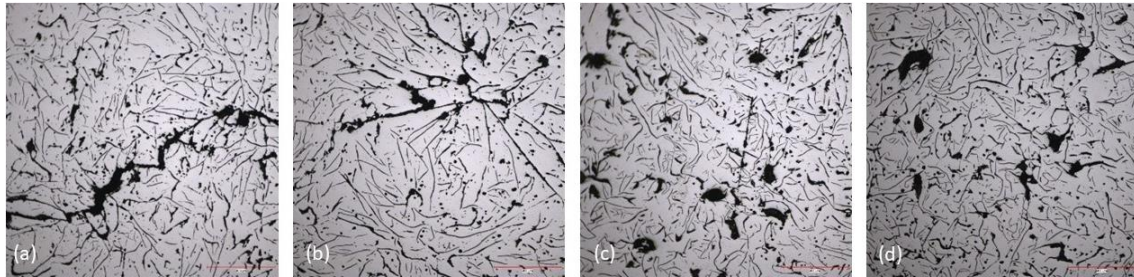
Şekil 9. Numune 1 - Dinamometre testi sonrası çatlak incelemesi; (a) İç sürtünme yüzeyi, (b) İç sürtünme yüzeyi en büyük çatlak, (c) İç sürtünme yüzeyi çatlağın ölçümü, (d) Dış sürtünme yüzeyi (Sample 2 – Crack inspection after dynamometer test; (a) Inner friction surface, (b) Largest crack on inner friction surface, (c) Crack measurement on inner friction surface, (d) Outer friction surface)



Şekil 10. Numune 1- Mikroyapı görüntüleri; (a, b) İç balata sürtünme yüzeyi, (c, d) Dış balata sürtünme yüzeyi (Sample 1 - Microstructure images; (a, b) Inner pad friction surface, (c, d) Outer pad friction surface)



Şekil 11. Numune 1 - Mikroyapı görüntüleri; (a,b) Gözenekli mikroyapı, (c,d) Gaz boşlukları (Sample 1 - Microstructure images; (a, b) Microstructure porosity, (c, d) Gas porosity)



Şekil 12. Numune 1 - Mikroyapı görüntüleri; (a, b) Azot çatlakları, (c, d) Azot boşlukları (Sample 1 - Microstructure images; (a, b) Nitrogen fissure, (c, d) Nitrogen porosity)

Ayrıca aynı numunenin, Şekil 10 (a) iç balata sürtünme yüzeyinden, Şekil 10 (b) dış balata sürtünme yüzeyine doğru bakıldığında, mikroyapıda belirgin değişiklikler görülmektedir. İç balata sürtünme yüzeyinde, daha kalın ve uzun C tipi grafit lamelleri bulunurken, dış balata sürtünme

yüzeyinde daha ince grafit lamelleri ve daha homojen bir mikroyapı görülmektedir. Bu farklılık, malzemenin homojen olmamasından kaynaklanmaktadır ve numunenin farklı bölgelerindeki farklı mekanik özelliklerin oluşabileceğini göstermektedir.

Bununla birlikte, homojen olmayan mikroyapıya ek olarak, numunelerde gözlemlenen gözenekler, gaz boşlukları ve azot boşlukları gibi diğer kusurlar da dikkat çekmektedir.

Şekil 11’de, gaz boşlukları ve gözenekli mikroyapı örnekleri bulunmaktadır. Numune 1’de yoğun miktarda gözenek ve gaz boşluklarının bulunmasının, test sırasında daha fazla çatlak oluşumuna neden olduğu şeklinde yorumlanmıştır. Bu durum, Linder ve arkadaşlarının çalışmasında (2006), elde ettiği verileri ile benzerlik göstermektedir. Çalışmalarında, porozite miktarı arttıkça yorulma mukavemetinin azaldığını vurgulamışlardır [27].

Şekil 12’de (a, b) mikroyapıda dar, uzun ve rastgele yönlerde dağılmış boşluklar, elektron mikroskobu EDS yöntemi ile incelendiğinde, element analizinde %90 azot tespit edilmiş ve bu kusurların azot boşluğu olduğu yorumu yapılmıştır. Azot kusurlarının, genellikle numunenin yüzeyine yakın yerlerde oluştuğu ve işlemeden sonra gözle görülür boyutlarda olduğu bilinmektedir. Azot boşlukları ve çatlakları genellikle yüksek azot içeriğine sahip alaşımlar veya kalıp malzemelerinden kaynaklanmaktadır. Sertucha ve arkadaşları çalışmasında (2022), azot seviyeleri %0,008’den (80 ppm) yüksek olduğunda bu tür kusurların oluşma riskinin arttığını belirtmektedir [18]. Bu durum, azot içeriğinin çatlak oluşumunda kritik bir faktör olduğunu ve yüksek azot içeriğine sahip numunelerin çatlak oluşumuna daha yatkın olduğunu ortaya koymaktadır.

Numune 1’de görülen mikroyapı kusurları, fren diskinin dinamometre testinde erken çatlak oluşumunun kök nedeni olarak tespit edilmiştir. Bu kusurları önlemek amacıyla, süreç iyileştirmeleri yapılarak Numune 2 imal edilmiştir.

2.5. Süreç İyileştirmeleri Ve Numune 2 Üretimi

(Process Improvements And Production Of Sample 2)

Fren diskinin çatlak dayanımını iyileştirmek ve Numune 1’de görülen mikroyapı kusurlarını önlemek amacıyla, besleyici giriş sayısı artırılması, yolluk tasarımı iyileştirmesi ve zirkonlu (Zr) aşılama uygulaması süreç geliştirmeleri yapılmıştır.

Zirkonlu (Zr) aşılama, dökme demirlerde fazla azotu bağlayarak, yapı içerisindeki azot nedenli porozite ve gaz boşluklarını azaltmaktadır. Katılaşma sürecinde grafit lamellerinin büyümesini

kontrol ederek mikroyapıyı iyileştirmekte ve sonuç olarak kırılma tokluğunu ve çatlak dayanımını arttırmaktadır [28, 40].

Besleyici giriş sayısının artırılması ve yolluklarının buna göre tekrar tasarlanması, döküm esnasında metalin kalıp içinde daha dengeli ve homojen bir şekilde dolmasını sağlamakta ve katılaşma sürecinde homojen olmayan mikroyapının oluşumunu önlemektedir. Ayrıca yolluk tasarımı, gözenekliliği ve gaz hapsini azaltmaktadır. Bu sayede, disk yüzeylerinde ısıl iletkenliğin ve mukavemetin eşit olması sağlanarak daha iyi çatlak dayanımı elde edilmektedir [41].

Süreç iyileştirmeleri sonrasında Numune 2 üretilmiş ve Numune 1 ile aynı dinamometre test prosedürlerine tabi tutulmuştur. Dinamometre testinin ardından, Numune 2’den mikroyapı, sertlik ve çekme dayanımlarının karşılaştırılması için örnek numuneler çıkartılmıştır.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSIONS)

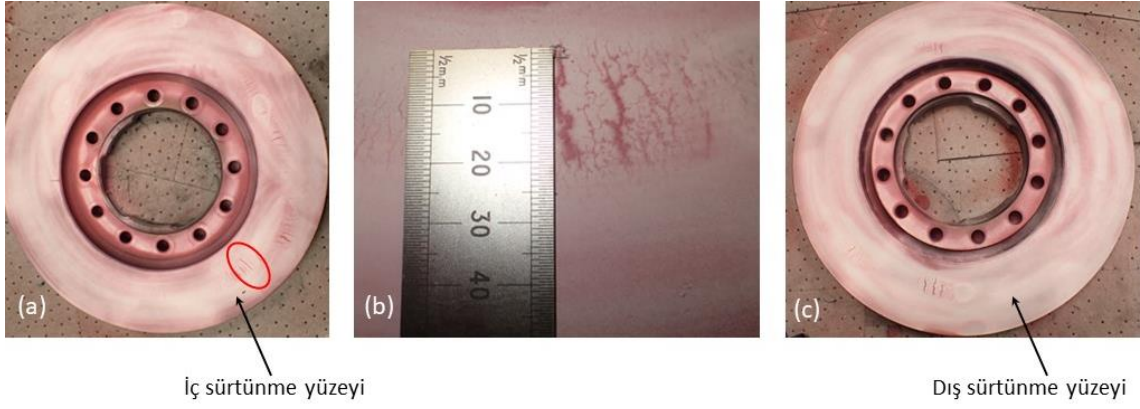
Bu bölümde, ilk aşamada test edilen Numune 1 ve daha sonra iyileştirilmiş süreç ile üretilip test edilen Numune 2’nin, testler sonrası yapılan inceleme bulguları açıklanmıştır.

Süreç iyileştirmesi yapılarak üretilen Numune 2, dinamometre testini tamamladıktan sonra penetrant sıvısı testine tabi tutularak çatlak oluşumları incelenmiştir. Yapılan görsel incelemelerde, Numune 2’nin (Şekil 13) balata sürtünme yüzeylerinde oluşan en büyük çatlak 20 mm, beklenen kesit uzunluğunun %75’inden kısa olarak ölçülmüştür. Çatlakların, iç ve dış balata sürtünme yüzeylerinde dengeli bir dağılım gösterdiği tespit edilmiştir.

Aşağıda Tablo 3’de, Numune 2’ye ait çekme dayanımı ve sertlik ölçüm sonuçları verilmiştir.

Tablo 4’te Numune 1 ve 2’ye ait kimyasal analizleri verilmiştir. Numune 1 ve 2 arasında bir fark planlanmamış olup normal döküm prosesi değişkenliğinden kaynaklı farklar olduğu yorumu yapılmıştır.

Şekil 14’de (a, b), Numune 2’nin mikroyapı görüntüleri verilmiştir. Numune 2’de mikroyapı iç balata sürtünme yüzeyinden, dış balata sürtünme yüzeyine doğru incelendiğinde, grafit dağılımının daha homojen olduğu görülmüştür.



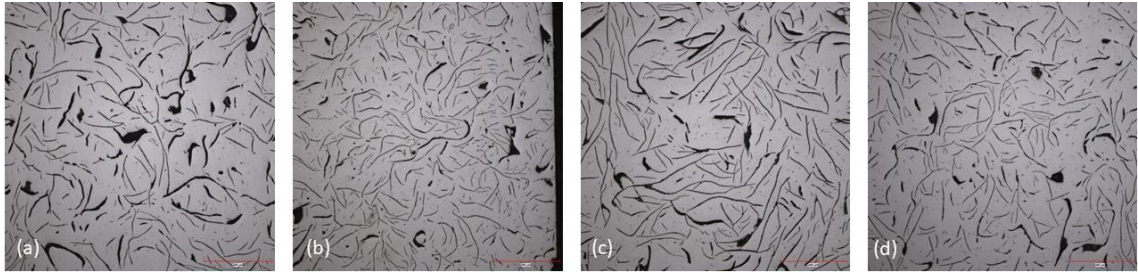
Şekil 13. Numune 2 – Dinamometre testi sonrası çatlak incelemesi; (a) İç sürtünme yüzeyi, (b) İç sürtünme yüzeyi çatlak ölçümü, (c) Dış sürtünme yüzeyi (Sample 2 – Crack inspection after dynamometer test; (a) Inner friction surface, (b) Crack measurement on inner friction surface, (c) Outer friction surface)

Tablo 3. Numune 2 – Çekme dayanımı ve sertlik ölçüm sonuçları (Sample 2 – Tensile strength and hardness measurement results)

Numune 1	Çekme (MPa)	Sertlik (HB)
1	172,82	209,43
2	169,47	219,78
3	170,81	216,37
4	176,31	233,29

Tablo 4. Numune 1 ve 2 – Kimyasal analiz sonuçları (Sample 2 – Chemical analyses results)

	% C	% S	% Si	% P	% Mn	% Cr	% Cu	% Mn
EN-GJL-150	3,20-3,50	Max 0,11	1,80-2,40	Max 0,20	0,40-0,80	0,15-0,50	0,50-1,00	Max 0,10
Numune 1	3,39	0,06	1,83	0,03	0,53	0,18	0,71	0,001
Numune 2	3,20	0,09	1,80	0,01	0,50	0,18	0,60	0,001



Şekil 14. Numune 2 - Mikroyapı görüntüleri; (a, b) Gözenekli mikroyapı, (c, d) Gaz boşlukları (Sample 2 - Microstructure images; (a, b) Microstructure porosity, (c, d) Gas porosity)

Numunelere ait çekme dayanımları ve sertlik değerleri karşılaştırıldığında, Numune 1 ve Numune 2 arasında kayda değer bir fark görülmemiştir.

Numune 1 ve Numune 2'nin balata sürtünme yüzeylerinden ölçülen çatlak boyutları karşılaştırıldığında, Numune 2'nin yaklaşık %70 daha iyi bir çatlak dayanımı sergilediği tespit edilmiştir. Bu bulgu, süreç iyileştirmelerinin çatlak

oluşumu üzerindeki etkinliğini ve önemini göstermektedir. Öte yandan, Numune 1'de gözlemlenen istenmeyen C ve D tipi grafit formları, malzemenin homojenliğini olumsuz etkileyerek çatlak dayanımını azalttığı görülmüştür. Bu durum, Numune 2'de kullanılan zirkonlu aşının etkisiyle düzeltilmiş, daha homojen bir mikroyapı sağlanarak çatlak oluşumunun önlenmesine katkıda bulunduğu görülmüştür.

Her iki numunede de gözlenen mikro gözenekli yapılar, malzemenin mekanik özellikleri üzerinde belirgin bir etkiye sahiptir. Numune 1'de daha fazla ve büyük boyutta görülen gözeneklerin, çatlak oluşumunu teşvik ettiği ve mekanik dayanıklılığı olumsuz etkilediği yorumu yapılmıştır. Numune 2'de gözlenen daha az miktardaki ve küçük boyuttaki gözenekler olmasına karşın süreç iyileştirmeleri sonucunda elde edilen homojen mikroyapı sayesinde çatlak dayanımının arttığı görülmüştür. Bu bulgular, gözenek yoğunluğunun ve boyutunun, malzemenin çatlak dayanımı üzerinde kritik bir faktör olduğunu göstermektedir. Literatürde yapılan çalışmalar, gözeneklerin katılma sürecinin sonunda oluştuğunu, boyutlarının artmasıyla malzemenin mekanik özelliklerini olumsuz etkilediğini belirtmektedir [16].

Mikroskop ile görsel olarak incelendiğinde, Numune 2'de, Numune 1'e göre daha az azot boşluğu tespit edilmiştir. Bu durum, döküm sürecinde uygulanan zirkonlu aşılamanın, literatürde vurgulanmış azot nedenli boşlukları önleyici etkilerini doğrulamaktadır. Literatürde yapılan çalışmalar, zirkonlu aşılamanın döküm sırasında metal içinde azotun gaz halinde kalmasını önleyerek veya azaltarak bu tür boşlukların oluşumunu minimize ettiğini göstermektedir. Zirkon, döküm sırasında metal içinde çözünerek azot ile reaksiyona girmekte ve bu sayede azotun döküm sonrası boşluklar olarak ortaya çıkmasını engellemektedir [28,40]. Literatürde yapılan çalışmalar, zirkon içeren aşılama kullanarak azotu stabilize etmenin, döküm işlemi sırasında oluşabilecek azot boşluklarını azaltmak veya ortadan kaldırmak için etkili bir yöntem olduğunu vurgulamaktadır [40].

Bu çalışmanın sonucunda elde edilen bulgular, süreç iyileştirmelerinin Numune 2'nin mikroyapısını iyileştirildiğini ve bu iyileştirmenin çatlak dayanımını belirgin şekilde artırdığını ortaya koymaktadır.

4. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışmada, ağır ticari araçlarda kullanılan fren disklerinde malzeme özelliklerinin fren diski dayanım performansı üzerindeki etkileri incelenmiş ve üretim sürecindeki besleyici ve yolluk tasarımı, aşılama gibi parametrelerin malzeme özelliklerine etkisi vurgulanmıştır.

İlk testte, mevcut süreçlerle elde edilen Numune 1'in beklenenden erken çatladığı gözlemlenmiştir.

Mikroyapı incelemeleri, malzemenin homojen olmadığını ve yoğun miktarda gaz hatası içerdiğini doğrulamıştır. Bu hataların önlenmesi amacıyla aşağıdaki süreç iyileştirmeleri yapılmıştır:

- Besleyici giriş sayısının artırılması
- Yolluk tasarımının iyileştirilmesi
- Zirkonlu aşının kullanılması

Numune 2'de uygulanan süreç iyileştirmeleri sonucunda mikroyapıda;

- C ve D tipi grafitlerde azalma,
- Azot ve diğer gaz boşluklarında azalma,
- Disk üzerinde radyal yönde ve iç-dış balata sürtünme yüzeyleri arasında malzeme homojenliği sağlanmış ve en büyük çatlak uzunluğu 65 mm'den 20mm'ye indirilmiştir.

Bu bulgular, mikroyapının homojenliğinin ve döküm hatalarının fren disklerinin çatlak dayanımını doğrudan etkilediğini göstermektedir. Bu çalışma sonucunda elde edilen süreç parametreleri, ağır ticari araçların fren disklerinin üretiminde kullanılacaktır. Böylece, fren disklerinin dayanım performansı artırılarak güvenilirlik sağlanacaktır.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Yazarlar sağlanan test imkânlarından dolayı Ege Fren San. Ve Tic. AŞ'ye, numunelerin hazırlanmasındaki desteklerinden dolayı İstikamet Döküm AŞ'ye teşekkürlerini sunar.

ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

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

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)

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

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

Bora GÜNTAY: 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] A. Rashid, Overview of Disc Brakes and Related Phenomena-A Review. *International Journal of Vehicle Noise and Vibration*, 10:4 (2014) 257-301.
- [2] G. P. Voller, Analysis of Heat Dissipation from Railway and Automotive Friction Brakes. Doctoral Dissertation, Brunel University School of Engineering and Design PhD Theses, 2003.
- [3] O. Maluf, M. Angeloni, M. T. Milan, D. Spinelli, W. W. Bose Filho, Development of Materials for Automotive Disc Brakes. *Minerva*, 4:2 (2007) 149-158.
- [4] M. H. Dakhil, A. K. Rai, R. Reedy, A. A. Jabbar, Structural Design and Analysis of Disc Brake in Automobiles. *International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development*, 4:1 (2014) 95-112.
- [5] İ. C. Güleryüz, Ö. C. Yılmaz, Ağır Hizmet Aracı Bütünleşik Fren Diski ve Poyra Çiftinin Soğuma Süresinin Sayısal ve Deneysel Olarak İncelenmesi. *Politeknik Dergisi*, 27:2 (2023) 469-477.
- [6] İ. C. Güleryüz, B. Yılmaz, Ağır Hizmet Aracı Fren Diski Soğuma Davranışının İncelenmesi. *Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology*, 8:4 (2020) 936-947.
- [7] M. C. Pekşen, Gri Dökme Demir Üretiminde Metalürjik Silisyum Karbür Ve Ferro Silis Katkılarının Malzeme Üzerindeki Etkileri.
- [8] M. H. Cho, S. J. Kim, R. H. Basch, J. W. Fash, H. Jang, Tribological Study of Gray Cast Iron with Automotive Brake Linings: The Effect of Rotor Microstructure. *Tribology International*, 36:7 (2003) 537-545.
- [9] G. Le Gigan, M. Ekh, T. Vernersson, R. Lunden, Modelling of Grey Cast Iron for Application to Brake Discs for Heavy Vehicles. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 231:1 (2017) 35-49.
- [10] W. Li, X. Yang, S. Wang, J. Xiao, Q. Hou, Comprehensive Analysis on the Performance and Material of Automobile Brake Discs. *Metals*, 10:3 (2020) 377.
- [11] S. Fidaner, S. Çelik, H. Doğmuş, C. Süzen, A. D. Duran, Genel Dökümcülük Bilgisi. Milli Eğitim Basımevi, İstanbul, (1979).
- [12] H. Lu, M. Liu, D. Yu, T. Zhou, H. Zhou, P. Zhang, H. Bao, Effects of Different Graphite Types on The Thermal Fatigue Behavior of Bionic Laser-Processed Gray Cast Iron. *Metallurgical and Materials Transactions, A*:49 (2018) 5848-5857.
- [13] J. R. Davis, Classification and Basic Metallurgy of Cast Irons. *ASM Specialty Handbook Cast Irons*, (1996) 3-12.
- [14] Microstructure of Cast Irons – Graphite Classification by Visual Analysis. *International Organization for Standardization*, (2019).
- [15] L. Collini, G. Nicoletto, R. J. M. S. Konečná, Microstructure and Mechanical Properties of Pearlitic Gray Cast Iron. *Materials Science and Engineering: A*, 488:1-2 (2008) 529-539.
- [16] S. Vazehrad, Shrinkage Porosity Characterization in Compacted Cast Iron Components. 2012.
- [17] P. Idodo, S. F. M. Rayan, Reducing Casting Defects in Pure Copper Casting: A Look at the Gating Design of High-Performance Blast Furnace Tuyeres. *Jönköping University*, (2022).
- [18] J. Sertucha, J. Lacaze, Casting Defects in Sand-Mold Cast Irons—An Illustrated Review with Emphasis on Spheroidal Graphite Cast Irons. *Metals*, 12:3 (2022) 504.
- [19] E. F. Ryntz Jr, R. E. Schroeder, W. W. Chaput, W. O. Rassenfoss, The Formation of Blowholes in Nodular Iron Castings (Retroactive Coverage). *Transactions of the American Foundrymen's Society*, 91 (1983) 161-164.
- [20] S. D. Sun, S. J. He, M. Q. Zhang, X. Ma, Study of Blowholes Formation and Its Prevention in Nodular Iron Castings. *Key Engineering Materials*, 584 (2014): 67-72.
- [21] George M. Goodrich, Cast Iron Microstructure Anomalies and Their Causes. *AFS Trans*, 105 (1997) 669-683.
- [22] H. Kambayashi, Y. Kurokawa, H. Ota, Y. Hoshiyama, H. Miyake, Evaluation with Surface Analysis Equipment, Of Casting Defects in Cast Iron Articles. In *Materials Science Forum*, (2007) p. 1110-1115.
- [23] R. T. Patil, V. S. Metri, S. S. Tambore, Causes of Casting Defects with Remedies. *International Journal of Engineering Research & Technology*, 4:11 (2015) 639-644.

- [24] M. Javahery, M. Abbasi, Simulation of Casting Process: Case Study on the Gating and Feeding Design for Outlet Diaphragms of Iron Ore Ball Mill. *Heat and Mass Transfer*, 55 (2019) 1959-1967.
- [25] R. Elliott, *Cast Iron Technology*. Butterworths, 1988.
- [26] Y. Lin, Y. Zhang, N. Zhu, D. Lai, J. Huang, K. Wang, Effect of Nitrogen on the Microstructure and Mechanical Properties of Gray Cast Iron. *Jom*, 74:3 (2022) 954-962.
- [27] J. Linder, A. Arvidsson, J. Kron, The Influence of Porosity on the Fatigue Strength of High-Pressure Die Cast Aluminium. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 29:5 (2006) 357-363.
- [28] M. S. Soiński, P. Jędrecki, K. Grzesiak, Inoculation of Grey Cast Iron with Master Alloys Containing Strontium and Zirconium. *Archives of Foundry Engineering*, 11:3 spec (2011) 195-198.
- [29] J. Yamabe, M. Takagi, T. Matsui, T. Kimura, M. Sasaki, Development of disc brake rotors for trucks with high thermal fatigue strength. *JSAE review*, 23:1(2002) 105-112.
- [30] L. C. Kumruoğlu, *Lamel Grafitli ve Küresel Grafitli Dökme Demirlerde Karbon Eşdeğerinin Mekanik Özellikler ve Mikroyapıya Etkisinin İncelenmesi*. Master's Thesis, Sakarya Üniversitesi, 2003.
- [31] H. R. Abbasi, M. Bazdar, A. Halvae. Effect of Phosphorus as an Alloying Element on Microstructure and Mechanical Properties of Pearlitic Gray Cast Iron. *Materials Science and Engineering: A*, 444:1-2 (2007) 314-317.
- [32] C. Khuntrakool, S. Janudom, P. Muangjunburee, N. Mahathaninwong, T. Chuchee, T. Chotikarn, A Yodjan, Effects of Chemical Composition on Microstructure and Properties of High Phosphorus Grey Cast Iron Brake Shoe. *International Journal of Metalcasting*, 16:3 (2022) 1221-1234.
- [33] Y. S. Chung, I. B. Kim, I. M. Park, Influence of Sulfur on the Inoculation Effect of Gray Cast Iron. *Journal of Korea Foundry Society*, 9:3 (1989) 221-227
- [34] R. Gundlach, M. Meyer, L. Winardi, Influence of Mn and S on the Properties of Cast Iron Part III—Testing and Analysis. *International Journal of Metalcasting*, 9 (2015) 69–82.
- [35] *Grey cast irons (DIN EN 1561:1997-08)*. Standards Germany, (1997).
- [36] G. P. Voller, *Analysis of Heat Dissipation from Railway and Automotive Friction Brakes*. Doctoral Dissertation, Brunel University School of Engineering and Design PhD Theses, (2003).
- [37] Link, Model 6900 Ticari Araç Fren Dinamometresi, <https://www.linkeng.com/>
- [38] A. Saydan, H. Gürün, A. Gültaş, O. Çavuşoğlu, *Kalıplama Parametrelerinin Bakalit Malzemenin Darbe Dayanımına Etkisinin İncelenmesi*. 1. Uluslararası Plastik ve Kauçuk Teknolojileri Sempozyumu ve Sergisi, Ankara, (2013).
- [39] *Metallic materials - Tensile testing - Part 1: Method of test at room temperature (ISO 6892-1:2009)*.
- [40] R. L. Naro, Porosity Defects in Iron Castings from Mold-Metal Interface Reactions. *AFS Transactions*, 107 (1999) 839-851.
- [41] S. L. Nimbalkar, R. S. Dalu, *Design Optimization of Gating and Feeding System through Simulation Technique for Sand Casting of Wear Plate*. *Perspectives in Science*, 8 (2016) 39-42.

Güç Faktörü Düzeltmeli Yükselten Dönüştürücü Tabanlı Elektrikli Araç Şarj Ünitesi Tasarımı ve Model Öngörülü Yöntem ile Kontrolü

Naki GÜLER^{1*}, Uğur FESLİ², Samet BİRİCİK³

¹Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye

²Gazi Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Elektronik ve Otomasyon Bölümü, Ankara, Türkiye

³Lefke Avrupa Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Lefke, Kuzey Kıbrıs Türk Cumhuriyeti

Makale Bilgisi

Araştırma Makalesi
Başvuru: 05/08/2024
Düzeltilme: 28/09/2024
Kabul: 23/10/2024

Keywords

Model Öngörülü Kontrol
Yükselten dönüştürücü
Elektrikli araç şarj cihazı

Article Info

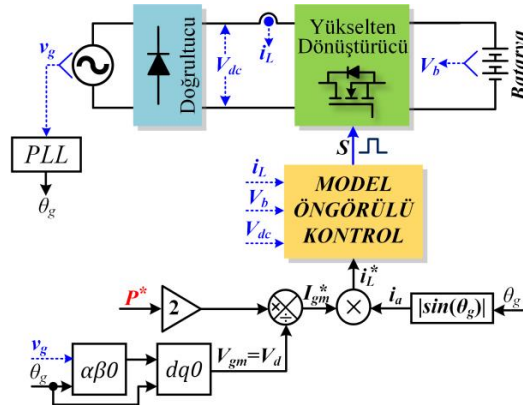
Research Article
Received: 05/08/2024
Revision: 28/09/2024
Accepted: 23/10/2024

Keywords

Model Predictive Control
Boost converter
Electric vehicle charger

Grafik Özet (Graphical/Tabular Abstract)

Bu makalede, şebekeden beslenen Güç Faktörü Düzeltmeli (GFD) yükselten dönüştürücü tabanlı elektrikli araç şarj cihazları için Model Öngörülü Kontrol (MÖK) tabanlı bir kontrol yöntemi önerilmiştir. Sonuçlar, önerilen yöntemin kararlı durum ve referans güç değeri ve şebeke gerilimindeki adım değişimi gibi dinamik geçişler sırasında akım kontrolü yapabildiğini göstermektedir. / In this paper, a Model-Predictive Control (MPC) based control method is proposed for grid-fed Power Factor Correction (PFC) boost converter-based electric vehicle (EV) chargers. The results show that the proposed method is capable of current control during steady-state and dynamic transitions, such as step change in reference power and grid voltage.



Şekil A: Önerilen kontrol yönteminin blok şeması / Figure A: The block schema of the proposed control method

Önemli noktalar (Highlights)

- Güç Faktörü Düzeltmeli (GFD) yükselten dönüştürücü tabanlı elektrikli araç şarj cihazları için Model Öngörülü Kontrol (MÖK) tabanlı bir kontrol yöntemi önerilmiştir. / A Model-Predictive Control (MPC) based control method is proposed for Power Factor Correction (PFC) boost converter-based electric vehicle (EV) chargers.
- Önerilen sistemin çeşitli gerilim seviyelerine sahip bataryaları en az %93 verimle şarj edebileceği doğrulanmıştır. / It is verified that the proposed system can charge batteries that have various voltage levels with a minimum 93% overall efficiency.
- Sonuçlar güç faktörü düzeltmesinin %3,46 toplam harmonik bozulma ile sağlandığını göstermektedir. / The results show that the power factor correction is provided with 3.46% total harmonic distortion.

Amaç (Aim): Bu makalenin temel amacı, PFC yükseltici dönüştürücü tabanlı elektrikli araç şarj cihazları için bir MPC yöntemi geliştirmektir. / The main intention of the paper is to develop an MPC method for PFC boost converter-based electric vehicle chargers.

Özgünlük (Originality): Önerilen sistem çeşitli voltaj seviyelerine sahip bataryaların şarj edilmesi için uygundur. / The proposed system is suitable for charging batteries that have various voltage levels.

Bulgular (Results): Önerilen sistemin çeşitli gerilim seviyelerine sahip bataryaları en az %93 verimle şarj edebileceği doğrulanmıştır. / It is verified that the proposed system can charge batteries that have various voltage levels with a minimum 93% overall efficiency.

Sonuç (Conclusion): Sonuçlar GFD ve akü şarjının başarılı bir şekilde sağlandığını doğrulamaktadır. / The results verify that the PFC operation and battery charge are successfully achieved.



Güç Faktörü Düzeltmeli Yükselten Dönüştürücü Tabanlı Elektrikli Araç Şarj Ünitesi Tasarımı ve Model Öngörülü Yöntem ile Kontrolü

Naki GÜLER^{1*}, Uğur FESLİ², Samet BİRİCİK³

¹Gazi University, Technology Faculty, Department of Electrical-Electronic Engineering, Ankara, Türkiye

²Gazi University, Vocational School of Technical Sciences, Department of Electronic and Automation, Ankara, Türkiye

³European University of Lefke, Department of Electrical and Electronic Engineering, Lefke, Turkish Republic of Northern Cyprus

Makale Bilgisi

Araştırma Makalesi
Başvuru: 05/08/2024
Düzeltilme: 28/09/2024
Kabul: 23/10/2024

Anahtar Kelimeler

Model Öngörülü Kontrol
Yükselten dönüştürücü
Elektrikli araç şarj cihazı

Öz

Bu makalede, şebekeden beslenen Güç Faktörü Düzeltmeli (GFD) yükselten dönüştürücü tabanlı elektrikli araç şarj cihazları için Model Öngörülü Kontrol (MÖK) tabanlı bir kontrol yöntemi önerilmiştir. GFD yükselten dönüştürücü kullanmanın arkasındaki temel fikir, elektrikli araçlarda yerleşik bulunan bir şarj cihazı kullanma zorunluluğunu ortadan kaldırmaktır. Güç dönüştürücü, 10kW anma gücüne sahip bir konut tipi şarj cihazı olarak kullanıma uygundur. GFD yükselten dönüştürücünün kontrolü MÖK ile sağlanmıştır. Önerilen kontrol stratejisinin performansı, MATLAB/Simulink platformunda gerçekleştirilen simülasyon çalışmaları ile incelenmiştir. Sonuçlar, önerilen yöntemin kararlı durum ve referans güç değeri ve şebeke gerilimindeki adım değişimi gibi dinamik geçişler sırasında akım kontrolü yapabildiğini göstermektedir. Ayrıca, önerilen sistemin 400V ve 700V gibi çeşitli gerilim seviyelerine sahip bataryaları en az %93 verimle şarj edebileceği doğrulanmıştır. Bununla birlikte, sonuçlar güç faktörü düzeltmesinin %3,46 toplam harmonik bozulma ile sağlandığını göstermektedir.

Power Factor Correction Boost Converter-Based Electric Vehicle Charger Design and Control with Model Predictive Method

Article Info

Research Article
Received: 05/08/2024
Revision: 28/09/2024
Accepted: 23/10/2024

Keywords

Model Predictive Control
Boost converter
Electric vehicle charger

Abstract

In this paper, a Model-Predictive Control (MPC) based control method is proposed for grid-fed Power Factor Correction (PFC) boost converter-based electric vehicle (EV) chargers. The main idea behind using a PFC boost converter is to eliminate the necessity of using an onboard charger in EVs. The power converter is suitable for use as a residential charger with 10kW rated power. The control of the PFC boost converter is achieved by MPC. The performance of the proposed control strategy is investigated by simulation studies performed on the MATLAB/Simulink platform. The results show that the proposed method is capable of current control during steady-state and dynamic transitions, such as step change in reference power and grid voltage. Also, it is verified that the proposed system can charge batteries that have various voltage levels such as 400V and 700V with a minimum 93% overall efficiency. In addition, the results show that the power factor correction is provided with 3.46% total harmonic distortion.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Elektrikli araçların yaygınlaşması, batarya şarj sistemlerinin önemini artırmıştır. Şarj sistemlerinin tasarımı ve güç sistemleri üzerindeki etkileri güncel çalışma konuları arasında yer almaktadır [1], [2]. Hem alternatif gerilim hem de doğru gerilim çıkışlı şarj üniteleri yaygın olarak kullanılmaktadır [3]. Alternatif gerilim çıkışlı şarj ünitelerinin düşük maliyetli ve basit yapıda olması ev tipi uygulamalarda tercih edilmesindeki temel unsurlardandır. Alternatif gerilim çıkışlı

ünitelerinden elektrikli araca uygulanan gerilim, araç üzerinde yerleşik bulunan şarj ünitesi tarafından doğru gerilime çevrilmektedir [4]. Ayrıca, bataryaya aktarılacak şarj gücü de bu yerleşik üniteler ve batarya yönetim sistemi ile belirlenmektedir. Dolayısıyla, alternatif gerilim çıkışlı şarj üniteleri için araç üzeri yerleşik şarj ünitesi kullanımı bir zorunluluktur. Ancak, doğru gerilim çıkışlı şarj üniteleri için araç üzeri yerleşik şarj ünitesi zorunluluğu bulunmamaktadır. Elektrikli araçlarda kullanılan bataryaların farklı gerilim ve güç seviyelerinde olması doğru gerilim

çıkışlı şarj sistemlerinde farklı gereksinimlere yol açmaktadır. Şarj sistemi çıkış gerilim seviyesinin geniş bir bant aralığındaki bataryaları şarj edebilecek şekilde ayarlanabilir olması, farklı güç dönüştürücüsü topolojilerinin kullanımında önemli bir etken olmuştur.

Doğru gerilim şarj ünitelerinde hem izoleli hem de izolesiz güç dönüştürücüleri kullanılmaktadır [5], [6]. Güvenlik amacıyla rezonans, iki yönlü çift aktif köprülü ve akım kaynaklı gibi birçok izoleli topoloji şarj ünitelerinde kullanılmıştır [5], [7]–[10]. [10]'da Vienna doğrultucu ve çift aktif köprülü dönüştürücü tabanlı şarj ünitesi önerilmiştir. Şebeke gerilimi doğrultulmuş ve şebeke-araċ arası izolasyon çift aktif köprülü dönüştürücü tarafından sağlanmıştır. [11]'de 800V gerilim sınıfındaki elektrikli araçlar için önerilen araç üzeri yerleşik şarj cihazında 1.25kV gerilim seviyesine ulaşmak için üç seviyeli çift aktif köprü dönüştürücü kullanılmıştır. Benzer olarak yüksek gerilim girişine sahip sistemlerden 350-400V gerilim aralığındaki bataryaları şarj etmek amacıyla seri-giriş paralel-çıkışlı güç dönüştürücüsü konfigürasyonları da kullanılmaktadır [5]. Bu izoleli topolojilerde kullanılan yüksek frekanslı anahtarlamaya uygun transformatörlerin tasarımı ve üretimi zorluk olarak ortaya çıkarsa da araç-şebeke arasında izolasyon sağlanması için büyük öneme sahiptir. Ancak, son yıllarda yayınlanan Society of Automotive Engineers J1772 ve Automotive Industry Standard 138 gibi standartlarda güvenlik gereksinimi açısından izolasyonun bir zorunluluk olmadığı vurgulanmıştır [12], [13]. Dolayısıyla, yükselten, alçaltan-yükselten, Totem-pole, dönüştürücüler gibi izolesiz güç dönüştürücüleri de elektrik araç şarj sistemlerinde kullanılmıştır [14]–[17]. [16]'da 250V ve 400V gerilim değerlerine sahip bataryaların şarjı ve motor sürücü için izolesiz bir araç üzeri yerleşik şarj ünitesi geliştirilmiştir. Önerilen güç dönüştürücüsü kontrollü doğrultucu olarak çalıştırılarak batarya şarjı gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, güç dönüştürücüsü motor kontrolcü olarak da kullanılarak tümleşik çalışma sağlanmıştır. Benzer amaçla Totem-pole dönüştürücü tabanlı izolesiz güç dönüştürücüsü modeli de kullanılmıştır [14].

Elektrikli araç şarj sistemlerinde akım ve/veya gerilim kontrolü güvenli bir şarj için gereksinim olarak ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle, şarj sistemlerinde kullanılan güç dönüştürücüsü topolojilerinin yanı sıra, kontrol yöntemleri de büyük öneme sahiptir. [18]'de Araç üzerindeki yerleşik şarj ünitesi kullanılarak, bataryanın şarj ve deşarj durumlarını yönetmek için bir çalışma durumu belirleme algoritması geliştirilmiştir. Akım

ve gerilim kontrol aşamalarının gerçekleştirilmesi için bağımsız PI kontrolcüler kullanılmıştır. Önerilen yapı düşük güçlü uygulamalarda kullanılabilirken, şebekeden çekilen akım kontrolü için güç faktörü düzeltme işlemi yapılmamıştır. Şebeke beslemeli alçaltan-yükselten dönüştürücü tabanlı izolesiz bir şarj ünitesi önerilen çalışmada, gerilim kontrolü için PI kontrolcü önerilmiştir [8]. Kararlı durum ve geçiş koşullarında yapılan testlerde kontrolün sağlandığı görülmüştür. Geçiş süresi 100ms civarında gerçekleştirilirken, güç faktörü düzeltme işlemi %3,5 harmonik bozulma ile sağlanmıştır. Kayan Kipli Kontrol (KKK) tekniği hızlı dinamik cevap ve sistem parametrelerine duyarlı olması avantajlarıyla güç dönüştürücülerin kontrolünde yaygın olarak kullanılmaktadır. Diğer taraftan, çatırdama sorunu KKK yönteminin uygulanmasındaki en büyük zorluk olarak görülmektedir. Bu durumun giderilmesi için KKK yöntemiyle Üstün Burulma Algoritması (ÜBA) birleştirilerek çatırdamalar azaltılmaktadır [19]. [5]'te önerilen seri-giriş paralel-çıkışlı izoleli güç dönüştürücülerinden oluşan batarya şarj ünitesinin ÜBA-KKK yöntemiyle kontrolü sağlanmıştır [9]. Şarj ünitelerinin kontrol sinyalleri merkezi olarak üretilmiş ve çıkışta akım girişte ise gerilim paylaşımı başarıyla sağlanmıştır. Kayan Kipli Kontrolcünün yanı sıra Model Öngörülü Kontrol tekniği de hızlı dinamik cevabı ve hassas kontrol sağlanması avantajlarıyla güç dönüştürücülerinin kontrolü için yaygın kullanılan bir yöntemdir. Bu avantajlarının yanı sıra, MÖK tekniğinin sistem parametrelerine duyarlı olması kontrolcü performansını etkilemektedir. Bu durum bir dezavantaj olarak ortaya çıksa da son yıllarda yapılan birçok çalışma bu olumsuz etkinin sınırlı olduğunu ispatlanmıştır [20], [21]. [16]'da geliştirilen izolesiz şarj ünitesinin kontrolü için MÖK önerilmiştir. MÖK'ün hızlı dinamik cevabı ve sıfır geçiş noktalarında oluşan bozulmaların en aza indirgenmesiyle güç kalitesinde iyileştirme sağlanmıştır. Farklı gerilim seviyelerine sahip batarya koşullarında yapılan deneysel çalışmalar, birim güç faktörü ile çalışmanın sağlandığını ve akım harmoniklerinin %1,89 ile %3,5 arasında değiştiğini ortaya koymuştur.

Bu çalışmada, elektrikli araçlar üzerinde yerleşik şarj ünitelerine olan ihtiyacı ortadan kaldırmak üzere güç faktörü düzeltmeli yükselten dönüştürücü tabanlı bir şarj ünitesinin kontrolü için Model Öngörülü Yöntem önerilmiştir. Güç dönüştürücüsü ve önerilen kontrol yapısı araç üzeri yerleşik şarj cihazı olarak da çalışabilir. Ancak, araç üzerinde yerleşik olan şarj cihazları toplam ağırlığı artırmakta ve elektrikli araçları karmaşık bir sistem haline getirmektedir. Bu nedenle, ev tipi doğru

gerilim şarj cihazı olarak kullanımının daha uygun olacağı önerilmiştir. Güç dönüştürücüsü girişinde kontrolsüz bir tam köprü doğrultucu bulunmaktadır. Doğrultucu çıkış akımı aynı zamanda yükselten dönüştürücü giriş akımı olmakla birlikte, kontrolü önerilen MÖK yöntemiyle sağlanmıştır. Ayrıca, güç faktörü düzeltme işleminin de sağlanması için akım referansının dalga şekli, şebeke gerilim dalga şekliyle aynı formda üretilmiştir.

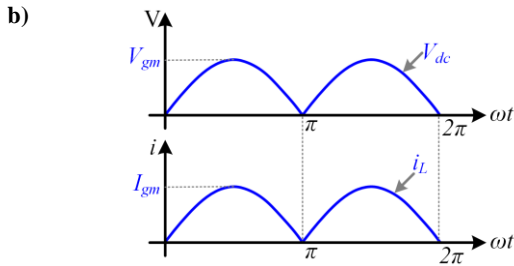
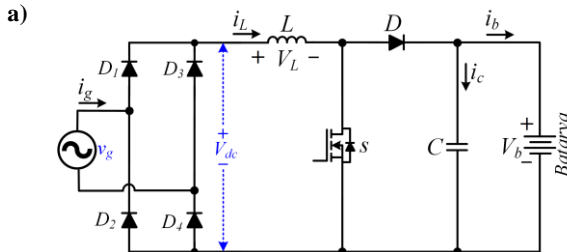
2. GÜÇ FAKTÖRÜ DÜZELTMELİ YÜKSELTEN DÖNÜŞTÜRÜCÜ MODELİ (POWER FACTOR CORRECTION BOOST CONVERTER MODEL)

Şebeke beslemeli bir yükselten dönüştürücü tabanlı batarya şarj sisteminin devre modeli Şekil 1(a)'da görülmektedir. Şebeke gerilimi köprü tipi tam dalga doğrultucu ile doğrultulduktan sonra yükselten dönüştürücü üzerinden bataryaya güç akışı sağlanmaktadır. Şekil 1(b)'de doğrultucu çıkış gerilimi ve akımına ait grafikler görülmektedir. Şekilden görüldüğü üzere, doğrultucu çıkış akımının ideal durumda gerilimle aynı fazda ve dalga formunda olması güç faktörü düzeltmeli dönüştürücüler için bir gerekliliktir. Diyotların ideal olduğu varsayıldığında, doğrultucu çıkış geriliminin (V_{dc}) tepe değeri Denklem 1'de verilen şebeke geriliminin tepe değerine (V_{gm}) eşit olmaktadır.

$$v_g = V_{gm} \sin(\omega t) \quad (1)$$

Doğrultucu çıkış gerilimi pozitif ($0 \leq \omega t \leq \pi$) ve negatif ($\pi \leq \omega t \leq 2\pi$) alternanslar için Denklem 2'deki gibi ifade edilebilir.

$$V_{dc} = \begin{cases} V_{gm} \sin(\omega t) & 0 \leq \omega t \leq \pi \\ -V_{gm} \sin(\omega t) & \pi \leq \omega t \leq 2\pi \end{cases} \quad (2)$$



Şekil 1. a) Şebeke beslemeli yükselten dönüştürücü tabanlı batarya şarj sistemi devre şeması b) Doğrultucu çıkış gerilim ve akım grafikleri (a) Circuit diagram of the grid-fed boost converter based battery charging system b) Rectifier output voltage and current graphs)

Şekil 1(b)'den görüldüğü üzere, yükselten dönüştürücü giriş akımı (i_L), V_{dc} ile aynı dalga formuna sahip olup, tepe değeri (I_{gm}) Denklem 3'te verilen şebeke akımının tepe değerine eşit olmaktadır.

$$i_g = I_{gm} \sin(\omega t) \quad (3)$$

Doğrultucu tarafında şebeke gerilim polaritesine bağlı olarak iletim-kesim durumları oluşurken, yükselten dönüştürücü tarafında s anahtarının durumuna bağlı olarak akım ve gerilim seviyeleri değişkenlik göstermektedir. Bu nedenle, dönüştürücü tarafı s anahtarının iletim ($S=1$) ve kesim ($S=0$) durumları için ayrı ayrı analiz edilir. Burada, S anahtarlama sinyalinin ifade etmektedir. Anahtarın iletimde olduğu durum için bobin gerilimi (V_L) Denklem 4'teki gibi ifade edilebilir.

$$V_L = L \frac{di_L}{dt} = V_{dc} \quad (4)$$

Anahtarın iletimde olduğu durumda batarya akımı (i_b) ise Denklem 5 ile hesaplanabilir.

$$i_b = -i_c \quad (5)$$

Anahtarın kesimde olduğu durum için V_L Denklem 6'daki gibi yazılabilir.

$$V_L = V_{dc} - V_b \quad (6)$$

Burada, V_b batarya gerilimini ifade etmektedir. Batarya akımı ise Denklem 7 ile hesaplanabilir.

$$i_b = i_L - i_c \quad (7)$$

s anahtarının iletim ve kesim durumları için genel bir ifadeyle V_L gerilimi Denklem 8'deki gibi yazılabilir.

$$V_L = L \frac{di_L}{dt} = V_{dc} - V_b(1 - S) \quad (8)$$

Benzer olarak, i_b Denklem 9 ile ifade edilebilir.

$$i_b = i_L(1 - S) - i_c \quad (9)$$

3. KONTROLÇÜ TASARIMI (DESIGN OF CONTROLLER)

Güç dönüştürücüsü çıkışına bağlı bataryanın şarjı için şebekeden aktarılan gücün kontrol edilmesi gerekmektedir. Bununla birlikte, Şekil 1(a)'daki güç dönüştürücüsünün şebekeden çektiği akımda güç faktörü düzeltme işleminin gerçekleştirilebilmesi için giriş akımının kontrol edilmesi bir gerekliliktir. Bu aşamaların gerçekleştirilmesi için referans güç değerine bağlı i_L akımının referansının oluşturulması ve model öngörülü yöntem ile kontrolü aşağıdaki bölümlerde açıklanmıştır.

3.1. Referans Akım Sinyalinin Üretilmesi

(Generation of Reference Current Signal)

Önceki bölümde belirtildiği üzere, dönüştürücünün güç faktörü düzeltme durumunda çalışabilmesi için yükselten dönüştürücü giriş akımının Şekil 1(b)'de verilen ideal i_L gibi doğrultucu çıkış gerilimiyle aynı fazda ve dalga formunda olması gerekmektedir. Bu nedenle, yükselten dönüştürücü giriş akımı referans sinyalinin (i_L^*) birim güç faktörünü sağlayacak şekilde üretilmesi gerekmektedir. Doğrultucu çıkışı için birim referans sinyal (i_a) Denklem 10'daki gibi şebeke tarafındaki birim sinüs sinyalinin mutlak değeri alınarak elde edilmiştir.

$$i_a = |\sin(\theta_g)| \quad (10)$$

Burada, θ_g şebeke fazına bağlı olarak üretilen açılı sinyali ifade etmekle birlikte, bu makalede klasik faz kilitlemeli çevrim (PLL) kullanılarak üretilmiştir. i_L akımının referansı Denklem 10'daki birim referans sinyal kullanılarak Denklem 11 elde edilmiştir.

$$i_L^* = I_{gm}^* i_a, \quad i_L^* = I_{gm}^* |\sin(\theta_g)| \quad (11)$$

Burada, referans şebeke akımının genliği I_{gm}^* ile ifade edilmektedir. Sistemin belirlenen bir referans güç değeri (P^*) için kontrol edileceği göz önünde bulundurulduğunda, temel güç eşitliğinden faydalanılarak Denklem 12 ile I_{gm}^* elde edilebilir.

$$I_{gm}^* = \frac{2P^*}{V_{gm}} \quad (12)$$

V_{gm} değeri bir fazlı şebeke gerilimine önce Clarke dönüşümü ($\alpha\beta 0$) ve devamında Park ($dq0$) dönüşümü uygulanarak elde edilmiştir [22]. Park dönüşümü sonucunda elde edilen V_d bileşeni V_{gm} değerini vermektedir. Denklem 12, Denklem 11'deki I_{gm}^* yerine konulduğunda Denklem 13'teki gibi referans akım sinyali üretilir.

$$i_L^* = \frac{2P^*}{V_{gm}} |\sin(\theta_g)| \quad (13)$$

3.2. Model Öngörülü Kontrol Tasarımı (Design of Model Predictive Control)

Yükselten dönüştürücü giriş akımı model öngörülü yöntem kullanılarak kontrol edilmiştir. Model öngörülü kontrol, sistemin matematiksel modeli, tahmin, maliyet fonksiyonu ve minimizasyon olmak üzere dört aşamada gerçekleştirilebilir. Sistemin matematiksel modeli Bölüm 2'de elde edilmişti. Yükselten dönüştürücü giriş akımının kontrolü için i_L akımının bir sonraki örnekleme süresi için tahmini Denklem 14'teki gibi İleri Euler yöntemi kullanılarak gerçekleştirilebilir.

$$\frac{di_L}{dt} \cong \frac{i_L(k+1) - i_L(k)}{T_s} \quad (14)$$

Burada, T_s kontrol yazılımının örnekleme süresini, $(k+1)$ bir sonraki örnekleme süresini, (k) mevcut örnekleme süresini ifade etmektedir. Denklem 14 düzenlenecek olursa, tahmin edilen akım değeri Denklem 15 ile hesaplanabilir.

$$i_L(k+1) \cong i_L(k) + T_s \frac{di_L}{dt} \quad (15)$$

Denklem 8'deki türev ifadesi Denklem 15'te yerine konulursa, tahmin denklemi Denklem 16'daki gibi yazılabilir.

$$i_L(k+1) \cong i_L(k) + \frac{T_s}{L} [V_{dc} - V_b(1 - S_j)] , \quad (16)$$

$$S_j = \begin{cases} 1 & \text{eğer } j = 1 \text{ ise} \\ 0 & \text{eğer } j = 2 \text{ ise} \end{cases}$$

Tahmin edilen akım değeri elde edildikten sonraki tasarım aşaması maliyet fonksiyonunun oluşturulmasıdır. Tahmin tabanlı olmayan kontrol yöntemlerinde hata fonksiyonu referans ile ölçülen değerler arasındaki farka göre yazılırken, Model Öngörülü Kontrol yönteminde maliyet fonksiyonu olarak adlandırılır ve referans ile tahmin edilen değerler arasındaki fark ile ifade edilir. Maliyet fonksiyonu, yükselten dönüştürücü giriş akım kontrolü için Denklem 17'deki gibi yazılabilir.

$$g_i(k+1) = |i_L^*(k) - i_L(k+1)| \quad (17)$$

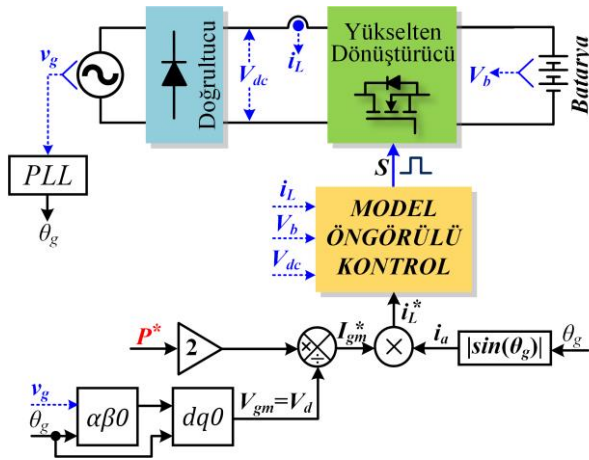
i_L , L bobininden anahtarlamaya bağlı olarak geçecek bir akım sinyali olduğundan saf bir doğru akım olmamaktadır. Bu nedenle, Denklem 17'deki maliyet fonksiyonunun sonucu çoğunlukla sıfıra yakın olmamakla birlikte, maksimum değeri bobin akımındaki dalgalanma değerine bağlıdır. Dolayısıyla, anahtarlama frekansı buradaki maksimum hata üzerinde etkin rol oynamaktadır. Anahtarlama frekansının düşük olması maksimum hatayı artırırken tam tersi de geçerlidir. Bu durum, Model Öngörülü Kontrolcünün hatayı minimuma indirmek için anahtar pozisyonunu sürekli değiştirmesine sebep olmaktadır. Dolayısıyla, anahtarlama frekansını artırmaktadır. Anahtarlama sinyalinin periyot süresi minimum $T_s/2$ olabilmektedir. Bu durum, anahtarlama kayıplarının artmasına ve bazı durumlarda kontrolcü performansında bozulmalara sebep olmaktadır. Bu nedenle, anahtarlama sinyalinin değişimini azaltmak için Model Öngörülü Kontrolde Denklem 18'deki gibi ikinci bir maliyet fonksiyonu eklenmektedir.

$$g_s(k) = |S_j(k) - S(k-1)| \quad (18)$$

Burada, $S_j(k)$ Denklem 16'nın hesaplandığı anahtar pozisyonunu, $S(k-1)$ ise bir önceki örneklemede üretilen anahtarlama sinyalinin pozisyonunu ifade etmektedir. Denklem 16 ve 18'de verildiği üzere iki adet maliyet fonksiyonu bulunmaktadır. Model Öngörülü Kontrol yönteminin bilinen özelliklerinden biri olarak birden çok kontrol parametresini aynı anda kontrol edebilme kabiliyeti bu iki fonksiyonun birleştirilmesinde kolaylık sağlamaktadır. Toplam maliyet fonksiyonu Denklem 19'daki gibi yazılabilir.

$$g_j(k) = g_i(k+1) + \lambda g_s(k) \quad (19)$$

Burada, λ ağırlıklandırma faktörü olarak adlandırılan bir sabittir. Büyük λ değeri kullanımı anahtarlama frekansının azalmasını sağlarken, küçük olması anahtarlama frekansının artmasına sebep olacaktır. Özellikle giriş geriliminin değişken yapıda olduğu sistemlerde, λ değerinin otomatik olarak değiştirilmesi anahtarlama frekansındaki değişimlerin azaltılmasında etkin bir rol oynamaktadır [20]. Bu makalede şebeke beslemeli bir sistem kullanıldığından, λ değeri deneme-yanılma ile elde edilmiştir ve sabit tutulmuştur. Kontrol sinyalinin üretilmesi için Denklem 19'daki maliyet fonksiyonu anahtarın iletim ve kesim durumu için ayrı ayrı hesaplanmıştır. Hesaplanan iki değer arasından küçük olanı daha az kontrol hatası olacağı anlamına geleceğinden, maliyet fonksiyonu değerleri minimizasyona tabi tutularak optimum anahtar durumu belirlenmiştir. Önerilen kontrol yöntemine ait blok şema Şekil 2'de verilmiştir. Yükselten dönüştürücü giriş akımı, giriş gerilimi ve batarya gerilimleri Model Öngörülü Kontrolde kullanılmak üzere ölçülen parametrelerdir. Şebeke gerilimi ise güç faktörü düzeltme işleminin gerçekleştirilmesi için gerekli faz açısı sinyalinin üretilmesinde kullanılmıştır.



Şekil 2. Önerilen kontrol yönteminin blok şeması
(The block schema of the proposed control method)

Bununla birlikte, referans güç değeri (P^*) ve şebeke geriliminin genliği (V_{gm}) kullanılarak referans akım sinyalinin genliği (I_{gm}^*) üretilmiştir. Sonuç olarak yükselten dönüştürücü referans akımı (i_L^*) üretilerek Model Öngörülü Kontrolle uygulanmış ve anahtarlama sinyali (S) üretilmiştir.

4. SİMÜLASYON SONUÇLARI (SIMULATION RESULTS)

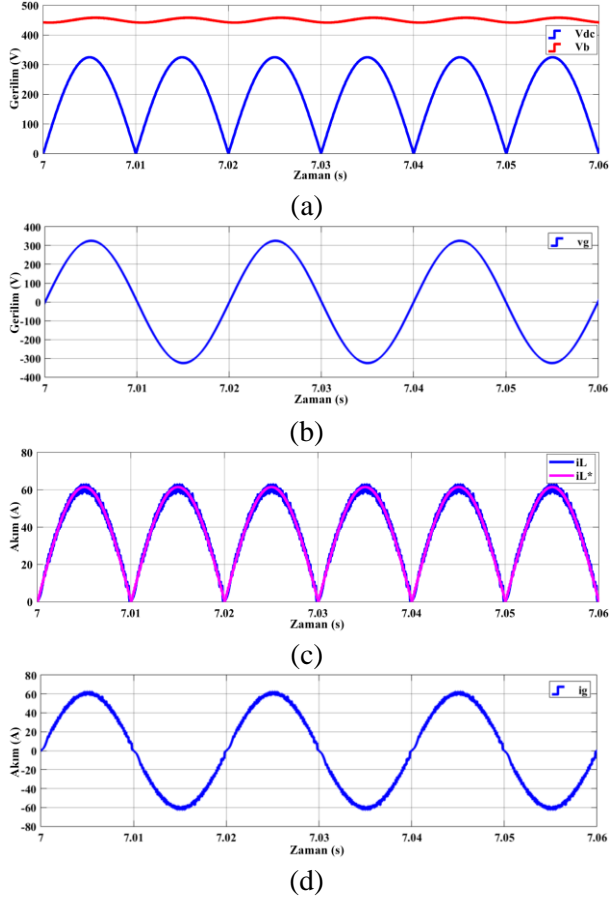
Önerilen kontrol yönteminin performansı MATLAB/Simulink ortamında gerçekleştirilen simülasyon çalışmalarıyla değerlendirilmiştir. Simülasyon ortamında 400V ve 700V batarya gerilimi koşullarında kararlı durum testleri yapılmıştır. Bununla birlikte, referans güç değişimi ve şebeke geriliminde gerçekleştirilen değişimler altında geçici durum testlerine ait sonuçlar sunulmuştur. Simülasyon parametreleri Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Simülasyon parametreleri (Simulation parameters)

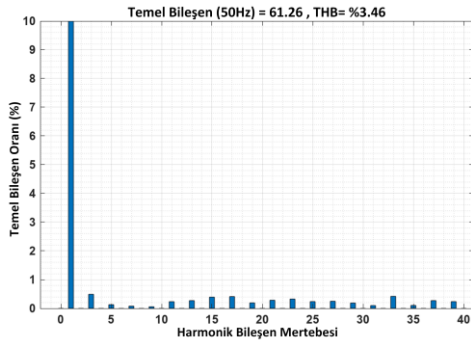
Değişkenler ve Sembolü	Değeri
Şebeke gerilimi (etkin), v_g	230V
Nominal batarya gerilimi, V_b	400V, 700V
Nominal batarya kapasitesi	10Ah
Nominal dönüştürücü gücü, P_n	10kW
Endüktans, L	2mH
Kapasitans, C	1000 μ F
Örnekleme süresi, T_s	20 μ s
Ağırlıklandırma faktörü, λ	0.2

400V nominal batarya gerilimi (V_b), 230V şebeke gerilimi (v_g) ve 10kW referans güç değeri (P^*) altında elde edilen kararlı durum sonuçları Şekil 3'te görülmektedir. Batarya doluluk oranı (SOC) simülasyon başlangıcında %50 olarak seçilmiştir. Hem doluluk oranı hem de şarj durumunda olmasından dolayı V_b değerinin nominal değerden büyük olduğu Şekil 3(a)'da görülmektedir. Bununla birlikte, batarya gerilimi üzerinde şebeke frekansının iki katı frekansta olan dalgalanmalar görülmektedir. Bu durum bir fazlı doğrultuculara kaçınılmaz bir durumdur. Doğrultucu çıkış geriliminin (V_{dc}) ise, Şekil 3(b)'de verilen şebeke geriliminin tam dalga doğrultulmuş hali olduğu yine Şekil 3(a)'da görülmektedir. Yükselten dönüştürücü giriş akımının referansı (i_L^*) ve ölçülen değeri (i_L) Şekil 3(c)'de görülmektedir. Şekilden görüldüğü üzere, i_L akımı referansını takip etmektedir. Referans güç değerine bağlı olarak referans akımının tepe değeri 61.5A seviyesindedir. Şekil 3(d)'de görüldüğü üzere, şebeke akımı i_L akımının alternanslara bağlı olarak yansımalarıdır. Bununla birlikte, şebeke akımının v_g ile aynı fazda olduğu

görülmektedir. Dolayısıyla, güç faktörü düzeltme işleminin başarılı bir şekilde gerçekleştirildiği açıktır. Buna ek olarak, şebekeden çekilen akımdaki Toplam Harmonik Bozulma (THB) sonucu Şekil 4'te görülmektedir. THB %3,46 olarak ölçülmüş olup, uluslararası standartlarda tanımlanan limitlerin altındadır [23].



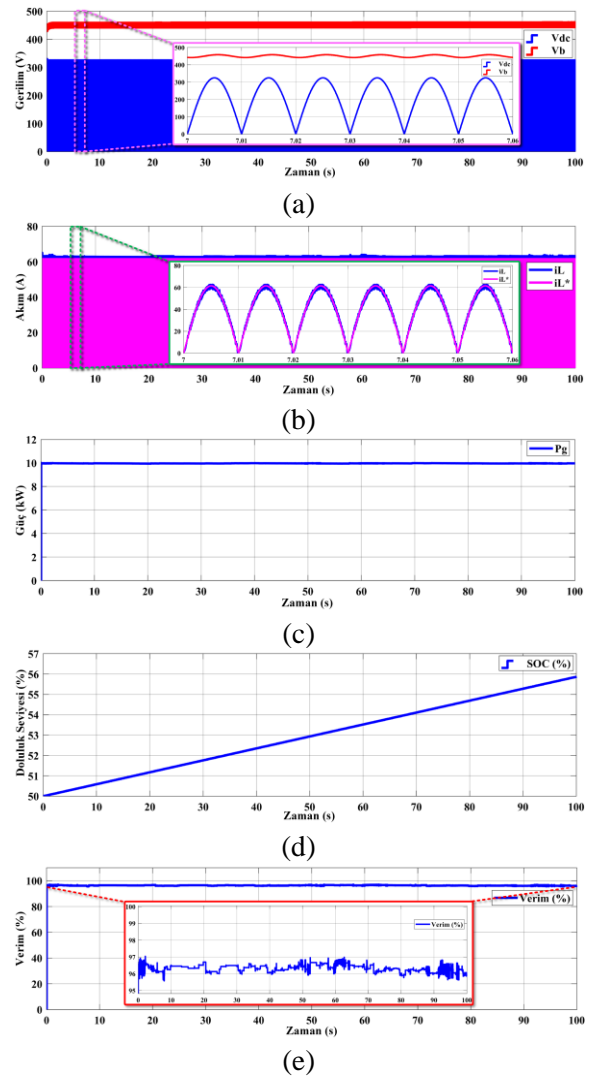
Şekil 3. Kararlı durum sonuçları a) Doğrultucu çıkış ve batarya gerilimleri b) Şebeke gerilimi c) Yükseltilen dönüştürücü giriş akımı d) Şebeke akımı (Steady-state results a) Rectifier output and battery voltages b) Grid voltage c) Input current of the boost converter d) Grid current)



Şekil 4. Şebeke akımındaki toplam harmonik bozulma (Total harmonic distortion in the grid current)

Şekil 3'teki çalışma koşullarında batarya şarj durumunun incelenmesi için yapılan simülasyon çalışmasına ait sonuçlar Şekil 5'te verilmiştir. Şekil

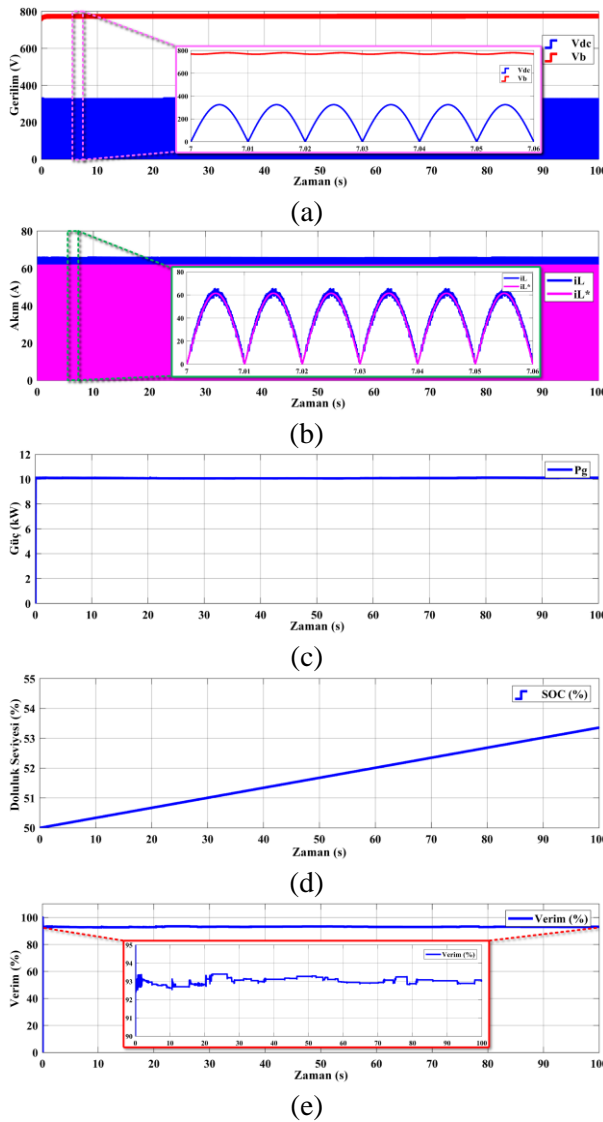
5(a)'da görüldüğü üzere, simülasyon süresi boyunca tam dalga doğrultucu çıkış gerilimi ve batarya gerilimi aynı seviyededir. Benzer olarak, i_L ve referansının aynı seviyede tutulduğu ve kontrolün gerçekleştiği Şekil 5(b)'de görülmektedir. Ölçülen güç değerine ait grafik Şekil 5(c)'de görülmektedir. Simülasyon süresi boyunca 10kW güç aktarımı başarılı bir şekilde sağlanmaktadır. Şekil 5(b) ve (c)'deki bu sonuçlar önerilen kontrol algoritmasının başarılı bir şekilde çalıştığının göstergesidir. Bununla birlikte, Şekil 5(d)'de verilen sonuçlardan görüldüğü üzere, başlangıçta %50 olan batarya doluluk seviyesi aktarılan güç ile artarak simülasyon sonucunda yaklaşık %56 seviyesine ulaşmaktadır. Bu durum, batarya şarjının gerçekleştirildiğini göstermektedir.



Şekil 5. Batarya şarj durumuna ait sonuçlar (400V nominal batarya gerilimi altında) a) Doğrultucu çıkış ve batarya gerilimleri b) Yükseltilen dönüştürücü giriş akımı ve referansı c) Şebekeden çekilen güç d) Batarya doluluk seviyesi e) Sistem verimi (Results for battery charge state (under 400V nominal battery voltage) a) Output voltage of the rectifier and battery b) Input and reference current of boost converter c) Grid power d) State of charge of the battery e) System efficiency)

Güç dönüştürücülerinin performansı açısından diğer bir unsur da sistem verimidir. Şekil 5(e)'de görüldüğü üzere, ortalama sistem verimi %96'nın üzerindedir. Sistem verimini etkileyen kayıplar, hem anahtarlama elemanı hem de diyot ve bobin iç direnci gibi diğer sistem bileşenlerinde meydana gelmektedir.

Güç dönüştürücüsünün farklı batarya gerilim seviyelerinde çalışabilirliğini incelemek amacıyla batarya nominal gerilimi 700V seçilerek elde edilen simülasyon sonuçları Şekil 6'da verilmiştir. Diğer sistem parametreleri Şekil 3'teki teste kullanılanlar ile aynıdır.

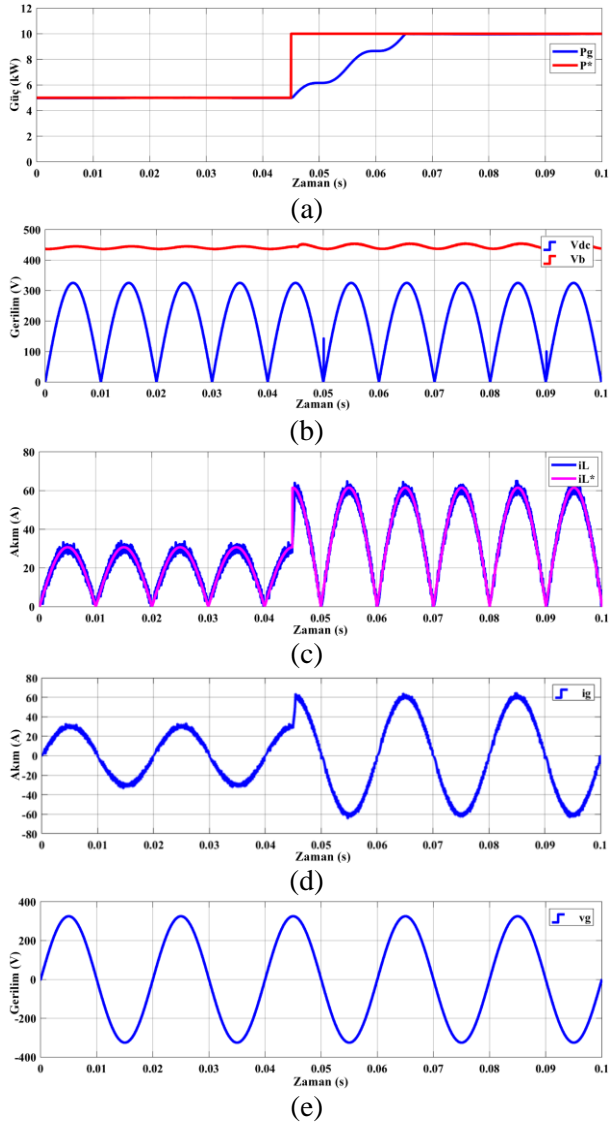


Şekil 6. Batarya şarj durumuna ait sonuçlar (700V nominal batarya gerilimi altında) a) Doğrultucu çıkış ve batarya gerilimleri b) Yükselten dönüştürücü giriş akımı ve referansı c) Şebekeden çekilen güç d) Batarya doluluk seviyesi e) Sistem verimi (Results for battery charge state (under 700V nominal battery voltage) a) Output voltage of the rectifier and battery b) Input and reference current of boost converter c) Grid power d) State of charge of the battery e) System efficiency)

Şekil 6(a)'da görüldüğü üzere, doğrultucu çıkış geriliminin tepe değeri şebeke gerilimi tepe değeriyle aynı seviyededir ($230\sqrt{2}$). Batarya gerilimi ise hem normal doluluk oranının %50 olması hem de şarj durumunda olması sebebiyle nominal değerinin üzerinde ve ortalama 775V seviyesindedir. Şekil 3'teki çalışma koşullarıyla aynı şebeke gerilimi ve güç referansı (10kW) kullanıldığından, i_L^* referansının tepe değerinin de aynı seviyede (61.5A) olduğu Şekil 6(b)'de görülmektedir. Bununla birlikte, akım kontrolünün bu durumda da Model Öngörülü Yöntem ile başarılı bir şekilde gerçekleştirildiği detay grafiğinde görülmektedir. i_L akımı üzerindeki dalgalanmanın Şekil 3 ve 5'e göre bir miktar artış gösterdiği yine grafikten görülmektedir. Bu durum, gerilim yükseltme oranının artışı kaynaklanmaktadır. Şekil 6(c)'de görüldüğü üzere, bu çalışma koşullarında da simülasyon süresi boyunca şebekeden çekilen güç değeri 10kW seviyesinde tutulmuştur. Başlangıç doluluk oranı %50 olan bataryanın şebekeden aktarılan güç ile şarj olarak simülasyon sonunda yaklaşık %53,4 seviyesine ulaşmıştır. 700V nominal batarya gerilimi koşullarında yapılan bu simülasyon süresince ortalama sistem veriminin %93 olduğu Şekil 6(e)'de görülmektedir. Şekil 5 ve Şekil 6'da verilen bu sonuçlar genel olarak yorumlanacak olursa, güç faktörü düzeltilmeli yükselten dönüştürücü tabanlı batarya şarj sisteminin 400V ve 700V nominal batarya gerilimi koşullarında çalışmaya uygun olduğu görülmüştür. Önerilen kontrol yöntemi her iki durumda da başarılı bir şekilde akım kontrolü sağlamıştır. Bununla birlikte, sistem veriminin 400V nominal batarya gerilimi koşulunda %96, 700V durumunda ise %93 olduğu görülmüştür. Bu fark yükselten dönüştürücü veriminin gerilim kazancına bağlı olarak azalmasından kaynaklanmaktadır [24].

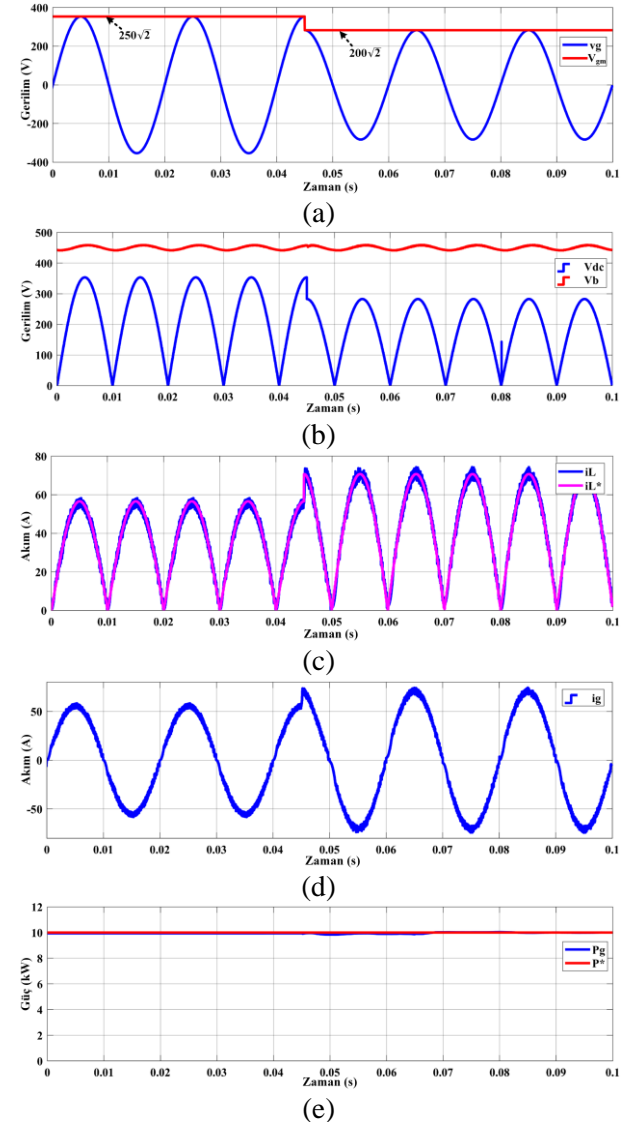
Kontrol yöntemlerinin performansları açısından diğer önemli bir unsur da geçici durumlara karşı verdiği dinamik cevaplardır. Bu amaçla, önerilen kontrol yönteminin dinamik performansı güç referansının değişimi ve şebeke gerilim seviyesinin değişimi koşullarında yapılan simülasyon çalışmalarına ait sonuçlar Şekil 7 ve 8'de verilmiştir. Referans güç değeri, elektrikli araçlar içerisinde bulunan batarya yönetim algoritması tarafından şarj ünitesine gönderilmektedir. Bu nedenle şarj cihazlarının farklı güç değerlerinde çalışma testlerinin yapılması gerekmektedir. Bununla birlikte, şebeke geriliminde belirli oranda farklılıklar oluşabilmesi de olası durumlar arasında yer almaktadır. Önerilen sistemin farklı gerilim seviyesinde testleri bu olası durumda çalışabilirliğini incelemek amacıyla

gerçekleştirilmiştir. Şekil 7(a)'da görüldüğü üzere, referans güç değeri ani olarak 5kW'tan 10kW'a yükseltilmiştir. Referans değişiminden şebeke geriliminin bir periyot süresi sonrasında güç seviyesinin 10kW'a ulaştığı görülmektedir. Batarya ve doğrultucu çıkış gerilimlerinin güç değişimi sonrasında yine aynı seviyede olduğu Şekil 7(b)'de görülmektedir. Güç seviyesinin artmasıyla batarya gerilimi üzerindeki düşük frekanslı dalgalanmalar da artmıştır. Güç referansının artırılmasıyla birlikte referans akım değerinin de Denklem 13'e göre arttığı Şekil 7(c)'de görülmektedir. Bununla birlikte, i_L akımının da kısa sürede (2ms) referansına ulaştığı görülmektedir.



Şekil 7. Güç referansının 5kW'tan 10kW'a çıkarılması durumuna ait sonuçlar a) Şebekeden çekilen güç ve referansı b) Doğrultucu çıkış ve batarya gerilimleri c) Yükselten dönüştürücü giriş akımı ve referansı d) Şebeke akımı e) Şebeke gerilimi (Results obtained increasing the reference power from 5kW to 10kW a) Reference and actual grid power b) Output voltage of the rectifier and battery c) Input and reference current of boost converter d) Grid current e) Grid voltage)

i_L akımının şebeke akımının alternanslara göre düzenlenmiş olduğu göz önünde bulundurulduğunda, Şekil 7(d)'deki şebeke akımı sonuçları güç değişiminin hızlı bir şekilde gerçekleştiğini doğrulamaktadır. Bu durum, önerilen kontrol yönteminin dinamik cevabının herhangi bir aşım olmadan hızlı bir şekilde gerçekleştiğini doğrulamaktadır. Ancak, Şekil 7(a)'da verilen dinamik tepki cevabının yaklaşık bir periyot sürdüğü görülmüştü. Akım sonuçları göz önünde bulundurulduğunda, güç hesabında kullanılan dönüşümlerin hesaplamalarda yaklaşık bir periyotluk gecikmeye yol açtığı çıkarımına varılabilir.



Şekil 8. Şebeke gerilimindeki değişim altında elde edilen sonuçlar a) Şebeke gerilimi b) Doğrultucu çıkış ve batarya gerilimleri c) Yükselten dönüştürücü giriş akımı ve referansı d) Şebeke akımı e) Şebekeden çekilen güç ve referansı (The results obtained under variation in grid voltage a) Grid voltage b) Output voltage of the rectifier and battery c) Input and reference current of boost converter d) Grid current e) Reference and actual grid power)

Ayrıca, şebeke akım ve gerilim sonuçları göz önünde bulundurulduğunda her iki sinyalin de aynı fazda olduğu Şekil 7(d) ve (e)'den görülmektedir.

Önerilen sistemin farklı şebeke gerilim genliğinde çalışabilme kabiliyetinin testi dinamik cevap açısından yapılan diğer bir simülasyon çalışmasıdır. İlgili teste ait simülasyon sonuçları Şekil 8'de görülmektedir. Önceki simülasyon çalışmalarından farklı olarak, simülasyon başlangıcında şebeke geriliminin etkin değerinin 250V olduğu Şekil 8(a)'da görülmektedir. Bu durumda, doğrultucu çıkış geriliminin şebekenin doğrultulmuş formu olduğu Şekil 8(b)'nin başlangıç bölümünde görülmektedir. Şebeke geriliminin önceki çalışmalardan yüksek olması ve güç değerinin sabit olması sebebiyle akım referansının tepe değerinin azaldığı (56.5A) Şekil 8(c)'de görülmektedir. Şebeke akım ve geriliminin bu çalışma koşulunda da aynı fazda olduğu Şekil 8(a) ve (d)'nin başlangıç bölümünde görülmektedir. Şebeke geriliminin etkin değeri 250V'tan 200V'a düşürüldüğü anda (0.045s), doğrultucu çıkış geriliminin de benzer şekilde aniden azaldığı Şekil 8(b)'de görülmektedir. Gerilim seviyesinin düşmesiyle, 10kW güç aktarımının sürdürülmesi için akım referansının 70.7A değerine yükseldiği Şekil 8(c)'de görülmektedir. Yaklaşık 2ms süre içerisinde i_L yeni referansını takip etmeye başlamıştır. Şekil 8(d)'de görüldüğü üzere, bu durum benzer olarak şebeke akımında da meydana gelmiştir. Şekil 8(e)'de verilen güç grafiğinden görüldüğü üzere, şebeke gerilimindeki değişimden önce ve sonrasında güç değeri referansını takip etmektedir. Dinamik

cevabının incelenmesi için yapılan bu simülasyon çalışmaları sonucunda, önerilen kontrol yapısının farklı güç ve gerilim seviyelerinde düzgün bir şekilde çalıştığı elde edilen sonuçlardan görülmüştür.

Tablo 2'de elektrikli araçların yerleşik şarj sistemlerinde kullanılan bir fazlı güç faktörü düzeltmeli dönüştürücüler için geliştirilmiş kontrol yöntemlerinin karşılaştırması verilmiştir. Tablodan görüldüğü üzere oransal-integral (PI) ve oransal-integral-türevsel (PID) denetleyiciler literatürde akım ve gerilim kontrolü için kullanılan yöntemler arasındadır [25]-[27]. [25] ve [26]'da iç-içe bağlı denetleyiciler kullanıldığından 4 adet ayarlanması gereken kontrol parametresi bulunurken, tek aşamalı PID kontrolcü bulunan [27]'de 3 parametrenin ayarlanması yeterli olmaktadır. Önerilen MÖK yönteminde ise sadece ağırlıklandırma faktörü kullanıldığından ayarlanması gereken bir parametre bulunmaktadır. Dolayısıyla, önerilen sistemin en az parametre ayarına ihtiyaç duyması kontrolcü tasarımı aşamasında kolaylık sağlayacak bir avantaj olarak vurgulanabilir. Çalışmaların güç kapasitesi açısından karşılaştırması yapıldığında, önerilen sistemin en yüksek nominal güç değerine sahip olduğu görülmektedir. Bununla birlikte, önerilen sistemin THB bozulma değeri [26]'daki sonuçlara yakın olmakla birlikte, [25] ve [27]'deki çalışmalara göre daha iyi olduğu Tablo 2'de görülmektedir. Önerilen sistemin verimi diğer çalışmalarla benzer seviyelerdedir.

Tablo 2. Bir fazlı güç faktörü düzeltmeli yükseltilen dönüştürücüler ve kullanılan kontrol yöntemlerinin karşılaştırılması (Comparison of single phase power factor correction boost converters and control methods)

	[25]	[26]	[27]	Önerilen Yöntem
Uygulama alanı	Elektrikli Araç Yerleşik Şarj Sistemi	Elektrikli Araç Yerleşik Şarj Sistemi	Elektrikli Araç Şarj Sistemi	Elektrikli Araç Şarj Sistemi
Kontrol yöntemi	PI tabanlı akım-gerilim kontrolü	PI tabanlı ortalama akım kontrolü	PID tabanlı gerilim kontrolü	MÖK
Ayarlanması gereken kontrol parametresi sayısı	4	4	3	1
Nominal güç	3kW	1kW	3.2kW	10kW
THB	%4,1	%3,6	%3,95	%3,46
Verim (maksimum)	%96.4	%96	%95	%96,5

5. SONUÇLAR (CONCLUSION)

Bu çalışmada, elektrikli araçlar üzerine yerleşik olan güç elektroniği şarj bileşenlerini ortadan kaldırmak için yükseltilen dönüştürücü tabanlı güç

faktörü düzeltmeli ev tipi bir DA şarj ünitesi ve kontrolü önerilmiştir. Köprü tipi doğrultucu ve yükseltilen dönüştürücüden oluşan güç elektroniği yapısının kontrolü Model Öngörülü Yöntem ile sağlanmıştır. Önerilen sistemin performansı kararlı

ve geçici durumlar içeren simülasyon çalışmalarıyla incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar, sistemin kararlı durumda akım kontrolünü ve güç faktörü düzeltme işlemini başarılı bir şekilde gerçekleştirdiğini göstermektedir. Bununla birlikte, batarya şarj işleminin ve güç kontrolünün gerçekleştirildiği simülasyon çalışmalarında görülmüştür. Önerilen kontrol yönteminin geçiş durumlarında da oldukça başarılı dinamik cevaplar sergilediği ve THB seviyesinin %3,46 olduğu görülmüştür.

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)

Naki GÜLER: 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.

Ugur FESLİ: Literatür araştırmasını yapmış, simülasyon çalışmalarının değerlendirilmesinde katkı sağlamıştır. Sonuçları analiz etmiş ve maklenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

He contributed to literature research and evaluation of the simulation results. He also analyzed the results and carried out writing the article.

Samet BİRİCİK: 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] Koç, M., Tör, O. B., & Demirbaş, Ş., Analysis the Effects of Electric Vehicles on Distribution Networks with Simulations Based on Probabilistic Methods. Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology, 9(1), 95-107 (2021).
- [2] Boyar, A., Kabalcı, Y., & Kabalcı, E., Grey Wolf Optimization Algorithm-Based Hybrid Energy Storage System Controller Design for Electric Vehicles. Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology 1-1. <https://doi.org/10.29109/gujsc.1475819> (2024).
- [3] Yahaya, A. A., Edpuganti, A., Khadkikar, V., & Zeineldin, H., A Novel Simultaneous AC and DC Charging Scheme for Electric Vehicles. IEEE Transactions on Energy Conversion (2024).
- [4] Kerem, A., & Gürbak, H., ELEKTRİKLİ ARAÇLAR İÇİN HIZLI ŞARJ İSTASYONU TEKNOLOJİLERİ. Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology, 8(3), 644-661 (2020).
- [5] Blinov, A., Chub, A., Guler, N., Bayhan, S., Parsa, L., & Vinnikov, D., Modular MV Naturally Balanced Converter with High-Frequency Isolation and no DC-Link Capacitor for EV Fast Charging. IEEE Transactions on Transportation Electrification (2024).
- [6] Komurcugil, H., Guler, N., Bayhan, S., & Gulbudak, O., Hysteresis Current Control of Buck-Boost Non-Isolated Onboard Charger for Electric Vehicles. In IECON 2023-49th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (pp. 1-6). IEEE (2023).
- [7] Yasa, Y., A system efficiency improvement of DC fast-chargers in electric vehicle applications: Bypassing second-stage full-bridge DC-DC converter in high-voltage charging levels. Ain Shams Engineering Journal, 14(9), 102391 (2023).
- [8] Safayatullah, M., Elrais, M. T., Ghosh, S., Rezaii, R., & Batarseh, I., A comprehensive review of power converter topologies and control methods for electric vehicle fast charging applications. IEEE Access, 10, 40753-40793 (2022).
- [9] Guler, N., Bayhan, S., Fesli, U., Blinov, A., & Vinnikov, D., Super-twisting Sliding Mode Control Strategy for Input Series Output Parallel Converters. IEEE Access (2023).
- [10] Safayatullah, M., Rezaii, R., Ghosh, S., & Batarseh, I., Control of Electric Vehicle Fast Charger based on Vienna Rectifier and Dual Active Bridge DC-DC Converter. In 2022 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT) (pp. 1-6). IEEE (2022)
- [11] Pradhan, R., Shah, S. B., Hassan, M. I., Wang, Z., & Emadi, A., A 15 kW Wide-Input Reconfigurable Three-Level DAB Converter

- for On-Board Charging of 1.25 kV Electric Vehicle Powertrains. *IEEE Transactions on Transportation Electrification* (2024).
- [12] SAE International, "SAE Electric Vehicle and Plug in Hybrid Electric Vehicle Conductive Charge Coupler," 2011 [Online]. Available: https://www.sae.org/standards/content/j1772_201210/
- [13] ARAI, "Electric Vehicle Conductive AC Charging System," 2017
- [14] Ali, T. F., Dominic, D. A., Prabhakaran, P., & Parameswaran, A. P., A Bidirectional Interleaved Totem Pole PFC-based Integrated On-board Charger for EV SRM Drive. *IEEE Access* (2024).
- [15] Kumar, G., & Singh, B., A Single-Stage Bridgeless PFC Charger with Enhanced Power Quality for LEV Mounted Solar PV Panel. *IEEE Transactions on Transportation Electrification* (2024).
- [16] Karneddi, H., Ronanki, D., & Rodriguez, J., Universal Integrated Onboard Charger with Model Predictive Current Control for Plug-in EV Charging. *IEEE Transactions on Power Electronics* (2024).
- [17] Kumar, G. N., Verma, A. K., & Mathuria, K., A novel buck-boost derived pfc converter for ev charging. In *IECON 2022–48th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society* (pp. 1-6). IEEE (2022).
- [18] Podamekala, V. K., & Sandeep, V., An Isolation Circuit based Charging and Discharging Model of On-Board Charger in Electric Vehicle. In *2022 IEEE 2nd International Conference on Sustainable Energy and Future Electric Transportation (SeFeT)* (pp. 1-6). IEEE (2022)
- [19] Güler, N., 9-Seviyeli Paket E-Hücreli Eviriciler için Üstün Burulma Algoritması Tabanlı Kayan Kipli Kontrol Tasarımı. *Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology*, 9(1), 57-70 (2021).
- [20] Guler, N., Biricik, S., Bayhan, S., & Komurcugil, H., Model predictive control of DC-DC SEPIC converters with autotuning weighting factor. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 68(10), 9433-9443 (2020).
- [21] Guler, N., & Komurcugil, H., Energy function based finite control set predictive control strategy for single-phase split source inverters. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 69(6), 5669-5679 (2021).
- [22] Campos-Salazar, J. M., Viani-Abad, A., Sandoval-García, R., Modeling and Simulation of a Single-Phase Linear Multi-Winding Transformer in the D-Q Frame. *J. Electron. Electric. Eng.*, 3, 224–253 (2024).
- [23] IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems, *IEEE Std 519-2014 (Revision of IEEE Std 519-1992)*, (2014).
- [24] Honadia, P. A. A., Barro, F. I., Sane, M., Performance Analysis of a Boost Converter with Components Losses. *Energy and Power Engineering*, 10, 399-413 (2018).
- [25] Zinchenko, D., Blinov, A., Chub, A., Vinnikov, D., Verbytskyi, I., Bayhan, S. High-Efficiency Single-Stage On-Board Charger for Electrical Vehicles. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 70(12), 12581-12592, (2021).
- [26] A. V. J. S. Praneeth and S. S. Williamson, Modeling, Design, Analysis, and Control of a Nonisolated Universal On-Board Battery Charger for Electric Transportation, *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 5(4), 912-924, (2019).
- [27] Chen, Y., Zhou, J., Dai, W. P., & Hu, E., Application of Improved Bridgeless Power Factor Correction Based on One-cycle Control in Electric Vehicle Charging System. *Electric Power Components and Systems*, 42(2), 112–123, (2014).

Experimental Investigation of Machinability of Filler Weld Applied to DIN 1.2379 Tool Steel by Milling Method

Yusuf SİYAMBAŞ^{1*} 

¹Erzincan Binali Yıldırım University Vocational High School, Department of Machinery and Metal Technologies, Erzincan, Turkey

Article Info

Research article
Received: 28/08/2024
Revision: 10/09/2024
Accepted: 21/09/2024

Keywords

Filler welding
Cutting force
Surface roughness
Regression analysis

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 28/08/2024
Düzeltilme: 10/09/2024
Kabul: 21/09/2024

Anahtar Kelimeler

Dolgu kaynağı
Kesme kuvveti
Yüzey pürüzlülüğü
Regresyon analizi

Graphical/Tabular Abstract (Grafik Özet)

In this study, DIN 1.2379 cold work tool steel materials were subjected to filler welding with welded joining process and their machinability was investigated. / Bu çalışmada, DIN 1.2379 soğuk iş takım çeliği malzemelere kaynaklı birleştirme işlemi ile dolgu kaynak işlemi yapılmış ve işlenebilirliği araştırılmıştır.

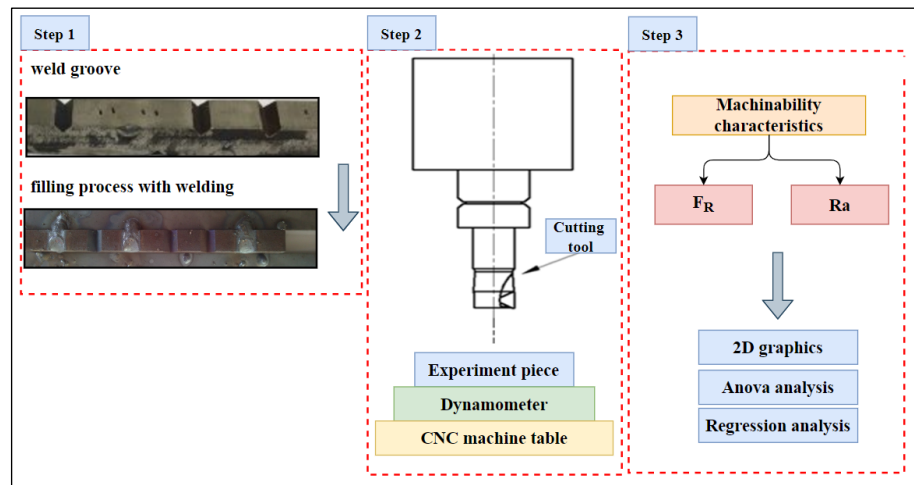


Figure A: Stages of the experimental study / Şekil A: Deneysel çalışmanın aşamaları

Highlights (Önemli noktalar)

- Machinability of filler weld applied to DIN 1.2379 cold work tool steel. / DIN 1.2379 soğuk iş takım çeliğine uygulanan dolgu kaynağının işlenebilirliği.
- Effects of cutting parameters on machinability characteristics. / Kesme parametrelerinin işlenebilirlik karakteristikleri üzerindeki etkileri.
- Statistical data with ANOVA and regression analysis. / Anova ve regresyon analizi ile istatistiksel veriler.

Aim (Amaç): In this study, it was aimed to investigate the milling of filler welds applied to DIN 1.2379 cold work tool steel in terms of cutting force and surface roughness. / Bu çalışmada DIN 1.2379 soğuk iş takım çeliğine uygulanan dolgu kaynaklarının frezelenmesinde kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğü açısından araştırılması amaçlanmıştır.

Originality (Özgünlük): It has been observed that the studies on filler welding of DIN 1.2379 steel are very limited and the machinability characteristics have not been investigated experimentally and statistically together. / DIN 1.2379 çeliğinin dolgu kaynağı üzerine yapılan çalışmaların oldukça sınırlı olduğu ve işlenebilirlik karakteristiklerinin deneysel ve istatistiksel olarak bir arada araştırılmadığı gözlemlenmiştir.

Results (Bulgular): As a result of the experiments, R_a values ranged between $0.100 \mu\text{m}$ and $0.226 \mu\text{m}$, while F_R values ranged between 399 N and 857 N . It was found that feed rate had the greatest impact on both cutting force and surface roughness. / Deneyler sonucunda R_a değeri $0.100 \mu\text{m}$ ile $0.226 \mu\text{m}$ değerleri arasında değişirken, F_R değerleri 399 N ile 857 N arasında oluşmuştur. Kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğü üzerinde en etkili parametrenin ilerleme oranı olduğu belirlenmiştir.

Conclusion (Sonuç): The R^2 values obtained for F_R and R_a showed that the mathematical models developed to predict the machining outputs can be used with high reliability for milling the filler weld applied to DIN 1.2379 material. / F_R ve R_a için elde edilen R^2 değerleri, işleme çıktılarını tahmin etmek için geliştirilen matematiksel modellerin DIN 1.2379 malzemeye uygulanan dolgu kaynağının frezelenmesi için yüksek güvenilirlikle kullanılabileceğini göstermiştir.



Experimental Investigation of Machinability of Filler Weld Applied to DIN 1.2379 Tool Steel by Milling Method

Yusuf SİYAMBAŞ^{1*}

¹Erzincan Binali Yıldırım University Vocational High School, Department of Machinery and Metal Technologies, Erzincan, Turkey

Article Info

Research article
Received: 28/08/2024
Revision: 10/09/2024
Accepted: 21/09/2024

Keywords

Filler welding
Cutting force
Surface roughness
Regression analysis

Abstract

Multi-purpose designed and manufactured constructions may also wear out over time, and breakage or rupture may occur as a result of this wear. In terms of cost, it is more economical to produce these parts by the welded joining method instead of reproducing them. In this context, in this study, a filler welding process was performed on DIN 1.2379 cold work tool steel materials with a welded joining process. The surfaces formed as a result of the filling process were machined by the milling method on a CNC milling machine. The investigation revealed that when cutting speed increased, surface roughness levels reduced. The opposite was observed for the cutting forces with increasing cutting speed. As a result of the experiments, Ra values ranged between 0.100 μm and 0.226 μm , while Fr values ranged between 399 N and 857 N. It was found that feed rate had the greatest impact on both cutting force and surface roughness. Regression analysis was used to create prediction equations for surface roughness and cutting force, and the outcomes of the experiments and predictions were compared.

DIN 1.2379 Takım Çeliğine Uygulanan Dolgu Kaynağının Frezeleme Yöntemi ile İşlenebilirliğinin Deneysel Araştırılması

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 28/08/2024
Düzeltilme: 10/09/2024
Kabul: 21/09/2024

Anahtar Kelimeler

Dolgu kaynağı
Kesme kuvveti
Yüzey pürüzlülüğü
Regresyon analizi

Öz

Çok amaçlı tasarlanmış ve imal edilmiş konstrüksiyonlar da zamanla aşınmalar ve bu aşınmalar sonucu kırılmalar veya kopmalar oluşabilmektedir. Bu parçaların, maliyet açısından yeniden üretilmesi yerine kaynaklı birleştirme yöntemi ile üretilmesi daha ekonomik olmaktadır. Bu kapsamla bu çalışmada, DIN 1.2379 soğuk iş takım çeliği malzemelere kaynaklı birleştirme işlemi ile dolgu kaynak işlemi yapılmıştır. Dolgu işlemi sonucunda oluşan yüzeyler CNC freze tezgâhında frezeleme yöntemiyle işlenmiştir. Çalışma sonucunda, kesme hızının artışı ile yüzey pürüzlülük değerleri düşüş göstermiştir. Kesme kuvvetlerinde ise kesme hızı artışı ile tam tersi durum gözlemlenmiştir. Deneyler sonucunda Ra değeri 0.100 μm ile 0.226 μm değerleri arasında değişirken, Fr değerleri 399 N ile 857 N arasında oluşmuştur. Kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğü üzerinde en etkili parametrenin ilerleme oranı olduğu belirlenmiştir. Regresyon analizi ile kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğü için tahmin denklemleri geliştirilmiş olup deneysel ve tahmin sonuçları karşılaştırılmıştır.

1. INTRODUCTION (GİRİŞ)

Wear of parts as a result of metal-to-metal friction causes serious problems in mechanical systems. These problems lead to shortened component lifetimes and system failures. Parts need to be replaced or repaired to eliminate these problems and maintain the efficiency of the system. Repairing worn parts is much more economical than the high cost of buying new parts. Weld repairs are a common method used to repair damage to metal or other weldable materials. Filler welding is a welding process used to rebuild or strengthen the surfaces of

worn or damaged metal parts [1]. This process is done to extend the life of parts exposed to excessive wear, impacts, or high temperatures. Filler welding is widely used, especially in sectors such as mining, cement, power generation, agriculture, and heavy industry [1]. There are many welding methods used in today's production. Gas metal arc welding, one of these methods, has an important place in hardfacing welding applications because it is easy to apply and allows high welding speeds [2]. This welding technique can be applied manually or integrated into automation systems, enabling bi-directional welding [3]. Gas metal arc welding is divided into

metal active gas (MAG) and metal inert gas (MIG) according to the type of gas used. In MIG welding, noble gases such as argon and helium are used as shielding gases, while carbon dioxide or gas mixtures are used in MAG welding. The simplicity of application of MIG welding has made it a highly sought-after and popular welding technique for all non-ferrous metals and alloys. However, in order for the welded repaired part to be reused, the welded area must be restored to its original condition. In this case, secondary operations such as grinding, sanding, and machining are needed.

The term "machinability" describes a material's ease or difficulty of machining. It results in less energy consumption, reduced machining times, good surface quality, and low tool wear during chip removal in a material with high machinability. Machinability depends on the material properties as well as the machining method and machining parameters. Criteria like cutting force, surface quality, tool wear, energy consumption, and dimensional accuracy and tolerances are used to comprehensively assess the machinability of a material [4-7]. Studies investigating the machinability of filler welds have been conducted in the literature. In an experimental study, five layers of Hastelloy C type material with layer thickness ranging from 2-3 mm were deposited on the surface of a 60 mm thick 56NiCrMoV7 steel block using semi-automatic MIG welding. They used 80 m/min cutting speed, 0.12 mm axial depth of cut, 12 mm cutting width, and 0.05 mm feed rate as machining parameters. During the experiments, it was noted that the side surfaces of the cutting tools were worn due to the high hardness of the workpiece surface. It was reported that the machining of nickel-based hard surface layers is limited to high speed dry machining due to rapid tool wear [8]. In another experimental study, the weldability and machinability of austenitic stainless steels strengthened with high nitrogen content were investigated. The parts were filled by TIG welding at a rate of 26 g/min. The investigation led to the conclusion that 40 m/min should be the cutting speed and that low cutting speeds prolong tool life [9]. In another study, the worn area of X40CrMoV5-1 hot work tool steel was filled by electric arc welding, and the milling performance of different coated carbide inserts was investigated. Resultant force, surface roughness, and cutting power with respect to machining parameters were optimized by the Taguchi-based gray relational analysis method. As a result of the study, it was stated that the resultant force and surface roughness are affected by the feed rate and, the cutting speed is the most effective parameter for the cutting power [10]. In

another study, the machinability of welded repaired DIN 1.2344 hot work tool steel was investigated with TiAlN-coated carbide tools. The machining parameters were determined as feed rate, cutting speed, and depth of cut. As a result of the experimental study, it was stated that the most effective parameter on surface roughness was chip depth, while all parameters were effective on cutting force. It is said that the most effective parameters in terms of cutting temperature are chip depth and speed [11]. In another experimental study, the cutting force generated in the milling process of modified AISI P20 steel was investigated using the response surface method. First and secondary prediction models of the cutting force were developed based on feed rate, cutting speed, axial depth of cut, and radial depth of cut. Feed rate was the most effective input parameter, followed by cutting speed, axial depth of cut, and radial depth of cut, according to Anova analysis [12]. In another study, the face-milling performance of hard-facing weld metal on JIS-S50C carbon steel was investigated on microstructure, chip characteristics, wear properties, and surface roughness. After comparing the wear of the cutting tool edge in wet and dry conditions, it was found that the dry condition exhibits a smaller flank wear than that of the wet condition. They explained the severe wear in the wet condition by the fact that a greater amount of coolant oil droplets cannot penetrate into the chip-tool interface and then provides an insufficient amount of lubricant in order to decrease the cutting temperature [13]. In another study, the machinability of hard surfaces deposited by nickel-based welding was investigated at high cutting speed. As a result of the study, it was stated that the high tool wear was caused by the 1 mm top layer of the hard surface coating leading to the formation of notches and chips on the cutting surface. It was reported that 190 m/min cutting speed is the most suitable value in terms of cutting forces. They also related the increase in power during milling to tool wear [14].

The literature research revealed that filler welding is often employed in repair processes. In addition to the economic advantages of the method, there are also disadvantages, such as tool wear during the processing of the hard structure caused by the weld structure. Within this context, the suitability of the processing parameters comes to the fore. This work examined surface roughness and cutting force during the milling of filler welds applied to DIN 1.2379 cold work tool steel.

2. MATERIAL AND METHOD (MATERİYAL VE METOT)

The steps carried out for this experimental study are presented comprehensively in Figure 1. A Buğra MIG 650 SW brand welding machine was used for the welding process. Technical specifications of the

welding machine are given in Table 1. SG2 Geka brand wire was used as gas metal arc welding wire (Table 2). The welding process was performed at 24 volts, 120 ampere welding current, and 3 m/min wire feed speed. Images of the welded and machined samples are given in Figure 2.

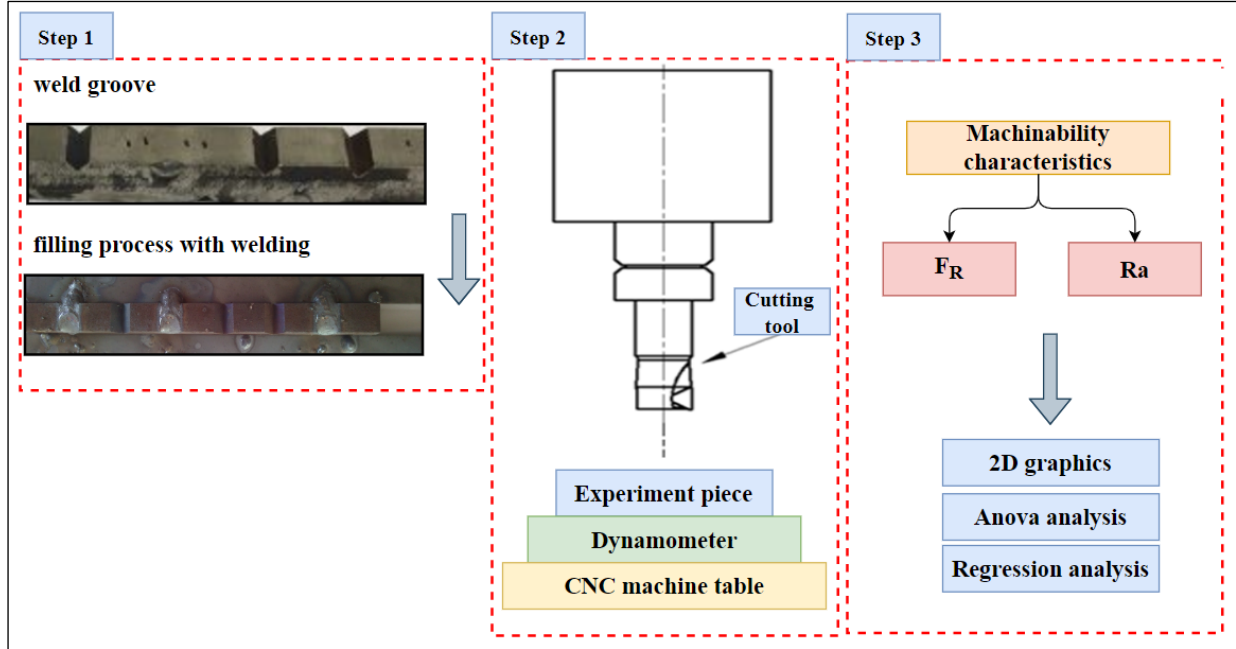


Figure 1. Stages of the experimental study (Deneysel çalışmanın aşamaları)

Table 1. Technical specifications of Buğra MIG 650 SW welding machine (Buğra MIG 650 SW kaynak makinasının teknik özellikleri)

Mains voltage (V)	3x380	Dimensions (mm)	460x1360x980
Idle operating voltage (V)	22-49	Maximum on-board power (KVA)	27
Welding current adjustment range (V)	50-650	Wire diameter that can be used (mm)	1.0-1.2.1.6-2.0-2.4
Wire feed speed range (m/min)	1-24	Weight (kg)	247

Table 2. Technical specifications and mechanical properties of SG2 welding wire (SG2 kaynak telinin teknik özellikleri ve mekanik özellikleri)

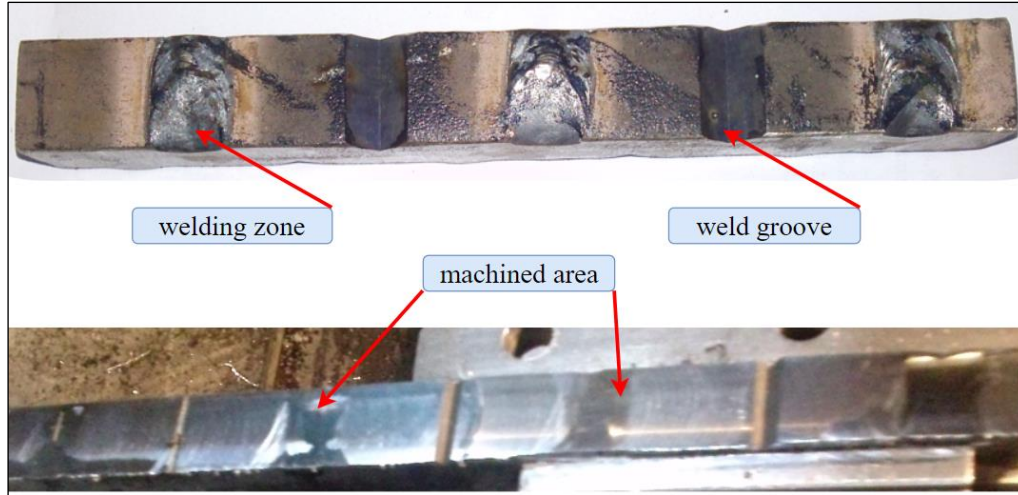
Chemical composition (%)			Yield Strength (MPa)	Tensile Strength (MPa)	Impact Strength (J)	Elongation (%)
C	Si	Mn	min. 420	500-640	min. 47	min. 22
0.08	0.85	1.45				

The cold work tool steel DIN 1.2379, which is extensively utilized in the industry, was chosen for the experimental investigation. Specimens measuring 20x20x100 mm were used as workpiece

material. Table 3 provides the chemical makeup of the material utilized in the experiment. In order to make the welding process easier, 60° weld grooves were opened on the parts.

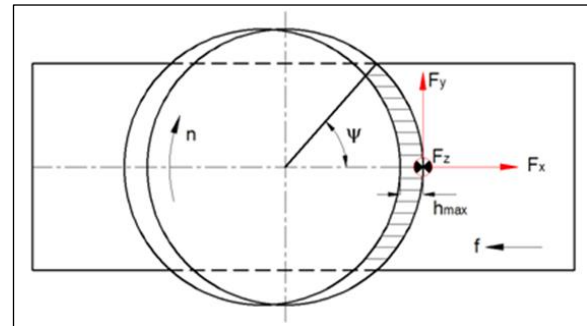
Table 3. DIN 1.2379 Chemical composition of the material (DIN 1.2379 Malzemenin kimyasal bileşimi)

Material	Hardness (HB)	Chemical composition (%)							
		C	Mn	P	S	Si	Cr	Mo	V
DIN 1.2379	229	1.59	0.25	0.023	0.0006	0.33	11.34	0.72	0.74

**Figure 2.** Welded and machined parts (Kaynaklı ve işlenmiş parçalar)

The trials employed PVD-coated TiAlN-coated cemented carbide inserts (GC1010-490R-08T308M-PM) made by Sandvik Coromant. CoroMill 490-032A25-08L coded tool holder with cylindrical shank, 32 mm diameter machining capacity, and 90° edge milling angle was used as tool holder. On a CNC milling machine, machinability tests were conducted using the parameters specified in ISO 8688-1. Before the experiments, the welded area was cleaned and the slagged part was processed. The values of the cutting parameters were determined with reference to the manufacturer's data. The experiments were carried out under dry conditions at three different cutting speeds (80, 100, 128 m/min), three different feed rates (0.10, 0.15, 0.20 mm/rev), and 0.3 mm cutting depth. The machining experiments were carried out on a Johnford VMC550 BSD vertical machining center with a power of 5.5 kW using a Fanuc control unit located in the Industrial CNC laboratory of Gazi University Faculty of Technology, Department of Manufacturing Engineering. With a Kistler 9257B three-component piezoelectric dynamometer, cutting force measurements were carried out. This dynamometer is connected to a Kistler 5070A multichannel charge amplifier. The cutting force data were then analyzed using Dynoware software. The symmetrical face milling method was used for milling the welded areas. This method allows the calculation of the resultant force (F_R). The

components of the cutting force acting on an insert of the cutting tool in face milling are expressed in Figure 3.

**Figure 3.** Cutting geometry in symmetric face milling (Simetrik yüzey frezelemede kesme geometrisi)

In this way, F_x is the instantaneous feed component, F_y is the instantaneous normal component, and F_z is the instantaneous vertical component. The immediate resultant force on the workpiece is known as F_R . A is the cutter's instantaneous cutting angle, while F_x , F_y , and F_z are the immediate cutting forces on an insert with feed in the X, Y, and Z directions, respectively. Equation 1 was used to compute the resultant force [15-17].

$$F_R = \sqrt{(F_x)^2 + (F_y)^2 + (F_z)^2} \quad (1)$$

Measurement of roughness was done using the profile approach. For this purpose, a portable MAHR-Perthometer M1, which can read the profile change in terms of Ra, Rz, and Rmax, was used. After the samples were machined to 100 mm length, the measurement process was carried out without waiting in order not to oxidize the surfaces and affect the measurement values. The average surface roughness (Ra) values investigated in the study were obtained according to ISO 4287 standard [18]. Ra values were also determined by averaging the results of three measurements taken from each machined surface. The sample length (λ) was 0.8 mm and the measurement length (L) was 4 mm.

3. Experimental Results and Discussion (Deneysel Sonuçlar ve Tartışma)

The resultant force (F_R) and surface roughness (Ra) values resulting from milling experiments using the cutting parameters were measured, and the numerical values are given in Table 4. Figures 4 and 5 show the variations in F_R and Ra values based on feed rate and cutting speed.

Table 4. Cutting parameters and experimental results (Kesme parametreleri ve deneysel sonuçlar)

Exp. no	Feed rate (mm/rev)	Cutting speed (m/min)	F_R (N)	Ra (μm)
1	0.1	80	399	0.146
2	0.1	100	559	0.126
3	0.1	128	564	0.100
4	0.15	80	518	0.181
5	0.15	100	685	0.162
6	0.15	128	757	0.146
7	0.2	80	653	0.226
8	0.2	100	675	0.190
9	0.2	128	857	0.174

3.1. Evaluation of F_R (F_R 'nin değerlendirilmesi)

The change in F_R values in relation to feed rate and cutting speed is depicted in Figure 4. Examining Figure 4, it is evident that F_R values rise as cutting speed increases across the board for all feed rates.

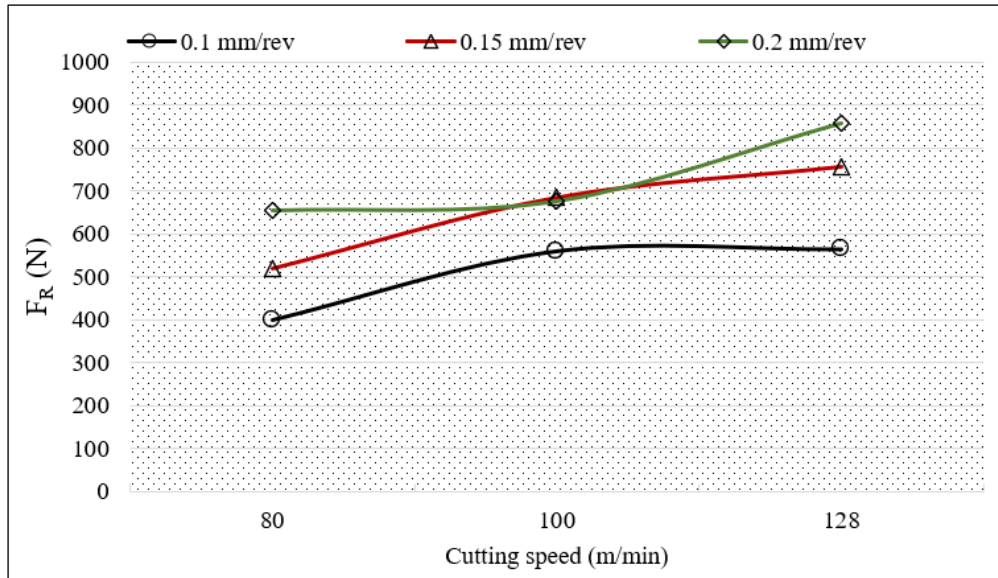


Figure 4. Variation of F_R depending on cutting parameters (Kesme parametrelerine bağlı olarak F_R 'nin değişimi)

With the increase in cutting speed, F_R values increased between 5% and 65% at all feed rates. This can be explained by the high Si content in SG2 wire, which increases the yield strength of the material and wears the cutting tools rapidly at high cutting speeds. At all cutting speed values, F_R values rose as feed rate increased. This increase can be attributed to the increase in both the amount of material removal and the resistance encountered during cutting with increasing feed rate [19].

3.2. Evaluation of Ra (Ra'nın değerlendirilmesi)

The variation of Ra values with regard to feed rate and cutting speed is depicted in Figure 5. Analyzing Figure 5, it is evident that Ra values fall at all feed rates as cutting speed increases. This may be explained by the fact that when cutting speed increases, temperature rises as well, which causes the adhering material's strength in the second deformation zone to diminish. The material with reduced strength is deformed more easily, and the chip flows more easily away from the cutting zone

[20-22]. As with the F_R values, R_a values rose as the feed rate increased at all cutting speed values. As the feed rate increases, the distance between the marks that each insert leaves on the workpiece during the metal removal process (feed marks) increases.

Greater feed rates cause these markings to become more noticeable, which causes the surface to ripple deeper and more pronouncedly [23]. This is thought to be effective on surface roughness.

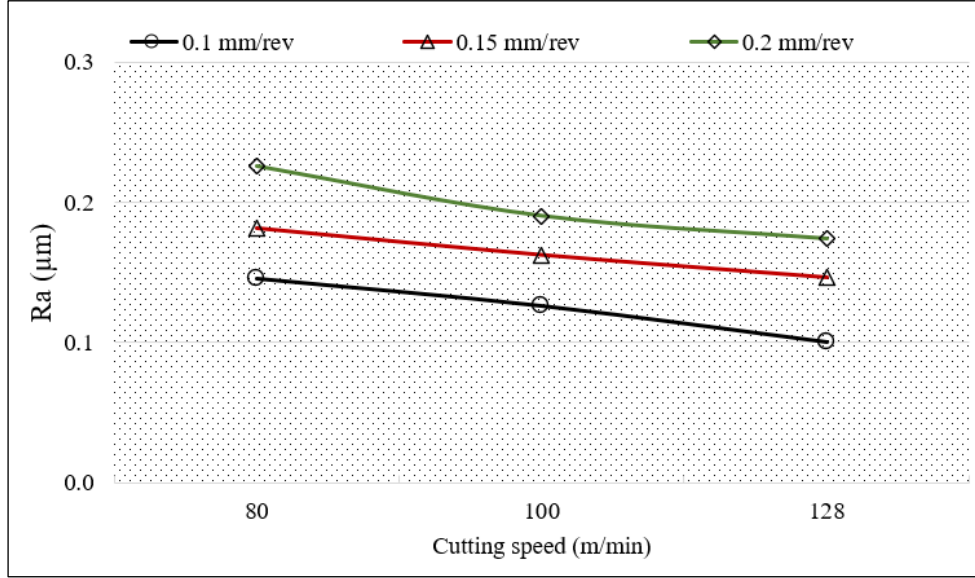


Figure 5. Variation of R_a depending on cutting parameters (Kesme parametrelerine bağlı olarak R_a 'nın değişimi)

Anova results of F_R and R_a values are presented in Table 5. The biggest value of F is the factor that has the greatest influence on F_R and R_a among the values that were found by computing the sum of

squares of each component independently. Table 5 illustrates that the feed rate was the primary factor influencing both F_R and R_a . The effect rate of feed rate on F_R is 51.02%, while on R_a it is 72%.

Table 5. Anova results (Anova sonuçları)

Parameter	DF	SS	MS	F	P	PRC (%)
F_R						
Feed rate (f)	2	75782	37891	14.17	0.015	51.02
Cutting speed (V_c)	2	62061	31030	11.61	0.022	41.78
Error	4	10695	2674			7.20
Total	8	148538				100
R-sq= 92.80%, R-Sq (adj)= 85.60%						
R_a						
Feed rate (f)	2	0.007913	0.003956	121.66	0.000	72.00
Cutting speed (V_c)	2	0.002948	0.001474	45.32	0.002	26.82
Error	4	0.000130	0.000033			1.18
Total	8	0.010990				100
R-sq= 98.82%, R-Sq (adj)= 97.63%						

Regression analysis is used to describe the relationship between a dependent variable and one or more independent variables. The F_R and R_a values obtained for this experimental study are given in equations 2 and 3 as first order equations.

$$F_R = 52 + 1013f + 2.40V_c + 11.7f*V_c \quad (2)$$

$$R_a = 0.1301 + 0.830f - 0.000755V_c - 0.00101f*V_c \quad (3)$$

Regression equations were obtained by considering the feed rate (f) and cutting speed (V_c) factors. R^2 is the coefficient expressing the appropriateness of the

regression equation. As the R^2 value approaches 1, it is accepted that the statistical closeness of the regression model expressing the relationship between the dependent and independent variables increases.

In this context, R^2 values for F_R and R_a are 0.9028 and 0.98, respectively (Figure 6-7). In this case, it is concluded that the regression model makes a good prediction and the study is in line with the realities.

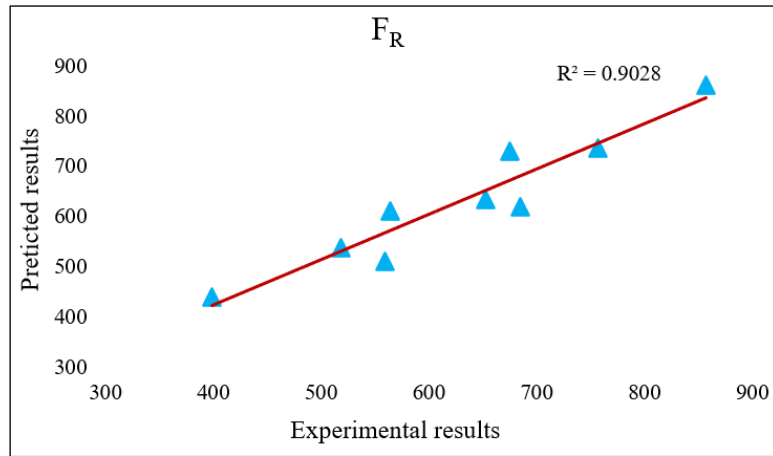


Figure 6. Comparison of F_R results (F_R sonuçlarının karşılaştırılması)

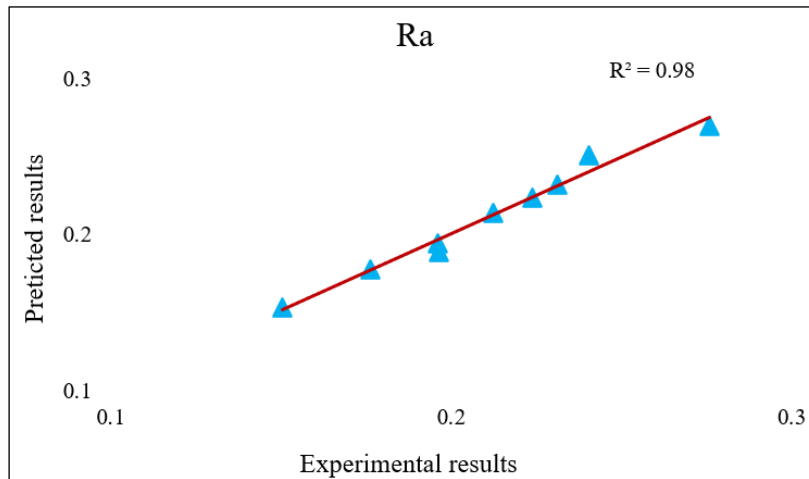


Figure 7. Comparison of R_a results (R_a sonuçlarının karşılaştırılması)

4. CONCLUSIONS (SONUÇLAR)

The results obtained as a result of the machinability tests of the filler welding process on DIN 1.2379 material are summarized below.

➤ At constant feed rates, it was shown that F_R values rose as cutting speed increased. This is attributed to the high Si content in SG2 wire, which increases the yield strength of the material and wears the cutting tools rapidly at high cutting speeds.

➤ At constant feed rates, it was found that R_a values dropped as cutting speed increased.

➤ An Anova study revealed that the feed rate was the primary factor influencing both F_R and R_a . The effect rate of feed rate on F_R is 51.02%, while on R_a it is 72%.

➤ The R^2 values obtained for F_R and R_a showed that the mathematical models developed to predict the machining outputs can be used with high reliability for milling the filler weld applied to DIN 1.2379 material.

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)

Yusuf SİYAMBAŞ: 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] Yavuz Y. (2018). Cr-WBC esaslı sert dolgu örtülü elektrot üretimi ve karakterizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- [2] TMMOB (1998). Aşınmayı önlemede etkili yöntemler, Mühendis ve Makine, 17-21
- [3] Böhler (2016'a). Filler Metals for Repair, Anti-wear and Anti-corrosion, 1-28
- [4] Kacal A., Yıldırım F., Application of grey relational analysis in high-speed machining of hardened AISI D6 steel, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 227:7 (2013) 1566-1576.
- [5] Şirin Ş., Şirin E., Turgut Y., Korkut, İ., AISI D2 Soğuk İş Takım Çeliğinin Farklı Geometriye Sahip Kesici Takımlarla Frezeleme İşleminde Kesme Parametrelerinin Yüzey Pürüzlülüğü ve Takım Aşınmasına Etkisinin Araştırılması, Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi, 6:3 (2018) 660-668.
- [6] Yağmur S., AISI 1050 çeliğinin tormalanmasında minimum miktarda yağlamanın (MMY) kesme kuvvetleri ve yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisinin araştırılması, Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology, 11:4 (2023) 1024-1034.
- [7] Cakıroğlu R., Uzun G., Yüksek ilerleme ile frezeleme işlemi esnasında oluşan kesme kuvvetinin ve iş parçası yüzey pürüzlülüğünün Yapay Sinir Ağları ile modellenmesi, Gazi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 7:1 (2021) 58-66.
- [8] Mansori M. E., Nouari M., Dry machinability of nickel-based weld-hardfacing layers for hot tooling, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 47:11 (2007) 1715-1727.
- [9] Onozuka M., Shimizu K., Urata K., Kimura M., Kadowaki H., Okamoto M., Okuno K., Basic analysis of weldability and machinability of structural materials for ITER Toroidal Field coils, Fusion engineering and design, 82:5-14 (2007) 1431-1436.
- [10] Günay M.; Modeling and multiple optimization in face milling of hardfacing welding applied steel: Force, roughness, power, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 236:12 (2022) 6652-6664.
- [11] Karcı M. (2010). Kaynakla tamiri yapılan kalıpların CNC freze tezgahında işleme parametrelerinin belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [12] Abou-El-Hossein K. A., Kadirgama K., Hamdi M., Benyounis K. Y., Prediction of cutting force in end-milling operation of modified AISI P20 tool steel, Journal of Materials Processing Technology, 182:1-3 (2007) 241-247.
- [13] Poonayom, P., Wattanajitsiri, V., & Kimapong, K., A machinability study of hardfacing weld metal on JIS-S50C carbon steel, Key Engineering Materials, 728 (2017) 85-90.
- [14] Benghersallah, M., Boulanouar, L., Le Coz, G., Devillez, A., & Dudzinski, D., Machinability of Stellite 6 hardfacing, In EPJ Web of Conferences, 6 (2010) 02001.
- [15] Günay M., Kaçal A., Turgut Y., Optimization of machining parameters in milling of Ti-6Al-4V alloy using taguchi method, NWSA: Engineering Sciences, 6-1 (2011) 428-440.
- [16] Y Altıntaş., Manufacturing automation: metal cutting mechanics, Machine Tool Vibrations, and CNC Design, Cambridge University Press, 2012.
- [17] Alauddin M., Mazid M. A., El Baradi M. A., Hashmi M. S. J., Cutting forces in the end milling of Inconel 718. Journal of Materials Processing Technology, 77:1-3 (1998) 153-159.

- [18] ISO 4287:1997, Geometrical Product Specifications (GPS)-Surface texture: profile method-terms, definitions and surface texture parameters, International Organization for Standardization, Geneva, (1997).
- [19] Yağmur S., The effects of cooling applications on tool life, surface quality, cutting forces, and cutting zone temperature in turning of Ni-based Inconel 625. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 116:3 (2021) 821-833.
- [20] Uzun G., Çiftçi İ., Demir B., Hayat F., Ç5140 Çeliğinin Mikroyapı ve Mekanik Özelliklerinin İşlenebilirliği Etkisi, 5th International Advanced Technologies Symposium, (2009) 1262-1265, Türkiye.
- [21] Özçatalbaş Y., Kesici Takım ve Is Malzemesi Mekanik Özelliklerinin Yüzey Pürüzlülüğü ve Kesme Kuvvetlerine Etkisi, *Politeknik Dergisi*, 4 (2002) 47-52.
- [22] Uzun G., Çiftçi İ., Ç5140 Çeliğinin Mekanik Özelliklerinin Takım Aşınması ve Kesme Kuvvetlerine Etkisinin İncelenmesi, *Journal of Polytechnic*, 15-1 (2012) 29-34.
- [23] Bahçe E., Güler M. S., Emir E., Özel C., CoCrMo Tibial Komponentin Karbür Takım ile İşlenmesinde Yüzey Özelliklerinin Araştırılması. *Ordu Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 8:1 (2018) 16-30.

Parameter Extraction of Photovoltaic Cell and Module with Four-Diode Model Using Flood Algorithm

İpek ÇETİNBAŞ^{1*} 

¹Eskişehir Osmangazi University, Faculty of Engineering and Architecture, Department of Electrical and Electronics Engineering, Eskişehir, Turkey

Article Info

Research article
Received: 13/11/2024
Revision: 29/11/2024
Accepted: 05/12/2024

Keywords

Flood Algorithm
Four-Diode Model
Friedman Test
Parameter Extraction
Photovoltaic
Wilcoxon Signed-Rank Test

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 13/11/2024
Düzeltilme: 29/11/2024
Kabul: 05/12/2024

Anahtar Kelimeler

Taşkın Algoritması
Dört Diyotlu Model
Friedman Testi
Parametre Çıkarması
Fotovoltaik
Wilcoxon İşaretili Sıra Testi

Graphical/Tabular Abstract (Grafik Özet)

In this study, the PV parameter extraction problem has been studied. The eleven unknown parameters of the four-diode model have been extracted using the FLA, PLO, MGO, WO, and ECO algorithms. The results have been evaluated using evaluation metrics and statistical tests. / Bu çalışmada, FV parametre çıkarımı problemi üzerinde çalışılmıştır. Dört diyotlu modelin bilinmeyen on bir parametresi FLA, PLO, MGO, WO ve ECO algoritmaları ile çıkartılmıştır. Sonuçlar, değerlendirme metrikleri ve istatistiksel testler ile değerlendirilmiştir.

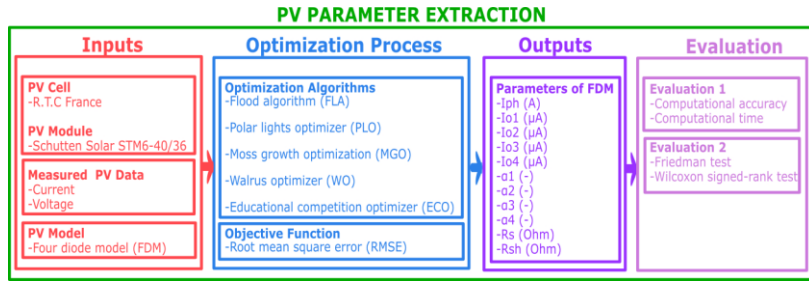


Figure A: PV parameter extraction process / Şekil A: FV parametre çıkarımı süreci

Highlights (Önemli noktalar)

- The PV parameter extraction of the four-diode model has been performed. / Dört diyotlu modelin PV parametre çıkarımı yapılmıştır.
- For the first time, the FLA, PLO, MGO, WO, and ECO algorithms have been used to solve this problem in this study. / Bu problemin çözümü için FLA, PLO, MGO, WO ve ECO algoritmaları ilk defa bu çalışmada kullanılmıştır.
- The success of the FLA algorithm in PV parameter extraction has been statistically proven. / FLA algoritmasının PV parametre çıkarımında ki başarısı istatistiksel olarak kanıtlanmıştır.

Aim (Amaç): This study aims to extract the unknown parameters of a PV cell and module. / Bu çalışma bir FV hücrenin ve modülün bilinmeyen parametrelerini çıkarmayı amaçlamaktadır.

Originality (Özgünlük): When examining literature, it can be observed that single, double, and triple diode models are widely used, while four-diode model is included in very few studies. Motivated by this, this article focuses on PV parameter extraction for four-diode model using metaheuristic algorithms. FLA, PLO, MGO, WO, and ECO have been used for the first time to solve the defined problem and successful results have been obtained. / Literatür incelendiğinde, tek, çift ve üçlü diyot modellerinin yaygın olarak kullanıldığı, dört diyotlu modelin ise çok az çalışmada yer aldığı görülmektedir. Bu noktadan yola çıkılarak bu makale, meta sezgisel algoritmalar kullanılarak dört diyotlu model için PV parametre çıkarımına odaklanmaktadır. Tanımlanan problemin çözümünde FLA, PLO, MGO, WO ve ECO ilk kez kullanılmış ve başarılı sonuçlar elde edilmiştir.

Results (Bulgular): The smallest minimum RMSE was obtained with FLA, calculated as $9.8251385E-04$ with FDM-C and $1.6884311E-03$ with FDM-M. / En küçük minimum RMSE FLA ile elde edilmiş olup FDM-C ile $9.8251385E-04$ ve FDM-M ile $1.6884311E-03$ olarak hesaplanmıştır.

Conclusion (Sonuç): According to evaluation metrics and statistical tests, FLA produced significantly better results than the other algorithms and outperformed them in pairwise comparisons. In conclusion, FLA has proven to be a successful and promising algorithm for PV parameter extraction, with its success statistically validated. / Değerlendirme metrikleri ve istatistiksel testlere göre; FLA diğer algoritmalarından daha önemli sonuçlar ürettiği ve ikili karşılaştırmalar neticesinde de diğer algoritmalarından daha başarılı olduğu görülmüştür. Sonuç olarak, FLA'nın FV parametre çıkarımında başarılı ve umut vaat eden bir algoritma olduğu görülmüş ve başarısı istatistiksel olarak kanıtlanmıştır.



Parameter Extraction of Photovoltaic Cell and Module with Four-Diode Model Using Flood Algorithm

İpek ÇETİNBAŞ^{1*}

¹Eskişehir Osmangazi University, Faculty of Engineering and Architecture, Department of Electrical and Electronics Engineering, Eskişehir, Turkey

Article Info

Research article
Received: 13/11/2024
Revision: 29/11/2024
Accepted: 05/12/2024

Keywords

Flood Algorithm
Four-Diode Model
Friedman Test
Parameter Extraction
Photovoltaic
Wilcoxon Signed-Rank
Test

Abstract

Photovoltaic (PV) cells exhibit a nonlinear characteristic. Before modeling these cells, obtaining accurate parameters is essential. During the modeling phase, using these parameters is crucial for accurately characterizing and reflecting the behavior of PV structures. Therefore, this article focuses on PV parameter extraction. A PV cell and module were selected and modeled using the four-diode model (FDM). This problem, consisting of eleven unknown parameters related to the FDM, was solved with the flood algorithm (FLA). To compare the algorithm's performance on the same problem, the polar lights optimizer (PLO), moss growth optimization (MGO), walrus optimizer (WO), and educational competition optimizer (ECO) were also employed. These five metaheuristic algorithms were used for the first time in this study, both for solving the PV parameter extraction problem and with the FDM. The objective function aimed at obtaining the smallest root mean square error (RMSE) was evaluated and compared through evaluation metrics, computational accuracy, computational time, and statistical methods. The smallest minimum RMSE was obtained with FLA, calculated as $9.8251385E-04$ with FDM-C and $1.6884311E-03$ with FDM-M. To statistically demonstrate and reinforce FLA's success over other algorithms, the Friedman test and Wilcoxon signed-rank test were utilized. According to these tests, FLA produced significantly better results than the other algorithms and outperformed them in pairwise comparisons. In conclusion, FLA has proven to be a successful and promising algorithm for PV parameter extraction, with its success statistically validated.

Taşkın Algoritması Kullanılarak Dört Diyotlu Model ile Fotovoltaik Hücre ve Modülün Parametre Çıkarımı

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 13/11/2024
Düzeltilme: 29/11/2024
Kabul: 05/12/2024

Anahtar Kelimeler

Taşkın Algoritması
Dört Diyotlu Model
Friedman Testi
Parametre Çıkarımı
Fotovoltaik
Wilcoxon İşaretli Sıra
Testi

Öz

Fotovoltaik (FV) hücreler doğrusal olmayan karakteristiğe sahiptir. Bu hücrelerin modellenmesinin öncesinde doğru parametrelerin elde edilmesi gereklidir. Modellenme aşamasında ise bu parametrelerin kullanımı FV yapıların davranışlarının doğru karakterize edilebilmesi ve yansıtılabilmesi açısından çok önemlidir. Bu sebeple bu makalede, FV parametre çıkarımı çalışılmıştır. Bir FV hücre ve modül seçilmiş ve dört diyotlu model (FDM) ile modellenmiştir. FDM'ye ilişkin bilinmeyen on bir parametreden oluşan bu problem taşkın algoritması (FLA) ile çözülmüştür. Aynı problemin çözümünde algoritmanın karşılaştırılması için, kutup ışıkları optimizasyonu (PLO), yosun büyüme optimizasyonu (MGO), mors optimizasyonu (WO) ve eğitim rekabeti optimizasyonu (ECO) kullanılmıştır. Bu beş meta sezgisel algoritma, hem FV parametre çıkarımı probleminin çözümü için hem de FDM ile ilk defa bu çalışmada kullanılmıştır. En küçük kök ortalama kare hatası (RMSE) elde edilmenin amaçlandığı amaç fonksiyonu; değerlendirme metrikleri, hesaplama doğruluğu, hesaplama zamanı ve istatistiksel metotlar ile değerlendirilmiş ve karşılaştırılmıştır. En küçük minimum RMSE FLA ile elde edilmiş olup FDM-C ile $9.8251385E-04$ ve FDM-M ile $1.6884311E-03$ olarak hesaplanmıştır. FLA'nın diğer algoritmalarla göre başarısını istatistiksel olarak kanıtlamak ve pekiştirmek için statistical tests kullanılmıştır. Bu testlere göre; FLA diğer algoritmalarından daha önemli sonuçlar ürettiği ve ikili karşılaştırmalar neticesinde de diğer algoritmalarından daha başarılı olduğu görülmüştür. Sonuç olarak, FLA'nın FV parametre çıkarımında başarılı ve umut vaat eden bir algoritma olduğu görülmüş ve başarısı istatistiksel olarak kanıtlanmıştır.

1. INTRODUCTION (GİRİŞ)

According to the International Energy Agency data, PV and wind energy systems have doubled in both capacity increase and their share in electricity generation between 2018 and 2023. This significant development is expected to reflect as a cost reduction by 2030 [1]. Among renewable energy sources, PV systems play a key role in the clean energy transition due to their low cost. With their modular technological structure, they have a wide range of applications, from small residential-type installations to large-scale, gigawatt-level power plant applications [2], [3]. PV systems can convert sunlight directly into electrical energy without moving parts. These systems are a sustainable energy source through their various applications. Additionally, they stand out for their environmentally friendly approach and advantages [4]-[6].

Maximizing the benefit obtained from PV systems requires focusing on PV cells. The accurate characterization of the behavior of these cells is related to obtaining electrical models and extracting the fundamental parameters that form these models with the highest possible accuracy. Correctly modeling the current-voltage characteristics of PV cells, which have a nonlinear characteristic, forms the basis for many topics, including PV cell design, fault detection, energy forecasting, and maximum power point tracking. Furthermore, it directly affects the design and capacities of other

components in PV systems, playing a decisive role in the operation and optimal energy management of the systems [7]-[9].

In PV parameter extraction studies, PV cells and modules are modeled as single diode, double diode, three diode, and four-diode models. Various approaches are used to improve computational accuracy and reduce computation time in obtaining the parameters of these models. Analytical and numerical/iterative methods [10], deterministic methods [11], modified deterministic methods [12], numerical/iterative and deterministic methods [13], metaheuristic algorithms and advanced / improved / enhanced bio-inspired techniques [14]-[25], and hybrid and adaptive methods [26]-[34] are among the many methods used. A total of 25 articles corresponding to these categories have been reviewed. The summary of this literature review is provided in Table 1, with column headings for algorithm/method, PV cell/module, PV model, and objective function. In studies where RMSE is used as the objective function for different algorithms and methods, PV cells and modules have been modeled as single diode model based cell (SDM-C), single diode model based module (SDM-M), double diode model based cell (DDM-C), double diode model based module (DDM-M), three diode model based cell (TDM-C), three diode model based module (TDM-M), four-diode model based cell (FDM-C), and four-diode model based module (FDM-M).

Table 1. Literature review (Literatür incelemesi)

Algorithm/Method	PV Cell/Module	PV Model								Objective Function (RMSE)	
		SDM		DDM		TDM		FDM			
		C	M	C	M	C	M	C	M		
Analytical and numerical/iterative methods [10]	SP70		☑								☑
Lambert W-function [11]	SP40, SP70, KC200GT		☑								☑
Modified newton-raphson method [12]	RTC France, CHL285P, PWP210	☑	☑								☑
Iterative method and the Lambert W function [13]	SQ80, KC200GT, ST40		☑								☑
Weighted leader search algorithm [14]	R.T.C France, PVM 752, STM6-40/36, LSM 20, PWP201, STP6-120/36, KC200GT, ESP-160 PPW	☑	☑	☑	☑	☑	☑				☑
INFO algorithm [15]	RTC France, Photowatt-PW201, STM6-40/36, STP6-120/36	☑	☑	☑	☑						☑
Artificial hummingbird algorithm [16]	RTC France	☑		☑		☑					☑
Puffer fish inspired optimization technique [17]	RTC France								☑		☑
Ranking teaching-learning-based optimization algorithm [18]	R.T.C France, STM6-40/36, STP6-120/36	☑	☑	☑	☑						☑
Diversity improvement-oriented differential evolution [19]	PW201, STM6-40/36, STP6-120/36	☑	☑	☑		☑					☑

Multi-strategy gaining-sharing knowledge-based algorithm [20]	RTC France, PW201, STM6-40/36, STP6-120/36	✓	✓	✓	✓			✓
Manta ray foraging optimization with dynamic fitness distance balance [21]	STP6-120/36, PWP201, XKD-50W, XHYG-10W						✓	✓
Developed JAYA algorithm [22]	RTC France, PWP201	✓	✓	✓		✓		✓
Multi-strategy-based tree seed algorithm [23]	RTC France, PWP201, STM6-40/36	✓	✓	✓	✓			✓
Enhanced snake optimization algorithm [24]	RTC France, PWP201, STM6-40/36	✓	✓	✓	✓			✓
Fractional order kepler optimization algorithm [25]	RTC France, KC-200, Ultra-Power-85, SP-70	✓	✓	✓	✓			✓
Hybrid white shark optimizer and artificial rabbits optimization [26]	R.T.C France, PVM 752, STM6-40/36, LSM 20, PWP 201, STP6-120/36, STE 4/100, KC200GT	✓	✓	✓	✓			✓
Hybrid particle swarm optimization and dingo optimizer [27]	RTC France						✓	✓
Enhanced chaotic JAYA algorithm [28]	R.T.C France, STM6-40/36, STP6-120/36	✓	✓	✓	✓			✓
Hybrid analytical/iterative method [29]	R.T.C France, PVM 752, PWP201	✓	✓					✓
Micro adaptive fuzzy cuckoo search optimization [30]	PWP201, STM6-40/36		✓		✓	✓	✓	✓
Improved grey wolf optimization [31]	RTC France						✓	✓
Fitness-guided particle swarm optimization with adaptive newton-raphson [32]	RTC France, SM55, KC200GT						✓	✓
Multiagent system based cuckoo search optimization with lambert W-function [33]	R.T.C France, PWP201	✓	✓					✓
Lambert w-function and newton-raphson method collaborated with spider wasp optimizer [34]	R.T.C France, PWP201, KC200GT, STM6-40/36	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

In addition to various methods, different metaheuristic algorithms have been used for PV parameter extraction. The solution of a problem with different metaheuristic algorithms can be explained using the no free lunch theorem. According to this theorem, no algorithm can solve all problems. Furthermore, the success of algorithms in problem-solving is not standard and may be either good or bad depending on the problem. There is no such thing as the best algorithm [35]. This is because each metaheuristic algorithm has its strengths and weaknesses. As a result, different success levels appear in different problems [36]. Additionally, when examining Table 1, it can be observed that SDM, DDM, and TDM are widely used, while FDM is included in very few studies in the literature. Motivated by this, this article focuses on PV parameter extraction for FDM using metaheuristic algorithms.

This article presents PV parameter extraction. The extraction of the eleven unknown parameters of a PV cell and module, modeled as FDM-C and FDM-M, was obtained using FLA. This problem was also solved using the PLO, MGO, WO, and ECO algorithms. These five metaheuristic algorithms

were used for the first time in this study to solve the parameter extraction problem. The objective function, aimed at obtaining the smallest RMSE, was compared using evaluation metrics and statistical methods.

This article consists of five sections. Following the introduction, the second section defines the problem and objective function. The third section presents the FLA algorithm, the solution method for the problem, in detail. Additionally, the PLO, MGO, WO, and ECO algorithms are summarized. The fourth section examines the parameter extraction results in detail, and the fifth section presents the conclusions.

2. DEFINITION OF THE PROBLEM (PROBLEMİN TANIMLANMASI)

The problem of this article is PV parameter extraction for FDM. This section is presented under two subheadings: FDM of PV cell and module, and objective function.

2.1. Four-Diode Model (FDM) of PV Cell and Module (PV Hücre ve Modülün Dört Diyotlu Modeli (FDM))

FDM is a detailed approach for modeling PV cells and modules. Despite its high computational demand, parameter sensitivity, and complex implementation, it allows the nonlinear nature and behavior of PV to be reflected with higher accuracy under various conditions compared to single, double, and three-diode models. The electrical circuit of a PV cell and module with FDM is shown in Figure 1(a) and (b). It consists of a photo-

generated source (I_{ph}), four diodes connected in parallel (D_1, D_2, D_3, D_4), a parallel/shunt resistance (R_{sh}), and a series resistance (R_s). The diffusion current is represented by the first diode, recombination in the depletion region by the second diode, recombination in other regions by the third diode, and leakage currents due to structural imperfections by the fourth diode. The general current representation for FDM, obtained by subtracting the diode currents and shunt current from the photo-generated current, is given for FDM-C and FDM-M in Equation (1) [9], [30], [37]-[38].

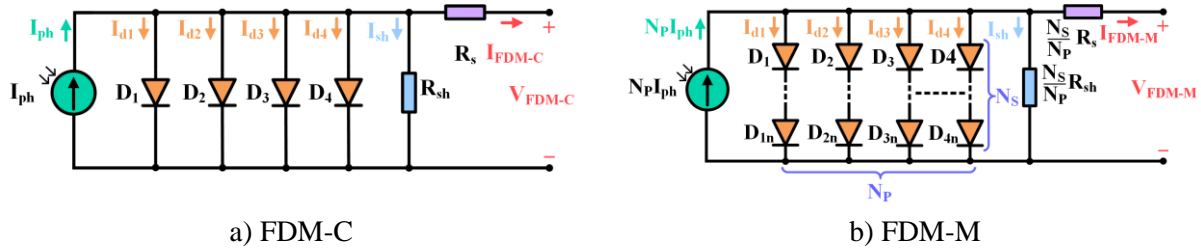


Figure 1. Electrical circuit of PV cell and module with FDM (FDM ile FV hücre ve modülün elektriksel devresi)

$$I_{FDM} = \begin{cases} I_{FDM} = I_{ph} - I_{d1} - I_{d2} - I_{d3} - I_{d4} - I_{sh} \\ I_{FDM-C} = \begin{cases} I_{ph} - I_{o1} \left[e^{\left(\frac{V_{FDM-C} + R_s I_{FDM-C}}{\alpha_1 V_t} \right)} - 1 \right] - I_{o2} \left[e^{\left(\frac{V_{FDM-C} + R_s I_{FDM-C}}{\alpha_2 V_t} \right)} - 1 \right] - \dots \\ I_{o3} \left[e^{\left(\frac{V_{FDM-C} + R_s I_{FDM-C}}{\alpha_3 V_t} \right)} - 1 \right] - I_{o4} \left[e^{\left(\frac{V_{FDM-C} + R_s I_{FDM-C}}{\alpha_4 V_t} \right)} - 1 \right] - \frac{V_{FDM-C} + R_s I_{FDM-C}}{R_{sh}} \end{cases} \\ I_{FDM-M} = \begin{cases} I_{ph} - I_{o1} \left[e^{\left(\frac{V_{FDM-M} + N_s R_s I_{FDM-M}}{\alpha_1 V_t N_s} \right)} - 1 \right] - I_{o2} \left[e^{\left(\frac{V_{FDM-M} + N_s R_s I_{FDM-M}}{\alpha_2 V_t N_s} \right)} - 1 \right] - \dots \\ I_{o3} \left[e^{\left(\frac{V_{FDM-M} + N_s R_s I_{FDM-M}}{\alpha_3 V_t N_s} \right)} - 1 \right] - I_{o4} \left[e^{\left(\frac{V_{FDM-M} + N_s R_s I_{FDM-M}}{\alpha_4 V_t N_s} \right)} - 1 \right] - \dots \\ \frac{V_{FDM-M} + N_s R_s I_{FDM-M}}{R_{sh} N_s} \end{cases} \end{cases} \quad (1)$$

Where, I_{FDM} is the output current of FDM, I_{ph} is the photo-generated current, I_{d1} is the 1st diode current, I_{d2} is the 2nd diode current, I_{d3} is the 3rd diode current, I_{d4} is the 4th diode current, I_{sh} shunt resistance current, I_{o1} is the 1st diode reverse saturation current, V_{FDM-C} are the output voltage of PV cell, R_s is the series resistance, I_{FDM-C} are the output current of PV cell, α_1 is the 1st diode ideality factor, V_t is the junction thermal voltage, I_{o2} is the 2nd diode reverse saturation current, α_2 is the 2nd diode ideality factor, I_{o3} is the 3rd diode reverse saturation current, α_3 is the 3rd diode ideality factor, I_{o4} is the 4th diode reverse saturation current, α_4 is the 4th diode ideality factor, R_{sh} is the shunt resistance, V_{FDM-M} are the output voltage of PV module, N_s is the number of series-connected PV

cells, and I_{FDM-M} are the output current of PV module.

2.2. Objective Function (Amaç Fonksiyonu)

The objective function of the PV parameter extraction problem to be solved with FLA, PLO, MGO, WO, and ECO algorithms is RMSE. To achieve this, the difference between the estimated and measured currents of the PV cell or module is minimized. The general representation of the function showing the difference between the estimated and measured current for FDM, the current function for FDM-C, the current function for FDM-M, and the decision variables of these functions are given in Equation (2). The RMSE used as the objective function is given in Equation (3) [15].

$$f_{FDM}(x) = \begin{cases} f_{FDM}(x) = (I_{estimated}) - (I_{measured}) \\ f_{FDM-C}(x) = \left(I_{ph} - I_{o1} \left[e^{\left(\frac{V_{FDM-C} + R_s I_{FDM-C}}{\alpha_1 V_t} \right)} - 1 \right] - I_{o2} \left[e^{\left(\frac{V_{FDM-C} + R_s I_{FDM-C}}{\alpha_2 V_t} \right)} - 1 \right] - \dots \right. \\ \left. I_{o3} \left[e^{\left(\frac{V_{FDM-C} + R_s I_{FDM-C}}{\alpha_3 V_t} \right)} - 1 \right] - I_{o4} \left[e^{\left(\frac{V_{FDM-C} + R_s I_{FDM-C}}{\alpha_4 V_t} \right)} - 1 \right] - \frac{V_{FDM-C} + R_s I_{FDM-C}}{R_{sh}} \right) - (I_{FDM-C measured}) \\ f_{FDM-M}(x) = \left(I_{ph} - I_{o1} \left[e^{\left(\frac{V_{FDM-M} + N_s R_s I_{FDM-M}}{\alpha_1 V_t N_s} \right)} - 1 \right] - I_{o2} \left[e^{\left(\frac{V_{FDM-M} + N_s R_s I_{FDM-M}}{\alpha_2 V_t N_s} \right)} - 1 \right] - \dots \right. \\ \left. I_{o3} \left[e^{\left(\frac{V_{FDM-M} + N_s R_s I_{FDM-M}}{\alpha_3 V_t N_s} \right)} - 1 \right] - I_{o4} \left[e^{\left(\frac{V_{FDM-M} + N_s R_s I_{FDM-M}}{\alpha_4 V_t N_s} \right)} - 1 \right] - \dots \right) \\ \left. \frac{V_{FDM-M} + N_s R_s I_{FDM-M}}{R_{sh} N_s} \right) - (I_{FDM-M measured}) \end{cases} \quad (2)$$

$$x = \begin{cases} x_{FDM-C} = I_{ph}, I_{o1}, I_{o2}, I_{o3}, I_{o4}, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, R_s, R_{sh} \\ x_{FDM-M} = I_{ph}, I_{o1}, I_{o2}, I_{o3}, I_{o4}, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, R_s, R_{sh} \end{cases}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [f_{FDM}(x)]^2} \quad (3)$$

Where, $f(x)$ is the current function, x is the decision variable, $f_{FDM}(x)$ is the current function of FDM, $I_{estimated}$ is the estimated current, $I_{measured}$ is the measured current, $f_{FDM-C}(x)$ is the current function of FDM-C, $I_{FDM-C measured}$ is the measured current of FDM-C, $f_{FDM-M}(x)$ is the current function of FDM-M, $I_{FDM-M measured}$ is the measured current of FDM-M, x_{FDM-C} is the decision variables of FDM-C, x_{FDM-M} is the decision variables of FDM-M, and $RMSE$ is the root mean square error.

3. FLOOD ALGORITHM (FLA) AND BRIEF SUMMARY OF PLO, MGO, WO, AND ECO ALGORITHMS (TAŞKIN ALGORİTMASI (FLA) VE PLO, MGO, WO VE ECO ALGORİTMALARININ KISA ÖZETİ)

The PV parameter extraction problem has been solved using the FLA, PLO, MGO, WO, and ECO algorithms, and the details are provided in the subsections.

3.1. Flood Algorithm (FLA) (Taşkın Algoritması (FLA))

FLA is a metaheuristic algorithm inspired by natural flood events in river basins and the movement of water masses during these events. The movement of water in natural flood events, the behavior of water in response to slopes, and changes in the flow velocity and levels of water have all been addressed and mathematically modeled. FLA operates in two phases: regular movement and flooding, and the flowchart and pseudocode of FLA are shown in Figure 2 and Algorithm 1, respectively. Here, the water mass corresponds to the population of the

$$S_i^{new} = S_{best} + rand \times (S_j - S_i) \quad j = 1:D \quad (4)$$

$$Pk = (1.2/t) \times \left[\sqrt{T_{FLA} \times t^2 + 1} + \left((1/(T_{FLA}/4)) \times t \right) \times \ln \left(\sqrt{T_{FLA} \times t^2 + 1} + (T_{FLA}/4) \right) \right]^{-2/3} \quad (5)$$

algorithm, which searches for the best solution. The movement of the water mass in the direction of the slope corresponds to moving toward a better solution. Flooding corresponds to increasing population diversity.

3.1.1. Phase I: regular movement (Faz I: düzenli hareket)

This phase involves the modeling of three stages. In the first stage, the population search represents the natural movement of water toward the slope or a better point for the defined problem size. In the second stage, the population representing the water flow is modeled. In the final stage, the soil impermeability coefficient and its effect on the flood are examined. The general movement inspired by the natural movement of the water mass is given in Equation (4). Floods can occur as the flow of water in the river increases. The flow of water is modeled with the water depletion coefficient in Equation (5). Floods are not planned events and occur based on many factors. This random situation is reflected by the random (*rand*) parameter and the motion of the water masses is given in Equation (6). Another factor affecting the flood is the water permeability, which expresses the relationship between water and soil and reduces the risk of flooding. The soil permeability coefficient is given in Equation (7). There is an inverse relationship between this value and water flooding. A high soil permeability coefficient reduces the probability of water flooding, while the opposite increases the likelihood of flooding. As a result, the motion of the water masses or the position of the new swarm is determined by the rule given in Equation (8).

$$S_i^{new} = S_i + ((Pk)^{randn}/t) \times (rand \times (S_{max} - S_{min}) + S_{min}) \tag{6}$$

$$Pe_i = ((f(S_i) - f_{min})/(f_{max} - f_{min}))^2 \tag{7}$$

$$S_i^{new} = \begin{cases} \text{Equation 6} & \text{if } rand > rand + Pe_i \\ \text{Equation 4} & \text{if } rand \leq rand + Pe_i \end{cases} \tag{8}$$

Where, S_i^{new} is the motion of the water masses or i th position of new swarm, S_{best} is the slope of the water path, $rand$ is the random values between 0 and 1, S_j is the j th randomly member of the population, S_i is the i th randomly member of the population, D is the size of the problem, Pk is the water depletion coefficient, T_{FLA} is the maximum number of iterations, t is the current iteration, $randn$ is the normally distributed random number, S_{max} is the upper bound of the decision variable/s, S_{min} is the lower bound of the decision variable/s,

f_{max} is the best value of the objective function, and f_{min} is the worst value of the objective function.

3.1.2. Phase II: flooding (Faz II: taşkın)

In real life, water can be added to the water basin by rain or melting snow, and some water can evaporate by evaporation. It is assumed that the probability of water being added or evaporating is equal, as expressed in Equation (9). The poor solutions will be displaced by the newly added particles, and the position of the new solutions is given in Equation (10).

$$Pt = |\sin(rand/t)| \tag{9}$$

$$S_e^{new} = \begin{matrix} S_{best} + rand \times (rand \times (S_{max} - S_{min}) + S_{min}) \\ e = 1:N_e \end{matrix} \tag{10}$$

Where, Pt is the probability of occurrence of increase or decrease of water mass and N_e is the number of water particles [39].

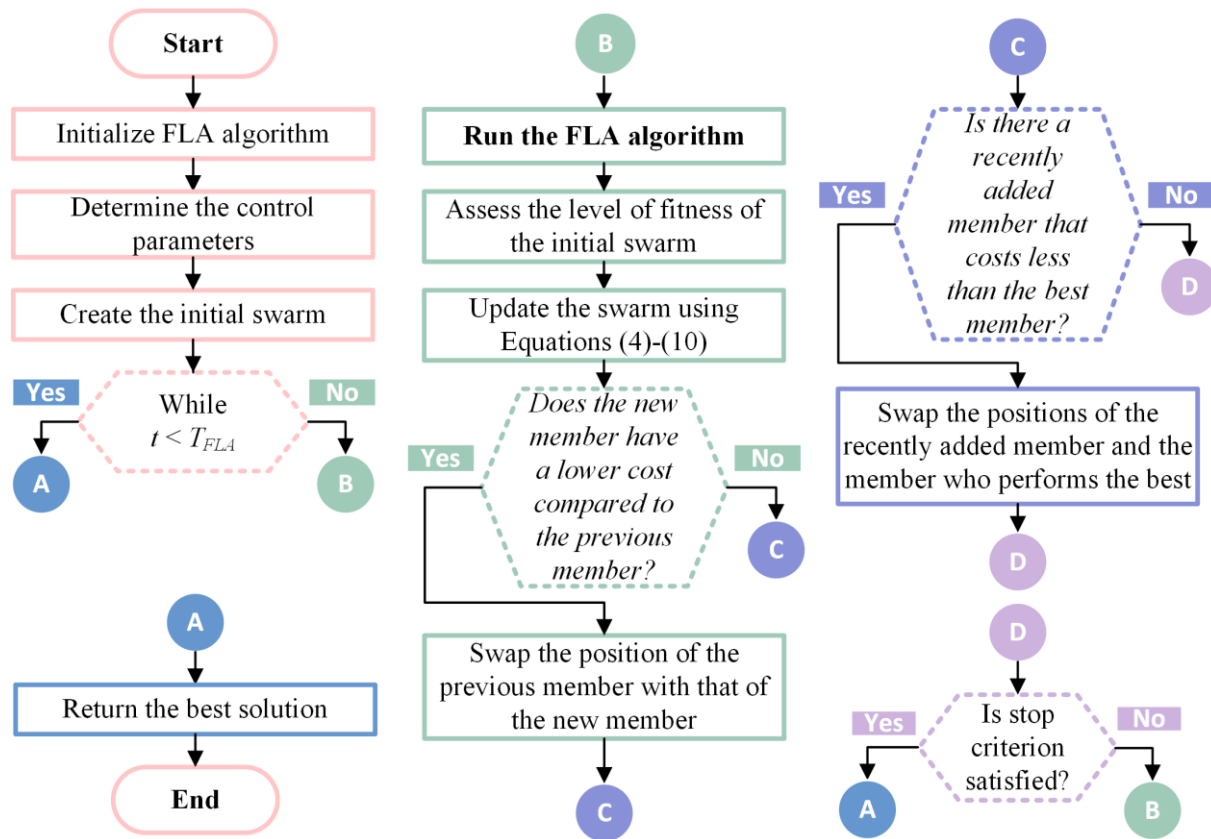


Figure 2. Flowchart of FLA (FLA'nın akış diyagramı)

Algorithm 1. Pseudocode of FLA (FLA'nın sözde kodu)

Phase	Step	FLA algorithm
Initialization		Parameter settings: N_e, N_{FLA}, t, T_{FLA}
	1	To create the accidental initial swarm/population N_{FLA} ($i = 1, \dots, N_{FLA}$)
	2	$S_i = S_{min} + rand \times (S_{max} - S_{min})$
	3	To evaluate the fitness of initial random swarm
	4	while $t = 0 \leq T_{FLA}$ do
	5	To arrange the generations $t = t + 1$
	6	for $i = 1$ in N_{FLA} do
	7	$Pe_i = ((f(S_i) - f_{min}) / (f_{max} - f_{min}))^2$
	8	if $rand > rand + Pe_i$ then
	9	$S_i^{new} = S_i + ((Pk)^{rand^n} / t) \times (rand \times (S_{max} - S_{min}) + S_{min})$
	10	else
	11	$S_i^{new} = S_{best} + rand \times (S_j - S_i)$
	12	end if
	13	if $f(S_i^{new}) < f(S_i)$ then
Process	14	$S_i = S_i^{new}$ and $f(S_{best}) = f(S_i)$
	15	end if
	16	if $f(S_i) < f(S_{best})$ then
	17	$S_{best} = S_i$ and $f(S_{best}) = f(S_i)$
	18	end if
	19	end for
	20	if $rand < P_t, Pt = \sin(rand/t) $ then
	21	for $e = 1$ in N_e do
	22	$S_e^{new} = S_{best} + rand \times (rand \times (S_{max} - S_{min}) + S_{min})$
	23	if $f(S_e^{new}) < f(S_{best})$ then
	24	$S_{best} = S_e^{new}$ and $f(S_{best}) = f(S_e^{new})$
	25	end if
	26	end for
	27	end if
	28	end while
Output		Return the optimum solution S_{best} that has been optimized by FLA

3.2. Brief Summary Of PLO, MGO, WO, And ECO Algorithms (PLO, MGO, WO ve ECO Algoritmalarının Kısa Özeti)

In addition to FLA, the PLO, MGO, WO, and ECO algorithms were also used in solving this problem. These algorithms are summarized in Table 2 with the column headings algorithm, inspiration source, control/key parameter, and value. As seen in the table, these five algorithms have different operating

scenarios and mathematical infrastructures due to their inspiration sources. FLA is inspired by water dynamics and flood behavior, PLO by aurora phenomena and light movement, MGO by growth and expansion patterns of moss, WO by social behavior and foraging of walruses, and ECO by competitive learning in educational settings. FLA, MGO, and ECO have one, PLO has two, and WO has three control/key parameters, which influence the performance of the algorithms [39]-[43].

Table 2. Inspiration and control parameters of FLA, PLO, MGO, WO, and ECO algorithms (FLA, PLO, MGO, WO ve ECO algoritmalarının ilham ve kontrol parametreleri)

Algorithm	Inspiration Source	Control/Key Parameter	Value
Flood algorithm (FLA) [39]	Water dynamics and flood behavior	N_e	5
Polar lights optimizer (PLO) [40]	Aurora phenomena and light movement	m	100
Moss growth optimization (MGO) [41]	Growth and expansion patterns of moss	α	[1,1.5]
		w	2
Walrus optimizer (WO) [42]	Social behavior and foraging of walruses	N_{WO}	50
		T_{WO}	10000
		p	0.4
Educational competition optimizer (ECO) [43]	Competitive learning in educational settings	N_{ECO}	50

4. RESULTS OF PV PARAMETER EXTRACTION AND EVALUATION (FV PARAMETRE ÇIKARIMI SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRME)

In this section, the PV parameter extraction results for FDM-C and FDM-M using the FLA, PLO, MGO, WO, and ECO algorithms and their performance in solving this problem are presented. This section is provided under the subheadings of inputs, results, computational accuracy and computational time, statistical tests, and convergence curves.

4.1. Inputs (Girdiler)

MATLAB software has been used for the simulation of this article. The code has been written as an m-file. The specifications of the computer on which the algorithms were run are as follows: Intel(R) Core(TM) i7-4790 CPU@3.60GHZ, 24GB RAM. The number of particles for all algorithms is

50. One run consists of 10,000 iterations, and a total of 30 runs were performed. For the PV parameter extraction problem, one PV cell and one PV module have been selected. The real current and voltage data of RTC France [44] have been used for the PV cell, and the real current and voltage data of Schutten Solar STM6-40/36 [45] have been used for the PV module. The short-circuit current, open-circuit voltage, current, and voltage at the maximum power point of the RTC France photovoltaic (PV) cell are 0.7603 A, 0.5728 V, 0.6894 A, and 0.4507 V, respectively. The Schutten Solar STM6-40/36 PV module consists of 36 series-connected cells. The short-circuit current, open-circuit voltage, current, and voltage at the maximum power point of this module are 1.663 A, 21.02 V, 1.50 A, and 16.98 V, respectively. There are eleven parameters to be extracted for FDM-C and FDM-M. The lower and upper bounds of decision variables for FDM-C and FDM-M are provided in Table 3.

Table 3. Lower and upper bounds of decision variables for FDM-C and FDM-M (FDM-C ve FDM-M için karar değişkenlerinin alt ve üst sınırları)

PV Model	Lower Bound						Upper Bound					
	I_{ph} (A)	$I_{o1}, I_{o2}, I_{o3}, I_{o4}$ (µA)	$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$ (-)	R_s (Ω)	R_{sh} (Ω)	I_{ph} (A)	$I_{o1}, I_{o2}, I_{o3}, I_{o4}$ (µA)	$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$ (-)	R_s (Ω)	R_{sh} (Ω)		
FDM-C	0	0	1	0	0	1	10	2	1	1000		
FDM-M	0	0	1	0	0	2	50	60	0.36	1000		

4.2. Results Of PV Parameter Extraction (FV Parametre Çıkarımı Sonuçları)

RTC France PV cell has been modeled with FDM. Then, its eleven parameters were estimated using the metaheuristic algorithms FLA, PLO, MGO, WO, and ECO. The PV parameter extraction results of FDM-C in the 30th run is provided in Table 4. The RMSE results are ranked from smallest to largest. When comparing the results of the algorithms, the

smallest RMSE of 9.8259271E-04 was obtained by the FLA algorithm. FLA is followed by the MGO, WO, PLO, and ECO algorithms. The I-V and P-V curves plotted using the measured data of the RTC France PV cell and the estimated data by FLA are shown in Figure 3. When examining the graphs, it can be observed that the measured data and estimated data match and align successfully. This demonstrates the success of FLA in PV parameter extraction.

Table 4. PV parameter extraction results of FDM-C in the 30th run (FDM-C'nin 30. çalışmasında ki FV parametre çıkarımı sonuçları)

Parameter	FLA	PLO	MGO	WO	ECO
I_{ph} (A)	0.7607786	0.7618875	0.7620525	0.7607443	0.7644102
I_{o1} (µA)	0.2367755	0.0000000	0.4379903	0.8278776	0.0028874
I_{o2} (µA)	0.1753640	2.2315195	0.0001060	3.4578557	9.9999343
I_{o3} (µA)	0.4295003	5.1182996	0.0000000	0.0165228	0.0000000
I_{o4} (µA)	0.0514301	0.0771697	2.5467624	0.0208131	4.5437976
α_1 (-)	1.4549103	1.9999474	1.5388396	1.6145120	2.0000000
α_2 (-)	2.0000000	1.9725127	1.7562160	1.9989313	2.0000000
α_3 (-)	2.0000000	1.9644260	1.9972460	1.9986554	1.9964226
α_4 (-)	2.0000000	1.4314299	1.9527657	1.9402148	2.0000000
R_s (Ω)	0.0366915	0.0264810	0.0315264	0.0278392	0.0142843
R_{sh} (Ω)	55.2848811	999.9861154	904.8492791	1000.0000000	999.9999986
RMSE	9.8259271E-04	5.3341190E-03	3.4425204E-03	4.1260695E-03	8.7908497E-03
RMSE Rank	1	4	2	3	5

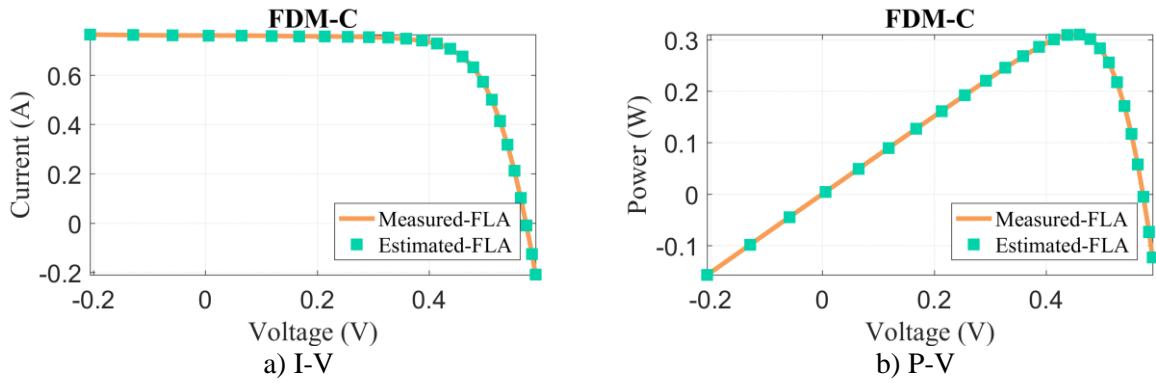


Figure 3. Measured data and estimated results by the FLA algorithm for FDM-C (FDM-C için ölçülen veriler ve FLA algoritması tarafından tahmin edilen sonuçlar)

Schutten Solar STM6-40/36 PV module has been modeled with FDM. The unknown parameters were estimated using five algorithms. The PV parameter extraction results of FDM-M in the 30th run is provided in Table 5. When comparing the results, as in FDM-C, the smallest RMSE was obtained by the FLA algorithm. FLA, with an RMSE value of 1.7298036E-03, is followed by WO, PLO, ECO,

and MGO. The I-V and P-V curves plotted using the measured data of the PV module and the estimated data by FLA are shown in Figure 4. When examining the graphs, it can be observed that the measured data and estimated data successfully align. This further reinforces the success of FLA in PV parameter extraction.

Table 5. PV parameter extraction results of FDM-M in the 30th run (FDM-M'nin 30. çalışmasında ki FV parametre çıkarımı sonuçları)

Parameter	FLA	PLO	MGO	WO	ECO
I_{ph} (A)	1.6639045	1.6603123	1.5678745	1.6567446	1.6700870
I_{o1} (μ A)	50.0000000	37.2997289	4.8006234	47.1939470	43.3733815
I_{o2} (μ A)	1.7384783	12.4044569	0.7767664	7.2122661	21.0710384
I_{o3} (μ A)	50.0000000	49.9997600	3.1665514	48.5210498	31.3869353
I_{o4} (μ A)	0.0000006	18.8837222	7.4204936	3.0396871	49.5251575
α_1 (-)	60.0000000	54.9375789	57.0870319	14.6349084	47.6637244
α_2 (-)	1.5202937	1.7717246	1.4398523	1.6940785	1.8569793
α_3 (-)	60.0000000	57.4100491	46.0022475	29.2704550	3.4923193
α_4 (-)	60.0000000	56.9073724	48.3385472	28.3250795	58.8497972
R_s (Ω)	0.0042740	0.0000007	0.0000000	0.0000001	0.0000015
R_{sh} (Ω)	15.9451344	999.5697608	996.4024267	67.8580756	772.1200189
RMSE	1.7298036E-03	9.5790451E-03	6.2579367E-02	4.4530579E-03	1.8810481E-02
RMSE Rank	1	3	5	2	4

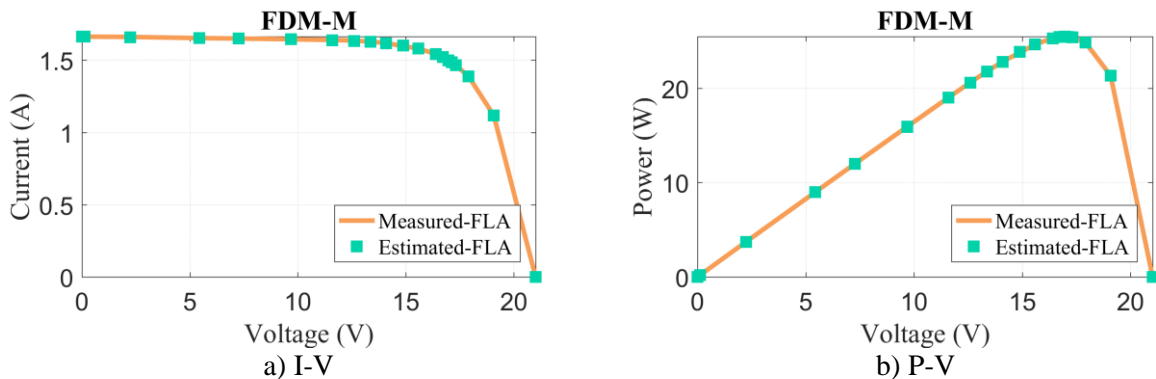


Figure 4. Measured data and estimated results by the FLA algorithm for FDM-M (FDM-M için ölçülen veriler ve FLA algoritması tarafından tahmin edilen sonuçlar)

4.3. Computational Accuracy And Computational Time (Hesaplama Doğruluğu ve Hesaplama Zamanı)

With the FLA, PLO, MGO, WO, and ECO metaheuristic algorithms, the eleven unknown parameters of FDM-C and FDM-M have been estimated. Among these algorithms, FLA has been the most successful algorithm with the smallest RMSE value. In addition, the results of 30 runs for FLA and the other four algorithms have been examined in terms of computational accuracy and

computational time. The average, maximum, minimum, and standard deviation of RMSE results for each algorithm over 30 runs have been calculated. These values were considered as evaluation metrics and used in the comparison of the algorithms. The results of computational accuracy are presented in Table 6. When examining the mean rank and total rank obtained for FDM-C and FDM-M, it is observed that FLA achieved the smallest average and smallest minimum RMSE in all 30 runs. It can be seen that FLA was stable while obtaining these results.

Table 6. Results of computational accuracy (Hesaplama doğruluğunun sonuçları)

Model	Algorithm	Average	Rank	Maximum	Rank	Minimum	Rank	Standard Deviation	Rank
FDM-C	FLA	3.5935746E-03	1	1.9545185E-02	4	9.8251385E-04	1	4.0925274E-03	4
	PLO	5.3270909E-03	4	6.8654356E-03	1	2.9804325E-03	5	8.4791828E-04	1
	MGO	1.2313673E-02	5	8.1558691E-02	5	1.9179928E-03	4	1.4768313E-02	5
	WO	5.1329891E-03	3	7.7100840E-03	2	1.1112930E-03	3	1.6308073E-03	2
	ECO	3.6185213E-03	2	8.7908497E-03	3	9.8282486E-04	2	2.9561315E-03	3
FDM-M	FLA	2.0424885E-03	1	5.3526331E-03	1	1.6884311E-03	1	8.3286997E-04	1
	PLO	5.7040859E-03	3	9.5790451E-03	3	4.3762803E-03	5	1.0998252E-03	3
	MGO	5.8146164E-02	5	1.9412997E-01	5	2.3186272E-03	3	5.2869327E-02	5
	WO	4.3529314E-03	2	5.4001772E-03	2	1.7443232E-03	2	9.4028259E-04	2
	ECO	7.6413890E-03	4	1.8810481E-02	4	3.2180135E-03	4	3.8708561E-03	4
Model	Algorithm	Mean Rank	Total Rank	Mean Rank	Total Rank	Mean Rank	Total Rank	Mean Rank	Total Rank
FDM-C	FLA	1.000	1	2.500	3	1.000	1	2.500	3
	PLO	3.500	4	2.000	1	5.000	5	2.000	1
and FDM-M	MGO	5.000	5	5.000	5	3.500	4	5.000	5
	WO	2.500	2	2.000	2	2.500	2	2.000	2
	ECO	3.000	3	3.500	4	3.000	3	3.500	4

Results of computational time in seconds are provided in Table 7. FLA is slower than the other algorithms in terms of computational time. This situation requires evaluating both computational accuracy and computational time together. When examining the mean rank and total rank obtained for FDM-C and FDM-M, the algorithm with the best speed in terms of average, maximum, and minimum is MGO. However, in terms of computational accuracy, it ranks last in both average and maximum, and fourth in minimum. In terms of

standard deviation, ECO is ranked first. In computational accuracy, the most stable results were produced by FLA, which ranked fourth in stability. Detailed modeling studies are conducted for PV systems, and based on feasibility studies, a decision is made regarding whether the system is feasible or not. Since the initial investment cost is high and the system is planned for approximately 25 years, it is not a correct choice to only reference computational time; computational accuracy should be considered as the reference.

Table 7. Results of computational time in seconds (Saniye olarak hesaplama zamanının sonuçları)

Model	Algorithm	Average	Rank	Maximum	Rank	Minimum	Rank	Standard Deviation	Rank
FDM-C	FLA	7.5228295E+01	4	8.8241180E+01	3	6.8833375E+01	5	4.4631682E+00	3
	PLO	8.1867098E+01	5	1.2522939E+02	5	6.3543348E+01	3	1.1831198E+01	5
	MGO	4.2401781E+01	1	5.1080383E+01	2	3.9898257E+01	1	3.0551056E+00	2
	WO	7.3454392E+01	3	1.0920248E+02	4	6.4644150E+01	4	9.1429877E+00	4
	ECO	4.2528322E+01	2	4.8869973E+01	1	4.0571758E+01	2	1.8302202E+00	1
FDM-M	FLA	1.0383685E+02	5	1.7047343E+02	5	5.9285478E+01	5	2.6327109E+01	5
	PLO	7.1289870E+01	3	1.0583865E+02	3	5.5181437E+01	4	1.0679184E+01	2
	MGO	6.3604604E+01	2	9.6735429E+01	2	3.9857680E+01	1	1.3012154E+01	4
	WO	6.1961489E+01	1	7.4850672E+01	1	4.9918176E+01	3	6.4269138E+00	1
	ECO	7.4966452E+01	4	1.0916227E+02	4	4.6934324E+01	2	1.2364525E+01	3
Model	Algorithm	Mean Rank	Total Rank	Mean Rank	Total Rank	Mean Rank	Total Rank	Mean Rank	Total Rank
FDM-C	FLA	4.500	5	4.000	4	5.000	5	4.000	5
	PLO	4.000	4	4.000	5	3.500	3	3.500	4
and FDM-M	MGO	1.500	1	2.000	1	1.000	1	3.000	3
	WO	2.000	2	2.500	2	3.500	4	2.500	2
	ECO	3.000	3	2.500	3	2.000	2	2.000	1

4.4. Friedman And Wilcoxon Statistical Tests

(Friedman Ve Wilcoxon İstatistiksel Testleri)

Among the FLA, PLO, MGO, WO, and ECO algorithms, FLA has achieved successful results in PV parameter extraction. These results were evaluated using two statistical tests, namely the Friedman test and the Wilcoxon signed-rank test. The first statistical test is the Friedman test. It is a test that tells whether there is a significant difference between the results computed by the algorithms in solving the PV parameter extraction problem for 30 runs and ranks the algorithms. For a 0.05 significance level, the p-value is examined, and

if this value is less than 0.05, it indicates a significant difference between the algorithms. The results of the Friedman test are provided in Table 8. The p-value for FDM-C was calculated as 8.5587363E-07, and for FDM-M it was 8.9032486E-19, showing a significant difference between the algorithms. In both models, the smallest mean rank, or the best results, were obtained with FLA. The results of the mean and total ranking of algorithms are presented in Table 9. Based on the ranking of the results obtained in these two models, the Friedman test proves that the most successful results were produced by FLA among the five algorithms.

Table 8. Results of Friedman test (Friedman testinin sonuçları)

Model	Algorithm	Mean Rank	Rank	P-value	Conclusion
FDM-C	FLA	2.000	1	8.5587363E-07	There is significant difference among the performance of algorithms at 5% level of significance.
	PLO	3.167	4		
	MGO	4.233	5		
	WO	3.100	3		
	ECO	2.500	2		
FDM-M	FLA	1.033	1	8.9032486E-19	There is significant difference among the performance of algorithms at 5% level of significance.
	PLO	3.333	3		
	MGO	4.600	5		
	WO	2.300	2		
	ECO	3.733	4		

Table 9. Results of ranking of algorithms

(Algoritmaların sıralanmasının sonuçları)

Model	FLA	PLO	MGO	WO	ECO
FDM-C	1	4	5	3	2
FDM-M	1	3	5	2	4
Mean Rank	1.000	3.500	5.000	2.500	3.000
Total Rank	1	4	5	2	3

The second statistical test is the Wilcoxon signed-rank test. According to the Friedman test, FLA is the most successful algorithm among the five. With the Wilcoxon signed-rank test, FLA was compared pairwise with the other four algorithms. As in the

Friedman test, the p-value for a 0.05 significance level was examined. The results of the Wilcoxon signed-rank test are presented in Table 10. A total of 8 comparisons were made, with 4 in FDM-C and 4 in FDM-M. In 7 of these 8 cases, it is evident that the results found by FLA are better than those of the other algorithms, as the p-value is less than 0.05. The results of the mean and total ranking of algorithms are provided in Table 11. According to the pairwise comparison of the results obtained in these two models, the algorithm closest to FLA in performance is ECO, followed by WO, PLO, and MGO.

Table 10. Results of Wilcoxon signed-rank test (Wilcoxon işaretli sıra testinin sonuçları)

Model	FLA vs Compared Algorithm	P-value	Rank	H	Zval	Ranksum	IS/ IS NOT
FDM-C	PLO	4.0329776E-03	3	1	-2.8755707	720	IS
	MGO	2.8789721E-06	1	1	-4.6792706	598	IS
	WO	3.5011674E-03	2	1	-2.9199240	717	IS
	ECO	8.4999697E-02	4	0	-1.7223856	798	IS NOT
FDM-M	PLO	9.9186286E-11	2	1	-6.4681861	477	IS
	MGO	8.9934060E-11	1	1	-6.4829705	476	IS
	WO	1.6947245E-09	4	1	-6.0246534	507	IS
	ECO	1.3288512E-10	3	1	-6.4238328	480	IS

Table 11. Results of ranking of algorithms
(Algoritmaların sıralanmasının sonuçları)

Model	PLO	MGO	WO	ECO
FDM-C	3	1	2	4
FDM-M	2	1	4	3
Mean Rank	2.500	1.000	3.000	3.500
Total Rank	2	1	3	4

4.5. Convergence Curves (Yakınsama Eğrileri)

For 10,000 iterations, the solution finding process of FLA, PLO, MGO, WO, and ECO algorithms in PV parameter extraction can be shown with convergence curves in the 30th run. The convergence curves for FDM-C are shown in Figure 5(a), and for FDM-M in Figure 5(b). As seen in the figures, the lowest RMSE value was obtained with the FLA algorithm compared to the other algorithms.

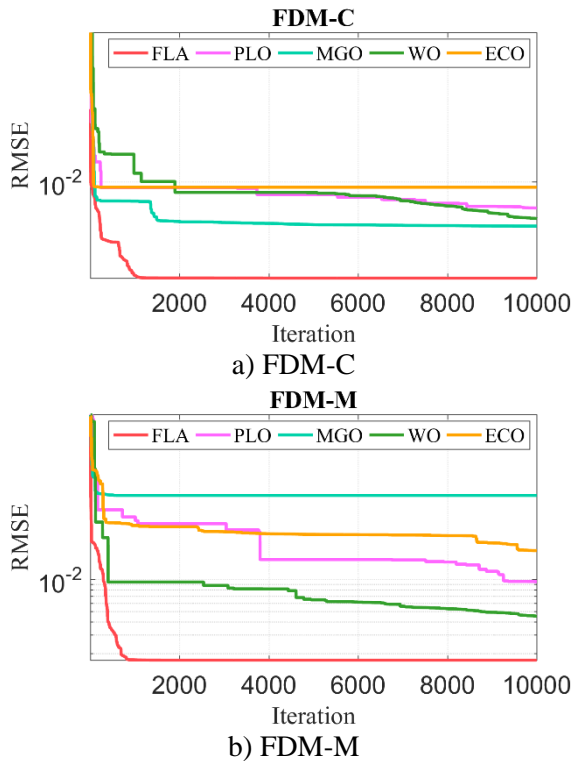


Figure 5. Convergence curves in the 30th run (30. çalışmadaki yakınsama eğrileri)

5. CONCLUSION (SONUÇLAR)

The correct modeling of PV systems with the right parameters is required to accurately express their response to changing meteorological conditions. Accurately defining the current-voltage characteristics with the correct parameters is crucial for predicting and planning the performance of FV systems in real-world applications. In this article, PV parameter extraction of a PV cell and module was performed using FDM. The eleven unknown

parameters of FDM were obtained using the meta-heuristic algorithms FLA, PLO, MGO, WO, and ECO. These five algorithms were used for both solving the parameter extraction problem and for the first time in this study with FDM. RMSE was selected as the objective function. The RMSE was evaluated using assessment metrics, computational accuracy, computational time, and statistical methods. The smallest minimum RMSE was obtained with FLA, calculated as 9.8251385E-04 for FDM-C and 1.6884311E-03 for FDM-M. To statistically prove and reinforce the success of FLA over the other algorithms, the Friedman test and Wilcoxon signed-rank test were used. According to these tests, FLA produced more significant results than the other algorithms, and, based on pairwise comparisons, it was shown to be more successful than the others. As a result, FLA was found to be a successful and promising algorithm for PV parameter extraction for FDM, and this was statistically proven.

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)

İpek ÇETİNBAŞ: She performed the simulation studies, analyzed the results, and carried out the writing process.

Benzetim çalışmalarını gerçekleştirmiş, sonuçlarını analiz etmiş ve 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] International Energy Agency: IEA, "Solar and wind global," 2024.
- [2] IEA, "Solar PV," International Energy Agency. [Online]. Available: <https://www.iea.org/energy-system/renewables/solar-pv>. [Accessed: 30-Oct-2024].

- [3] Çinici OK, Acir A. Optimization of array design in photovoltaic power plants using the taguchi and ANOVA analysis. *Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology*. 2023; 11(4), 1195-1208, 2023.
- [4] Bayyığit A, Çinici OK, Acir A. Tek yüzeyli ve çift yüzeyli fotovoltaik panellerin performans analizi. *Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology*. 2023; 11(2), 407-420.
- [5] Abd-Elhady MM, Elhendawy MA, Abd-Elmajeed MS, Rizk RB. Enhancing photovoltaic systems: a comprehensive review of cooling, concentration, spectral splitting, and tracking techniques. *Next Energy*, 2025; 6, 100185.
- [6] Rehman T-U, Qaisrani MA, Shafiq MB, Baba YF, Aslfattahi N, Shahsavar A, Cheema TA, Park CW. Global perspectives on advancing photovoltaic system performance—a state-of-the-art review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2025; 207, 114889.
- [7] Eminoğlu U, Atay BK. PV modüller/hücrelerin tek-diyot eşdeğer devre parametrelerinin kestirimi için yeni bir analitik model. *Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology*, 2023; 11(2), 524-533.
- [8] Pedroza-Díaz A, Rodrigo PM, Dávalos-Orozco Ó, De-la-Vega E, Valera-Albacete Á. Review of explicit models for photovoltaic cell electrical characterization. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2025, 207, 114979.
- [9] Choulli I, Elyaqouti M, Arjdal EH, Saadaoui D, Ben Hmamou D, Lidaighbi S, Elhammoudy A, Abazine I, Ydir B. Mitigating local minima in extracting optimal parameters for photovoltaic models: an optimizer leveraging multiple initial populations (OLMIP). *International Journal Of Hydrogen Energy*. 2024; 92, 367-391.
- [10] Lidaighbi S, Elyaqouti M, Assalaou K, Ben Hmamou D, Saadaoui D, H'roura J. Parameter estimation of photovoltaic modules using analytical and numerical/iterative approaches: a comparative study. *Materials Today*. 2022; 52, 1–6.
- [11] Ben Hmamou D, Elyaqouti M, Arjdal E, Ibrahim A, Abdul-Ghaffar HI, Aboelsaud R, Obukhov S, Diab AAZ. Parameters identification and optimization of photovoltaic panels under real conditions using lambert W-function. *Energy Reports*. 2021; 7, 9035–9045.
- [12] Mlazi NJ, Mayengo M, Lyakurwa G, Kichonge B. Mathematical modeling and extraction of parameters of solar photovoltaic module based on modified Newton–Raphson method. *Results in Physics*. 2024; 57, 107364.
- [13] Nassar-eddine I, Obbadi A, Errami Y, El Fajri A, Agunaou M. Parameter estimation of photovoltaic modules using iterative method and the lambert W function: a comparative study. *Energy Conversion and Management*. 2016; 119, 37–48.
- [14] Çetinbaş İ. Parameter extraction of single, double, and triple-diode photovoltaic models using the weighted leader search algorithm. *Global Challenges*. 2024; 8(5), 2300355.
- [15] Demirtas M, Koc K. Parameter extraction of photovoltaic cells and modules by INFO algorithm. *IEEE Access*, 2022; 10, 87022-87052.
- [16] Navarro MA, Oliva D, Ramos-Michel A, Haro EH. An analysis on the performance of metaheuristic algorithms for the estimation of parameters in solar cell models. *Energy Conversion and Management*. 2023; 276, 116523.
- [17] Singla mk, Gupta J, Parag N, Ekta T, Tella TG, Mosaad MI, Murodbek S. Improving photovoltaic cell parameter calculations through a puffer fish inspired optimization technique. *Heliyon*. 2024; 10(13), e33952.
- [18] Yu X, Hu Z, Wang X, Luo W. Ranking teaching-learning-based optimization algorithm to estimate the parameters of solar models. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 2023; 123, 106225.
- [19] Ren C, Song Z, Meng Z. Photovoltaic model parameters identification using diversity improvement-oriented differential evolution. *Swarm and Evolutionary Computation*. 2024; 90, 101689.
- [20] Xiong G, Gu Z, Mohamed AW. Boucekara HREH, Suganthan PN. Accurate parameters extraction of photovoltaic models with multi-strategy gaining-sharing knowledge-based algorithm. *Information Sciences*. 2024; 670, 120627.
- [21] El Marghichi M, Dangoury S. Electrical parameters identification for three diode photovoltaic based on the manta ray foraging optimization with dynamic fitness distance balance. *Optik*. 2024; 296, 171548.
- [22] Choulli I, Elyaqouti M, Arjdal EH, Ben Hmamou D, Saadaoui D, Lidaighbi S, Elhammoudy A, Abazine I, El Aidi Idrissi Y. DIWJAYA: JAYA driven by individual weights for enhanced photovoltaic model parameter estimation. *Energy Conversion and Management*. 2024; 305, 118258.
- [23] Beşkirli A, Dağ İ, Kiran MS. A tree seed algorithm with multi-strategy for parameter estimation of solar photovoltaic models. *Applied Soft Computing*. 2024; 167, 112220.

- [24] Mai C, Zhang L, Hu X. An adaptive snake optimization algorithm incorporating subtraction-average-based optimizer for photovoltaic cell parameter identification. *Heliyon*. 2024; 10(15), e35382.
- [25] Hassan Hakmi S, Alnami H, Ginidi A, Shaheen A, Alghamdi TAH. A fractional order-kepler optimization algorithm (FO-KOA) for single and double-diode parameters PV cell extraction. *Heliyon*. 2024; 10(16), e35771.
- [26] Çetinbaş İ, Tamyurek B, Demirtaş M. Parameter extraction of photovoltaic cells and modules by hybrid white shark optimizer and artificial rabbits optimization. *Energy Conversion and Management*. 2023; 296, 117621.
- [27] Singh B, Singla MK, Nijhawan P. Parameter estimation of four diode solar photovoltaic cell using hybrid algorithm. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*. 2022; 44(2), 4597-4613.
- [28] Premkumar M, Jangir p, Sowmya R, Elavarasan RM, Kumar BS. Enhanced chaotic JAYA algorithm for parameter estimation of photovoltaic cell/modules. *ISA Transactions*. 2021; 116, 139-166.
- [29] Choulli I, Elyaqouti M, Ben Hmamou D, Arjdal EH, Saadaoui D, Lidaighbi S, Elhammoudy A, Obukhov S, Ibrahim A. A novel hybrid analytical/iterative method to extract the single-diode model's parameters using lambert's W-function. *Energy Conversion and Management: X*. 2023; 18, 100362.
- [30] Słowik A, Cpałka K, Xue Y, Hapka A. An efficient approach to parameter extraction of photovoltaic cell models using a new population-based algorithm. *Applied Energy*. 2024; 364, 123208.
- [31] Celtek SA, Kul S, Singla MK, Gupta J, Safaraliev M, Zeinoddini-Meymand H. Grey wolf-based heuristic methods for accurate parameter extraction to optimize the performance of PV modules. *IET Renewable Power Generation*. 2024; 18(14), 2248-2260.
- [32] Premkumar M, Ravichandran S, Hashim TJT, Sin TC, Abbassi R. Fitness-guided particle swarm optimization with adaptive newton-raphson for photovoltaic model parameter estimation. *Applied Soft Computing*. 2024; 167, 112295.
- [33] Gude S Jana KC. A multiagent system based cuckoo search optimization for parameter identification of photovoltaic cell using lambert W-function. *Applied Soft Computing*. 2022; 120, 108678.
- [34] Abdel-Basset M, Mohamed R, Hezam IM, Sallam KM, Hameed IA. Parameters identification of photovoltaic models using lambert W-function and newton-raphson method collaborated with AI-based optimization techniques: a comparative study. *Expert Systems with Applications*. vol. 2024; 255, 124777.
- [35] Wolpert DH, Macready WG. No free lunch theorems for optimization. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*. 1997; 1(1), 67-82.
- [36] Talbi EG. *Metaheuristics: from design to implementation*, 1st ed. Nashville, TN: John Wiley & Sons, 2009.
- [37] Yang X, Zeng G, Cao Z, Huang X, Zhao J. Parameters estimation of complex solar photovoltaic models using bi-parameter coordinated updating L-SHADE with parameter decomposition method. *Case Studies in Thermal Engineering*. 2024; 61, 104917.
- [38] Yang X, Zeng G, Cao Z, Huang X, Zhao J. Novel parameter identification for complex solar photovoltaic models via dynamic L-SHADE with parameter decomposition. *Case Studies in Thermal Engineering*. 2024; 61, 104938.
- [39] Ghasemi M, Golalipour K, Zare M, Mirjalili S, Trojovský P, Abualigah L, Hemmati R. Flood algorithm (FLA): an efficient inspired meta-heuristic for engineering optimization. *The Journal of Supercomputing*. 2024; 80(15), 22913-23017.
- [40] Yuan C, Zhao D, Heidari AA, Liu L, Chen Y, Chen H. Polar lights optimizer: algorithm and applications in image segmentation and feature selection. *Neurocomputing*. 2024; 607, 128427.
- [41] Zheng B, Chen Y, Wang C, Heidari AA, Liu L, Chen H. The moss growth optimization (MGO): concepts and performance. *Journal of Computational Design and Engineering*. 2024; 11(5), 184-221.
- [42] Han M, Du Z, Yuen KF, Zhu H, Li Y, Yuan Q. Walrus optimizer: a novel nature-inspired metaheuristic algorithm. *Expert Systems with Applications*. 2024; 239, 122413.
- [43] Lian J, Zhu T, Ma L, Wu X, Heidari AA, Chen Y, Hui G. The educational competition optimizer. *International Journal of Systems Science*, 2024, 55(15), 3185-3222.
- [44] Easwarakhanthan T, Bottin J, Bouhouch I, Boutrit C. Nonlinear minimization algorithm for determining the solar cell parameters with microcomputers. *International Journal of Solar Energy*. 1986; 4(1), 1-12.

- [45] Tong NT, Pora W. A parameter extraction technique exploiting intrinsic properties of solar cells. *Applied Energy*. 2016; 176, 104-115.

Mobilya Sektöründe Modülerlik: Modüler Bir Pikap Ünitesinin Sistemik Tasarım Yaklaşımı ile Tasarımı ve Tasarım Tescil Süreci

Cemile ŞANLIER* , Zeynep Sude YILDIRIM , H. Rıza BÖRKLÜ 

Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Endüstriyel Tasarım Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 28/10/2024
Düzeltilme: 28/11/2024
Kabul: 05/12/2024

Anahtar Kelimeler

Sistemik tasarım
Pikap
Modüler
Mobilya
Tasarım tescili

Article Info

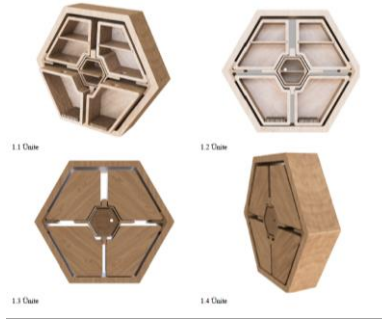
Research article
Received: 28/10/2024
Revision: 28/11/2024
Accepted: 05/12/2024

Keywords

Systematic design
Turntable
Modular
Furniture
Design registration

Graphical/Tabular Abstract (Grafik Özet)

Çalışma kapsamında sistemik tasarım yaklaşımı ile modüler bir pikap ünitesinin tasarımı yapılmış ve tasarım tescili alınmıştır. / Within the scope of the study, a modular pickup unit was designed with a systematic design approach and its design registration was obtained.



Şekil A: Tescil edilen pikap ünitesi / Figure A: Registered turntable unit

Highlights (Önemli noktalar)

- Makalede, modüler mobilyaların değişen yaşam tarzları ve mekân ihtiyaçlarına uyum sağlayarak kullanıcılar için esneklik sunduğu müzik hobisi perspektifinden vurgulanmaktadır. / The article emphasizes, from the perspective of musical hobbies, that modular furniture offers flexibility to users by adapting to changing lifestyles and spatial needs.
- Sistemik tasarım yaklaşımı ile modüler pikap ünitesi tasarlanmış ve modüler mobilyaların müzik aletlerinin depolanması ve sergilenmesine olanak sağladığı gösterilmiştir. / A modular turntable unit has been designed using a systematic design approach, and it has been demonstrated that modular furniture enables the storage and display of musical instruments.
- Gazi Üniversitesi Teknoloji Transfer Ofisi desteğiyle, tasarım tescili alınarak tasarım ve tasarımcı hakları korunmuştur. / With the support of the Technology Transfer Office of Gazi University, design registration has been obtained, ensuring the protection of design and designer rights.

Aim (Amaç): Bu çalışmanın amacı, modüler mobilya tasarımlarının günümüzdeki önemini müzik hobisi perspektifinden inceleyerek, modüler bir pikap ünitesini sistemik tasarım yaklaşımı ile tasarlamaktır. / The aim of this study is to examine the contemporary importance of modular furniture designs from the perspective of musical hobbies and design a modular turntable unit using a systematic design approach.

Originality (Özgünlük): Modülerlik kavramı, mobilya tasarımında müzik hobisi bağlamında incelenmiştir. / Concept of modularity has been examined in the context of furniture design through the lens of a music hobby.

Results (Bulgular): Mobilyaların kişiselleştirilmesi, kullanıcıların ihtiyaçlarına ve zevklerine uygun çözümler sunarak yaşam alanlarını daha fonksiyonel ve estetik hale getirmektedir. / The personalization of furniture provides solutions tailored to the needs and preferences of users, making living spaces more functional and aesthetic.

Conclusion (Sonuç): Bu çalışmada, modüler mobilya tasarımlarının günümüzdeki önemini müzik hobisi perspektifinden incelenerek, modüler bir pikap ünitesi tasarlanmış ve tasarım tescili ile tasarımcı haklarının korunmasına dikkat çekilmiştir. / In this study, the importance of modular furniture designs in today's world is examined from the perspective of a music hobby, a modular turntable unit is designed, and attention is drawn to the protection of the designer's rights through design registration.



Mobilya Sektöründe Modülerlik: Modüler Bir Pikap Ünitesinin Sistemik Tasarım Yaklaşımı ile Tasarımı ve Tasarım Tescil Süreci

Cemile ŞANLIER* , Zeynep Sude YILDIRIM , H. Rıza BÖRKLÜ

Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Endüstriyel Tasarım Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 28/10/2024
Düzeltilme: 28/11/2024
Kabul: 05/12/2024

Anahtar Kelimeler

Sistemik tasarım
Pikap
Modüler
Mobilya
Tasarım tescili

Öz

Geleneksel mobilya tasarımından farklı olarak, modüler mobilyalar, değişen yaşam tarzları ve mekân ihtiyaçlarına uyum sağlayarak kullanıcılar için esneklik sunmaktadır. Bu makalede, müzik hobisinin mobilya tercihlerine olan etkisi incelenerek, modüler mobilyaların müzik aletlerinin depolanması ve sergilenmesine olanak sağladığı görülmüştür. Niş bir müzik tercihi olan pikaplar için bir ürün tasarlanmasına karar verilmiştir. Sistemik tasarım yaklaşımının kavramsal tasarım ve şekillendirme tasarımı adımlarının kullanıldığı modüler bir pikap ünitesi tasarım projesi ele alınarak, modüler mobilya tasarımlarının günümüzdeki önemine ve mobilya pazarındaki müzik hobisinin etkisine odaklanılmıştır. Ayrıca tasarım ve tasarımcı haklarının korunması amacıyla Gazi Üniversitesi Teknoloji Transfer Ofisi desteği ile ürünün tasarım tescili alınmıştır. Bu çalışma, gelecekteki modüler mobilya tasarım projeleri ve tasarım tescil işlemi için ilham kaynağı olabilecek bir perspektif sunmaktadır.

Modularity in the Furniture Sector: Design of a Modular Turntable Unit Using a Systematic Design Approach and Design Registration Process

Article Info

Research article
Received: 28/10/2024
Revision: 28/11/2024
Accepted: 05/12/2024

Keywords

Systematic design
Turntable
Modular
Furniture
Design registration

Abstract

Modular furniture, in contrast to traditional furniture design, gives users flexibility by adjusting to changing needs for space and lifestyle. In this study, the effect of music hobby on furniture preferences is examined, and it is seen that modular furniture allows for the storage and display of musical instruments. It was decided to design a product for turntables, which are a niche music preference. A modular turntable unit design project, in which the conceptual design and shaping design steps of the systematic design approach are used, is discussed, focusing on the importance of modular furniture designs today and the effect of music hobby on the furniture market. In addition, the design registration of the product was obtained with the support of Gazi University Technology Transfer Office in order to protect the design and designer rights. This study offers a perspective that can be a source of inspiration for future modular furniture design projects and design registration process.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Mobilya tarihi, tasarım, işçilik, malzeme kullanımı ve fonksiyonellik açısından bu evrimi inceleyen bir disiplindir [1]. Mobilya sektörü, tarih boyunca işlevsel ihtiyaçlardan estetik ve tasarım anlayışlarının birleşim alanına doğru önemli bir dönüşüm geçirmiştir. Başlangıçta, mobilyalar yalnızca pratik birer araç iken zamanla insanların yaşam alanlarını kişiselleştiren ve estetikle fonksiyonelliği birleştiren öğelere dönüşmüştür [2]. Bu dönüşüm, mobilya sektörünün dinamiklerini köklü bir şekilde değiştirmiştir. Ancak günümüzde, mobilya sektörü geçmişin mirasından beslenirken,

küreselleşme, teknolojinin hızlı gelişimi ve değişen tüketici talepleri gibi faktörlerle yeniden şekillenmektedir. Artık mobilya tasarımı, sadece estetik ve fonksiyonellikten çok daha fazlasını içermekte; sürdürülebilirlik, esneklik ve kişiselleştirilebilirlik gibi çağdaş değerler de bu tasarımlara dahil edilmektedir.

Bugünün mobilya sektöründe öne çıkan en önemli trendlerden biri, fonksiyonellik ve esnekliktir [3]. Sınırlı yaşam alanlarına sahip bireyler, mobilyalardan birden fazla işlev beklerken, aynı zamanda bu mobilyaların farklı yaşam koşullarına uyum sağlayabilmesini talep etmektedir. Özellikle

büyük şehirlerde yaşayan, küçük alanlarda yaşamaya alışkın olan kişiler için modüler ve çok amaçlı mobilya tasarımları büyük önem taşımaktadır [4]. Bu eğilim, ergonomi ve konforun önemini de artırmıştır. Örneğin, Avrupa'daki yaşlanan nüfus, daha rahat ve ergonomik mobilyalara olan talebi artırmış ve üreticileri bu yönde tasarımlar geliştirmeye zorlamıştır.

Mobilya sektörü, yalnızca fiziksel ihtiyaçları karşılamakla kalmayıp, tüketicilerin duygusal ve kişisel beklentilerini de göz önünde bulundurmaya zorlanmıştır [5]. Mobilyalar günümüzde, bireylerin yaşam tarzlarını ve kişiliklerini yansıtan birer öge haline gelmiştir. Bu bağlamda, mobilya tasarımı artık kitlesel üretim anlayışından çok, daha kişiselleştirilmiş ve özelleştirilebilir bir yapıya bürünmüştür [6]. Tüketiciler, yaşam alanlarını sadece fonksiyonel değil, aynı zamanda bireysel zevklerine göre şekillendirmek istemektedirler. Bu da tasarımcıların, mobilyaların yalnızca kullanıcılarıyla değil, onların yaşam biçimleri, hobileri ve günlük rutinleriyle uyumlu olacak şekilde çözüm geliştirmelerini gerektirmektedir. Bu noktada, mobilya sektörü tüketici davranışlarından en çok etkilenen sektörlerden biri olmuştur [7]. Kullanıcılar, mobilyaların gelecekteki yaşam değişikliklerine, hobilerinin gelişimine, iş değişikliklerine veya farklı konutlara geçiş gibi çeşitli ihtiyaçlara esnek ve uyumlu olmasını beklemektedirler [8].

Sürdürülebilirlik de günümüz mobilya sektörünün önemli bir gündem maddesidir [9]. Tüketicilerin artan çevre bilinci, üreticileri daha sürdürülebilir ve çevre dostu malzemeler kullanmaya teşvik etmektedir. Bu bağlamda, uzun ömürlü, dayanıklı ve geri dönüştürülebilir ürünlerin tercih edilmesi, sektörün geleceğinde büyük önem taşımaktadır [10]. Ayrıca, sürdürülebilirlik anlayışı, üretim süreçlerinde verimliliği artırmayı ve atıkları azaltmayı hedefleyen yeni üretim tekniklerinin gelişmesine yol açmıştır. Bu anlayış, aynı zamanda çok fonksiyonlu ve çevre dostu ürün tasarımlarını da desteklemektedir.

Teknolojinin etkisi de mobilya sektöründeki dönüşümü hızlandıran bir diğer önemli faktördür. Artık mobilyalar, yalnızca fiziksel alanı dolduran eşyalar olmaktan çıkmış, akıllı teknolojilerle entegre edilen ürünler haline gelmiştir. Kullanıcılar, yaşam alanlarını daha verimli ve fonksiyonel hale getirmek için teknolojiyi kullanmayı tercih etmektedir. Akıllı aydınlatma çözümleri, entegre ses sistemleri veya teknolojiyle uyumlu oturma grupları gibi unsurlar, evdeki yaşamı daha pratik hale getiren yenilikler olarak öne çıkmaktadır. Bu

trend, mobilyaların gelecekteki işlevsel rollerinin çeşitlenebileceğini ve daha da kişiselleştirilebileceğini göstermektedir.

Avrupa Birliği gibi gelişmiş pazarlar, bu değişimlerin en iyi yansıdığı bölgelerdendir. AB'de artan yaşlı nüfus, daha fonksiyonel ve ergonomik mobilyalara olan talebi artırırken, bağımsız mobilya parçalarının popülerliğini de beraberinde getirmiştir. Bağımsız mobilya parçaları, kullanıcıların mevcut mobilya setlerine yeni parçalar ekleyerek yaşam alanlarını daha esnek ve kişisel hale getirmelerini sağlar. Bu da mobilya tasarımında daha esnek çözümler arayan tüketici beklentileriyle doğrudan ilişkilidir. Ülkemiz, mobilya üretimi ve ihracatında hızla büyüyen bir pazar haline gelmiştir. MOSFED (Mobilya Dernekleri Federasyonu) 2023 mobilya analiz raporuna göre 2001'de 250 milyon dolar olan ihracat, 2022 ve 2023 yıllarında 5 milyar doları aşarak 20 kat büyümüştür. Böylece 2023 yılında Türkiye dünya mobilya ihracatında 7. sırada yer almıştır [11]. Aynı raporda 2024'in ikinci yarısında da ihracatta artış olacağı belirtilmektedir. Türk mobilya sektörü, iç pazarda ve küresel ölçekte kaliteyi, estetiği ve fonksiyonelliği bir arada sunarak rekabet avantajı sağlamaktadır [12, 13].

Mobilya sektörü geçmişten günümüze birçok evrim geçirmiştir. Günümüzde, teknolojinin ve değişen tüketici ihtiyaçlarının etkisiyle daha fonksiyonel, ergonomik, modüler ve çevre dostu mobilyalar tasarlanmaktadır. Bu dönüşüm, mobilya sektörüne yeni fırsatlar sunarken, aynı zamanda tüketicilerin yaşam alanlarını daha kişisel ve özgün bir şekilde düzenlemelerine olanak tanımaktadır. Gelecek, esnek ve çok işlevli modüler tasarımların daha da ön plana çıkacağı bir dönem olacak ve mobilya tasarımı, farklı yaşam tarzlarının ve gelecekteki beklentilerin vazgeçilmez bir parçası haline gelecektir.

Bu çalışmada, modern mobilya sektöründe önemli bir adım olan "modülerlik" kavramı ve hobilerin mobilya ile ilişkisi, bir pikap ünitesi tasarımı üzerinden incelenmiş ve ürünün tasarım tescili alınmıştır. Sistematik tasarım yaklaşımı ile tasarlanan pikap ünitesi, müzikle ilgilenen bireylerin hobilerine hitap eden bir mobilya ögesi olarak, fonksiyonellik ve estetiği bir arada sunmayı amaçlamaktadır. Modüler tasarım sayesinde, ünitenin farklı mekanlara ve ihtiyaçlara göre düzenlenebilmesi, kişisel ve fonksiyonel bir deneyim sağlar. Tasarım tescil süreci, yenilikçi ürünlerin fikri mülkiyet haklarını koruyarak, tasarımcılar ve üreticiler için güvenli bir ortam yaratmaktadır. Sonuç olarak, modülerlik ve

hobilerin mobilya tasarımıyla entegrasyonu, modern tasarımda önemli bir rol oynamakta ve bu iki unsurun birleşimi, fonksiyonel ve estetik açıdan zengin yaşam alanlarının oluşmasına olanak tanımaktadır.

2. MODÜLER MOBİLYA TASARIMI, HOBİLERİN MOBİLYA TASARIMINA ETKİSİ ve PİKAPLAR (THE IMPACT OF HOBBIES ON FURNITURE DESIGN AND TURNTABLES)

Hobi kelime anlamı olarak bir kişinin asıl uğraşı dışında zevk olarak yaptığı faaliyetlerdir [14]. Hobiler (at binmek, yemek yapmak vb.), kişisel zevkleri ve günlük yaşamı zenginleştiren ve mental sağlığı güçlendiren etkinliklerdir [15, 16]. Müzik, bu hobiler arasında yaygın aktivitelerden biridir. Zamanla, müzikle ilgilenen bireylerin ihtiyaçları, mobilya tasarımı da etkilemiş ve özellikle müzik dinleme alanlarına yönelik özel tasarımlar ortaya çıkmıştır. Bu bağlamda, modüler mobilya tasarımı, esneklik, kullanım kolaylığı ve kişiselleştirilebilirlik sunarak müzikle ilgili özel gereksinimlere uygun çözümler üretmiştir.

Modüler mobilyalar, farklı parçaların bir araya getirilerek kullanıcının ihtiyaçlarına göre özelleştirilebilen tasarımlardır. Bu mobilyalar, yer değiştirebilir, yeniden düzenlenebilir ve farklı mekanlarda kolayca kullanılabilir. Modüler tasarımlar, müzikle ilgilenen bireyler için ses sistemleri, hoparlör ve pikaplar gibi cihazları düzenlemek, yerleştirmek, korumak ve sergilemek için ideal çözümler sunar.

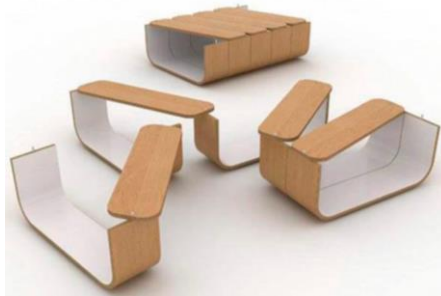
Son yıllarda, analog müzik dinleme, özellikle pikaplar, yeniden popülerlik kazanmıştır. Bu,

mobilya tasarımcılarını etkileyerek, pikaplar ve müzik dinleme alanları için özel tasarımlar yaratmalarına yol açmıştır. Pikaplar, yalnızca müzik aracı değil, aynı zamanda estetik bir öğe olarak da önemli bir yer tutar. Bu bağlamda, pikapların yerleştirileceği ünitelerin estetiği ve fonksiyonelliği büyük önem taşır.

Hobilerin mobilya tasarımına olan etkisi, giderek daha fazla kişiselleştirilmiş ve fonksiyonel çözümler üretilmesine olanak sağlamaktadır. Müzik gibi hobiler, özel mobilya ihtiyaçları doğururken, modüler mobilya tasarımı bu ihtiyaçları karşılamak için esneklik ve fonksiyonellik sunar. Gelecekte, müzikle ilgilenenlerin daha fazla özelleştirilebilir, şık ve fonksiyonel mobilya tasarımlarına yönelmesi beklenmektedir. Bu durum, hem estetik hem de fonksiyonel açıdan daha zengin yaşam alanlarının yaratılmasına olanak sağlayacaktır.

2.1. Modüler Mobilya Tasarımı (Modular Furniture Design)

Modüler tasarım, farklı kullanıcı ihtiyaçları ve tercihlerine göre kolayca monte ve demonte edilebilen, yeniden yapılandırılabilen standart bileşenlere veya modüllere sahip ürünlerin oluşturulmasını sağlayan bir tasarım yaklaşımıdır [17-20]. Bu yaklaşımda, modüller veya bileşenler, birbirleriyle uyumlu olacak şekilde tasarlanır ve kullanıcıların özel bilgi veya ek araç gerektirmeden ürünleri kişiselleştirmelerine olanak tanır. Şekil 1'de parçaların kendi içerisindeki hareket ile farklı şekillerde kullanılabilen modüler bir mobilya tasarım örneği görülmektedir.



Şekil 1. Modüler mobilya tasarımı örneği [21] (Example of modular furniture design)

Modüler mobilyalar, genellikle standart boyutlardaki iki veya daha fazla parçadan oluşan ve her biri bağımsız olarak işlevsel olan mobilyalardır. Kullanıcılar, bu modülleri birleştirerek farklı kompozisyonlar oluşturabilir ve mobilyalarını ihtiyaçlarına göre özelleştirebilirler [22]. Modüler birimler ne kadar küçülürse, oluşturulacak form ve boyutlar o kadar çeşitlenecek ve esneklik sağlanacaktır [23]. Esnek bir mobilya da farklı

kullanım olanakları sunarak mekana ve amaca uyum sağlayabilecektir. Modüler tasarımın sağladığı esneklik, uyarlanabilirlik ve kolay montaj gibi avantajlar, geleneksel mobilyalardan ayıran önemli özelliklerdir. Ayrıca, modüler mobilyalar çevre dostudur çünkü bileşenleri kolayca sökülüp yeniden kullanılabilir, böylece atık miktarı azalır ve sürdürülebilirlik sağlanır.

Modüler mobilyaların popüler örnekleri arasında, kitap rafları, masalar, üniteler ve depolama birimleri yer alır. Bu mobilyalar, kullanıcı ihtiyaçlarına göre farklı şekillerde monte edilebilen ve özelleştirilebilen bileşenlerden oluşur. Genel olarak modüler tasarım, mobilyaların tasarım ve üretim süreçlerini değiştirerek, kullanıcılara daha fazla esneklik, kişiselleştirme imkanı ve çevre dostu seçenekler sunan güçlü bir yaklaşımdır [24].

2.2. Müziğin Mobilya Sektörüne Etkisi, Pikaplar ve Pazar Eğilimleri (The Impact of Music on the Furniture Industry, Turntables and Market Trends)

Pandemi sonrası dönemde, evlerin sadece barınma değil, aynı zamanda iş, hobi ve sosyal yaşamın birleşim noktası haline gelmesiyle [25], mobilya sektöründe büyük yenilikler gereksinimi

doğmuştur. İnsanları farklı şekillerde birleştiren ve çeşitli mobilya unsurlarıyla harmanlanarak evlere entegre edilen en yaygın hobi müzik olmuştur. Bu süreçte müzik, tarih boyunca eğlencenin temel kaynaklarından biri olmanın ötesine geçerek, ev dekorasyonunun önemli bir parçası haline gelmiştir. Özellikle müzikle ilgili birçok araç, ekipman ve aksesuar geliştirilmiş ve müzik üniteleri (plak çalarlar, hoparlörler, amplifikatörler vb.) evlerde estetik ve işlevsel birer öğe olarak yerini almıştır.

Modern müzik üniteleri, hem işlevsellik hem de estetik açıdan önemli değişikliklere uğrayarak, müzik tutkunlarının ihtiyaçlarına göre şekillenmiştir. Şekil 2’de verilen Crosley Furniture Everett Plak Çalar Standı, eski tasarım cazibelerini Bluetooth bağlantısı ve LED aydınlatma gibi modern özelliklerle birleştiren örneklerden biridir.



Şekil 2. Crosley Furniture Everett modeli [26] (Crosley Furniture Everett model)

İlk kez 19. yüzyılın sonlarında tanıtılan ve zamanla elektrikli hale gelen plak çalarlar, teknolojik evrimlerini sürdürerek modern zamanlara ulaşmıştır [27-28]. Pikaplar, müzik dinleme deneyiminin temel unsurlarından biri olarak ev dekorasyonuna entegre edilmiştir. Bugün, Bluetooth bağlantısı, USB girişleri ve yerleşik hoparlörler gibi

özelliklerle donatılan modern pikaplar, hem müzik dinleme deneyimini geliştiriyor hem de evde şık bir atmosfer yaratıyor. Şekil 3’de görülen (a)Victrola Vintage 3 Hızlı Bluetooth Bavul Pikap ve (b) Audio-Technica AT-LP60X-BK Tam Otomatik Stereo Pikap gibi popüler modeller, modern teknolojiyi ve estetiği birleştiren örneklerdir [29]



Şekil 3. (a)Victrola Vintage 3 Hızlı Bluetooth Bavul Pikap [30], (b) Audio-Technica AT-LP60X-BK Tam Otomatik Stereo Pikap [31] (a) Victrola Vintage 3 Speed Bluetooth Suitcase Turntable, b) Audio-Technica AT LP60X-BK Fully Automatic Stereo Turntable)

Müzik, evdeki genel dekorla uyumlu mobilyalarla bütünleştirildiğinde, estetik bir bütünlük sağlar. Kitaplık hoparlörleri, ses çubukları gibi öğeler, mobilya tasarımlarına entegre edilerek hem işlevsel

hem de estetik açıdan zenginleştirilmiştir. Ayrıca, bazı mobilyalar, kullanıcıların cihazlarına kolayca bağlanabilmesi için Bluetooth veya Wi-Fi bağlantısı gibi modern özelliklerle donatılmaktadır. Sehpalar

veya çalışma masaları gibi mobilyalar, müzik ekipmanlarının saklanabilmesi veya kabloların gizlenebilmesi amacıyla özel bölmelerle tasarlanabilmektedir. Bu tasarımlar, hem evin genel dekorasyonuna uyum sağlar hem de dinleme deneyimini daha sürükleyici ve eğlenceli hale getirir.

Son yıllarda, plak çaralarının popülaritesindeki artış, müzikle ilgili hobiler ve koleksiyonculuk kültürünün mobilya sektörüne etkisini açıkça göstermektedir. Pikap pazarı, analog sesin cazibesini yeniden keşfeden müzik tutkunları ve koleksiyoncular arasında büyük bir büyüme yaşamaktadır [32-33]. Küresel pikap pazarı, 2023 yılında 318,87 milyon ABD Doları olarak değerlendirilmiş ve 2024-2031 yılları arasında yıllık bileşik büyüme oranı %8,42 olarak öngörülmektedir. Bu büyümenin temel nedenlerinden biri, ses cihazı meraklılarının ve müzik tutkunlarının yüksek kaliteli ses ekipmanlarına olan talebinin artmasıdır. Ayrıca, kablosuz bağlantı ve dijital çıkış gibi yeni teknolojilerin tanıtılması, pikap pazarını sadece analog meraklılarının ötesine taşımıştır [34].

Sonuç olarak, müzik ve hobiler, mobilya sektörüne önemli etkiler yaparak, müzikle ilgili ürünlerin ev dekorasyonuna entegrasyonunu sağlamış ve bu ürünlerin evlerde daha fonksiyonel ve şık bir şekilde kullanılmasına olanak tanımıştır. Modern müzik üniteleri ve plak çaraları, tasarım ve teknoloji açısından sürekli gelişen ve yenilenen ürünlerdir. Bu gelişmeler, müzik tutkunları ve koleksiyoncular için önemli bir pazar fırsatı yaratırken, evde daha keyifli ve modern bir dinleme deneyimi sunmaktadır.

3. TASARIMDA SİSTEMATİK YAKLAŞIM (SYSTEMATIC APPROACH IN DESIGN)

Pahl ve Beitz tarafından geliştirilen Sistematik Tasarım Yaklaşımı, ürün tasarımı ve mühendisliğinde yaygın olarak kullanılan bir tasarım metodolojisidir [35]. Sistematik tasarım yaklaşımı, nihai ürünün işlevsel, estetik açıdan hoş olmasını ve hedef kullanıcı ihtiyaçlarını karşılamasını sağlamak için mantıklı ve düzenli bazı adımları içerir.

Sistematik tasarım yaklaşımının kavramsal tasarım süreci tasarım probleminin net bir şekilde belirlenmesi ile başlar. Tasarım gereksinimlerini, kullanıcı ihtiyaçlarını ve kısıtlamaları ana hatlarıyla belirtir. Bir sonraki adımda kullanıcı ihtiyaç ve istekleri analiz edilerek bir ihtiyaç listesi hazırlanır. Bunu çeşitli tasarım fikirlerinin üretildiği ve

ardından tasarım gereksinimlerini karşılama potansiyellerine göre değerlendirildiği ve seçildiği fikir oluşturma takip eder. Oluşturulan fikirler arasından konsept tasarım çözümleri seçilir. Bu konseptler eskiz yolu ile somutlaştırılarak güçlü ve zayıf yönleri belirtilir. Bu noktada da eleme yapılarak bir tasarım konsepti seçilir, eskizler, modeller ve bilgisayar destekli tasarım (CAD) gibi çeşitli yöntemler kullanılarak ayrıntılı bir hale dönüştürülür. Tasarım süreci boyunca, Pahl ve Beitz'in sistematik yaklaşımı, nihai ürünün iyi tasarlanması ve kullanıcı ihtiyaçlarını karşılamasını sağlamak için işlev, biçim, estetik ve üretilebilirlik gibi farklı tasarım yönlerini dikkate alınmanın önemini vurgular.

Genel olarak, Pahl ve Beitz'in sistematik yaklaşımı, kullanıcı ihtiyaçlarını karşılayan yüksek kaliteli ürünler oluşturmak için bir çerçeve sağlayan planlı ve kapsamlı bir tasarım sürecidir. Yaklaşım, çeşitli endüstrilerdeki tasarımcılar ve mühendisler tarafından geniş çapta benimsenmiştir ve ürün tasarımı için hala değerli bir araç durumundadır [36].

3.1 Kavramsal Tasarım ile Modüler Pikap Ünitesi Geliştirilmesi (Development of Modular Turntable Unit with Conceptual Design)







Kavramsal tasarım, tasarımcıların belirli bir tasarım problemini ele alan bir dizi fikir ve konsept ürettiği Sistematik Tasarım yaklaşımının ilk aşamadır. Kavramsal tasarımın amacı, tasarım gereksinimlerini karşılama ve hedeflenen kullanıcı ihtiyaçlarını karşılama potansiyeline sahip bir dizi tasarım konsepti yaratmaktır [37].

Bu çalışmada ele alınan modüler pikap ünitesi örneğinde Sistematik tasarıma bağlı olan Kavramsal tasarıma ait şu 7 aşama ele alınmıştır: (1) İhtiyaç listesi oluşturulması, (2) Fonksiyon şeması, (3) Alt ve genel tasarımlar, (4) Ön değerlendirme, (5) Önemli tasarımlar, (6) Ek seçim işlemleri, (7) Değerlendirme ve son karar [38].

Mevcut ürün gamlarının incelenmesi

Kavramsal tasarım süreci başlamadan önce piyasada var olan tasarımların incelenmesi ve nihai tasarımda olması istenen / istenmeyen özelliklerin belirlenmesi çok önemlidir. Belirlenen kriterlere göre Tablo 1'de gösterilen piyasada var olan tasarımların bazıları incelenmiştir. Bu kapsamda seçilen örnekler tasarım aşamasında göz önüne alınan örnek kümesinden seçilen, nihai tasarıma özellik bakımından en yakın ürünlerdir.

Tablo 1. Piyasada mevcut pikap ünitelerinin karşılaştırılması (Comparison of turntable units available on the market)

Mevcut Ürün Gamlarının Karşılaştırılması							
Ürün	Estetik	Ergonomik	Depolama özelliği	Modülerlik	Malzeme kalitesi	Kompakt	İşlevsellik
	+	-	-	-	+	+	+
	+	+	-	-	+	-	+
	+	-	+	-	+	-	-
	+	+	+	-	+	+	+
	+	+	+	-	-	-	+
	-	-	+	-	+	+	-

Tablo 1’de de görüldüğü gibi örnek olarak seçilen ürünlerde estetik, ergonomi, depolama, modülerlik, malzeme kalitesi, kompaktlık ve işlevsellik özelliklerine bakılmış olup genelde modülerliğin eksik olduğu belirlenmiştir. Ayrıca ergonomi, depolama ve işlevsellik gibi özelliklerin de bir arada olmadığı görülmüştür. Bu nedenle tasarıma eklenecek özelliklerin başında bunların olması öngörülmüştür.

İhtiyaç listesi

İhtiyaç listesi ya da diğer adıyla tasarım şartnamesi, tasarımda gerekli olan veya olması istenen özelliklerin bir listesidir [39]. Tablo 2 ile verilen Tasarım Şartnamesinde tasarımda mutlaka olması gereken özellikler istek (İ) ile belirtilirken, olması istenen ama zorunlu olmayan özellikler arzu (A) ile belirtilmiştir.

Tablo 2. Pikap ünitesi için ihtiyaç listesi (List of requirements for the turntable unit)

		İhtiyaç listesi Modüler Pikap Ünitesi	Sorumlu Cemile Şanlier, H. Rıza Börklü, Zeynep Yıldırım
	(İ),(A)	İstekler	
1	(İ)	Pikap/CD Player vb. ses kaynağının kendisini fiziki olarak depolayabilmeli.	
2	(A)	Pikap/CD Player vb. ses kaynağının ek parçalarını (CD, plak vb.) depolayabilmeli.	
3	(İ)	Yan parçaları modüler olmalı.	
4	(A)	Boyutu ayarlanabilmeli.	
5	(A)	Düşük maliyetli üretilebilmeli.	
6	(İ)	Kullanımı kolay ve güvenli olmalı.	
7	(A)	Modern bir tasarımı olmalı/ estetik görünmeli.	
8	(A)	Olabildiğince az yer kaplamalı.	
9	(A)	Engelli bireylerin kullanımına uygun olmalı.	
10	(A)	Marka görünürlüğü olmalı.	

Tablo 2’de verilen Pikap ünitesi tasarım şartnamesinde de görüldüğü üzere ses kaynağını fiziki olarak depolayabilmesi, modüler ek parçalara sahip olması ve kolay/güvenli kullanıma sahip olması gibi bazı temel ve önemli özellikler belirlenmiştir. İlerleyen süreçte yapılan tasarım ve

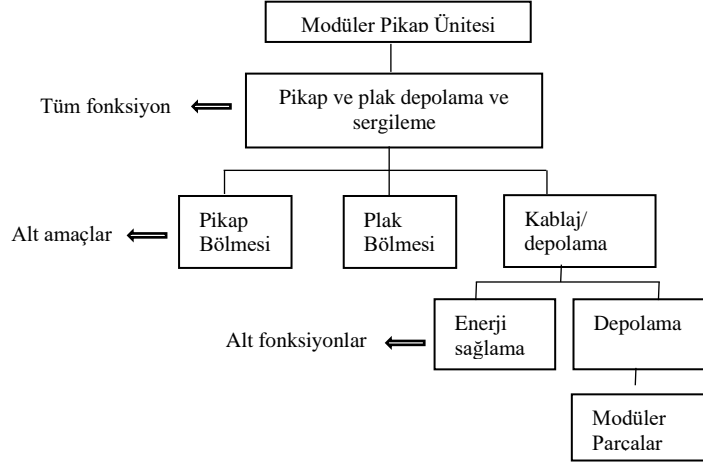
seçimler, bu parametreler doğrultusunda yapılacaktır.

Fonksiyon Şeması

Fonksiyon şeması, bir sistem veya ürünün girdi ve çıktıları arasındaki ilişkinin temsilidir. Sisteme ait

işlevleri temsil eden birbirine hiyerarşik bağlı kutular yardımıyla gösterilir. Fonksiyon şemaları, temel fonksiyonları ve bunların ara bağlantılarını tanımlamaya, tasarım konseptlerini iletmeye ve potansiyel tasarım zorluklarını sürecin erken aşamalarında belirlemeye yardımcı olur. Bu çalışma kapsamında tasarlanan ürünün girdi ve çıktıları

klasik bir fonksiyon şemasına ihtiyaç duyulmayacak biçimde olduğu için (statik bir sistem) fonksiyonel analiz yaklaşımı ile hiyerarşik fonksiyon şeması olarak düzenlenmiştir [40]. Hiyerarşik fonksiyon şeması, tüm fonksiyon, alt amaç ve bunlara karşılık oluşturulan alt fonksiyonlar olarak Şekil 4’de görülmektedir.



Şekil 4. Pikap ünitesine ait hiyerarşik fonksiyon şeması (Hierarchical function diagram of the turntable unit)

Şekil 4’de verilen hiyerarşik fonksiyon şeması modüler pikap ünitesinin fonksiyonel yapısını anlatacak şekilde düzenlenmiştir. Buna göre ünitenin tüm fonksiyonu pikap ve plakları fiziki olarak depolamak ve sergilemektir. Pikap bölümü, plak bölümü ve kabloları ile genel depolaması olmak üzere üç alt amaç belirlenmiştir. Depolama amacı için diğer alt fonksiyonlar da; kablolar/güç sağlama, ek depolama ve modüler parçalar ile belirtilmiştir.

Morfolojik Matris ve Tasarım Varyantları Oluşturulması

Kavramsal tasarımın bir diğer aşaması olan morfolojik matris, tasarım seçeneklerini sistematik olarak keşfetmek için kullanılan bir aşamadır. Bu noktada, tasarımın farklı özellikleri ele alınarak, bu özelliklerin farklı seçeneklerin kombinasyonları

halinde değerlendirilir. Bu yöntem sayesinde farklı seçeneklerin bir arada kullanılmasıyla daha iyi sonuçlar elde edilebilir.

Fonksiyon şemasında belirtilmiş olan ana özellikler ve alt fonksiyonlar Tablo 3’teki gibi morfolojik karta yerleştirilmiştir. Bu proje için müzik kaynağının depolanması, aksesuarların depolanması, enerji sağlama, modüler parçaların kullanımı ve sistem hacmi gibi farklı parametreler Tablo 3’te seçilmiştir. İstenen her fonksiyon için sunulan farklı çözümlerin kombinasyonları belirlenerek altı adet çözüm seçeneği belirlenmiştir. Belirlenen seçenekler; Seçenek 1: 1.1 – 2.1 – 3.2 – 4.2 – 5.2, Seçenek 2: 1.1 – 2.1 – 3.1 – 4.1 – 5.1, Seçenek 3: 1.2 – 2.2 – 3.2 – 4.2 – 5.1, Seçenek 4: 1.2 – 2.1 – 3.1 – 4.1,3 – 5.2, Seçenek 5: 1.3 – 2.2 – 3.2 – 4.1,2 – 5.1 ve Seçenek 6: 1.1 – 2.1 – 3.2 – 4.1,2,3 – 5.1,2 şeklindedir.

Tablo 3. Pikap ünitesine ait morfolojik matris (Morphological matrix of the turntable unit)

	Çözüm Seçeneği 1	Çözüm Seçeneği 2	Çözüm Seçeneği 3
Alt fonksiyonlar	S1	S2	S3
Müzik kaynağını depolama	Gizli	Gömülü	Açık
Aksesuar ve bağlantıları depolama	Gizli kablolar	Kablo çerçevesi	
Enerji sağlama	Akü	Priz bağlantısı	
Modülerliği sağlama	Tabure	Raf	Kitaplık
Sistem hacmini değiştirme	Şekli/Açısı	Boy	

Ön Değerlendirme ve Seçim Kartı

Ön değerlendirme aşamasında, morfolojik matris yöntemiyle elde edilen tasarım alternatifleri önceden belirlenmiş kriterler kullanılarak değerlendirilir. Bu kriterler; tasarımın hedeflerini, tasarımın kullanım amaçlarını, üretim maliyetlerini, ürün performansını ve benzeri faktörleri içerebilir. Değerlendirme sonucunda, en uygun tasarım alternatifi belirlenir ve daha ayrıntılı bir tasarım için geliştirilir. Bu aşama, tasarımın daha ileri aşamalarında yapılacak değişikliklerin sayısını azaltır ve zaman ve maliyet tasarrufu sağlar. Ayrıca,

tasarımın kullanıcılara ve işletmeye sunacağı faydaların ve dezavantajların önceden değerlendirilmesine yardımcı olur.

Tablo 4'te gösterilen bu aşama sayesinde seçenekler maliyet, şartname ile uyumluluk, gerçekleştirilebilirlik, ergonomi ve emniyet gibi önceden belirlenen kriterler ile değerlendirilerek tasarım seçeneği (konsepti) sayısı 3'e düşürülmüştür. İstenen özellik karşılandığında (+), karşılanmadığında (-) ile belirtilirken yeterli bilgiye sahip olunmadığı durumda ise (?) ile işaretlenmiştir.

Tablo 4. Pikap ünitesi kavramsal tasarım ön değerlendirmesi (Turntable unit conceptual design preliminary consideration)

	SEÇİM KARTI						MÜZİK ÜNİTESİ		KARAR:
	A	B	C	D	E	F	(+) EVET (-) HAYIR (?) EKSİK BİLGİ (!) TEKRAR GÖZDEN GEÇİR	(+) EVET (-) HAYIR (?) EKSİK BİLGİ (!) TEKRAR GÖZDEN GEÇİR	
	TÜM İŞLEVLE UYUMLU								
	ŞARTNAMEYİ KARŞILIYOR								
	GERÇEKLEŞTİRİLEBİLİRLİK								
	MÜSAADE EDİLEBİLİR MALİYET								
	EMNİYET ŞARTLARINI KARŞILAR								
	ERGONOMİK								
	AÇIKLAMA								
SEÇ 1	+	+	?	-	+	?		-	
SEÇ 2	+	+	+	-	+	-		+	
SEÇ 3	+	+	?	+	+	-		+	
SEÇ 4	-	+	-	-	?	+		-	
SEÇ 5	+	?	-	-	-	?		-	
SEÇ 6	+	+	+	?	+	+		+	

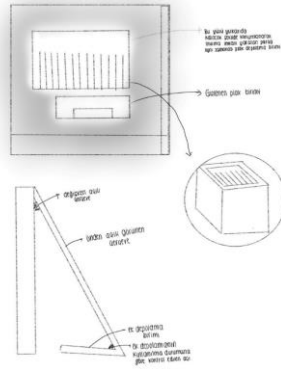
Önemli Tasarımlar

Bir önceki aşamada seçilen Seçenek 2, Seçenek 3 ve Seçenek 6 kriterleri karşılamıştır. Bu nedenle eskiz ile somutlaştırılmışlardır. Şekil 5'te verilmiş olan Seçenek 2'de gizli konumdaki pikap birimi ile kullanım dışı senaryoda ses sisteminin zarar görmesi engellenmiştir. Aynı zamanda kapalı konumda bulunduğu sürece plak depolama parçası kullanıcının oturabileceği bir işleve bürünmektedir. Önden bakıldığında açık çerçeveye sahip ön parça sayesinde kullanım sırasında da, kullanım dışındayken de ferah ve az yer kaplayan bir çerçeveye sahiptir. Kullanıcı isteğine göre açısı ayarlanabilen çerçeve ile yan profil görüntüsü değişebilmektedir. Şekil 6'te gösterilen Seçenek 3'e ait tasarımda ünitenin tamamı iki ana parçadan oluşmaktadır. Spesifik olarak dikey duran bir pikap

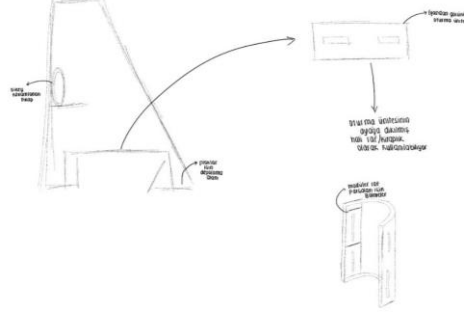
modeli için geliştirilmiştir. Ana pikap ünitesi profilden A harfine benzemekte ve ayakları plakları depolamaktadır.

Diğer bir parçası olan tabure ise kullanım dışıyken ana ünitenin içinde depolanır. Sonrasında çıkarılarak oturma imkânı sağlar. Ayağa dikildiğinde ise boşluklu yapısı ortaya çıkar ve çıkarılıp takılabilen raflar sayesinde kitaplık işlevini de görmektedir.

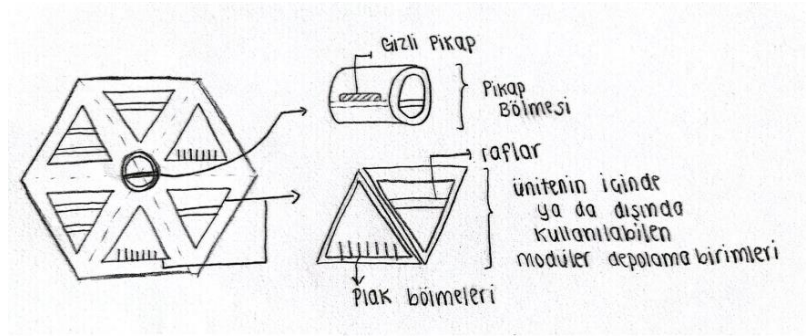
Seçenek 6'da ise parçalarda küp geometrisi benimsenmiştir (Şekil 7). İki farklı parçadır. Bir tanesi pikap depolar ve duvara monte edilmesi öngörülmüştür. Diğeri ise plak kalınlığında yuvalara sahiptir ve bu tip parçadan kullanıcı isteğine göre çeşitli miktarlarda alınabilmesi öngörülmüştür. Üst üste de kullanılabilirdiği gibi birbirinde ayrı konumlarda da kullanılabilir.



Şekil 5. Pikap ünitesi kavramsal tasarım seçenekleri (Seçenek 2) (Turntable unit conceptual design options)



Şekil 6. Pikap ünitesi kavramsal tasarım seçenekleri (Seçenek 3) (Turntable unit conceptual design options)

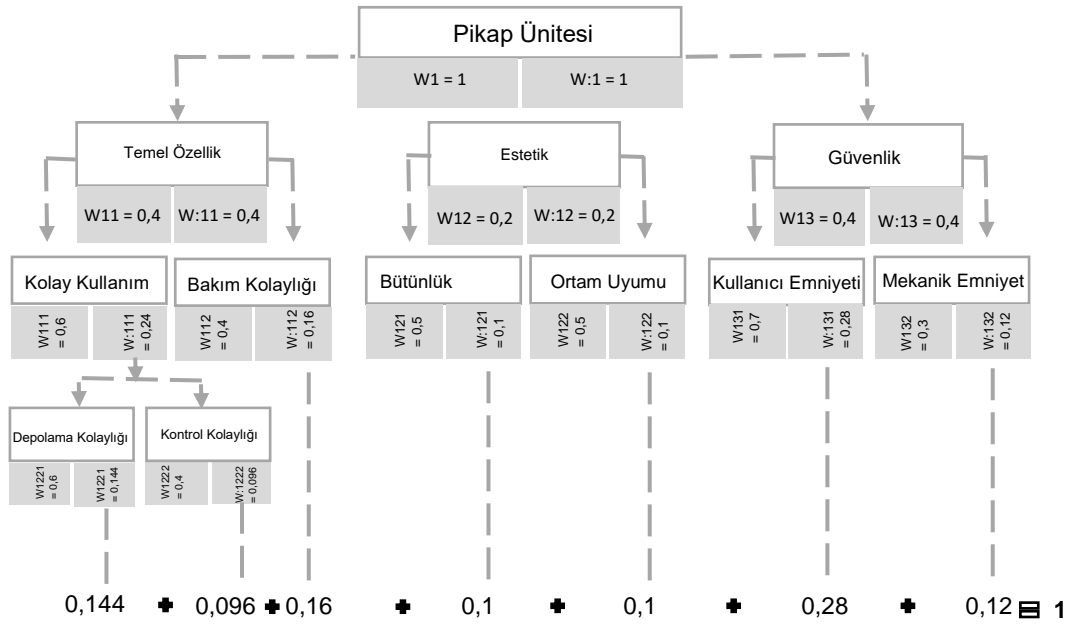


Şekil 7. Pikap ünitesi kavramsal tasarım seçenekleri (Seçenek 6) (Turntable unit conceptual design options)

Ek Seçim İşlemleri

Seçim kartında 3'e kadar indirgenen seçenekler hala sayıca fazla olduğunda ek seçim işlemlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu işlemler sırasıyla: Amaçlar ağacı, değerlendirme çizelgesi ve değer profili diyagramı oluşturularak yapılır. Şekil 8'deki amaçlar ağacında her bir kritere alt basamağa kadar önem derecesine göre puanlar verilmiştir (Kolay kullanım: 0,3, Ortama uyum: 0,1 gibi). Amaçlar ağacında her hedef için belirlenen tüm değerlerin toplamının 1 olması gerekmektedir. Pikap ünitesi için üç ana hedef belirlenmiştir; temel özellik, estetik ve güvenlik. Ürünün kullanıcılar tarafından

kolay ve anlaşılır bir şekilde kullanılması en önemli kriter olduğu için 0,3 olarak ağırlıklandırılmıştır. Ürün bulunduğu mekanda sürekli yer alacağı için kullanım esnasındaki emniyeti diğer önemli kriterdir. Ürün içerisinde yer alan parçaların kolay bir şekilde çıkarılması, takılması ve plakların düzgün bir şekilde depolanması ve sergilenmesi de yüksek ağırlık değerine sahiptir. Parçaların birbiri ile ve pikap ünitesinin bulunduğu ortamdaki estetik algısı ve uyumu diğer parametre olan estetik kriteri ile eşleştirilmiştir. Estetik bir ürün olması hedeflenmesine rağmen diğer kritik değerlere göre daha düşük ağırlık oranına sahiptir.



Şekil 8. Ek seçim işlemi: Amaçlar ağacı (Objectives tree)

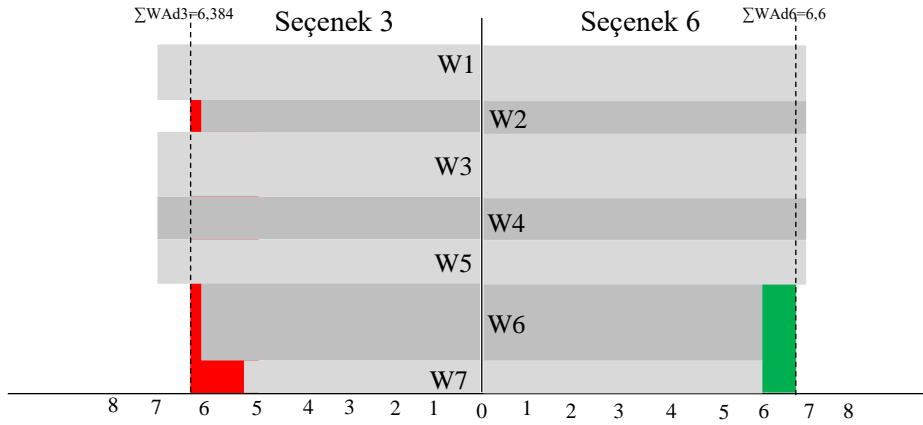
Tablo 5. Ek seçim işlemi: Değerlendirme çizelgesi (Evaluation chart)

Değerlendirme çizelgesi				Seçenek 2			Seçenek 3			Seçenek 6		
Kriter	W	Parametreler	Oran	Değer	Ağırlık Değeri	Oran	Değer	Ağırlık Değeri	Oran	Değer	Ağırlık Değeri	
1	0,144	Hacim	Az	5	0,72	Fazla	7	1,008	Fazla	7	1,008	
2	0,096	Ergonomi	Orta	6	0,576	Orta	6	0,576	Fazla	7	0,672	
3	0,16	Karmaşıklık	Az	5	0,8	Fazla	7	1,12	Fazla	7	1,12	
4	0,1	Karmaşıklık	Orta	6	0,6	Fazla	7	0,7	Fazla	7	0,7	
5	0,1	Sistem Bileşenleri	Fazla	7	0,7	Fazla	7	0,7	Fazla	7	0,7	
6	0,28	Malzeme/Mek anizma	Orta	6	1,68	Orta	6	1,68	Orta	6	1,68	
7	0,12	Güvenlik	Fazla	7	0,84	Az	5	0,6	Orta	6	0,72	
$\sum Wt=1$				$\sum Wd2=45$ $\sum WAd2=5,916$			$\sum Wd5=42$ $\sum WAd3=6,384$			$\sum Wd6=42$ $\sum WAd6=6,6$		

Ardından Tablo 5’de görülen değerlendirme çizelgesi hazırlanmıştır. Bu çizelgede amaçlar ağacında belirlenen 7 amaç ve bu amaçların her birine uygun hacim, ergonomiklik, karmaşıklık, sistem bileşeni, malzeme, mekanizma ve güvenlik gibi belirlenen değişkenler yer almaktadır. Bu değişkenlerin ilgili kriteri karşılama derecesi olan önem oranı ‘Az: 5’, ‘Orta: 6’ ve ‘Fazla: 7’ şeklinde belirlenmiştir. Amaçlar ağacından elde edilen ağırlık değeri ile önem oranının çarpılması ve hepsinin toplanması ile her bir tasarım seçeneğinin ağırlıklı hedef puanı oluşturulmuştur. Elde edilen toplam ağırlık hedef puanına göre en yüksek puanlara sahip olan Seçenek 3 ve Seçenek 6 son iki tasarım seçeneği olarak seçilmiştir.

Değerlendirme çizelgesinde elde edilen değerler ve ikiye indirgenen seçenekler bir sonraki aşama olan Değer profil diyagramına aktarılırlar. Değer profil diyagramı, tasarım ve fonksiyonellik açısından farklı tasarım seçeneklerinin karşılaştırıldığı bir analiz aracıdır. Amaçlar ağacında verilen değerlere uygunluklarına göre iki seçeneğin de değerleri yatay sütunlar olarak grafiğe aktarılırlar. Ardından iki seçenekte de en az boşluk kalacak şekilde dikey çizgiler çekilerek hangi seçeneğin en az boşluğa sahip olduğu (zayıf noktaları), yani amaçlar ağacı değerlerine ne kadar uyumlu olduğu, tespit edilir. Şekil 9’da görüldüğü üzere Seçenek 3’e ait sütun boşlukları Seçenek 6’ya ait olanlardan daha

fazladır. Böylece en iyi tasarım seçeneği olarak Seçenek 6 belirlenir.



Şekil 9. Ek seçim işlemleri: Değer profil diyagramı (Value profile diagram)

Sonuç ve Değerlendirme

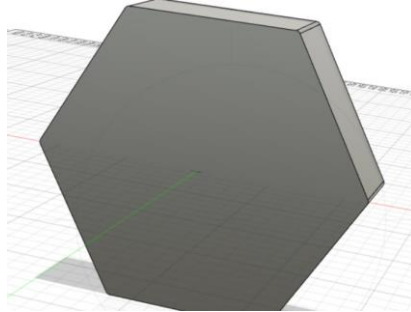
Kavramsal tasarım aşamaları sonucunda modüler bir pikap ünitesi tasarımı için 6 numaralı seçenek konsept çözüm önerisi olarak belirlenmiştir. İlk şamada belirlenen ihtiyaç listesindeki tüm kriterleri

sağlayan ve bütün değerlendirme aşamalarından geçerek seçilen bu konsept çözüm çalışmanın bir sonraki aşaması için yol gösterici olacaktır. Bu sayede, nihai tasarım hedeflerine daha hızlı ve daha etkili bir şekilde ulaşılması sağlanmıştır.

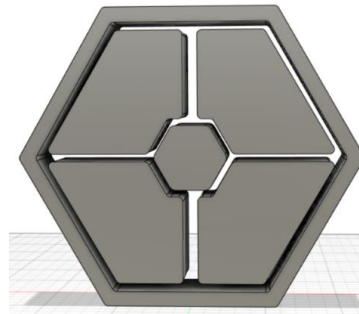
4. PİKAP ÜNİTESİNİN ŞEKİLLENDİRME TASARIMI (SONUÇLAR)

Kavramsal tasarım aşaması sonucunda seçilen konsept tasarım önerisi bu aşamada ayrıntılı bir

şekilde somutlaştırılmıştır. İlk baştaki tasarımdan yola çıkılarak kabataslak yapılan ilk modelleme aşağıda Şekil 10'da verilmiştir. Modellemeler Fusion 360 yazılımı kullanılarak yapılmıştır.



Şekil 10. Seçile optimum konseptin kaba ön modeli (Solid model of the selected optimum concept)

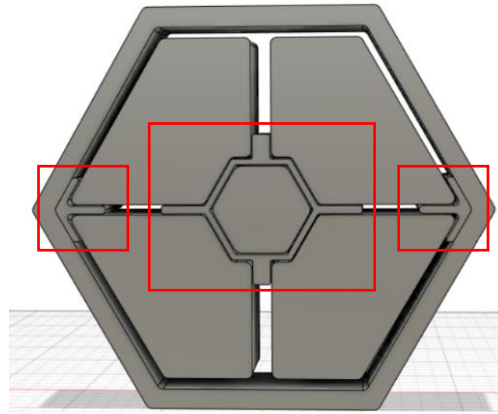


Şekil 11. Tasarımın altıgen çerçeve şeklinde yeniden düzenlenmesi (Rearrangement of the design into a hexagonal frame)

Ancak bu aşamada kullanım senaryosu üzerindeki tutarsızlık ve zorlanmalar fark edilmiştir. Tasarımın amacı gereği pazarlanma faktörü de göz önüne alınarak bir araya geldiği zaman bir bütün oluşturabilecek modülerlik amaçlanmaktadır. Anılan nedenle bu aşamadaki modülerlik geometrisi tekrar tasarlanarak altıgen bir çerçeve içerisine yerleşen parçalar şeklinde oluşturulmuştur (Şekil 11).

Altıgen bal peteği biçimi, görsel olarak simetrik ve dengelidir. Diğer geometrik şekillerle kıyaslandığında, alanı en verimli şekilde dolduran şekil olarak öne çıkar. Ayrıca, altıgen şekli modüler bir yapıya sahip olup, karmaşadan uzak, uyumlu ve düzenli bir yapı oluşturur, bu da tasarıma esneklik kazandırır [41-43]. Bu sebeple ürünün genel tasarımında, doğada en sık karşılaşılan altıgen form ilham kaynağı olarak kullanılmıştır. Doğadaki mimariden esinlenen bu tasarımın devamında yine birbirine benzer primitive geometriler baz alınmıştır. Şekil 12’de da görüldüğü üzere yamuk geometrisini andıran saklama alanlarının yanında merkezde müzik kaynağı için yine altıgen bir

geometri seçilmiştir. Söz konusu depolama alanlarının fiziksel desteği için de sol ve sağda birer tane, ortadaki altıgenin dört yanında da bir tane olmak üzere toplam 3 destek kullanılmıştır. Sol ve sağ desteklerin vida ile çerçeveye sabitlenmesi, orta kısmın ise duvara monte edilmesi planlanmıştır. Desteklerin de eklenmesinin ardından depolama alanları özelleştirilmeye başlanmıştır. Şekil 13’de görüldüğü gibi alt kattaki birimlerin içerisine yaklaşık onar tane plak alacak şekilde yuvalar yerleştirilmiştir. Ardından üstteki dolaplara da istenildiği zaman çıkarılabilen raflar eklenerek kişiselleştirme imkânı tanınmıştır. Bütün parçalar ortalama bir kullanıcının kaldırabileceği ağırlıktadır ve Şekil 14’deki gibi altıgen kavrama boşluklarına sahiptir. Engelli bireylerin normal hayatında karşılaştığı problemler göz önüne alındığında fiziksel olarak eşit şartlar oluşturulması herkes için tasarım anlayışı açısından önemlidir [44]. Bu yüzden tasarlanan nihai ürünün parça yerleşimi ile tekerlekli sandalyeli kullanıcılar da dahil olmak üzere, raflara ve plak bölmelerine rahatça erişilebilmesi mümkün kılınmıştır.



Şekil 12. Tasarıma eklenen destekler (Prop parts added to the design)



Şekil 13. Kişiselleştirmeye uygun depolama alanları (Storage areas suitable for personalization)



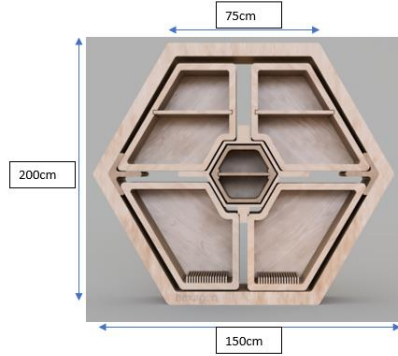
Şekil 14. Kavrama boşlukları (Grip gaps)

Malzeme Seçimi ve İmalat

Tasarımın tamamlanmasının ardından imalat ve bütünleme aşamaları göz önüne alınmıştır. Ne kadar niş olması beklenen bir ürün olsa da maliyetin uygun tutulması, ağırlık açısından ergonomik olması ve tabii ki kolay üretilebilir olması bu araştırma kapsamında göz önünde bulundurulmuş konulardır. Bu nedenle ürünün genel olarak malzemesi MDF (Medium Density Fiberboard) seçilmiştir. MDF, orta yoğunluklu yonga levha anlamına gelir ve ağaç lifi, odun atıkları ve bağlayıcı maddelerin yüksek sıcaklık ve basınç altında preslenmesiyle üretilen bir tür yapay ahşap malzemedir. MDF, genellikle mobilya üretiminde, iç mekan dekorasyonunda, duvar panellerinde, kapıların yapımında ve diğer çeşitli ahşap işlerinde kullanılır. MDF, lif levhaları arasındaki boşlukların minimuma indirilmesi ve düzgün bir yüzey elde edilmesi açısından yüksek bir hassasiyet gerektirir. Bu nedenle mükemmel bir yüzey pürüzsüzlüğü ve

homojen bir yapı sağlamaktadır [45-46]. Mobilya endüstrisinde MDF, ahşap kaplama malzemeleri veya ahşap vernik kaplamaların uygulanabileceği bir alt tabaka olarak kullanılır. MDF, doğal ahşaba göre daha düşük maliyetli ve daha kolay şekillendirilebilir bir malzemedir. Bu nedenle bu tasarımda MDF malzeme tercih edilmiştir.

Altıgen şeklindeki çerçeve 6 adet küçük levhanın montajından oluşacaktır. Bu levhalar freze tezgâhı ile işlenebilmektedir. Aynı zamanda ortadaki altıgen kısım da bu şekilde üretilecek olup dört adet çıkıntı şeklindeki levhalar da sonradan monte edilecektir. Destek parçaları tek parça olarak frezede işlenecek olup çerçeveye monte edilecektir. Son olarak depolama alanları parça parça kalıp ile üretilecek sonrasında monte edilecektir. Tasarımın farklı açılardan gösterimi Şekil 15-17’de verilmiştir. Güvenlik açısından duvara sabitleme amacıyla eklenmiş askı delikleri (2 üst 2 orta olmak üzere 4 tane) Şekil 18’de gösterilmiştir.



Şekil 15. Pikap ünitesinin genel ölçüleri (Dimensions of the turntable unit)



Şekil 16. Pikap ünitesinin kullanım senaryosu (Usage scenario of the turntable unit)



Şekil 17. Pikap ünitesinin marka detayı (Brand detail of the turntable unit)



Şekil 18. Askı detayları (Hanger details)

5. PİKAP ÜNİTESİNİN TASARIM TESCİL SÜRECİ (DESIGN REGISTRATION PROCESS OF TURNTABLE UNIT)

Rekabetin yoğun olduğu ve sürekli yenilikçiliğin teşvik edildiği bir ortamda, araştırma ve geliştirme faaliyetlerinin sonucunda ortaya çıkan yeni ve özgün eserlerin korunması büyük bir önem taşımaktadır. “Tasarlanan yeni ve farklı bir ürün korunmadığı sürece hemen taklit edilecek, yaratılan ürün farklı olmaktan çıkacak ve tasarımcısına ya da üreticisine artı değer katmaktan yoksun kalacaktır. Bu sebeple tasarımların mutlaka üçüncü şahısların izinsiz kullanımına karşı korunması gerekmektedir” [47]. Bu aşamada, fikri ve sınai mülkiyet hakları devreye girmektedir. Fikri mülkiyet hakları, genellikle tasarımcı ve tasarımı korumak üzere yapılandırılmış yasal haklardır. Bu haklar, aynı zamanda sektörün çıkarlarını koruyarak bilime, teknolojiye ve kültüre erişimi güvence altına almak için düzenlenmiştir [48]. Türkiye’de, bu hakları korumak için patent, faydalı model, tasarım ve marka gibi tescil araçları kullanılır. Özellikle mobilya endüstrisi gibi fikir ve yeniliklerin yoğun şekilde kullanıldığı alanlarda bu koruma araçları yaygın olarak kullanılır. Tasarım tescil işlemi, bir ürünün tasarımının yasal olarak korunması için başvurulmuş bir süreçtir. Bu süreç; ürünün görünümü, şekli veya dış tasarımına ait kullanım hakkını sağlar. Bu sayede yasal koruma yanında hem rekabet avantajı hem de hukuki güvence elde edilmiş olunur. Dünya genelinde iki ana tescil yöntemi bulunmaktadır: Esas inceleme ve Şekli inceleme. Şekli inceleme, basit, maliyet açısından uygun ve hızlı olduğu için birçok ülkede tercih

edilen bir yöntemdir. Türk hukukunda da bu yöntem benimsenmiştir. Şekli inceleme, tescil başvurusunda gerekli detayların yerine getirilip getirilmediğini değerlendirir, yenilik ve ayırt edicilik gibi ayrıntılı incelemelere odaklanmaz. Tasarım tescili, genellikle patent ofisleri veya ilgili yasal merciler aracılığıyla gerçekleştirilir [49]. 2021 yılı verilerine göre Türkiye’de mobilya sektöründe 94 patent başvurusu, 1244 tasarım başvurusu ve 915 marka başvurusu gerçekleştirilmiştir [50]. Bu sayede, mobilya üreticileri ve tasarımcıları, kendi özgün ürünlerini yasal olarak koruyabilmektedir.

Nihai tasarım süreci tamamlanan modüler pikap ünitesinin fikri ve sınai mülkiyet haklarının korunması için tasarım tescil ve faydalı model başvurusu yapılması planlanmıştır. Araştırma sürecinde, Gazi Üniversitesi Teknoloji Transfer Ofisi ile yapılan değerlendirmeler sonucunda tescil işlemlerinin üniversite tarafından yapılabileceği belirlenmiştir. Teknoloji Transfer Ofisi, tasarım tescili ve diğer fikri mülkiyet işlemleri konusunda uzmanlaşmış bir birim olarak, tasarımcıların haklarını koruyacak şekilde başvuru sürecinin yönlendirilmesini sağlamıştır. Tasarım tescil sürecinin ilk aşaması olan ve Şekil 19’da bir bölümü verilen Gazi Üniversitesi’ne ait Buluş Bildirim Formu doldurulmuştur. Tasarımın genel özellikleri yanında yenilikçi yönlerinden bahsedilmiş ve ürünü tanıtan görsellerine yer verilmiştir. Başvuru formu içerik olarak incelenmesi için tescil ofisine iletilmiştir. Başvurunun Türk Patent ve Marka Kurumuna iletilmesinin ardından yetkili kurum Türk Patent ve Marka Kurumu tarafından şekli ve içerik incelemesi yapılır. Bu sürecin sorunsuz ilerlemesi ile tescil ve sicil kararı verilir.

- Buluş Başlığı

- Buluşun Özeti (50-100 kelime arası)

- Buluşu tanımlayan 5 anahtar kelime

- Buluşun hangi sorun/probleme çözüm sağlanması beklenmektedir?

- Buluş ile ilgili teknolojinin mevcut durumu nedir?

- Buluşun getireceği çözüm önerisi nedir ve bu çözümü hangi yöntem/metot/uygulama ile sağlayacaktır?

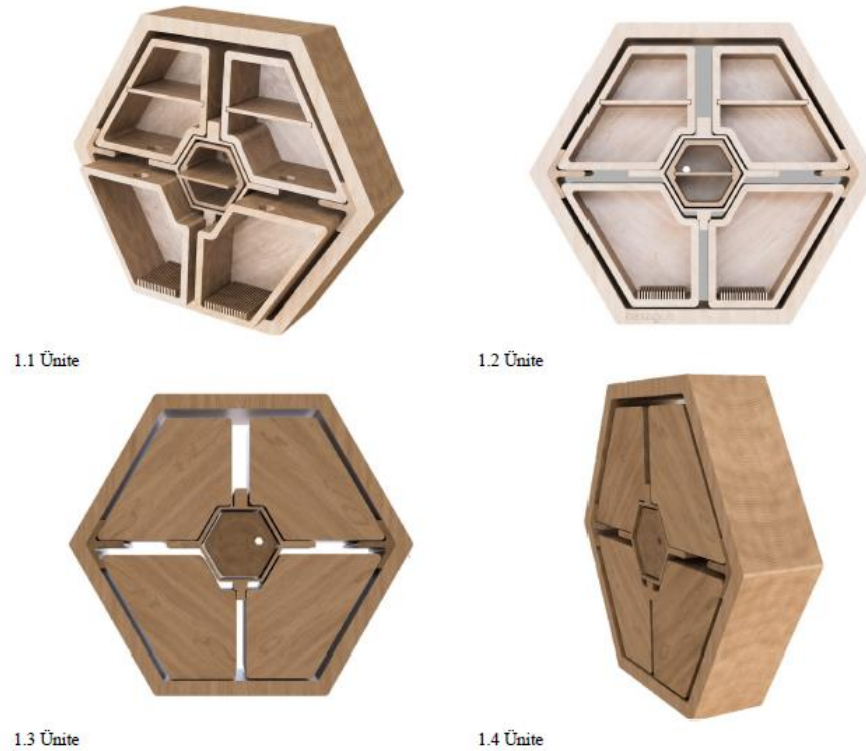
- Buluşu mevcut çözümlerle karşılaştırarak yeni, özgün yönlerini ve sağlayacağı avantajları açıklayınız.

Şekil 19. Buluş bildirim formu (Invention notification form)

Önceki bölümlerde de bahsedilen yenilikçi ve modern yaklaşımının yanında kolay üretilebilirliği ve ergonomi dolayısıyla bu projede bahsedilen tasarım öne çıkmış ve Gazi Üniversitesi Teknoloji Transfer Ofisi'nin de desteği ile ürünün tasarım

tescil süreci tamamlanmıştır. Modüler pikap ünitesinin süreç sonunda "2023 005286" tescil numarası ile tasarım tescili alınmıştır. Karar Türk Patent Kurumu'nun 417 numaralı bülteninde yayınlanmıştır (Şekil 20) [51].

2023/417 Tasarımlar Bülteni	Türk Patent ve Marka Kurumu	Yayın Tarihi : 24.07.2023	525		
(11) 2023 005286	(21) 2023/005286	(15) 29.05.2023	(22) 29.05.2023	(28) 1	(51) 06-04
(73) GAZİ ÜNİVERSİTESİ(6762225) EMNİYET MAH. BANDIRMA CAD. 6 /1 Yenimahalle Ankara TÜRKİYE					
(72) ZEYNEP SUDE YILDIRIM					
(72) CEMİLE ŞANLIER					
(72) HÜSEYİN RIZA BÖRKLÜ					
(74) HİLAL AKSOY (GRUP OFİS MARKA PATENT A.Ş.)					



Şekil 20. Türk Patent Kurumu 417. Bülten kesiti (Turkish Patent Institute Bulletin 417 excerpt)

6. CONCLUSIONS (SONUÇLAR)

Bu çalışmada, mobilya sektöründe modüler tasarım anlayışının avantajları ele alınarak, müzik hobisi olan kullanıcılar için özgün bir modüler pikap ünitesi sistematik tasarım yaklaşımı ile tasarlanmıştır. Kavramsal tasarım aşamasında, müzikseverlerin ihtiyaçları ve beklentileri göz önünde bulundurulmuş ve geleneksel pikap ünitelerinin ötesinde, estetik ve kullanım deneyimi açısından farklı bir yaklaşıma sahip konsept çözüm önerisi belirlenmiştir. Şekillendirme tasarım aşamasında ise ürünün tüm detaylarına karar verilmiş ve tasarım süreci tamamlanmıştır. Bu yaklaşım, ürünün sadece fonksiyonel değil, aynı zamanda görsel olarak da dikkat çekici olmasını sağlamıştır.

Tasarlanan modüler pikap ünitesi, mevcut piyasa seçenekleriyle karşılaştırıldığında, modüler yapısı sayesinde benzersiz bir avantaj sunmaktadır. Pikap severler için özel olarak tasarlanmış olan bu modüler sistem, kullanıcıların ihtiyaç ve zevklerine göre özelleştirilebilen parçalarla donatılmıştır. Her bir modül, fonksiyonel olarak birbirini tamamlayacak şekilde tasarlanmış, böylece kullanıcılar farklı modülleri birleştirerek, sadece estetik değil, aynı zamanda performans açısından da tatmin edici bir deneyim elde edebilmektedirler. Bu özellik, ürünün piyasadaki diğer sabit yapıları ürünlerden ayrılmasını sağlayarak, müzik hobisine duyulan tutkuyu daha verimli bir şekilde yaşama imkanı sunmaktadır. Ayrıca, modüler yapısı, kullanımda esneklik ve saklama kolaylığı sağlarken, sınırlı yaşam alanlarına sahip kullanıcılar için de pratik bir çözüm sunmaktadır. Tüm bu faktörler, ürünün mevcut ürünler ile rekabet edebilirliğini artırırken, pikap severler için ideal bir seçenek olarak öne çıkmasını sağlamaktadır. Ayrıca, tasarımın hukuki korunmasını sağlamak amacıyla tasarım tescili alınmıştır. Bu sayede, tasarımın ve tasarımcının hakları yasal olarak güvence altına alınmış ve tasarımın özgünlüğü korunmuştur.

Sonuç olarak, bu çalışma modüler tasarımın mobilya sektöründeki potansiyelini ve müzik gibi özel hobi alanlarında kullanıcı taleplerine nasıl yanıt verebileceğini gözler önüne sermektedir. Modüler pikap ünitesi tasarımı, kullanıcı odaklı yaklaşımı ve yenilikçi yapısıyla hem estetik hem de fonksiyonel anlamda başarılı bir çözüm sunmakta ve pazarda önemli bir yer edinme potansiyeline sahiptir. Bu tasarım, gelecekteki hobilerin entegre edileceği mobilya ürünlerine ilham verecek bir örnek teşkil etmektedir. Gelecekteki mobilya

tasarımlarında, kişisel zevkler ve ihtiyaçlar doğrultusunda özelleştirilebilen ve farklı hobileri destekleyen sistemlerin daha yaygın hale gelmesi beklenmektedir. Bu tasarım, mobilya ile eğlenceli ve fonksiyonel bir yaşam alanı yaratma konusunda yeni bir vizyon sunarak, hobileri günlük yaşamla entegre etmenin yollarını gösteren önemli bir adım atmaktadır.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

Gazi Üniversitesi Teknoloji Transfer Ofisi'ne katkılarından dolayı teşekkür ederiz.

We would like to thank Gazi University Technology Transfer Office for their contributions.

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)

Cemile ŞANLIER: Makalenin planı, literatür araştırmasını ve yazım sürecini gerçekleştirmiştir.

She carried out the plan, literature research and writing process of the article.

Zeynep Sude YILDIRIM: Ürün tasarımı fikrinin geliştirilmesi, katı modelin oluşturulması ve görselleştirilmesini gerçekleştirmiştir.

The development of the product design concept, creation of the solid model, and its visualization have been carried out.

H. Rıza BÖRKLÜ: Makalenin planlama, yazım ve kontrol sürecinde rehberlik etmiştir.

He has provided guidance during the planning, writing, and review process of the paper.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

There is no conflict of interest in this study.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Boyla, O. (2016). Mobilya Tarihi. Erişim tarihi: 20 Kasım 2024, <http://www.youblisher.com/p/589306-MobilyaTarihiekitaplarim-tr-gg/>
- [2] Tosun, Ö., Altunok, M., Küreli, İ., & Kasal, A. (2023). Mobilya tasarım sürecinde toplumların kültürel niteliklerinin etkisi ve özgün Türk mobilyasının tanınırlığının araştırılması. *GU J Sci, Part C*, 11(4), 966-983.
- [3] Seçer Kariptaş, F., Güney Yüksel, F. C., Kariptaş, F., Bayır Aydın, S., Eribol, C., & Çıkırıkçı, B. (2023). İşlevsellik ve esneklik bağlamında ofis iç mekân tasarımında mobilya kullanımı. *Modular Journal*, 6(2), 154-167. <https://doi.org/10.59389/modular.1397253>
- [4] Risueño Dominguez, M. (2022). Part of the furniture: Envisioning furniture futures through qualitative research and design. Yüksek Lisans Tezi. Massachusetts Institute of Technology.
- [5] Pirc Barcic, A., Kitek Kuzman, M., Vergot, T., & Grošelj, P. (2021). Monitoring consumer purchasing behavior for wood furniture before and during the COVID-19 pandemic. *Forests*, 12(7), 873.
- [6] Özel, Y., & Üruk, Z. F. (2021). Mobilya-biçim-tercih. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 21, 589-600.
- [7] Khosro, S. K., Shalbfan, A., & Thoemen, H. (2020). Consumer behavior assessment regarding lightweight furniture as an environmentally-friendly product. *European Journal of Wood and Wood Products*, 78(4).
- [8] Özçelik, Ö., & Kaprol, T. (2017). İç mekân örgütlenmesinde esneklik ve fonksiyonellik kavramı bağlamında mekanın değerlendirilmesi ve düzenlenmesi. *İleri Teknoloji Bilimleri Dergisi*, 6(3), 301-312.
- [9] Candan, Z., & Tunçel, S. (2024). Sürdürülebilirlik ve mobilya endüstrisi. *Ağaç ve Orman*, 5(1), 18-31. <https://doi.org/10.59751/agacorman.1376623>
- [10] Bumgardner, M. S., & Nicholls, D. L. (2020). Sustainable practices in furniture design: A literature study on customization, biomimicry, competitiveness, and product communication. *Forests*, 11(12), 1277. <https://doi.org/10.3390/f11121277>
- [11] MOSFED. 2023 Mobilya Analiz Raporu. https://mosfed.com/2023-mobilya-analiz-raporu/#flipbook-df_3926/27/. Erişim tarihi: 28 Kasım 2024.
- [12] Altay, B., & Gürpınar, K. (2008). Açıklanmış karşılaştırmalı üstünlükler ve bazı rekabet gücü endeksleri: Türk mobilya sektörü üzerine bir uygulama. *Afyon Kocatepe Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 10(1), 257-274.
- [13] Gürpınar, K., & Barca, M. (2007). Türk mobilya sektörünün uluslararası rekabet gücü düzeyi ve nedenleri. *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi İİBF Dergisi*, 2(2), 41-61.
- [14] Wikipedia. Hobi. <https://tr.wikipedia.org/wiki/Hobi>. Erişim tarihi: 20 Kasım 2024.
- [15] Brajša-Žganec, A., Merkaš, M., & Šverko, I. (2011). Quality of life and leisure activities: How do leisure activities contribute to subjective well-being? *Social Indicators Research*, 102, 81-91. <https://doi.org/10.1007/s11205-010-9724-2>
- [16] Fancourt, D., Aughterson, H., Finn, S., & Walker, E. (2021). How leisure activities affect health: A narrative review and multi-level theoretical framework of mechanisms of action. *The Lancet Psychiatry*, 8(4), 329-339.
- [17] Gómez-Carmona, O., Sádaba, J., & Casado-Mansilla, D. (2019). Enhancing street-level interactions in smart cities through interactive and modular furniture. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 1-14.
- [18] Choi, J. Y., Lee, E. J., & Park, S. J. (2018). An usability evaluation of flexible modular furniture for single-person households. *Journal of the Korean Institute of Interior Design Academic Journal*, 27(6), 89-98. <https://doi.org/10.14774/JKIID.2018.27.6.089>
- [19] Saïded, A. S., Najmaddin, R., & Ali, J. S. (2024). Impact of flexible furniture on small spaces in residential apartments with smart solutions. *Nanotechnology Perceptions*, 20(3).
- [20] Garip, B. S., Sağlar Onay, N., Garip, E., & Güzelci, O. (2019). Flexible and modular furniture design for changing living environments. *Proceedings of the 29th International Conference Research for Furniture Industry*, Ankara, Turkey.
- [21] Wang, S. (2022). Application of product life cycle management method in furniture modular design. *Mathematical Problems in Engineering*, 2022, Article ID 7192152. <https://doi.org/10.1155/2022/7192152>
- [22] Ekohunters. Modular Furniture. Erişim tarihi: 20 Kasım 2024, <https://www.ekohunters.com/modular-furniture/>
- [23] Kurnalı, M. (2021). Mikro mekanlar için modüler ve esnek mobilya tasarımları üzerine bir değerlendirme. *Congress on Scientific Researches and Recent Trends-8*, The Philippine Merchant Marine Academy, Philippines. Full Text Book.

- [24] Romero-Subiron, F., & Rosado, P. (1995). The design of a line control system for the modular furniture industry. *International Journal of Production Research*, 33(7), 1953-1972.
- [25] Morse, K. F., Fine, P. A., & Friedlander, K. J. (2021). Creativity and leisure during COVID-19: Examining the relationship between leisure activities, motivations, and psychological well-being. *Frontiers in Psychology*, 12, 609967. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2021.609967>
- [26] Crosley Radio. Everett record storage media console CF1103. <https://www.crosleyradio.com/everett-record-storage-media-console-cf1103>. Erişim tarihi: 20 Kasım 2024.
- [27] Kogen, J. H. (1977). Record changers, turntables, and tone arms—A brief technical history. *Journal of the Audio Engineering Society*, 25(10/11), 749-758.
- [28] Lippit, T. M. (2006). Turntable music in the digital era: Designing alternative tools for new turntable expression. In *Proceedings of the 2006 conference on New Interfaces for Musical Expression* (pp. 71-74).
- [29] Barnett, K. S. (2006). Furniture music: The phonograph as furniture, 1900–1930. *Journal of Popular Music Studies*, 18(3), 301-324.
- [30] Do-Re. Audio-Technica AT-LP60XBT-BK Bluetooth stereo turntable. https://www.do-re.com.tr/audio-technica-at-lp60xbt-bk-bluetooth-stereo-turntable-siyah?srsId=AfmBOoqkRA6MK76nnsStpDhuVYEif3P4FSXj0QZg_o3wmTNBLj0DEVnF. Erişim tarihi: 20 Kasım 2024.
- [31] Amazon. Victrola vintage Bluetooth hoparlörlü. <https://www.amazon.com.tr/Victrola-Vintage-Bluetooth-Hoparl%C3%B6rl%C3%BC-Harita/dp/B01M7VNH02>. Erişim tarihi: 20 Kasım 2024.
- [32] Konuk, E., & Kırdar, Y. (2023). Dijital teknoloji çağında müzik. *Journal of Awareness*, 8(1), 1-17. <https://doi.org/10.26809/joa.1985>
- [33] Kaya, D. H. (2022). Ses Kayıt Cihazlarının İcadıyla Oluşan Müzik Endüstrisinde Kitlesel Müzik Tüketim Araçlarının Bireyselleşme Dönüşümü. Yüksek Lisans Tezi. İstanbul Kültür Üniversitesi, İstanbul.
- [34] Verified Market Research. Turntables market. <https://www.verifiedmarketresearch.com/product/turntables-market/>. Erişim tarihi: 20 Kasım 2024.
- [35] Mayda, M., & Börklü, H. R. (2014). An integration of TRIZ and the systematic approach of Pahl and Beitz for innovative conceptual design process. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 36(3), 859–870. <https://doi.org/10.1007/s40430-013-0106-y>
- [36] Mayda, M., & Börklü, H. R. (2014). Yeni ve inovatif bir kavramsal tasarım işlem modeli ile su filtresi tasarımı. *GU Journal of Science, Part C*, 2(1), 169-180.
- [37] Börklü, H. R. (2010). Mühendislik tasarımı: Sistemik tasarım (Türkçe). Hatiboğlu Yayınları.
- [38] Biçer, D., Börklü, H. R., & Erden, O. (2021). Sistemik tasarım yaklaşımı ile yeni bir market arabasının kavramsal tasarımı. *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry*, 5(3), 577–586. <https://doi.org/10.46519/ij3dptdi.845858>
- [39] Azeloğlu, C. O., & Alper, E. (2019). Yeni bir hidroterapi egzersiz aletinin sistemik konstrüksiyon yaklaşımıyla kavramsal tasarımı. *GU J Sci, Part C*, 7(2), 291-302.
- [40] Mayda, M., & Börklü, R. (2008). Yeni bir kavramsal tasarım işlem modeli. *TÜBAV Bilim*, 1(1), 13-25.
- [41] Zhang, Q., Yang, X., Li, P., Huang, G., Feng, S., Shen, C., Han, B., Zhang, X., Jin, F., & Xu, F. (2015). Bioinspired engineering of honeycomb structure—Using nature to inspire human innovation. *Progress in Materials Science*, 74, 332–400.
- [42] Khalil, D. (2021). Simulate the honeycomb system as an inspirational design concept in the field of furniture. *Journal of Design Science and Applied Arts*, 2, 32–43.
- [43] AskNature. Honeycomb. <https://asknature.org/strategy/honeycomb-structure-is-space-efficient-and-strong/>. Erişim tarihi: 20 Kasım 2024.
- [44] Çelik, A., & Azeloğlu, C. O. (2022). A conceptual design application with a systematic approach: Disabled-friendly gym equipment. *GU Journal of Science, Part C*, 10(4), 792–804.
- [45] Pakarinen, T. (1999). Success factors of wood as a furniture material. *Forest Products Journal*, 49(9).
- [46] Bayat, M. (2023). Types of engineered wood and their uses. In *Current applications of engineered wood* (pp. 1–20). IntechOpen.
- [47] Sarsılmaz, E. (2009). Endüstriyel tasarım tescil başvuru sürecinin irdelenmesi. Doktora Tezi. Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [48] Gökova, U., & Bozkurt, K. (2006). Fikri ve sınai mülkiyet hakkı (FSMH) olarak patentler: Dünya ve Türkiye açısından tarihsel bir bakış. *Muğla Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi (İLKE)*, 17(17).

- [49] Çetin, F. (2018). Endüstriyel tasarım tescil süreci ve bir uygulama: Demonte sandalye örneği. Yüksek Lisans Tezi. Bartın Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Bartın.
- [50] T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, Sanayi Genel Müdürlüğü. (2022). Mobilya sektör raporu. Ankara. Erişim tarihi: 20 Kasım 2024.
- [51] Türk Patent ve Marka Kurumu. Tasarım. <https://www.turkpatent.gov.tr/arastirma-yap?form=design¶ms=%257B%257D&run=true>. Erişim tarihi: 20 Kasım 2024.



Yığma Yapılarda Güçlendirme Tekniklerinin Koruma İlkeleri ile İlişkilendirilmesi ve Mardin Tarihi Dokusunda Değerlendirilmesi

İzzettin KUTLU^{1*}

¹Mardin Artuklu Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Mimarlık Bölümü, Mardin, Türkiye

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 08/06/2024
Düzeltilme: 30/08/2024
Kabul: 14/11/2024

Anahtar Kelimeler

Tarihi yapı
Güçlendirme
Restorasyon
Mimari miras
Mardin

Article Info

Research article
Received: 08/06/2024
Revision: 30/08/2024
Accepted: 14/11/2024

Keywords

Historical buildings
Retrofitting
Restoration
Architectural heritage
Mardin

Grafik Özet (Graphical/Tabular Abstract)

Çalışma, yığma yapılarda güçlendirme teknikleri ile ilgili kapsamlı literatür taramasını içermekte ve koruma ilkeleri ile ilişkilendirilerek Mardin tarihi kent dokusunda değerlendirmektedir. / The study includes a comprehensive literature review on retrofitting techniques in masonry buildings and evaluates them in relation to conservation principles in the historical urban heritage of Mardin.



Şekil A: Çalışmanın aşamaları / Figure A: Stages of study

Önemli noktalar (Highlights)

- Koruma ilkeleri ile güçlendirme yöntemleri arasındaki ilişki, özellikle yığma yapılardaki uygulamalarda karşılaşılan pratik zorlukları ve çözüm yolları bilimsel bir temelde irdelenmektedir. / The relations between conservation principles and retrofitting methods, especially the practical difficulties encountered in the applications of masonry buildings and their solutions were examined on a scientific basis.
- Mardin tarihi kent dokusunda yer alan ve güçlendirme stratejilerine ihtiyaç duyan yapılar örneklenilerek, bu yapıların korunmasına yönelik uygulanabilir yöntemler ortaya konmaktadır. / The buildings in the historical urban heritage of Mardin in need of retrofitting strategies were exemplified and applicable methods for the preservation of these buildings were provided.)
- Çalışma, yığma yapıların güçlendirilmesi ve tarihi çevrenin sürdürülebilir bir şekilde korunması için teorik bir altyapı ile uygulamaya yönelik rehber niteliğinde veriler sunmaktadır. / The study provides a theoretical background and practical guidance for the retrofitting of masonry structures and the sustainable preservation of the historical heritages.)

Amaç (Aim): Güçlendirme teknikleri ile koruma tüzükleri arasındaki ilişkiyi tespit etmek ve Mardin tarihi kent dokusunda güçlendirme stratejilerine ihtiyaç duyan yapıları belirlemek amaçlanmıştır. / It is aimed to determine the relationship between retrofitting techniques and conservation regulations and to identify the buildings in need of retrofitting strategies in the historical urban heritage of Mardin.

Özgünlük (Originality): Güçlendirme teknikleri ile koruma tüzüklerinde yer alan maddelerin ilişkilendirilmesi çalışmanın özgün değerini oluşturmaktadır. / The relation between retrofitting techniques and the articles in the conservation regulations constitutes the original value of the study.

Bulgular (Results): Tarihi yığma yapılarının güçlendirilmesinde teknolojik gelişmeler ile birlikte uygun müdahalelerin gerçekleştirilmesinin analiz ve deneyler ile mümkün olduğu belirlenmiştir. / It was determined that it is possible to realize appropriate interventions with technological developments in the retrofitting of historical masonry buildings through analysis and experiments.

Sonuç (Conclusion): Gelişen teknolojiyle çeşitlenen güçlendirme tekniklerinin, her zaman tarihi yapıların özgün dokusuyla uyumlu olmayabileceği sonucuna varılmıştır. / It was concluded that retrofitting techniques, which have increased with the developing technology, may not always be appropriate with the original character of the historical building.



Yığma Yapılarda Güçlendirme Tekniklerinin Koruma İlkeleri ile İlişkilendirilmesi ve Mardin Tarihi Dokusunda Değerlendirilmesi

İzzettin KUTLU^{1*}

¹Mardin Artuklu Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Mimarlık Bölümü, Mardin, Türkiye

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 08/06/2024
Düzeltilme: 30/08/2024
Kabul: 14/11/2024

Anahtar Kelimeler

Tarihi yapı
Güçlendirme
Restorasyon
Mimari miras
Mardin

Öz

Tarihi yapılar, deprem, kuvvetli rüzgâr, patlama gibi güçlü dış yüklere karşı savunmasız olduğundan, son yıllarda yığma yapılar ve elemanları için farklı güçlendirme yaklaşımları geliştirilmiştir. Yapıya uygulanacak en uygun güçlendirme yöntemini belirlemek için her bir tekniğin avantaj ve dezavantajlarının kapsamlı biçimde değerlendirilmesi gerekmektedir. Bu çalışma, farklı güçlendirme yöntemlerinin karşılaştırılmasını ve etkinliklerinin değerlendirilmesini amaçlamaktadır. Çalışmada sistematik literatür taraması, verilerin analizi ve koruma tüzüklerinin incelenmesi olmak üzere toplam 3 aşamalı bir metodoloji izlenmiştir. İlk aşamada, literatür taraması ile tarihi yapıların güçlendirilmesi konusunda ilgili önemli mevcut kaynaklara yer verilmiş ve önemli bir veri sunulmuştur. İkinci aşamada elde edilen sonuçlara ait veriler tablolaştırılmıştır. Son aşamada ise uluslararası koruma tüzükleri kapsamında geçen güçlendirme maddeleri ortaya konmuş ve tarihi yığma yapılara uygulanabilecek güçlendirme tekniklerinin değerlendirmelerine yer verilmiştir. Bu değerlendirmeler ile birlikte önemli kültürel miras eserlerine sahip Mardin'deki tarihi yapıların durumu analiz edilmiştir. Çalışmada, tarihi yığma yapılarının güçlendirilmesinde teknolojik gelişmeler ile birlikte uygun müdahalelerin gerçekleştirilmesinin analiz ve deneyler ile mümkün olduğu; Mardin tarihi dokusunda güçlendirme tekniklerine ihtiyaç duyulan birçok yığma yapı stoğunun var olduğu vurgulanmaktadır. Sonuç olarak, inşa edildiği döneme ait değerlerin nesiller arası aktarımında kritik öneme sahip olan mimari miras yapılarının gerektiği durumlarda uygun güçlendirme stratejileri ve projeler ile korunması büyük önem arz etmektedir.

Evaluation of Technical Approaches in the Retrofitting of Historical Buildings in association with Conservation Principles and Mardin's Historical Heritage

Article Info

Research article
Received: 08/06/2024
Revision: 30/08/2024
Accepted: 14/11/2024

Keywords

Historical buildings
Retrofitting
Restoration
Architectural heritage
Mardin

Abstract

Since historical buildings are vulnerable to strong external loads such as earthquakes, strong winds and explosions, different seismic retrofitting approaches have been developed and applied for masonry structures in recent years. This study aims to compare different retrofitting methods and to evaluate their effects and effectiveness. The study was based on a 3-stage methodology: systematic literature review, data analysis and examination of conservation regulations. Firstly, a literature review was conducted to analyse the existing literature on the retrofitting of historical buildings. In the second stage, the data of the results obtained were analysed in tables. In the last stage, the retrofitting articles within the scope of international conservation regulations are presented and the retrofitting techniques that can be applied to historical masonry structures. The condition of historical buildings possessing significant cultural heritage in Mardin was systematically analyzed. The study empirically demonstrated the feasibility of reinforcing historical masonry structures through appropriate interventions combined with technological advancements. Furthermore, it was emphasized that Mardin's historical heritage contains a substantial inventory of masonry buildings requiring retrofitting techniques. In conclusion, the development of reinforcement projects was deemed necessary for architectural heritage structures under threat of demolition.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Günümüzde geçmişe kıyasla daha az sıklıkta inşa edilen yığma sistemli yapılar, mevcut bina stokunun

önemli bir kısmını oluşturmaktadır [1]. Genellikle yığma sistemli olarak inşa edilen kültürel miras yapıları da estetik, sosyal, arkeolojik, kültürel, ekonomik ve teknolojik değerler bağlamında

insanlık tarihinin gerçek bir hazinesi olarak görülmektedir. Bu yapılarda kullanılan inşa pratikleri, inşaat teknolojileri ve yerel malzemeler, günümüzün doğal afet tehlikelerine karşı oldukça savunmasız kalabilmektedir. Geçmiş deprem verilerinin de gösterdiği üzere, yığma yapılarda hasarlar ve can kayıpları meydana gelebilmektedir. Bu nedenle, bu tür yapıların sismik ve aşırı yükler altında ayakta kalmasını sağlayacak güçlendirme çalışmaları kritik önem taşımaktadır. Geçmiş dönemlerde yığma yapılar yalnızca ampirik kurallara doğrultusunda inşa edilmiş ve sismik etkiler genellikle göz önünde bulundurulmamış veya hesaplamalar sonrası dikkate alınacak düzeyde teknolojik malzeme ortaya çıkmamıştır [2]. Bu durum, yığma yapılarda depremin neden olduğu sismik yüklere karşı yeterli mukavemete sahip olamamasına yol açmıştır. Yığma yapıların tamamının veya bazı elemanlarının, deprem etkilerinden kaynaklanan enerjiyi sönmüleyebilmeleri ve depremlerin neden olduğu kuvvetleri azaltabilmeleri için genellikle sismik etkiler öncesinde güçlendirilmesi gerekmektedir. Örneğin, L'Aquila depremi sonrası tarihi yapıların acil güçlendirme ve restorasyon çalışmalarında bu gereklilik açıkça gözlemlenmiştir [3]. L'Aquila'daki tarihi şehir merkezinde meydana gelen hasarların değerlendirilmesi, bu tür yapıların güçlendirilmesinin gerekliliğini bir kez daha vurgulamaktadır [4]. Mazzarella [5] çalışmasında da belirtildiği gibi, enerji verimliliği açısından yapılan güçlendirme çalışmaları, yığma yapılar üzerinde olumlu sonuçlar doğurmuştur. Yığma kubbeler gibi özel yapı elemanları üzerinde yapılan analizler, bu tür yapıların güçlendirilmesinin önemini ortaya koymaktadır [6]. Özellikle, San Giuliano di Puglia'daki kilisenin sismik onarım ve iyileştirilmesi üzerine gerçekleştirilen çalışmalar, yığma yapıların deprem dayanıklılığını artırmada kullanılan tekniklerin etkinliğini göstermektedir [7]. Benzer şekilde, genel olarak tarihi yapıların güçlendirilmesinde izlenen ilkeler ve yaklaşımlar, literatürde geniş yer bulmaktadır [8].

Teknolojik gelişmelerle birlikte, araştırmacılar yığma yapıların veya elemanlarının mekanik performansını güçlendirmek ve iyileştirmek için çeşitli yaklaşımlar geliştirmiş ve uygulamıştır. Örneğin, tarihi Şehzade Mehmet Camii'nin dinamik analizinde kullanılan sismik taban izolasyonu uygulaması, bu tür tekniklerin etkinliğini ortaya koymaktadır [10]. Benzer şekilde, kubbe yapı formlarının kenet ile güçlendirilmesi üzerine yapılan araştırmalar da bu alandaki yenilikçi yaklaşımların bir örneğidir [11]. Ancak, pek çok güçlendirme veya iyileştirme tekniği yalnızca bireysel yapı durumları üzerinde çalışılmıştır [12].

Örneğin, Kars Kümbet Camisi'nin deprem davranışını inceleyen çalışmalar, bu durumun spesifik bir örneğidir [13]. Seville Katedrali üzerine yapılan testler ve sonlu elemanlar yöntemi ile gerçekleştirilen teşhis süreci, bu tekniklerin yalnızca belirli koşullarda uygulanabilir olduğunu göstermektedir [14]. L'Aquila havzasındaki doğrusal olmayan sismik tepkiler üzerine yapılan çalışmalarda da tarihi yapılarda yer alan malzeme ve yapı sistemlerinin farklılıklarının önemine dikkat çekilmiştir [15]. Bu durum, tüm tarihi yapılar için genel bir sonuç elde edilemeyeceğini, bireysel yapılar üzerinde elde edilen sonuçların genişletilemeyeceği ve farklı yerel malzemelere veya sistemlere sahip diğer durumlara doğrudan uygulanamayacağı anlamına gelmektedir. Farklı malzemelerden yapılmış yığma yapılarda güçlendirme veya iyileştirme yöntemleri farklı şekillerde sonuçlar doğurabilmektedir. Her malzemenin özgün özellikleri, tarihi yığma yapılarda standart bir model üretimini ve standart bir güçlendirme, koruma ve restorasyon stratejisini engellemektedir. Bu tür yapıların analizinde, sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak yapılan simülasyonlar, farklı malzemelerin nasıl tepki verebileceğini göstermektedir [16]. Yığma yapıda yer alan tüm bölümler için aynı durum geçerlidir. Güçlendirilmiş/iyileştirilmiş yığma yapı elemanının, yapının tamamının özgün periyodunu değiştirebileceği, dolayısıyla deprem etkisi altındaki dinamik performansı da değiştirebilmektedir. Bu nedenle, güçlendirme/iyileştirme süreçlerinde yapının tamamının dikkate alınması daha doğru sonuçlar vermektedir. Bu tür yaklaşımların etkinliği, The International Scientific Committee on the Analysis and Restoration of Structures of Architectural Heritage (ISCARSAH) tarafından da belirlenen prensiplerle uyumlu hale getirilmelidir. ISCARSAH'ın belirlediği kriterler, özellikle tarihi yapıların güçlendirilmesi ve korunmasında standartlaştırılmış bir model yerine, her yapının özgün özelliklerine ve malzemelerine göre özel çözümler geliştirilmesi gerektiğini vurgulamaktadır [17]. Bu gelişmeler sonucunda son yıllarda, sayısal simülasyon yöntemi yığma yapıların güçlendirme/iyileştirme araştırmalarında yaygınlaşmaya başlamıştır. Sayısal simülasyon, güçlü bir araç olarak kullanılabilen ve güçlendirme/iyileştirme verimliliği ile ilgili olarak yığma yapıların mekanik performansını analiz etmek için daha sık uygulanabilmektedir [18].

Yığma yapıların güçlendirilmesi için geliştirilen yöntemler, yapıların deprem, rüzgar, toprak basıncı gibi dış etkenlere karşı dayanımını arttırmayı amaçlamaktadır. Güçlendirme işlemleri genel

olarak dış yüklerin azaltılması, yapı elemanının güçlendirilmesi ve yapı bütünlüğünün güçlendirilmesi olmak üzere üç temel kavram üzerinde yoğunlaşmaktadır [18]. Dış kuvvetleri azaltmak, yapıya etki eden deprem, rüzgar, toprak basıncı vb. gibi dış yüklerin etkisini azaltmak için ek yapısal elemanlar eklenmesi veya yapının geometrisinde değişiklikler yapılmasını içermektedir. Mevcut elemanları güçlendirmek, yapının taşıyıcı sistemindeki beton duvarları, taşıyıcı ayaklar, hatıllar, kubbe vb. gibi elemanların dayanımının ve sünekliğinin artırılması için çeşitli güçlendirme teknikleri uygulanmasını kapsamaktadır. Yapının bütünlüğünü geliştirmek ise güçlendirme işlemlerinin yığma yapıdaki tüm taşıyıcı sistemin bütüncül bir davranış sergilemesini sağlamaktadır [19,20]. Literatürdeki çalışmalar, bu üç temel yaklaşımın farklı yöntemlerle uygulandığını ve yığma yapıların güçlendirilmesinde etkin sonuçlar verdiğini göstermektedir.

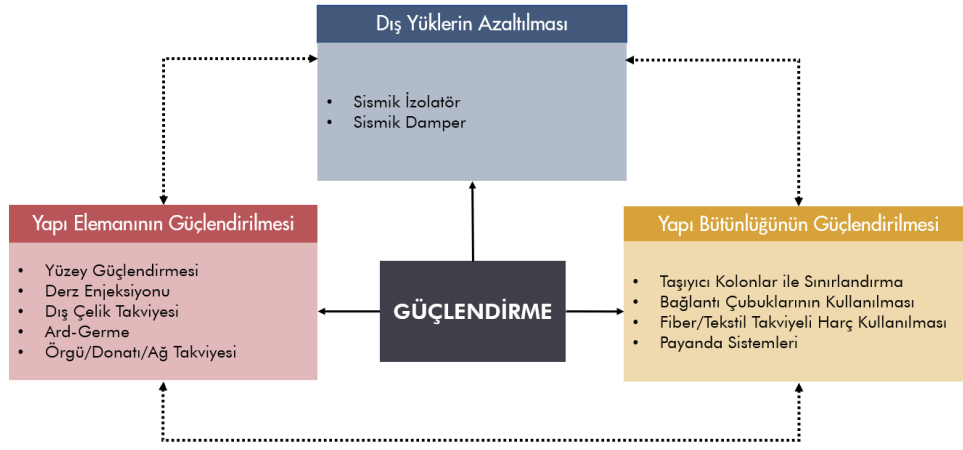
Bu çalışmanın amacı, tarihi yapılara yapılacak yapısal müdahalelerin hassas dengesini değerlendirmektir. Koruma ve müdahale arasındaki bu dengenin incelenmesi, güçlendirme sistemlerinin etkinliklerinin karşılaştırılmasını ve beraberinde mevcut tüzük ve yönetmeliklerde belirtilen güçlendirme ilkelerinin ele alınmasını gerektirmektedir. Çalışma, öncelikle tarihi yapılarda uygulanan güçlendirme tekniklerini ortaya koymaktadır. Bu süreç kapsamlı bir literatür taramasını ve günümüze kadar gerçekleştirilen deneysel çalışmalara yer vererek güçlendirme tekniklerinin detaylı analizini içermektedir. Beraberinde bu tekniklerin yapıda göstermiş olduğu etkiler tablolaştırılmış ve değerlendirilmiştir. Tarihi yapılara uygulanacak müdahaleler öncesinde dikkat edilmesi gereken hususları içeren tüzük ve yönetmeliklerde, güçlendirme uygulamaları ile ilgili maddeler açığa çıkarılmıştır. Güçlendirme teknikleri ve maddeler arasındaki uygunluk durumuna dair değerlendirmelere yer verilmiş ve beraberinde Türkiye’de önemli bir kültürel miras bölgesi olan Mardin’de güçlendirme tekniklerine ihtiyaç duyan yapılar örneklendirilmiştir. Güçlendirme tekniklerinin maddeler ile uygunluk durumunun tespiti ve Mardin özelinde tartışmaya açılması, çalışmanın özgün değerini oluşturmaktadır. Özellikle Mardin gibi tarihi miras

değeri yüksek bölgelerde yer alan tarihi yapıların korunması ve yeniden kullanımı, mimarlık, mühendislik, sanat tarihi, arkeoloji gibi farklı disiplinlerin iş birliğini gerektirmektedir. Ancak bu disiplinler arasındaki iletişim ve eşgüdüm sıklıkla yetersiz kalmaktadır. Sonuç olarak, bu çalışma, tarihi yapılara yapılacak müdahalelerde uyulması gereken ilkelerin kapsamlı bir değerlendirmesini sunarak, koruma-müdahale dengesinin sağlanmasına yönelik bir çerçeve oluşturmayı hedeflemektedir.

2. MATERYAL VE METOD (MATERIALS AND METHODS)

Tarihi ve kültürel miras yapıları, inşa edildikleri dönemin kültürel, sosyal, tarihsel ve dini değerlerinin aktarımında kritik öneme sahiptir [21]. Bu nedenle, yıkılma tehlikesi altında bulunan bu tür mimari yapıların güçlendirilmesi ve korunması için kapsamlı restorasyon projelerinin geliştirilmesi gerekliliği ortaya çıkmaktadır. Tarihi yapıların korunması, geçmiş ile günümüz arasındaki kültürel sürekliliğin ve kimliğin sağlanması açısından büyük önem taşımaktadır [22]. Dolayısıyla, bu tür mimari mirasın yapısal güçlendirilmesi ve restorasyonu, sürdürülebilir koruma çalışmaları arasında öncelikli konular arasında yer almalıdır.

Tarihi yığma yapıların güçlendirilmesinde, teknolojik gelişmeler ışığında çeşitli yeni teknik ve uygulamalar ortaya çıkmaya devam etmektedir. Bu kapsamdaki tüm yaklaşımların ortak amacı, kültürel ve tarihsel değerlerini barındıran geleneksel yapıların yıkımını engelleyerek, özgün mimarilerinin gelecek nesillere aktarılmasını sağlamaktır. Özellikle son yıllarda, deprem, ağır rüzgarlar, patlama gibi güçlü dış yükler karşısında savunmasız kalan bu yapılar için sismik güçlendirme yöntemleri geliştirilmiştir. İleri teknolojik yöntemler kullanılarak gerçekleştirilen güçlendirme projeleri, tarihi yapıların işlevselliğini ve güvenliğini artırırken, özgün mimari özelliklerinin de korunmasına olanak tanımaktadır. Çalışma kapsamında mevcut ve geliştirilmekte olan güçlendirme teknikleri, dış yüklerin azaltılması, yapı elemanının güçlendirilmesi ve yapı bütünlüğünün güçlendirilmesi olmak üzere üç temel kavramda ele alınmıştır (Şekil 1).



Şekil 1. Yığma yapıların güçlendirilmesinde temel üç kavram ve yöntemleri - Yazar tarafından oluşturulmuştur. (Three basic concepts and methods of retrofitting of masonry constructions - Created by the author.)

Çalışma 3 aşamalı bir sürecin ardından hedeflediği sonuca erişmektedir (Şekil 2). İlk aşama, yığma yapıların güçlendirilmesinde kullanılan tekniklere dair bir kavramsal alt yapının oluşturulmasıdır. Bu süreç, sistematik literatür taramasını içermektedir. Literatürdeki mevcut çalışmalar incelenmiş ve güçlendirme tekniklerine dair detaylı bilgiler sunulmuştur. İkinci aşamada ise elde edilen bilgiler analiz edilmiş, güçlendirme tekniklerinin etkinlikleri ortaya konmuştur. Her güçlendirme tekniği, yığma bir yapının strüktürel iyileştirmesine farklı etki etmektedir. Dolayısıyla bu teknikler arasındaki farkı sunmak amacıyla literatürdeki deneysel çalışmalar sonucu ile bir tablo oluşturulmuştur. Bu tablo, güçlendirme tekniklerinin uygulanacağı sırada nasıl bir etki oluşturacağına dair ön bilgi sunmaktadır. Son aşamada ise mimari miras yapılarına uygulanacak olan müdahalelerin, titizlikle ve yapının özgün durumuna zarar vermeden uygulanması gerektiğine

dair uyulması gereken uluslararası koruma tüzük ve ölçütlerinde yer alan güçlendirme maddelerine yer verilmektedir. Tüzükler içerisinde yer alan bu maddeler ayrıştırılarak tablo haline getirilmiştir. Bu aşamaların ardından, tarihi ve kültürel değeri olan bir yapıya uygulanacak güçlendirme tekniğinin, uygulanma sürecine ve tüzüklere uygun olup olmadığına dair değerlendirmelere yer verilmiştir. Değerlendirmeler kategorize edilmiş ve güçlendirme teknikleri ile tüzükler arasında değerlendirme noktaları oluşturulmuştur. Bu noktalar, hem tüzük maddeleri hem de güçlendirme teknikleri hakkında bilgi sahibi olma sürecini hızlandırmıştır. Beraberinde, uzun yıllardır farklı medeniyetlere ev sahipliği yapmış ve Anadolu'da birçok önemli eseri tarihi dokusunda barındıran Mardin kentinde, güçlendirmeye ihtiyaç duyduğu yapılan gözlemler ile belirlenen mimari miras eserleri tablo haline getirilerek tartışmaya açılmıştır.



Şekil 2. Çalışma aşamalarının temsili - Yazar tarafından oluşturulmuştur. (Representation of the stages of study - Created by the author.)

Çalışmada gerçekleştirilen bu aşamalar, tarihi yapıların güçlendirilmesinde kullanılan tekniklerin literatürde yer alan bilgilerin edinilmesini ve koruma tüzükleri bağlamında etkilerinin değerlendirilmesini sağlamıştır.

3. BULGULAR (RESULTS)

Tarihi yapıların korunması ve güçlendirilmesi için son yıllarda teknolojik gelişmelere paralel olarak çeşitli teknikler öne çıkmaktadır. Bu teknikler, dış yüklerin etkisinin azaltılması, yapısal elemanların güçlendirilmesi ve yapısal bütünlüğün

güçlendirilmesi olmak üzere üç ayrı başlıkta ele alınmıştır.

3.1. Dış Yüklerin Etkisini Azaltmak Amacıyla

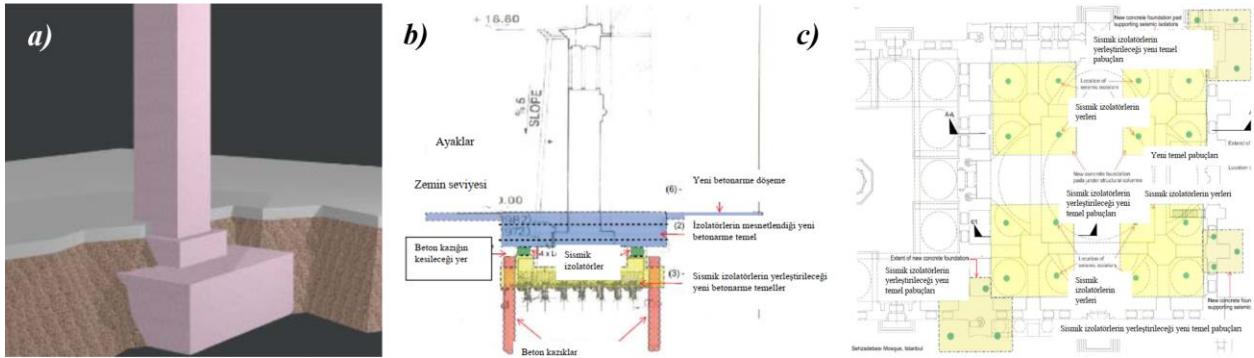
Güçlendirme (Retrofitting to Minimise the Effect of External Loads)

Deprem, yer kabuğu içinde biriken enerjinin ani olarak ortaya çıkması ile yer kabuğunda ötelenmelere neden olmaktadır. Bu ötelenmeler de enerjinin etkisi ile çok ani olmakta ve yapılarda şok etkisi yaratmaktadır. Yapı, yer kabuğundan ayrı bir kütle olması nedeni ile zeminde oluşan yer hareketine ters yönde yapı içerisinde atalet kuvvetleri oluşmaktadır [23]. Yapıda büyük hasarlara ve yıkımlara neden olabilecek atalet kuvvetlerine karşı yapılarda güçlendirme/iyileştirme çalışmaları yapılmaktadır.

3.1.1. Sismik izolatör (Seismic isolator)

Sismik izolatörlerin (taban izolasyon sistemi), yığma yapıların depreme karşı güçlendirilmesinde oldukça etkili bir strateji olduğu bilinmektedir. Bu yaklaşım, yapının temeli ile yapı arasına esnek ve hareketli bir sistem yerleştirilerek, deprem hareketlerinin yapı içerisine aktarılmasını engellemeyi hedefler [24-25]. Böylece, sismik izolatörler aracılığıyla deprem kuvvetlerinin etkisi büyük ölçüde azaltılabilmektedir [26]. Sismik izolatörler, yapısal elemanlara doğrudan müdahale edilmeksizin, temel seviyesinde bir güçlendirme sağlamaktadır [27]. Tarihi bir yapıda sismik izolatörlerin yerleştirilmesi, yeni inşa edilen

betonarme ve karkas sistemli yapılarda olduğu kadar basit bir süreci içermemekte ve özenle planlanmış adımlar gerektirmektedir. Soyluk [28] çalışmasında Şehzade Mehmet Cami için bu sürecin nasıl uygulanabileceğine dair süreci detaylandırmıştır. İlk olarak, mevcut yapının temel sistemine zarar vermemek amacıyla fil ayaklarının çevresinde yer alan tabliye kaldırılmaktadır (Şekil 3a). Bu işlem, izolatör uygulama sürecinde gerçekleştirilecek temel işlemlerinin kolaylıkla yapılabilmesi için gereklidir. Ardından, mevcut temeller sondajla delinerek fore kazıklar yerleştirilmektedir ve böylece temel zemine güvenli bir şekilde sabitlenmektedir (Şekil 3b). Bu adımları takiben, fil ayaklarının çevresinde sismik izolatör ölçüleri referans alınarak kare planlı çukurlar açılmakta ve mevcut taş temele yatay delikler açılarak beton bilezikler dökülmektedir. Bu beton bilezikler, ardgermeli kablolar ile taş temele bağlanarak eski ve yeni malzemenin birlikte çalışması sağlanmaktadır. Beton bileziklerin altı kazılıp mevcut temel kaldırıldıktan sonra, sismik izolatörlerin yerleştirilmesi için yeni betonarme temel pabuçları yerleştirilmektedir (Şekil 3c). Kurşun kauçuk mesnetler bu pabuçlar üzerine yerleştirilmekte ve yük güvenli alınması için öngerme yapılmaktadır. Son olarak, sismik izolatörlerin işlevini yerine getirebilmesi için cami çevresinde 30 cm'lik sismik boşluklar oluşturulmaktadır. Bu işlemler, yapının tarihi karakterini koruyarak çağdaş malzemeler ile tarihi yapıların sismik güvenlik tedbirlerinin entegrasyonunu sağlamaktadır.



Şekil 3. Tarihi yapılarda sismik izolatör uygulaması Şehzade Mehmet Cami örneği - a) Tabliyenin kaldırılma işlemi, b) Temel kesiti, c) Yeni temeller üzerinde izolatörlerin yerleştirme planı [28].
(Seismic isolator application in historical buildings Şehzade Mehmet Mosque example - a) Removal of the slab, b) Foundation section, c) Installation of isolators on new foundations [28].)

Taban izolasyon sistemlerinin çalışma prensibi üstyapı ile temel arasında yanıl rijitliği düşük elemanlar koyarak deprem nedeniyle oluşan deplasmanların temel ile üst yapı arasında olmasını sağlamak ve binaya ankastre temelli periyodundan ve deprem hareketinden daha büyük bir periyod vermektir [28]. De Luca vd. [29] deneyleri sonucunda, izolatörlerle takviye edilen bir duvar

parçasının, dış etkilere karşı 2,8 ile 24 kat daha küçük bir yer değiştirme yaşadığı ve kuvvetlerin, ankastre temele kıyasla 1,5 ile 15 kat azaldığını tespit etmiştir.

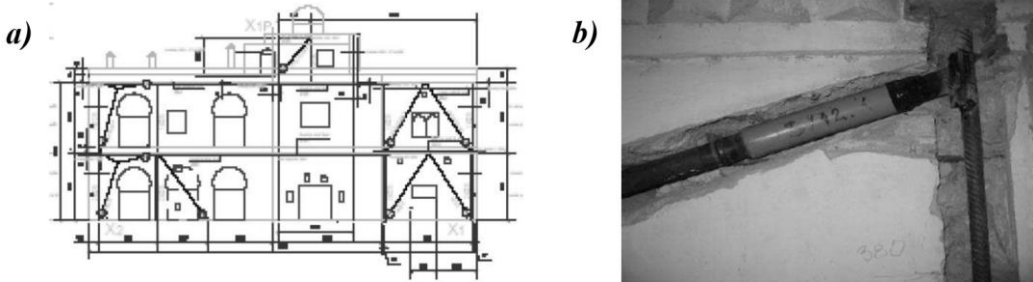
Sismik izolatörler, özellikle yapının orijinal görünümünü koruyabildiği ve görünmeyen bölgelerde müdahaleler gerçekleştirildiği için tarihi

yapılarda uygun bir güçlendirme stratejisi olarak tercih edilebilmektedir [30]. Ancak, bu tekniği mevcut bina altında uygulamanın günümüzde kolay bir yöntemi bulunmamaktadır. Taban izolasyon sistemi genellikle, yapıda oluşabilecek sismik yüklere direnmek için maksimum kapasitenin kullanıldığı bir teknik olarak görülmektedir [31]. Seki, vd. [32], lamine kauçuk ve amortisörü birlikte kullanan taban izolasyon teknolojisini kullanarak eski bir yığma şapel binasına güçlendirme uygulamıştır ve bu tekniğin sismik yüklenmeye karşı koyabilmesi ile birlikte tarihi yapının mimari özelliğini de koruyabileceği görülmüştür. Soyuk ve Tuna [10] yaptığı çalışmada, tarihi Şehzade Mehmet Cami'nde sismik taban izolatör uygulamasının dinamik davranışı önemli ölçüde iyileştirdiği sonucuna varmış ve ayrıca tarihi yapılarda orijinal dokuyu bozmadan güçlendirmenin sismik izolatörlerle sağlanabileceğine değinmişlerdir. Nanda, vd. [33], taban izolatör sistemi kullanılarak güçlendirilmiş yığma yapının, geleneksel ankastre taban yapısına kıyasla ivmelerinde %50'lik bir azalmaya sahip olduğunu tespit etmişlerdir. Tomažević, vd. [34], bu tekniğin tek başına iyileştirilmesinin yeterli olmadığı durumlarda diğer takviye malzemeleri ile kombinasyon halinde uygulanmasının da sismik davranışı büyük ölçüde iyileştirdiği sonucuna ulaşmıştır. Sismik izolatörler sadece yığma binalara değil, aynı zamanda kule, taç kapı gibi yapısal olmayan ağır monolitik nesnelere de

uygulanabilmektedir. Chiozzi, Simoni ve Tralli [35], İtalya-Ferrara'da yığma sistemli şehir kapısında sismik izolatör deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Sismik izolatörlerin en verimli uygulaması, inşası daha kolay olacağından yeni inşa edilen bina üzerinde olmaktadır. Bu teknik, tarihi yığma yapılarda özgünlüğü koruyabildiği için uygun olsa da, mekanik uygulama işi hem çok zahmetli hem de tüm yapıya müdahale gerektiren bir durumdur.

3.1.2. Sismik damper (Seismic damper)

Sismik damper, yapılarda depremin neden olacağı enerjiyi dağıtmak için kullanılan mekanik bir araçtır [36]. Deprem sırasında sismik enerji, damperler aracılığı ile alt yapıdan üst yapıya iletilmektedir. Enerjinin bir kısmı damperler tarafından emilerek dağıtılmaktadır (Şekil 4a-b). Bu durum sonucunda bina içerisinde deprem kuvveti sönümlenmektedir [37]. Damper ilk olarak yüksek binalarda rüzgar etkilerine karşı koymak için kullanılmıştır [38]. Daha sonra zamanla deprem etkilerine karşı yapılara entegre edilmiştir. Oldukça farklı tipte sismik damperler geliştirilmiş ve uygulanmıştır. Sismik damperlerin kullanımı, sismik kırılma eğilimi önemli ölçüde azaltabilmektedir [39]. Günümüze kadar, sismik sönümleyicilerin uygulamalarının çoğu, yerleştirilmeye uygun olduğu için karkas yapı sistemleri üzerinde gerçekleştirilmiş, yığma binalar için az sayıda araştırma mevcuttur.



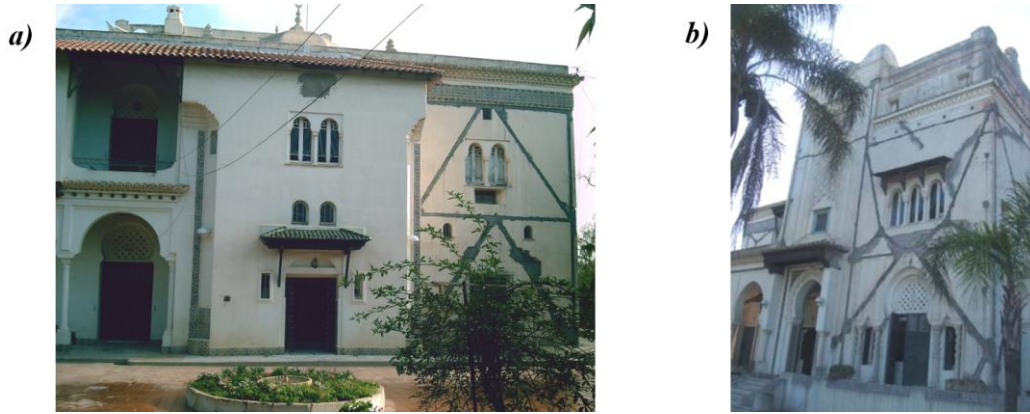
Şekil 4. Sismik damper - a) Şematik kesit çizimi, b) Uygulama bağlantı detayı [40]. (Seismic damper - a) Schematic section drawing, b) Application joint detail [40].)

Longarini ve Zucca [41], ayarlı kütle damperleri (Tuned Mass Damper-TMD) kullanarak tarihi bir yapıdaki sismik tepkiye iyileştirme teknikleri geliştirmiş ve tarihi yapının, gerilim, taban kesme ve üst yer değiştirme değerlerinin iyileştiğini tespit etmişlerdir. Benedetti [42], bu tekniği taş yığma yapıları güçlendirmek için önermiş ve önemli strüktürel iyileşmeler sağladığını belirlemiştir. Sismik damper ile güçlendirme, yığma binalarda fazla tadilat-yıkım ve uzun inşaat süreleri gerektirmektedir (Şekil 5a-b). Bu nedenle, ek sönümleme ve sertlik damperleri (Added Damping and Stiffness-ADAS) olarak adlandırılan alternatif bir damper önermiştir ve ADAS damperleri ile

donatılmış yeni dış beton duvarların yapıya eklenmesiyle oluşturulan bu sistem ile yığma yapıya müdahaleler mümkün olduğunca azaltılmıştır. Ayrıca Gocevski ve Petraskovic [43], çelik destek ve sismik damperlerin bir kombinasyonunu kullanarak yığma yapılar için bir model önerisinde bulunmuştur. Yapılan analizler sonucunda, damperlerin büyük miktarda sismik enerji yaydığını ve aşırı deformasyon ve çatlakları önlediği gözlenmiştir. Bununla birlikte, sismik damperin verimli olması için büyük deformasyonlar gerektirmesi ve yığma yapıların rijit özelliğe sahip olması nedeniyle bu tekniğin yığma yapılar için verimli olmayabileceğini savunan araştırmalar da

bulunmaktadır [44]. Günümüzde, daha önce de değinildiği üzere sismik damperler çerçevesi

yapıların güçlendirilmesinde daha yaygın olarak kullanılmaktadır [45].



Şekil 5. Sismik damper ile güçlendirilen Cezayir'deki bir yığma yapının görünümüleri - a) Güneybatı cephesi, b) Kuzeydoğu cephesi [40]. (Views of a masonry building in Algeria retrofitted with a seismic damper - a) South-west facade, b) North-east facade [40].)

3.2. Yapı Elemanını Güçlendirme (Retrofitting the Building Element)

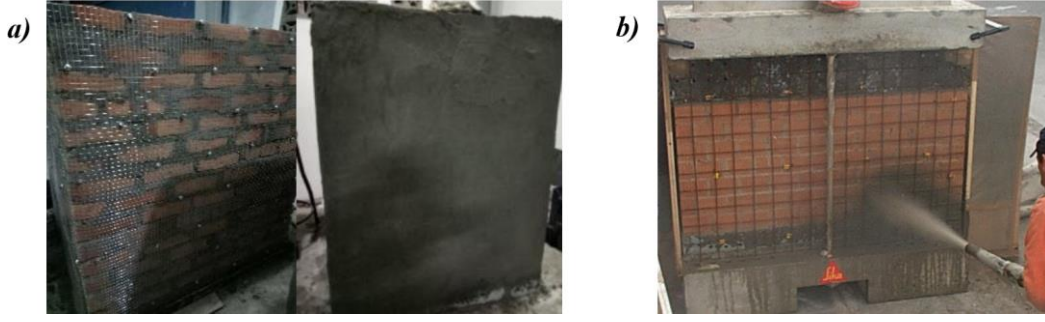
Yığma yapı sistemlerinde güçlendirme gerektiren temel strüktürel elemanlar arasında düşey taşıyıcılar, eğri akslı elemanlar, geçiş bölgeleri, destek sistemleri ve örtü elemanları yer almaktadır. Bu tür yapısal bileşenlerin mukavemet kapasitelerinin artırılması, yığma yapının tüm yük taşıma performansını iyileştirmektedir [46]. Böylece, yapının beklenmedik dış yükler karşısındaki direnç kabiliyeti de yükselmiş olmaktadır. Günümüzde, yığma yapıların güçlendirilmesinde, söz konusu yapısal elemanların mukavemet ve dayanım özelliklerinin artırılmasına yönelik teknikler diğer güçlendirme yaklaşımlarına kıyasla daha yaygın olarak tercih edilmektedir [47]. Bu durum, bu tür güçlendirme müdahalelerinin etkinliği ve uygulanabilirliği açısından genel kabul gördüğünü göstermektedir.

3.2.1. Yüzey güçlendirmesi (Surface retrofitting)

Genel yüzey güçlendirme işlemi, takviye malzemelerinin orijinal yapıya tutturulması, harç veya çelik bağlantılar kullanılarak birbirine bağlanması ile sağlanmaktadır [48]. Yüzey işlemede en sık kullanılan yaklaşım püskürtme beton (shotcrete) ve ferro-cement uygulamalarıdır. Ferro-cement genellikle sık aralıklarla serilmiş, sürekli ve küçük çaplı tel örgülerle donatılmış çimento harcından oluşan ince kesitli bir betonarme çeşididir (Şekil 6a) [18,49]. Püskürtme beton, yığma duvarın yüzeyine monte edilmiş bir tel örgü üzerine püskürtme beton püskürtülerek

uygulanmaktadır (Şekil 6b). Genellikle müdahale kalınlığı 7 cm ile 15 cm arasında değişmektedir. Püskürtme betonunun uygulanmasından önce, hasarlı tuğlaların çıkarılması ve boşlukların doldurulması gerekmektedir [50]. Karantoni ve Fardis [51], her iki yüzeydeki püskürtme beton müdahalesinin, duvar gerilimini ortalama % 50 azaltabildiğini, tek taraflı püskürtme beton kaplamanın ise gerilimi yaklaşık üçte bir azalttığını tespit etmiştir. Augenti, Nanni ve Parisi [52], uygulanacak duvar yüzeyinin pürüzlülüğü de güçlendirme işleminin etkinliğini belirlemede önemli bir rol oynadığını ve hasar almış veya bozulmuş kısımların çıkarılmasından sonra uygulanacak yığma duvar yüzeyi özellikle pürüzlü ise püskürtme betonun güçlendirmesi daha etkili olduğunu belirtmişlerdir.

Ferro-cement, yüksek mukavemetli (15-30MPa) bir çimento harcı tabakasına (10-15mm kalınlık) gömülü yakın aralıklı çok sayıda tel örgü katmanlarından oluşmaktadır [53]. Ferro-cementin mekanik özellikleri, örgü özelliklerine bağlıdır. Bunun nedeni müdahale sırasında uygulanan tel örgü, çatlama ve hasar anından sonra duvar ünitelerini sınırlayarak düzlem içi elastik olmayan deformasyon kapasitesini arttırmasıdır. Abrams ve Lynch [54] tarafından yapılan deneyde, bu güçlendirme tekniği ile düzlem içi yanıl yüklerle karşı direncin yaklaşık olarak %150 arttığı görülmüştür. Kadam, Singh ve Li [55], yığma duvarın uzun yönüne yapılacak olan sadece %0,29 takviyenin, duvarın düzlem dışı yönde mukavemetini 10 kattan fazla arttırabileceğini tespit etmiştir.



Şekil 6. Yığma duvar yüzeyine güçlendirme uygulamaları - a) Ferro-cement uygulaması [56], b) Püskürtme beton uygulaması [50]. (Retrofitting applications on masonry wall surface - a) Ferro-cement [56], b) Shotcrete [50].)

Genel olarak, yüzey işleme yöntemi, duvar yapısının mukavemetine ve rijitliğine önemli ölçüde katkı sağlamaktadır. Ayrıca, her iki uygulama türünde de yığma duvarın yükseklik/derinlik oranı değişmekte ve bu değişiklik sayesinde duvarın düzlem içi yanal direnci ve düzlem dışı stabilitesi de artabilmektedir [57]. Düşey taşıyıcı elemanlar için daha uygun olan bu güçlendirme tekniğinin, uygulamada çok fazla zaman harcanması ve özgün görünümüne zarar vermesi gibi dezavantajları bulunmaktadır. Dolayısı ile bu tekniğin kültürel değere sahip yığma yapı duvarlarında güçlendirilmesi kimi zaman uygun karşılanmamaktadır.

3.2.2. Derz enjeksiyonu (Grout injection)

Yığma yapı sistemlerinde, bazı durumlarda kagir birimlerin güçlendirilmesine ihtiyaç duyulmazken, harç bağlayıcısının zayıf, parçalanmış veya tamamen kaybolması, duvarın genel stabilitesini tehlikeye atabilmektedir [58]. Bu nedenle, hasar görmüş harcın daha yüksek mukavemet sağlayan yeni bağlayıcı malzemelerle değiştirilmesi veya onarılması gerekmektedir [59]. Bu kapsamda, derz enjeksiyonu yöntemi yığma yapıların güçlendirilmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır [60]. Bu teknikte, bozulmuş derz bölgeleri, özel enjeksiyon malzemeleri ile doldurulmaktadır (Şekil 7). Böylece, duvarın davranışı ve bütünlüğü

yeniden sağlanarak, yapının genel mukavemet kapasitesi artırılmaktadır.

Derz enjeksiyonu, derz aralıklarında bulunan boşlukları ve çatlakları doldurarak gerçekleştirilmektedir. Çok dar çatlaklardan büyük boşluklara kadar değişen boşlukları doldurmak için çeşitli harç türleri geliştirilmiştir. Bu tekniğin, duvarın rijitliğini ve mukavemetini özgün durumuna getirmede etkili olduğu, ancak özgün rijitlik veya mukavemet özelliklerinde önemli bir gelişme sağlayamadığı tespit edilmiştir. Harç malzemesi daha yüksek mukavemetli bir malzeme ile değiştirilebilse de, iyileştirmenin özgün durumunda önemli bir gelişime katkı sağlamadığı ve harca %2 sıradan Portland çimentosu eklenmesinin nihai hızlanma direncinde çok az veya hiç fark yaratmadığı belirlenmiştir [62]. Bununla birlikte, bu tekniğin etkinliği, diğer tekniklerle birlikte kullanıldığında artırılabilir. Tinazzi vd. [63], FRP çubukları ile yığma yapı üzerinde derz enjeksiyonu tekniğini birleştirerek çalışma yürütülmüş ve sonuçlar, FRP laminatları ile birlikte derz enjeksiyonu tekniğinin kullanılmasının en etkili güçlendirme tekniklerinden biri olduğunu göstermiştir. Bu yaklaşımın, ancak derz karışımında kullanılan malzemelerin mekanik özelliği ve takviye edilecek duvar ile fiziksel ve kimyasal uyumluluğu sağlandığı koşullarda yapının strüktürel sistemine katkı sağlayacağına dikkat edilmesi gerekmektedir.



Şekil 7. Tuğla yığma duvar üzerinde derz enjeksiyonunun yapılması [61]. (Grouting on a brick masonry wall [61].)

Yığma yapıların güçlendirilmesinde özgün görünümün yanı sıra fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikler açısından uyumluluğun korunması da önemli konulardandır [64]. Bu durum öncelikle yığma yapının özgün durumunun güçlendirme müdahaleleri sonrası da görünümünü koruması gerekirken; aynı zamanda, kullanılan malzemelerin fizikokimyasal ve mekanik performans açısından da yığma yapı malzemesi ile iyi bir uyumluluğa sahip olması gerektiği anlamını taşımaktadır. Uyumsuz güçlendirme materyallerinin kullanımı, çürüme mekanizmalarını başlatabilmekte ve yığma yapıda büyük zararlara yol açabilmektedir [65]. Bu nedenle, derz enjeksiyonlarında, yığma yapının uzun vadeli dayanıklılığını sağlamak için uyumluluk değerlendirmesi yapılması ve malzeme analiz/deneyleri sonucu müdahalelerin uygulanması gerekmektedir. Apostolopoulou vd. [66], derz enjeksiyonu sırasında malzeme seçimi için kırılma analizi ile ilgili metodolojik bir yaklaşım sunmuş ve belirlenen uyumluluk ve performans gerekliliğine uyan optimum harcın seçimi, güçlendirme malzemelerinin karakterizasyonu ve yığma yapının malzeme araştırılması sırasında ortaya çıkan gereksinimler belirlenerek gerçekleştirilmiştir. Pusat [67], farklı oranlarda hazırlanan harç numuneleri üzerinde yapılan çeşitli deneylerle, hangi karışım oranlarının mukavemet, fiziksel ve estetik olarak ihtiyaca cevap verebilecek nitelikte olacağını ele almış ve güçlendirilecek binanın mevcut harç bileşimlerine en yakın özellikte yeni malzemelerin kullanılması gerektiği sonucuna varmıştır. Akbulut [68], hazırladığı doktora tezinde yer verdiği deneyler sonucunda farklı iklim şartları için tarihi yapıların onarımında kullanılabilir harç karışımları önermiş ve yığma yapının malzeme özellikleri ile beraber bulunduğu coğrafi konumun da yapılacak olan müdahalelerde etkisinin olduğunu göstermiştir. Derz enjeksiyonu ile gerçekleştirilen güçlendirme tekniğinde, yığma yapıların standardize edilemeyen özelliklerinden dolayı, belirli bir formül veya sistem bulunmamaktadır. Her yığma yapı için farklı analizler yapılmalı, dönemin şartları değerlendirilmeli ve en uygun malzeme kullanılmalıdır.

3.2.3. Dış çelik takviyesi (External steel retrofitting)

Dış çelik takviye uygulaması, birbirine zayıf bağlanabilen veya bağlanamayan özgün yığma yapı elemanlarının arasına çelik elemanlar yerleştirilerek birlikte davranmasını sağlamaktadır. Yığma yapılara etkiyen yükler sonrasında küçük çatlaklar meydana gelebilmektedir ve bu çatlaklar, yapının yük taşıma kapasitesini aşması durumunda genişleyerek taşıyıcı sistemde büyük hasarlara

neden olabilmektedir. Buna karşılık güçlendirilen yığma yapılarda dış çelik takviyesi, çatlamanın yayılmasına ve genişlemesine engel olmaktadır [69,70]. Bu gibi durumlarda, dış yük takviye edilen çelik sistem tarafından taşınırken, özgün kagir sistem yük taşımak yerine yapısal bir eleman olarak çalıştırılmaktadır. Taghdi [71], çelik elemanların doğrudan yığma yapı duvarına tutturulmasıyla bir araştırma yapmıştır ve sonuçlar, güçlendirilmiş duvarın düzlem içi yönündeki yanal mukavemetinin yaklaşık 4,5 kat arttığını göstermiştir. Çeliğin mekanik özellikleri sayesinde etkili bir güçlendirme malzemesi olduğu için bir yapının yük direncini arttırmada etkili olmaktadır. Bu nedenle, bu yaklaşım zayıf yığma yapılar veya önemli ölçüde iyileştirilmesi gereken yapılar için tercih edilmektedir. Ancak çeliğin görünümü yığma yapının özgün görünüşüne uygun bir yenileme yaklaşımı olarak görülmemektedir. Ayrıca, yüksek maliyeti nedeniyle de çok sık tercih edilmemektedir.

3.2.4. Ard-germe (Post-tensioning)

Ardgerilmeli güçlendirme yönteminde, yapının yanal yüke dirençli çerçevesinin mukavemetini ve sünekliğini iyileştirmek amacıyla ön gerilmeli takviyeler yerleştirilmektedir [69,72]. Bu yöntem, duvar yüzeyi içinden bir delik açılması ve deliğe öngerilmeli takviyenin dikey olarak yerleştirilmesiyle gerçekleştirilmektedir (Şekil 8). İşlem sonucunda yapıya etkiyen basınç kuvveti, yığma duvarda oluşan gerilme kuvvetine karşı koyabilen ve böylece yük taşıma kapasitesini artıran ön gerilmeli takviye tarafından karşılanmaktadır [73]. Amiraslanzadeh vd. [74] çalışmalarında gerçekleştirdikleri deneyler sonucunda, ardgerme yöntemi ile yığma duvarların yanal yük direncinin iki katına çıkarılabileceğini göstermişlerdir. Al-Manaseer ve Neis [75] çalışmalarında, ardgerme yöntemi ile güçlendirilen bir yığma yapı duvarının eğilme dayanımını analiz etmek için deneyler gerçekleştirmiş ve ardgerme çeliklerin, yığma duvarın sünekliğini arttırmadığı ancak mukavemet ve rijitlik özelliklerini önemli ölçüde iyileştirdiğini tespit etmişlerdir. Korkmaz vd. [76] çalışmalarında, farklı konfigürasyonlarda uygulanmış elastik şeritlerle ard-germe yönteminin kullanılabilirliğini tespit etmek amacı ile 1:10 ölçekli maket yığma yapıları, artan ivmeler altında OTDÜ laboratuvarlarında test etmiş ve yatay şeritlerle yapılan güçlendirme sonucunda dayanımı %70, düşey şeritlerle yapılan güçlendirme sonucunda %40, hem yatay hem de düşey şeritlerle yapılan güçlendirme sonucunda %110 artış olduğunu belirlemişlerdir.



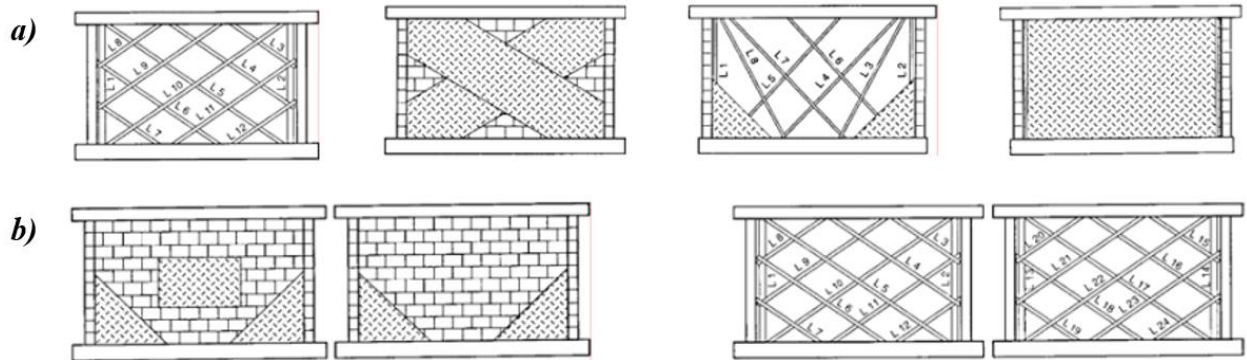
Şekil 8. Ardgerme tekniğinin uygulanması [74]. (Implementation of the post-tensioning technique [74].)

3.2.5. Örgü-donati-ağ takviyesi (Knit-ribbing-mesh retrofitting)

Fiber Takviyeli Polimer (Fiber Reinforced Polymer – FRP), yığma sistemli yapıları güçlendirmek için en sık kullanılan ağ takviyesidir. FRP kompoziti ilk olarak mevcut beton yapıları güçlendirmek için kullanılmıştır. Zamanla yığma ve ahşap sistemli yapılara da uygulanmış ve kapsamlı bir şekilde incelenmiştir [77]. Genel olarak, FRP kompozitleri kullanılarak yığma duvarlarının güçlendirilmesi, duvar yüzeyinin mukavemetini yaklaşık 1.1 ile 3 kat arttırabilmektedir. Elgawady vd. [78], karbon fiber ile güçlendirilmiş duvar yüzeyi üzerinde bir analiz yaparak yüzey direncinin %13-84 oranında geliştirilebileceğini bulmuştur. Mahmood ve Ingham [79], FRP'nin yığma binaların kayma direncini 3.25 kat arttırdığı tespit edilmiştir. Valluzzi, Tinazzi ve Modena [47] çalışmalarında, farklı konfigürasyonlarda FRP'nin etkinliğini araştırmak için ızgara düzenlemesi ve çapraz şeritler oluşturmuş ve takviye malzemesinin asimetrik uygulanmasının, yığma duvarların kesme

direncinin iyileştirilmesinde etkili olmadığı belirtilmiştir (Şekil 9a-b). Tarihi yığma yapılarda yer alan kemerlerin güçlendirilmesinde kullanılan FRP uygulamaları, özellikle hasarlı kemerlerin taşıma kapasitesini arttırmada etkili bir yöntem olarak öne çıkmaktadır. Yapılan çalışmalarda, hasar görmüş kemerlerin farklı FRP teknikleriyle güçlendirilmesi sonucunda, bu yapı elemanlarının yük taşıma kapasitelerinde önemli iyileşmeler sağlandığı gözlemlenmiştir. Örneğin, Fırat ve Eren [80] çeşitli FRP uygulamalarının, hasarlı kemerlerin taşıma kapasitesini %58'e varan oranlarda arttırdığı tespit edilmiştir. Bal ve Şimşek [12] çalışmalarında farklı FRP uygulamalarının yığma yapılarıdaki performans etkileri analiz edilmiş ve projeye özgü uygulama örnekleri sunulmuştur.

Bu bağlamda, FRP'nin yüksek mukavemet, esneklik ve hafiflik gibi özellikleri sayesinde, tarihi yapıların zarar görmeden güçlendirilmesi mümkün kılınmıştır [81]. Bu çalışmalar FRP'nin tarihi yapılar üzerindeki etkinliğini göstermesi açısından önemli bir bulgudur.



Şekil 9. FRP uygulamalarının temsili - a) Yığma duvarın tek yönüne uygulanan örnek FRP takviyesi, b) Yığma duvarın iki yönüne uygulanan örnek FRP takviyesi [78]. (Representation of FRP applications - a) Sample FRP applied to one side of masonry wall, b) Sample FRP applied to two sides of masonry wall [78].)

FRP farklı güçlendirme ve iyileştirme malzemeleriyle kombinasyon halinde uygulanabilmektedir (Şekil 10). Saleem vd. [82], FRP ve Polipropilen (PP) bandının birleşik kullanımının, tekil kullanımlarından çok daha üst

performans sergilediği tespit etmiş ve FRP ile güçlendirilen duvarlarda, FRP'nin duvar yüzeyinden ayrılmamasının önemli bir rol oynadığını belirtmiştir.

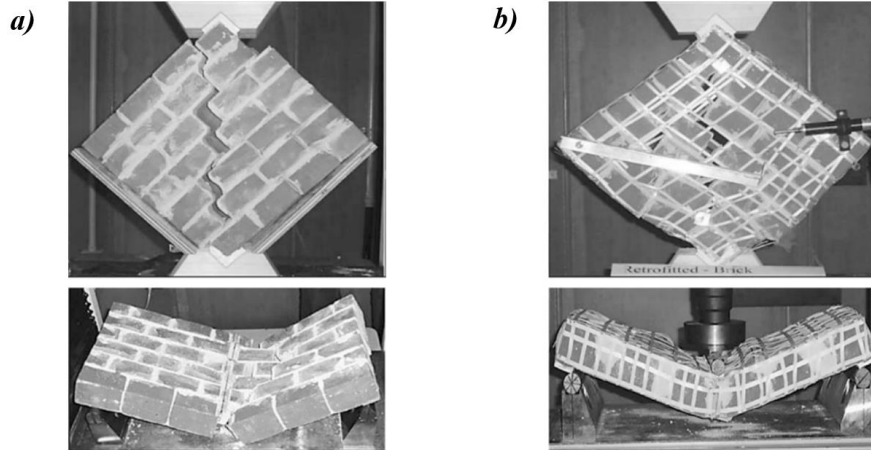


Şekil 10. FRP + PP-bant güçlendirilmesinin prototip bir ev modeli üzerinde farklı görünüşleri [82].
(Different views of FRP + PP-band retrofitting on a prototype house model [82].)

FRP malzemesinin maliyeti, güçlendirme yaklaşımlarının seçiminde maliyet açısından endişe kaynağı olan çelikten dahi yaklaşık olarak 5 ile 10 kat daha pahalıdır [83]. Ayrıca, bazı deneysel çalışmalarda FRP malzemelerinin özelliği ve performansı, özellikle uzun vadeli davranışları tam olarak anlaşılmamıştır [18]. Dahası, FRP normalde yığma duvar yüzeyine şeritlerin veya tabakaların harici olarak tutturulmasıyla uygulanır ve dolayısı ile su geçirmez bir bariyer oluşturabilmektedir. FRP kompozitleri ile güçlendirme uygulamasında epoksi bazlı yapıştırma malzemesi kullanılması, FRP takviyesinden alınacak verimde azalmaya neden olmaktadır [57]. Maliyetinin fazla olması durumlarda FRP yerine, PP bant veya bambu ağlar alternatif olarak kullanılabilir.

PP bant, Japonya'da uygun maliyetli bir güçlendirme yaklaşımı olarak tanıtılan ve önemli uzama kapasitesine sahip yapı malzemesidir. Sathiparan vd. [84], güçlendirilmiş ve

güçlendirilmemiş duvarlar üzerinde test yaparak PP bant ağı ile güçlendirilmiş duvar yüzeyinde, çatlakların oluşmasından sonra daha yüksek mukavemet sağladığını göstermiştir. Macabuag vd. [85], PP bant tekniğini Nepal kırsalında kerpiç duvar üzerine uygulamış ve bu güçlendirme yaklaşımının, malzeme kaybını önlemede ve duvar bütünlüğünü korumada yardımcı olduğu tespit edilmiştir (Şekil 11a-b). Bu yaklaşım, düşük mukavemetli yığma yapılar ve elemanları için uygun olabilmektedir. Yüksek mukavemetli kagir yapılarda uygulandığında, etkinliğinin azaldığı görülmüştür [85]. Meguro vd. [86], bambu bant ağları kullanarak bir kerpiç evin güçlendirilmesi üzerine bir araştırma yapmış ve güçlendirilmiş kerpiç evin, güçlendirilmeyen örneğe göre iki kat daha fazla dayanıklılık gösterdiğini ortaya koymuşlardır. Güçlendirilecek yığma yapının türüne göre PP-bant ve bambu ağları kullanımı, düşük maliyet ve kolay erişilebilirlik özellikleri sayesinde avantaj sağlayabilmektedir.



Şekil 11. PP bant deney görünüşleri - a) PP bant uygulanmayan eleman, b) PP bant uygulanan eleman [84]. (PP band test views - a) wall without PP banding, b) wall with PP banding [84].)

Carozzi vd. [87], ağ takviyesi uygulamalarının sadece düşey yığma elemanların güçlendirilmesinde etkili olmakla kalmadığını, tonoz ve kemerler gibi yatay elemanların güçlendirilmesinde de önemli ölçüde etkili olduğunu, farklı kompozitlerle güçlendirilmiş

(Tekstil Takviyeli Harç-TRM, Çelik Takviyeli Harç-SRG ve FRP) yığma kemer ve tonozlarda da etkili sonuçlar alındığını deneysel sonuçlar ile göstermişlerdir. Anania, Badalà ve D'Agata [86], yığma tonozlarda karbon fiber takviyeli polimer (Carbon Fiber Reinforced Polymer - CFRP) ile de

güçlendirme deneyleri gerçekleştirmiş ve etkili sonuçlara ulaşmışlardır. Yığma tonozlar ve kemerler üzerinde güçlendirme/iyileştirme hakkında yapılan araştırmalarda, kemerlerin iç ve dış kısımlarında karbon takviyeli polimerler kullanılarak yapılan güçlendirme tekniğinin birçok tekniğe kıyasla etkili olduğu sonucuna varılmıştır [89,90]. Polimer takviyeli lifler, tonozları ve kemerleri güçlendirmek için en yaygın olarak kullanılanlar olmasına rağmen, kırılğan davranışı ve su buharı geçirgenliğinin az olması gibi yığma yapıların korunmasında istenilmeyen dezavantajları da bulunmaktadır [91].

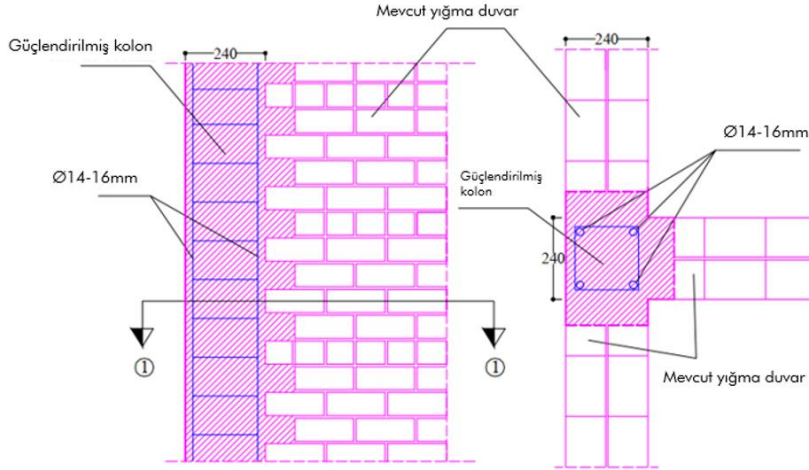
3.3. Yapısal Güçlendirme (Structural Retrofitting)

Yığma yapı sistemlerinde, hasar yoğunluğunun yüksek olduğu durumlarda, sadece belirli yapısal elemanların güçlendirilmesi yeterli olmayabilir. Bu tür hallerde, yapının bütünsel davranışını ve genel mukavemet kapasitesini iyileştirmek için kapsamlı güçlendirme stratejilerinin geliştirilmesi gerekmektedir [92]. Özellikle yığma yapılarda, lokal müdahaleler yerine, yapısal bütünlüğü

sağlayacak ve sistemin tümüne etki edecek güçlendirme önerileri önem kazanmaktadır [93]. Bu yaklaşım, yapının güvenlik ve kullanılabilirlik performansının artırılmasına yönelik bütüncül çözümler sunmaktadır.

3.3.1. Taşıyıcı kolonlar ile sınırlama (Confinement with load-bearing columns)

Söz konusu güçlendirme tekniği, yığma yapının köşe bölgelerinde, duvar birleşim noktalarında ve ayrıca kapı-pencere açıklıklarının çevrelerinde yapısal kolonlar içermektedir [53]. Bu kolonların kirişlerle ilişkilendirilmesi, yapının bütünlüğünü daha belirgin bir şekilde artırmaktadır (Şekil 12). Hem kolonlar hem de kirişler, yığma yapının aynı kat seviyesindeki sınırlandırılmasını sağlamaktadır. Bu güçlendirme yaklaşımı, yığma yapıların düzlem dışı ve düzlem içi dayanımını/direncini artırmayı hedeflemektedir. Yapılan deneysel çalışmalar, bu tekniğin yanal yük direncini yaklaşık 1,5 kat artırdığını ve yanal deformasyonları %50 oranında iyileştirdiğini göstermiştir [94].



Şekil 12. Yeni kolonların tuğla duvarlı bir yığma yapıya yerleştirilmesi [53]. (Installation of new columns in a masonry building with brick walls [53].)

Bu tekniğin mevcut yığma binalarda uygulanması zor ve maliyetli olmaktadır ancak yeni inşa edilen yığma sistemli yapılar için yapının bütünlüğünü garanti edebilme özelliği nedeniyle kullanılması tavsiye edilmektedir.

3.3.2. Bağlantı çubuklarının kullanılması

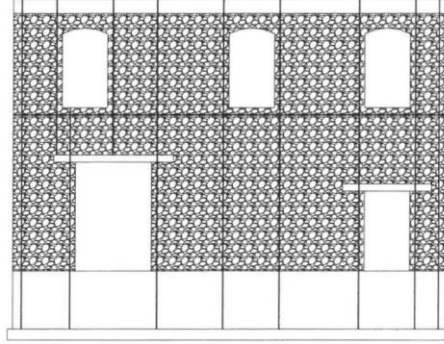
(Confinement with load-bearing columns)

Yığma yapıların bütünlüğünü ve elemanlar arası koordinasyonu artırmak amacıyla, bağlantı çubukları da güçlendirme yöntemleri arasında yer almaktadır [95]. Bu çubukların işlevi, yığma duvarların basınç dayanımını iyileştirmektir. Bu açıdan, bağlantı çubukları tekniği, ön-germe yöntemine benzerlik göstermektedir [96]. Temeli düzensiz oturmuş veya eğimli binalarda, bağlantı

çubukları, yapının dengesizlik gösterdiği kısımları özgün seviyesine geri getirmek için de kullanılabilir. Deneysel çalışmalar, dikey çelik bağlantı çubuklarıyla güçlendirilmiş yığma duvar panellerinin, hem mukavemet hem de süneklik açısından sismik kapasitesinin önemli ölçüde artırılabilirdiğini göstermiştir (Şekil 13) [97,98]. Ancak, çubukların korozyona karşı korunması için dikkatlice yüzey işlemi yapılması gerekmektedir. Metal bağlantı (gergi, kenet vb.) çubukları, özellikle büyük ölçekli ve karmaşık tarihi yapılarda, yapısal stabiliteyi sağlamak ve mevcut çatlakları kontrol altına almak amacıyla kullanılmaktadır. Bu sistemlerin farklı türleri, yapıların özelliklerine ve güçlendirme ihtiyaçlarına göre çeşitlilik göstermektedir. Gergi çubuk bağlantı

sistemleri (tie-rod connection), doğrudan bağlantılar, ankraj sistemleri, ve çelik levhalarla desteklenen kombinasyonlar olarak sınıflandırılabilir. Doğrudan bağlantılar, daha küçük ve basit yapılarda tercih edilirken, ankraj

sistemleri, büyük ve karmaşık yapılarda daha geniş alanları kapsayacak şekilde kullanılmaktadır. Çelik levhalarla desteklenen sistemler ise, zayıf bölgelerde ekstra mukavemet sağlamak amacıyla uygulanır.



Şekil 13. Metal bağlantı çubuklarının bir yığma duvara yerleştirilmesi [98]. (Fitting metal tie rods into a masonry wall [98].)

Ural vd. [99] tarihi yığma kemerlerde hasar görmüş gergi çubuklarının yenilenmesi için beş farklı teknik deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Sonuç olarak, bazı tekniklerin yapıların stabilitesini önemli ölçüde artırdığı tespit edilmiştir. Tanrıverdi ve Yavuz [100] yığma duvarlarda kullanılan kenetlerin daldırma derinliklerinin yapısal davranışa etkileri deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Sonuç olarak, kenet derinliğinin artırılmasının yük taşıma kapasitesini en az %10,53 oranında artırdığı, ancak çok derin kenetlerin kapasiteyi azaltabileceği belirlenmiştir. Benzer bir şekilde Çelik vd. [101] yapılan analizler sonucunda kenet batma noktası ile taş kenarı arasındaki mesafenin kritik bir rol oynadığını göstermiştir. Ural vd. [102] ise çalışmalarında elde edilen verilerden varılan temel sonuç: kenet ve zivana ile yapılan uygulamaların, yığma yapıların ana taşıyıcı elemanı olan duvarların kayma dayanımını yüksek oranlarda artırdığı, normal şartlarda yapılan bu uygulamaların yapının deprem performansını artıracağını göstermektedir. Yapılan çalışmalar, metal bağlantı elemanları ile (gergi, kenet vb.) sistemlerinin, yapıların stabilizasyonu ve çatlak kontrolü üzerinde belirgin bir olumlu etkisi olduğunu göstermektedir.

3.3.3. Fiber/tekstil takviyeli harçlar (Use of fibre/textile reinforced mortars)

Yığma yapılarda, harcın genel olarak çekme mukavemeti zayıf olduğundan, bu elemanın çekme ve eğilme dayanımının, basınç dayanımına kıyasla genellikle ihmal edilmektedir. Buna karşın, fiber/tekstil katkıli harç kullanımı, gerilme ve eğilme direncini geliştirerek, yığma sistemin bütünlüğünü artırabilmektedir [46]. Harcın lif/tekstil ilaveleri, bu malzemenin çekme mukavemetini iyileştirmektedir. Nitekim, yığma tuğla duvarlarının, sıva ve hibrit cam elyafları ile güçlendirildiği çalışmalarda, panellerin sadece düzlem dışı yöndeki hasarının önlenmekle kalmayıp, aynı zamanda düzlem içi hasar oranlarının da azaldığı gözlenmiştir [103]. Benzer şekilde, Martins vd. [104], Tekstil Takviyeli Harç (TRM) tekniğini kullanarak, tuğla yığma duvarlarda hem düzlem dışı mukavemetin hem de sünekliğin artırılabilirliğini göstermiştir (Şekil 14). Bununla birlikte bu teknik ile yığma yapıda gözlemlenecek olan bütünsel iyileşme, yukarıda bahsedilen yöntemler kadar etkili olmayacağına dikkat edilmelidir. Ayrıca bu teknik, derz enjeksiyon yaklaşımlarına benzerlik göstermektedir.

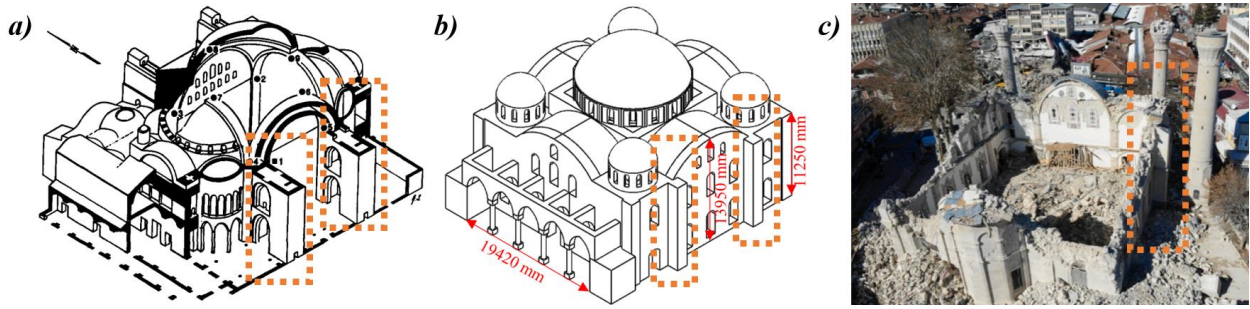


Şekil 14. Deneysel için hazırlanan duvarların yapımı ve TRM filesi uygulaması [104]. (Construction of walls prepared for the experiment and application of TRM mesh [104].)

3.3.4. Payanda Sistemi (Masonry Buttress Supports)

Tarihi yapıların güçlendirilmesinde kullanılan etkili yöntemlerden biri, yapının dış duvarlarına uygulanan payanda sistemidir. Bu sistem, özellikle büyük ölçekli ve ağır yapılar için kritik öneme sahiptir. Ayasofya Camii, bu tekniğin en başarılı örneklerinden biridir. Ayasofya'nın inşasında kullanılan payandalar, yapının büyük kubbesini ve ana duvarlarını destekleyerek, yapı üzerinde meydana gelebilecek yanal yüklerin ve deprem etkilerinin dengelenmesini sağlar (Şekil 15a) [105]. Bu yapıdaki payandalar, Bizans döneminden günümüze kadar yapının ayakta kalmasını sağlayan önemli mühendislik çözümlerinden biri olarak kabul edilmektedir [106]. Payanda sistemi, hem

yapının tarihi karakterini korumuş hem de yapısal bütünlüğünü muhafaza etmiştir. Benzer şekilde, Malatya Hacı Yusuf Taş Camii'nde de payanda sistemi kullanılmıştır (Şekil 15b). Bu camide, dış duvarlara eklenen payandalar, yapının taşıyıcı sistemini güçlendirmiş ve yapının uzun süre ayakta kalmasını sağlamıştır (Şekil 15c) [107]. Malatya gibi sismik aktivitenin yoğun olduğu bölgelerde, bu tür yapısal önlemler, tarihi yapıları koruma açısından hayati öneme sahiptir. Payanda sistemi, yapının özgün tasarımını bozmadan, mühendislik teknikleri ile güçlendirilmesine olanak tanıyan etkili bir yöntemdir. Bu tür uygulamalar, tarihi yapıların restorasyonunda geleneksel ve modern tekniklerin uyumlu bir şekilde nasıl bir araya getirilebileceğini göstermektedir.



Şekil 15. Payanda sistemleri - a) Ayasofya [105], b) Malatya Hacı Yusuf Taş Camii, c) 2023

Kahramanmaraş depremi sonrası Malatya Hacı Yusuf Taş Camii'nin payandaları [107]. (Buttress systems - a) Hagia Sophia [105], b) Malatya Hacı Yusuf Taş Mosque, c) image of the Malatya Hacı Yusuf Taş Mosque's standing buttress after Kahramanmaraş earthquake.)

4. DEĞERLENDİRME (EVALUATION)

Yığma tarihi yapılar, uzun yıllar boyunca çeşitli fiziksel ve çevresel etkilere maruz kalmalarından ötürü, zamanla yapısal bütünlüklerini kaybedebilmektedirler. Bu durum, söz konusu yapıların strüktürel güvenliklerini tehlikeye atabilmekte ve korunmaları için onarım ile güçlendirme gibi çözümlerin geliştirilmesini gerekli kılmaktadır. Tarihi yapıların onarım ve güçlendirilmesi süreçlerinde temel amaç, yapıların özgün niteliklerinin ve kültürel değerlerinin korunmasının yanı sıra, strüktürel dayanımlarının da artırılması suretiyle gelecek nesillere güvenli bir şekilde aktarılmasının sağlanmasıdır. Bu doğrultuda, özgünlüğün ve bütünlüğün gözetilmesi, uygulanan tekniklerin seçimi ve uygulanmasında ana ilkeleri oluşturmaktadır. Çalışma kapsamında irdelenen üç temel güçlendirme yaklaşımı - dış yüklerin etkisinin azaltılması, yapı elemanlarının güçlendirilmesi ve yapısal bütünlüğün iyileştirilmesi - deneysel çalışmaların yer aldığı literatür bilgileri ışığında Tablo 1'de özetlenmiştir. Tarihi yapıların güçlendirilmesinde uygulanacak yöntemin seçimi, yapının özgün nitelikleri, bulunduğu çevresel koşullar, mevcut hasarlar ve

koruma hedefleri gibi çok sayıda faktöre bağlıdır. Dolayısıyla, bütüncül bir değerlendirme yapılarak, en uygun güçlendirme stratejisinin belirlenmesi önem arz etmektedir. Tüm bu yaklaşımların avantaj ve dezavantajlarının dikkatli bir şekilde analiz edilmesi, tarihi yapıların özgünlüğünün korunması ve sürdürülebilir kullanımının sağlanması açısından kritik rol oynamaktadır. Güçlendirme hedeflerine göre güçlendirme teknikleri değerlendirildiğinde:

- Dış yüklerin etkisinin azaltılmasına yönelik güçlendirme teknikleri, tarihi yapıların dayanıklılığını artırmak açısından kritik bir rol oynamaktadır. Yapının doğal çevreye ve dış etkenlere karşı daha güçlü hale getirilmesi, yapı elemanlarında oluşabilecek hasarların en aza indirilmesini ve kullanım ömrünün uzatılmasını sağlamaktadır. Uygulanan sismik izolatör ve sismik damperin, bu konuda her ne kadar etkili olsa da tarihi değere sahip yapıların özgün görüşlerine büyük etki etmektedir ve uygulamaları oldukça zordur. Özellikle sismik izolatör için yapının düşey taşıyıcı elemanlarının askıya alınarak kaldırılması ve sonrasında temele yakın yerlerinde sismik izolatörlerin yerleştirilmesi gerekmektedir. Bu

süreç hem yapılar için riskli bir durum barındırırken hem de uygulayıcılar için oldukça güç süreçleri içermektedir.

- Yapı elemanların güçlendirilmesi, tarihi yapıların güvenli kullanımını ve uzun vadeli sürdürülebilirliğini desteklemektedir. Güçlendirmek üzere gerçekleştirilen teknikler, daha münferit müdahaleleri içermesi nedeniyle yığma yapının özgünlüğüne etkisi daha az olabilmektedir. Ayrıca sismik izolatör ve sismik damper gibi bir uygulama zorluğu gerektirmektedir. Bu durum tarihi yapılar için önemli bir avantajdır. Teknolojik gelişmeler, bu alanda kullanılacak malzeme

çeşitliliğini de arttırmış ve arttırmaya devam etmektedir. Bununla birlikte, orijinal mimari özelliklerin kaybolma riski ve uygulama sırasında yapıya zarar verme ihtimali gibi hususlar da dikkate alınmalıdır.

- Yapısal bütünlüğün güçlendirilmesi ise, tarihi yapıların bütüncül davranışının iyileştirilmesi ve deprem performansının artırılması açısından önemli bir yaklaşımdır. Bu sayede, yapının stabilitesi ve kullanım ömrü uzatılabilmektedir. Ancak, estetik görünümün bozulma riski ve mevcut yapı sistemine uyum sağlama zorlukları gibi dezavantajlar da göz önünde bulundurulmalıdır.

Tablo 1. Güçlendirme tekniklerinin etkinliği - Yazar tarafından oluşturulmuştur. (Effectiveness of retrofitting techniques - Created by the author.)

Güçlendirme Hedefleri	Teknikler	Etkiler
Dış Yüklerin Etkisini Azaltmak	Sismik İzolatör	Kuvvetler 5 ile 6 kat azaltılmaktadır.
	Sismik Damper	Sismik damperler tarafından yayılan enerji yoluyla iç sönümlemesini artırarak sismik kaynaklı titreşimleri önemli ölçüde azaltılabilmekte ve yapının genel davranışı iyileştirilebilmektedir.
Yapı Elemanlarını Güçlendirme	Yüzey Güçlendirmesi	Püskürtme beton, yanal mukavemeti yaklaşık 3,6 kat arttırmakta ve düzlem dışı yöndeki stabiliteyi geliştirmektedir. Ferro-cement, yanal direnci yaklaşık %150 arttırmaktadır.
	Derz Enjeksiyonu	Hem hasarlı alanlara harç enjeksiyonu hem de bütünüyle harç yenileme yalnızca orijinal rijitliği ve dayanımı eski haline getirebilmektedir.
	Dış Çelik Takviyesi	Düzlem içi yanal yüklerle karşı direnç 4,5 kat artırılmaktadır.
	Ard-Germe	Yanal sertliği ve mukavemeti 2 kata kadar gelişim sağlanırken, düzlem dışı yöndeki mukavemeti de arttırmaktadır.
	Örgü/Donatı/Ağ takviyesi	FRP, yanal direnci 1,1 ile 3 kat arttırmaktadır. Ayrıca düzlem dışı stabiliteyi de arttırabilmektedir. Çeşitli FRP uygulamaları, tarihi kemerlerde taşıma kapasitesini %58'e varan oranlarda arttırabilmektedir.
Yapısal Bütünlüğü Güçlendirme	Taşıyıcı Kolonlar	Yanal direnç yaklaşık 1,5 kat artırılabilir ve deformasyona karşı gelişim sağlanmaktadır.
	Bağlantı Çubukları	Artgerme yönteminde çelik çubuklarla oldukça benzer şekilde çalışmaktadır. Yığma yapının sismik kapasitesi önemli ölçüde geliştirilebilmektedir. Yığma duvarlarda kullanılan kenetlerin daldırma derinliklerinin yapısal davranışa etki ettiği görülmektedir.
	Fiber/Tekstil Takviyeli Harç	Harcın gerilme mukavemetini geliştirmektedir ve böylece düzlem dışı hasarların/patlama önüne geçilmektedir.
	Payanda Sistemleri	Yığma yapılarda dış duvarların güçlendirilmesinde etkili rol oynamakta ve yanal yükler ile deprem etkilerine karşı yapının sismik kapasitesini geliştirebilmektedir.

Çalışmanın bu bölümünde, taşıyıcı bileşenlerine yönelik güçlendirme yöntemleri sıralanan tarihi yığma yapıların, kültür varlıklarının korunmasına ilişkin tüzük, sözleşme ve ilke kararlarından birçok ülke tarafından kabul edilen belgeler incelenmiştir. Belgelerde yer alan onarım ve güçlendirme yöntemlerine ilişkin maddelere dayandırılarak temel koruma ilkeleri bağlamında değerlendirilmiştir. Doğal ve kültürel değerler konusunda dünya ülkelerinin ortak tavır ve işbirliği sağlamaya yönelik ilk çabaları 1930'larda

Uluslararası Anıtlar ve Sitler Konseyi (ICOMOS) ile başlamıştır. 1931 yılında İtalya'da Eski Eserler ve Güzel Sanatlar Yüksek Kurulu tarafından hazırlanan ve ICOMOS tarafından kabul edilip yayınlanan "Carta Del Restauro" bu alandaki ilk belge sayılabilmektedir [108]. 1945 yılında, Birleşmiş Milletler Eğitim, Bilim ve Kültür Kurumu'nun (UNESCO) 1954 yılında Avrupa Konseyini kurması ve aynı yıl Hollanda'nın başkenti Lahey'de ilk uluslararası resmi nitelikli belge olarak nitelendirilebilecek "Silahlı Çatışma

Halinde Kültürel Değerlerin Korunması Sözleşmesi'nin (Lahey Konvansiyonu)" hazırlanmıştır [109]. 1964 yılında ise bir grup uzmanın, korumanın ilkelerine ilişkin olarak hazırladıkları "Venedik Tüzüğü"nü [110] kamuoyuna sunulması, kurumsallaşma ve mevzuat oluşturmanın ilk adımları olarak nitelendirilebilmektedir. Kültürel ve doğal mirasın

korunması, onarımı ve değerlendirilmesi konusunda çalışan uluslararası kuruluşlar, zamanla koruma alanında tüzük ve bildirgeler yayınlamaktadır. İncelenen belgelerden aşağıda yer alan bazı madde ve içeriklerin yığma yapıların onarım ve güçlendirme teknikleri ile ilişkilendirilebilir nitelikte oldukları tespit edilmiştir (Tablo 2).

Tablo 2. Onarım ve güçlendirme teknikleri ile ilişkilendirilebilir maddeler – Yazar tarafından oluşturulmuştur. (Onarım ve güçlendirme teknikleri ile ilişkilendirilebilir maddeler – Yazar tarafından oluşturulmuştur.)

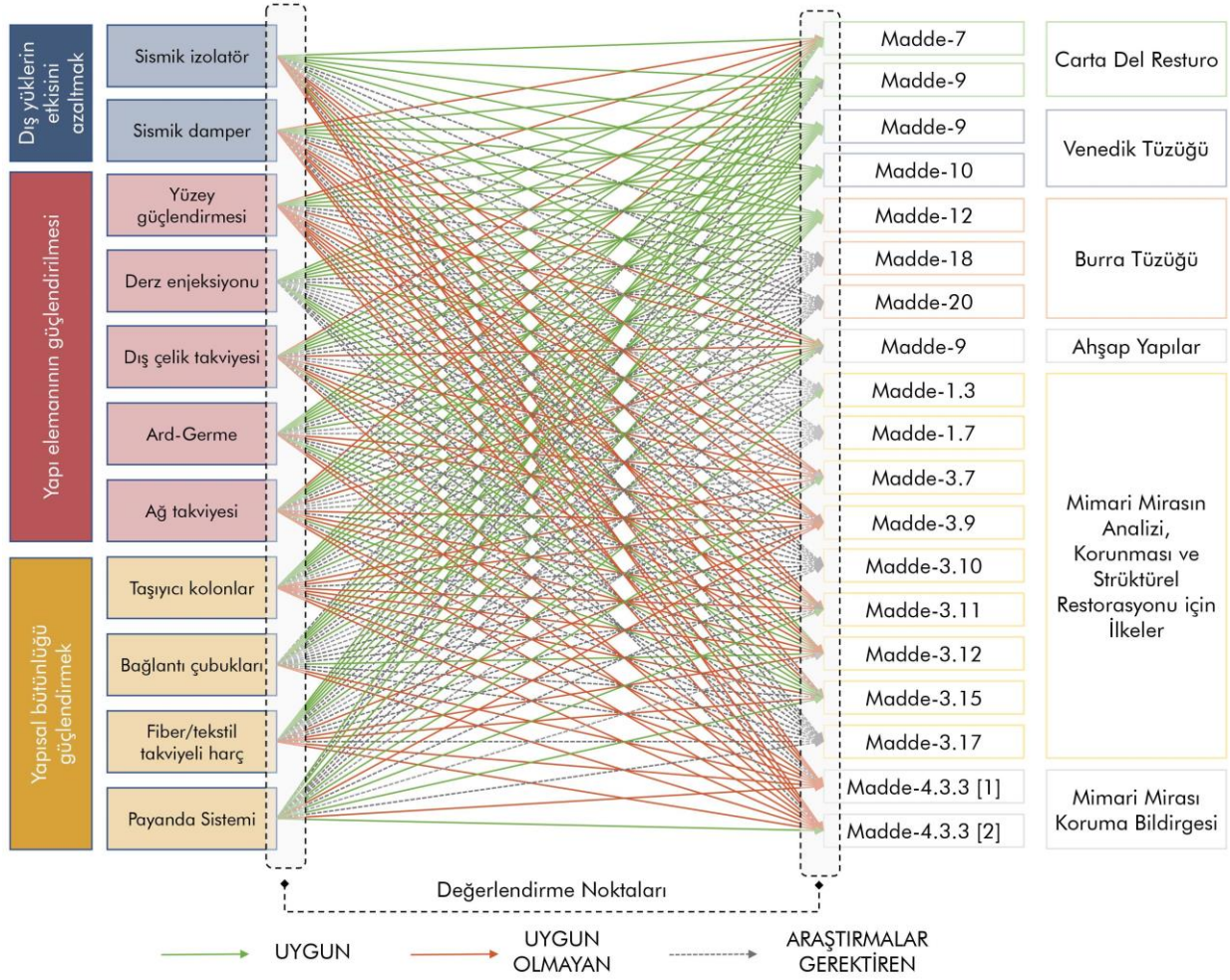
Belge	İlgili Madde	Onarım ve Güçlendirme Teknikleri ile İlişkilendirilebilir İçerik
Carta Del Restauro	Madde-7 (M-7)	Eğer bir anıtı sağlamlaştırmak, kısmi veya tam olarak bütünlük amacıyla, ya da yeniden kullanım nedeniyle ekler yapılması gerekirse, uyulması gereken temel koşul yeni öğelerin en azda tutulmaları, yalın ve yapısal düzeni yansıtır karakterde olmalarıdır.
	Madde-9 (M-9)	Bir anıtın taşıyıcı sistemini güçlendirmek veya kütlelerini bütünlük için eski yapıım yöntemleriyle amaca ulaşılmazsa, çağdaş tekniklerin kullanılması uygun olabilir. Aynı biçimde, basit ya da karmaşık tüm yıpranmış strüktürleri ayakta tutabilmek için çeşitli bilimlerin katkıda bulunmaya çağrılması gerekir.
Venedik Tüzüğü	Madde-9 (M-9)	Onarım kendine temel olarak aldığı özgün malzeme ile güvenilir belgelere saygıyla bağlıdır. Faraziyenin başladığı yerde onarım durmalıdır; yapılması gerekli herhangi bir eklemenin mimari kompozisyonundan farkı anlaşılabilir ve gününün damgasını taşımalıdır. Herhangi bir onarım işine başlamadan önce ve bittikten sonra, anıtın arkeolojik ve tarihi bir incelemesi yapılmalıdır.
	Madde-10 (M-10)	Geleneksel tekniklerin yetersiz kaldığı yerlerde, koruma ve inşa için bilimsel verilerle ve deneylerle geçerliliği saptanmış herhangi çağdaş bir teknik kullanılarak anıt sağlamlaştırılabilir.
	Madde-12 (M-12)	Eksik kısımlar tamamlanırken, bütünlük uyumlu bir şekilde bağdaştırılmalıdır; fakat bu onarımın, aynı zamanda sanatsal ve tarihi tanıklığı yanlış bir biçimde yansıtmaması için, özgünden ayrırt edilebilecek bir şekilde yapılması gereklidir.
Burra Tüzüğü	Madde-18 (M-18)	Restorasyon ve rekonstrüksiyon, mekanın kültürel açıdan önemli yönlerini ortaya çıkarmalıdır.
	Madde-20 (M-20)	Rekonstrüksiyon, yalnızca bir yerin hasar veya değişiklik nedeniyle eksik olduğu ve yalnızca yapının daha önceki bir durumunu yeniden üretmek için yeterli kanıtın olduğu durumlarda uygundur. Bazı durumlarda, rekonstrüksiyon, yerin kültürel önemini koruyan bir kullanım veya uygulamanın bir parçası olarak da uygun olabilir.
Tarihi Ahşap Yapıların Korunması için İlkeler	Madde-9 (M-9)	Tarihi bir yapının onarımında yeni ahşap, tarihi ve estetik değerlere saygı çerçevesinde kalınarak ve harap ve çürümüş kısımları değiştirmek, ya da restorasyonun gereklerini karşılamak amacıyla kullanılabilir.
Mimari Mirasın Analizi, Korunması ve Strüktürel Restorasyonu için İlkeler	Madde-1.3 (M-1.3)	Mimari mirasın değeri yalnız görünüşünde değildir; tüm bileşenleriyle döneminin yapıım teknolojisinin ünik bir örneği olarak korunmuş olması önemlidir. Özellikle yapıların yalnız cephelerinin korunup, içerideki taşıyıcı öğelerin kaldırılması koruma ölçütlerine aykırıdır.
	Madde-1.7 (M-1.7)	Taşıyıcı sistemin çökmesini önlemek amacıyla alınması gerekli acil güvenlik önlemleri dışında (örneğin deprem hasarı sonrasında), sağlayacağı yarar veya zarar tam olarak belirlenmeden tarihi esere herhangi bir müdahale yapılmamalıdır.
	Madde-3.7 (M-3.7)	Geleneksel ve yeni teknikler arasında tercih yapılmadan önce, her yapıımın durumu, güvenlik ve mukavemet talepleri göz önünde tutularak değerlendirilmeli, en az müdahale getiren ve kültürel değerlerle en uyumlu olan seçilmelidir.
	Madde-3.9 (M-3.9)	Mümkün olan yerlerde, yapılan müdahalenin geriye dönüşü uygun olması (reversible), böylece yeni bilgiler edinildiğinde yapılan müdahalelerin esere zarar vermeden kaldırılarak daha uygun olanlarla yer değiştirmesi arzu edilir.
	Madde-3.10 (M-3.10)	İstenmeyen yan etkileri önlemek amacıyla, onarımda kullanılan malzemelerin uzun dönem etkileri araştırılmalıdır.
	Madde-3.11 (M-3.11)	Strüktürün özel niteliklerine ve çevresine zarar verilmemelidir.
	Madde-3.12 (M-3.12)	Her müdahale mümkün olduğunca, strüktürün ilk tasarımına, yapıım tekniğine ve tarihi değerine saygı göstermeli ve onun gelecekte de anlaşılmasını sağlayacak izleri korumaya özen göstermelidir.
	Madde-3.15 (M-3.15)	Harap strüktürler mümkün olduğunca onarılmalı, tümü yenilenmemelidir.
	Madde-3.17 (M-3.17)	Söküm ve tekrar birleştirmeye ancak, strüktürün durumu ve malzemesi dolayısıyla başka bir yöntemle koruma olanaksız veya zararlı olduğunda, ek bir seçenek olarak, başvurulmalıdır.
Mimari Mirası Koruma Bildirgesi	Madde-4.3.3[1] (M-4[1])	Geleneksel tekniklerle inşa edilmiş yapılarda strüktürel güvenliği arttırmak amacıyla yapılacak müdahaleler yapıımın özgün strüktürel bünyesini değiştirmemeli ve geri dönülebilir olmalıdır.
	Madde-4.3.3[2] (M-4[2])	Erken modern ve çağdaş yapı strüktürleri söz konusu olduğunda, özellikle kamusal kullanımlarda olması durumunda, yapıımın özgün niteliklerinin başkalaştırılmasına yol açılmaması öngörülür.

Kültürel ve doğal mirasın korunması, onarımı ve değerlendirilmesi konusunda çalışan uluslararası kuruluşlar, zamanla koruma alanında tüzük ve bildirgeler yayınlamaktadır. Kültürel değerlere sahip her tarihi yapı örneği, kendine özel; tarihi, sanatsal, fiziksel, işlevsel ve strüktürel özelliklere sahiptir. Yapıların sorunları, kendilerine özgün özellikleri gibi özel ve farklı olmaktadır. Dolayısı ile tüm bu yapı stokunun hasar ve sorunlarının kesin tarif ve yöntemlerle güçlendirilmesi olanaksızdır. Tarihi yapılar, kültürel ve mimari önemlerine saygı gösterirken uzun ömürlülüklerini ve güvenliklerini sağlamak için genellikle güçlendirmeye ihtiyaç duyarlar. Bu süreçlerde uluslararası tüzük ve bildirgelerde yer alan maddelere göre dikkate alınması gereken önemli hususlar;

- Güçlendirme malzemelerinin ve tekniklerinin tarihi binanın yapımında kullanılan orijinal malzemelerle uyumluluğudur. Yapının özgünlüğünden ödün vermeyen malzeme ve yöntemlerin seçilmesi esastır. Bu, tarihi binada kullanılan orijinal yapım tekniklerini ve malzemeleri anlamak için kapsamlı araştırma ve analizler yapılmasını gerektirir.
- Gelecek nesillerin neyin orijinal, neyin sonradan eklenmiş olduğunu tespit edebilmelerini sağlamak için güçlendirme müdahaleleri geri döndürülebilir ve binanın orijinal dokusundan ayırt edilebilir olmalıdır. Bu ilke, herhangi bir değişikliğin geri döndürülebilir olması ve şeffaflık ve gelecekteki referanslar için açıkça belgelenmesi gereken minimum müdahale koruma yaklaşımıyla uyumludur.
- Tarihi binaların yapısal olarak güçlendirilmesi, hem yapı mühendisliği hem de mirasın korunması konusunda uzmanlığa sahip nitelikli profesyoneller tarafından gerçekleştirilmelidir. Bu disiplinler arası yaklaşım, güçlendirme müdahalelerinin binanın tarihi değerinden ödün vermeden yapısal gereklilikleri karşılmasını sağlamak için gereklidir.
- Ayrıca, güçlendirilen tarihi yapıların düzenli olarak izlenmesi ve bakımının yapılması, herhangi bir sıkıntı veya bozulma belirtisinin erken tespit edilmesi ve daha fazla hasarı önlemek için derhal ele alınması açısından hayati önem taşımaktadır. Bu proaktif yaklaşım,

tarihi binaların uzun vadeli korunmasını sağlamak için düzenli izleme ve bakımın önleyici koruma ilkesiyle uyumludur.

Çalışma kapsamında, restorasyon ve koruma uygulamaları içerisinde önemli bir yere sahip olan güçlendirme teknikleri, uluslararası alanda kabul gören tüzük ve bildirgelere dayanarak sınıflandırılmış ve analiz edilmiştir. Bu analizler, Şekil 16'da, belirli güçlendirme tekniklerinin hangi koruma maddeleriyle uyumlu veya uyumsuz olduğunu ifade edecek şekilde ele alınmıştır. Bu süreçte, özellikle "Mimari Mirasın Analizi, Korunması ve Strüktürel Restorasyonu için İlkeler" adlı belgede yer alan Madde-3.7, Madde-3.9 ve Madde-3.12 gibi maddelerde uygunluk problemlerinin olduğu tespit edilmiştir. Bu maddeler genellikle yapıların geri dönüştürülebilirliğine odaklanmakta olup uygulanan güçlendirme teknikleri sonrasında yapıların geri dönüştürülebilir olmaları çoğu zaman mümkün olmadığını göstermektedir. Yapılan değerlendirme ve gözlemler, "Mimari Mirasın Koruma Bildirgesi"nde yer alan bazı maddelerin, yapıların özgün strüktürel özellikleri ile doğrudan ilişkili olduğunu ve bu maddelerin, güçlendirme tekniklerinin yapının özgün strüktürel yapısına müdahale edebileceğini vurgulaması, koruma ilkeleri ile güçlendirme tekniklerinin uyumsuzluğunu ortaya koymaktadır. Özellikle derz enjeksiyonu gibi bazı tekniklerin, herhangi bir madde ile sakıncalı olduğu vurgulanmamadır fakat bazı maddelerle yapılan analiz ve araştırmalar sonucunda bu tekniklerin uygunluk durumunun tekrar değerlendirilmesi gerekliliği ortaya çıkmaktadır. Ayrıca sismik izolatör, sismik damper, yüzey güçlendirmesi, ağ takviyesi ve taşıyıcı kolonlar gibi yöntemlerle gerçekleştirilen güçlendirme teknikleri ise bu değerlendirme noktaları açısından diğer yöntemlere göre uygun bulunmayan madde sayısının fazla olduğu yöntemler olarak tespit edilmiştir. Elde edilen bulgular, güçlendirme tekniklerinin seçim ve uygulanmasında koruma ilkeleriyle olan uyumun önemini vurgulamaktadır. Bu analizler, koruma ve restorasyon çalışmalarında bilimsel bir metodolojiyi ve disiplinlerarası bir yaklaşımı teşvik ederek, tarihi yapıların sürdürülebilirliğini artırmayı amaçlamakta ve bu bağlamda gelecekteki restorasyon projeleri için kritik bilgiler sunmaktadır.









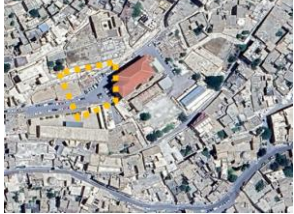







Şekil 16. Güçlendirme teknikleri ve koruma maddeleri arasındaki uygunluk durumunun değerlendirilmesi – Yazar tarafından oluşturulmuştur. (Assessment of the compatibility between retrofitting techniques and conservation articles - Created by the author.)

Teknolojik gelişmeler, tarihi yapıların korunması ve restorasyonunda kullanılabilecek uygun tekniklerin geliştirilmesine imkân tanımaktadır. Özellikle Anadolu gibi kıtalar arası bir köprü işlevi gören, zengin kültürel mirasa sahip olan ve tarihi mirasları bünyesinde barınan coğrafyalar bu tür tekniklerin geliştirilmesi için önemli alanlar olmaktadır. Anadolu'nun tarihsel ve kültürel mirasının önemli merkezlerinden birisi olan, geçmişten günümüze pek çok medeniyete ev sahipliği yapmış ve bu süreçte çeşitli mimari eserleri bünyesinde barındırarak çok katmanlı bir kimlik üretmiş Mardin kenti de bu bağlamda önemli bir çalışma alanı olmaktadır. Çalışma alanında yapılan detaylı gözlemler sonucunda Mardin'de yer alan tarihi yapılarda güçlendirme stratejilerine ihtiyaç duyan yapıların olduğu tespit edilmiştir. Özellikle, farklı medeniyetlerin etkilerini taşıyan ve bu nedenle çeşitli yapısal özelliklere sahip Mardin gibi tarihi bölgelerde, bu yapıların sayısı oldukça fazladır. Tarihi yapıların analiz edilmesinde teknolojik gelişmeler ile birlikte gözleme dayalı analizler de önem kazanmıştır. Fotoğraflama teknikleri ile

birlikte gözleme dayalı çalışmalar daha etkin gerçekleştirilebilmektedir. Bu çalışmada da gözleme dayalı kolaylıkla belirlenebilen yapılar kategorize edilmiştir. Gözlemler sonucunda, bu yapılar, Zinciriye Medresesi'nin doğu yönünde yer alan giriş kapısı, Mor Sobo Katedrali, Mor Loozor Manastırı, Midyat sivil mimarlık örneği, Osmanlı dönemine ait mescit, Dereiçi sivil mimarlık örnekleri ve Dara Antik Kenti tarihi kapısı olarak belirlenmiştir (Tablo 3). Bu eserlere ait strüktürel problem olarak tanımlanabilecek açıdan görsellere yer verilmiştir. Mardin'de güçlendirme stratejilerinin geliştirilmesine ihtiyaç duyan yapıların bunlarla sınırlı olmadığına altını çizmek gerekmektedir. Bu çalışma, gerçekleştirilen hızlı gözlemlere dayalı bilgilere yer vermiştir. Geliştirilen stratejiler sırasında, kapsamlı analizler ve deneyler gerçekleştirilmelidir. Bu bağlamda, bu çalışma, Mardin gibi tarihi dokusu zengin olan şehirlerde, tarihi yapıların korunması ve güçlendirilmesi için teknolojik yaklaşımların entegre edilebileceğini belirtmektedir.

Tablo 3. Mardin kentinde güçlendirme stratejilerine ihtiyaç duyan tarihi yapıların gözleme dayalı tespiti – Yazar tarafından oluşturulmuştur. (Observation-based identification of historical buildings in need of retrofitting strategies in Mardin city - Created by the author..)

Eser	Güncel Durum	Strateji Önerisi	Uydu Görüntüsü	Görsel
Zinciriye Medresesi Doğu Kapısı (Artuklu)	Dini Yapı	Yapı elemanının güçlendirilmesi		
Mor Sobo Katedrali (Midyat)	Harabe	Yapı elemanının ve yapısal bütünlüğün güçlendirilmesi		
Mor Loozor Manastırı (Midyat)	Harabe	Yapı elemanının ve yapısal bütünlüğün güçlendirilmesi		
Sivil Mimari Eser (Midyat)	Harabe	Yapı elemanının ve yapısal bütünlüğün güçlendirilmesi		
Osmanlı Dönemine ait Mescit (Artuklu)	Harabe	Yapı elemanının ve yapısal bütünlüğün güçlendirilmesi		
Dereiçi Sivil Mimarlık Eserleri (Savur)	Harabe	Yapı elemanının güçlendirilmesi		
Dara Antik Kenti Kapısı (Dara)	Harabe	Yapı elemanının ve yapısal bütünlüğün güçlendirilmesi		

Mardin'in kültürel mirasını oluşturan yapılar, sadece doğal afetler değil, aynı zamanda iklim değişikliği, yer altı su seviyelerindeki değişiklikler, yapısal yıpranma ve yetersiz bakım gibi faktörler nedeniyle de risk altındadır [111,112]. Bu bağlamda, yapılacak analizlerin sadece mevcut

hasarların tespiti ile sınırlı kalmaması, aynı zamanda bu hasarların gelecekteki olası etkilerini de öngörerek proaktif bir yaklaşım sergilemesi gerekmektedir. Örneğin, Doğu Anadolu Fay Sistemi'nin sürekli hareketliliği, potansiyel sismik riskleri artırmakta ve Mardin'deki tarihi yapılar için

acil müdahale gerekliliğini doğurmaktadır. Bu risklerin detaylı analiz edilmesi, sadece mevcut hasarların değil, aynı zamanda gelecekte oluşabilecek sorunların da önceden tespit edilmesine olanak sağlayacaktır. Tabloda yer alan yapıların dışında, Mardin'de yer alan daha küçük ölçekli fakat benzer öneme sahip sivil mimarlık örneklerinin de göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Özellikle geleneksel evler, zanaatkar atölyeleri ve dini yapılar, Mardin'in sosyo-kültürel yapısının bir parçasını oluşturmakta ve bu yapıların da aynı özenle ele alınması gerekmektedir. Bu tür yapılar için önerilecek güçlendirme tekniklerinin, hem yapısal bütünlüğü koruyacak hem de estetik ve tarihsel dokuyu bozmayacak nitelikte olması önemlidir.

Mardin'e özgü yapı malzemesi olan kireçtaşının dayanıklılığı, nem ve sıcaklık gibi çevresel koşullardan nasıl etkilendiği üzerine detaylı laboratuvar testleri yapılmalıdır. Bu testler sonucunda elde edilecek veriler, tarihi yapıların restorasyonu ve güçlendirilmesi sürecinde kullanılacak malzemelerin seçimini daha isabetli kılacaktır. Literatürde Mardin bölgesinde çıkarılan kireçtaşının analizine yer verilen bir adet çalışma bulunmaktadır. Semerci [113] çalışmasında Mardin'de Kasımiye Medresesi'nden alınan kireçtaşı numuneleri ile analizler gerçekleştirmiştir. Bu analizlerde medreseden alınan farklı numunelerin karşılaştırmalı analizi sonucunda farklı değerlerin ortaya çıktığı görülmüştür. Çalışma aynı yapı içerisinde kullanılan yapı malzemelerinin dayanımlarının farklılık gösterebileceğini ortaya koymuştur. Bu durum aynı yapı içerisinde farklı bölümlerin güçlendirilme sürecinde dahi özelleştirilmiş analizlere ihtiyaç duyulabileceğini ve Mardin'deki tarihi yapılara dair deneysel çalışmalarının artmasının bir gereklilik olduğunu göstermektedir.

Sonuç olarak, tarihi yapıların güçlendirilmesine yönelik uygulamalarda, koruma ilkeleri temel öncelik olmalıdır. Bu kapsamda, uyumluluk, geri döndürülebilirlik, profesyonel uzmanlık ve sürekli bakım gibi hususlar, güçlendirme sürecinin ayrılmaz bileşenleri olarak değerlendirilmelidir. Söz konusu ilkelerin bütüncül bir yaklaşımla entegre edilmesi, tarihi binaların kültürel ve mimari değerlerinin korunmasına ve gelecek nesillere aktarılmasına olanak sağlayacaktır. Böylelikle, Mardin gibi tarihsel ve kültürel öneme sahip şehirlerdeki mimari mirasın sürdürülebilirliği sağlanabilecektir.

5. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Tarihi yapılar, geçmişle bugün ve gelecek arasındaki ilişkiyi sağlayan ve bize yapıldığı dönemin yapım tekniği, malzeme özellikleri, yaşanmışlıkları hakkında da önemli bilgiler veren kültür varlıklarıdır. Bu sebeplerden dolayı bu yapıların korunması ve gelecek nesillere aktarılması gereklidir. Hiç kuşkusuz tarihi yapılara zarar veren birçok doğal ve yapay etmenler bulunmaktadır. Ülkemiz deprem kuşağında yer alan bir ülkedir ve tarihi yapılara etki eden en riskli dış yüklerden biri de depremdir. Türkiye genel yapı stoğunda, önemli ölçüde tarihi yığma yapı bulunmaktadır. Yığma yapılar hakkındaki yönetmelik şartlarının yerine tam olarak getirilmemesi, uygulama da yapılan hatalar, uygulama sırasında kontrollerin yetersizliği, malzeme özellikleri gibi nedenlerle yığma yapıların davranışında ciddi zayıflıklar ortaya çıkmaktadır. Bu sorunların çözümünde ise mevcut yapıların analizleri ve sonuçlara göre uygun müdahale tekniklerinin seçilmesi oldukça büyük önem arz etmektedir. Doğru yapısal analizler, tarihi yapıların davranışının belirlenmesine ve yapının güçlendirilmesi sırasında doğru yöntemler kullanılmasına imkan tanımaktadır. Türkiye'nin zengin tarihi dokusu, birçok yığma yapının da yer aldığı Mardin gibi şehirlerde, kültürel mirasın korunmasını zorunlu kılmaktadır. Ancak, bu yapıların korunması kadar, doğru tekniklerle güçlendirilmesi de hayati bir öneme sahiptir.

Yapılan çalışmalar, Mardin'deki tarihi yapıların çoğunun farklı medeniyetlerin izlerini taşıyan karmaşık yapısal özelliklere sahip olduğunu göstermektedir. Zinciriye Medresesi'nin doğu yönündeki giriş kapısı, Mor Sobo Katedrali, Mor Loozor Manastırı gibi yapılar, ciddi strüktürel problemlere sahip olup, hızlı bir şekilde güçlendirme stratejilerinin geliştirilmesine ihtiyaç duymaktadır. Bu kapsamda, yapılan gözlemler sonucunda, derz enjeksiyonu, dış çelik takviyesi, bağlantı çubukları, kenetler, zıvanalar vb. gibi çağdaş malzeme teknikleri ile çeşitli yöntemlerin tarihi yapıların güçlendirilme sürecinde etkili olduğu tespit edilmiştir. Ancak, bu tekniklerin uygulanmasında, hem özgün yapının korunması hem de strüktürel güvenliğin sağlanması amacıyla uluslararası koruma tüzükleri ile uyumlu bir yaklaşım benimsenmelidir. Özellikle, Mardin gibi tarihi dokusu zengin bölgelerde, güçlendirme stratejileri belirlenirken, koruma belgelerinde yer alan ilkeler ile teknik çözümlerin entegre edilmesi gerekmektedir. Bu belgeler, tarihi yapıların hem yapısal bütünlüğünü korumak hem de kültürel mirası gelecek nesillere aktarmak adına büyük önem taşımaktadır. Bu sayede kültürel değerlerin

korunması ile yapısal güvenlik arasındaki hassas denge sağlanarak, bu yapıların uzun vadeli korunması mümkün olacaktır.

Teknolojik gelişmeler ile birlikte güçlendirme alanında artan çeşitli teknik yaklaşımların kullanımında, uluslararası koruma tüzükleri kapsamlı bir çerçeve sunmaktadır. Dış yüklerin etkisinin azaltılması, yapı elemanlarının güçlendirilmesi ve yapısal bütünlüğün iyileştirilmesi, tarihi yapıların güçlendirilmesinde öne çıkan üç temel yaklaşımdır. Her bir yöntem, yapıların dayanıklılığını ve kullanım ömrünü artırma açısından farklı avantajlar sağlamaktadır. Dış etkenlere karşı koruma, yapısal güvenlik ve estetik değerlerin dengelenmesi, bu yaklaşımların uygulanmasındaki temel zorluklardır. Uluslararası koruma tüzükleri, tarihi yapıların özgünlüğünün ve bütünlüğünün korunmasına yönelik ilkeler ortaya koymaktadır. Venedik Tüzüğü, Nara Özgünlük Belgesi ve Burra Tüzüğü gibi belgeler, yapıların restore edilmesi, yenilenmesi ve güçlendirilmesi süreçlerinde uyulması gereken temel ilkeleri tanımlamaktadır. Bu ilkeler, tarihi yapıların kültürel değerlerinin gözetilmesi, asli niteliklerinin korunması ve özgün malzeme ile tekniklerinin kullanılması gerektiğini vurgulamaktadır. Güçlendirme uygulamalarının planlanması ve uygulanması aşamalarında, bu tüzüklerde yer alan ilkeler ile teknik yaklaşımların uyumlu bir şekilde bütünleştirilmesi önemlidir. Uzmanlar tarafından yürütülen titiz bir değerlendirme ve planlama süreci, uygulamaların başarısında kritik rol oynamaktadır. Sonuç olarak, tarihi yapıların güçlendirilmesi, çok disiplinli bir yaklaşım gerektirmektedir. Teknik çözümler ile koruma tüzüklerindeki ilkelerin bütünleştirilmesi, tarihi mirasın sürdürülebilirliğinin sağlanması adına büyük önem taşımaktadır. Kültürel değerlerin korunması ve yapıların güvenli kullanımı arasındaki hassas denge gözetilerek, tarihi yapıların gelecek nesillere aktarılması mümkün olabilecektir. Mardin'deki tarihi yapıların güçlendirilmesi de bölgedeki kültürel zenginliği koruma hedefiyle birlikte ele alınmalıdır. Bu bağlamda, yerel yapı malzemeleri ve tekniklerinin dikkate alındığı, uluslararası standartlarla uyumlu, disiplinler arası bir yaklaşım benimsenmelidir. Bu çalışma, güçlendirme tekniklerinin koruma tüzükleri ile ilişkilendirilmesine yer vererek bu alanda yapılacak olan çalışmaları hızlandıracak bir rehber ve Mardin'deki tarihi yapıların korunması ve güçlendirilmesine yönelik stratejilerin geliştirilmesi konusunda yol gösterici bir adım niteliğindedir.

ETİK STANDARTLARIN BEYANI DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS (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)

İzzettin KUTLU: Kapsamlı literatür taraması gerçekleştirmiş, uluslararası koruma ve tüzükler incelemiş, ilişkileri kurmuş, gözleme dayalı analizler yapmış, sonuçları analiz etmiş ve yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

He conducted a comprehensive literature review, examined international conservation and regulations, identified relations, performed observational analyses, synthesized the results, and wrote the manuscript.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

There is no conflict of interest in this study.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Matthys H., Noland L., Evaluation, strengthening and retrofitting of masonry buildings. TMS, Colorado (1989).
- [2] Ehsani M., Saadatmanesh H., Velazquez-Dimas J., Behavior of retrofitted URM walls under simulated earthquake loading. Journal of Composites for Construction, 3(3) (1999) 134-142. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0268\(1999\)3:3\(134\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0268(1999)3:3(134))
- [3] Binda L., Modena C., Casarin F., Lorenzoni F., Cantini L., Munda S., Emergency actions and investigations on cultural heritage after the L'Aquila earthquake: the case of the Spanish Fortress. Bulletin of Earthquake Engineering, 9 (2011) 105-138. <https://doi.org/10.1007/s10518-010-9217-3>
- [4] D'Ayala DF., Paganoni S., Assessment and analysis of damage in L'Aquila historic city centre after 6th April 2009. Bulletin of Earthquake Engineering, 9 (2011) 81-104. <https://doi.org/10.1007/s10518-010-9224-4>
- [5] Mazzarella L., Energy retrofit of historic and existing buildings. The legislative and regulatory point of view. Energy and Buildings, 95 (2015) 23-31. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.10.073>

- [6] Foraboschi P., Resisting system and failure modes of masonry domes. *Engineering Failure Analysis*, 44 (2014) 315-337. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2014.05.005>
- [7] Foraboschi P., Church of San Giuliano di Puglia: seismic repair and upgrading. *Engineering Failure Analysis*, 33 (2013) 281-314. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2013.05.023>
- [8] Örmecioğlu HT., Tarihi yapıların yapısal güçlendirilmesinde ana ilkeler ve yaklaşımlar. *Politeknik Dergisi*, 13(3) (2010) 233-237.
- [9] Fırat S., Işık N., Selçuk E., Tarihi yapıların temel sistemlerinin güçlendirilmesi. *Türk Doğa ve Fen Dergisi*, 9(Özel Sayı) (2020) 182-189. <https://doi.org/10.46810/tdfd.755813>
- [10] Soyluk A., Tuna ME., Sismik taban izolasyonu uygulaması için tarihi Şehzade Mehmet Camisinin dinamik analizi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 26(3) (2011) 667-675.
- [11] Fırat FK., Tanrıverdi Ş., Ural A., Kara ME., Kubbe yapı formlarının kenet ile güçlendirilmesi. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 11(2) (2022) 326-334. <https://doi.org/10.28948/ngumuh.1077401>
- [12] Bal A., Şimşek S., Tarihi yağma bir yapının lifli polimerler (FRP) ile güçlendirme alternatiflerinin araştırılması ve proje uygulaması. *Harran Üniversitesi Mühendislik Dergisi*, 4(3) (2019) 112-119.
- [13] Carhoglu Aİ., Zabin P., Korkmaz KA., Kars kümbet camisinin deprem davranışının incelenmesi. *Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology*, 2(1) (2014). 189-196.
- [14] Diz-Mellado E., Mascort-Albea EJ., Romero-Hernández R., Galán-Marín C., Rivera-Gómez C., Ruiz-Jaramillo J., Jaramillo-Morilla A., Non-destructive testing and Finite Element Method integrated procedure for heritage diagnosis: The Seville Cathedral case study. *Journal of Building Engineering*, 37 (2021) 102134. <https://doi.org/10.1016/j.job.2020.102134>
- [15] Ragozzino E., Nonlinear seismic response in the western L'Aquila basin (Italy): Numerical FEM simulations vs. ground motion records. *Engineering Geology*, 174 (2014) 46-60. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2014.03.010>
- [16] Aydın AC., Özkaya SG., The finite element analysis of collapse loads of single-spanned historic masonry arch bridges (Ordu, Sarpdere Bridge). *Engineering Failure Analysis*, 84 (2018) 131-138. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2017.11.002>
- [17] The International Scientific Committee on the Analysis and Restoration of Structures of Architectural Heritage (ISCARSAH)., *ISCARSAH Principles* (2003). <https://iscarsah.org/wp-content/uploads/2014/11/iscarsah-principles-tc3bcrk.pdf> Erişim 26 Ağustos 2024
- [18] Wang C., Sarhosis V., Nikitas N., Strengthening/retrofitting techniques on unreinforced masonry structure/element subjected to seismic loads: A literature review. *The Open Construction & Building Technology Journal*, 12(1) (2018) 251-268. <https://doi.org/10.2174/1874836801812010251>
- [19] Chuang SW., Zhuge Y., Seismic retrofitting of unreinforced masonry buildings—a literature review. *Australian Journal of Structural Engineering*, 6(1) (2005) 25-36. <https://doi.org/10.1080/13287982.2005.11464942>
- [20] Bhattacharya S., Nayak S., Dutta SC., A critical review of retrofitting methods for unreinforced masonry structures. *Journal of Disaster Risk Reduction*, 7 (2014) 51-67. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2013.12.004>
- [21] Jokilehto J., *A history of architectural conservation*. Routledge, New York (2017).
- [22] Saygı AS., Sahil S., Çanakkale-Bozcaada Geleneksel Kent Dokusu ve Evleri. *Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology*, 5(3) (2017) 13-35.
- [23] Tuna ME., *Depreme dayanıklı yapı tasarımı*. Turhan Kitabevi, Ankara (2000).
- [24] Naeim F., Kelly JM., (1999) *Design of seismic isolated structures: from theory to practice*. John Wiley & Sons, New York.
- [25] Julie S., Sajeeb R., Performance of base isolators and tuned mass dampers in vibration control of a multistoried building. *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering*, 2 (2012) 01-07.
- [26] Cimellaro GP., Marasco S., *Introduction to dynamics of structures and earthquake engineering (Vol. 45)*. Springer, Cham (2018).
- [27] Towashiraporn P., Park J., Goodno BJ., Craig JI., Passive control methods for seismic response modification. *Progress in Structural Engineering and Materials*, 4(1) (2002) 74-86. <https://doi.org/10.1002/pse.107>
- [28] Soyluk A., Sismik taban izolatörü kullanımının mimari tasarıma etkisi. *Doktora tezi*. Gazi Üniversitesi (2010).
- [29] De Luca A., Mele E., Molina J., Verzeletti G., Pinto AV., *Base isolation for retrofitting*

- historic buildings: Evaluation of seismic performance through experimental investigation. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 30(8) (2001) 1125-1145. <https://doi.org/10.1002/eqe.54>
- [30] Kelly JM., Aseismic base isolation: review and bibliography. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 5(4) (1986) 202-216. [https://doi.org/10.1016/0267-7261\(86\)90006-0](https://doi.org/10.1016/0267-7261(86)90006-0)
- [31] Kilar V., Petrovcic S., (2018) Seismic rehabilitation of masonry heritage structures with base-isolation and with selected contemporary strengthening measures. In: Ivorra S, Brebbia CA (ed) *Seismic Resistant Structures*, WIT Press, Southampton, ss 13-23.
- [32] Seki M., Miyazaki M., Tsuneki Y., Kataoka K., A masonry school building retrofitted by base isolation technology. 12th World Conference on Earthquake Engineering, Auckland, Yeni Zelanda, (2000).
- [33] Nanda RP., Agarwal P., Shrikhande M., Suitable friction sliding materials for base isolation of masonry buildings. *Shock and Vibration*, 19(6) (2012) 1327-1339. <https://doi.org/10.3233/SAV-2012-0675>
- [34] Tomažević M., Klemenc I., Weiss P., Seismic upgrading of old masonry buildings by seismic isolation and CFRP laminates: a shaking-table study of reduced scale models. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 7(1) (2009) 293-321. <https://doi.org/10.1007/s10518-008-9086-1>
- [35] Chiozzi A., Simoni M., Tralli A., Base isolation of heavy non-structural monolithic objects at the top of a masonry monumental construction. *Materials and Structures*, 49(6) (2016) 2113-2130. <https://doi.org/10.1617/s11527-015-0637-z>
- [36] Symans MD., Constantinou MC., Semi-active control systems for seismic protection of structures: a state-of-the-art review. *Engineering Structures*, 21(6) (1999) 469-487. [https://doi.org/10.1016/S0141-0296\(97\)00225-3](https://doi.org/10.1016/S0141-0296(97)00225-3)
- [37] Soong TT., Dargush GF., *Passive energy dissipation systems in structural engineering*. Wiley, New York (1997).
- [38] Housner G., Bergman LA., Caughey TK., Chassiakos AG., Claus RO., Masri SF., vd., *Structural control: past, present, and future*. *Journal of Engineering Mechanics*, 123(9) (1997) 897-971. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9399\(1997\)123:9\(897\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(1997)123:9(897))
- [39] Asteris PG., On the structural analysis and seismic protection of historical masonry structures. *The Open Construction & Building Technology Journal*, 2(1) (2008) 124-133. <https://doi.org/10.2174/1874836800802010124>
- [40] Taleb R., Bouriche F., Remas A., Boukri M., Kehila F., Use of ambient and forced vibration tests to evaluate seismic properties of an unreinforced masonry building rehabilitated by dampers. 15th World Conference on Earthquake Engineering (WCEE), Lisbon, Portekiz, (2012).
- [41] Longarini N., Zucca M., A chimney's seismic assessment by a tuned mass damper. *Engineering Structures*, 79 (2014) 290-296. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2014.05.020>
- [42] Benedetti D., Increasing available ductility in masonry buildings via energy absorbers. *Shaking table tests. European Earthquake Engineering*, 3 (2004) 1-29.
- [43] Gocevski V., Petraskovic Z., Seismic analysis of existing masonry structures reinforced with "SYSTEM DC90" dampers. *International Conference on Earthquake Engineering*, Üsküp, Makedonya, (2013).
- [44] Abrams DP., *New perspectives on seismic rehabilitation. Asia-Pacific workshop on Seismic Design and Retrofit of Structures*, Taipei, Taiwan, (1999).
- [45] Pilorge AG., Impact of friction dampers and ductility factor on the seismic response of concrete moment resisting frame buildings. *Yüksek Lisans Tezi, Concordia University* (2018).
- [46] Binda L., Modena C., Baronio G., Abbaneo S., Repair and investigation techniques for stone masonry walls. *Construction and Building Materials*, 11(3) (1997) 133-142. [https://doi.org/10.1016/S0950-0618\(97\)00031-7](https://doi.org/10.1016/S0950-0618(97)00031-7)
- [47] Valluzzi MR., Tinazzi D., Modena C., Shear behavior of masonry panels strengthened by FRP laminates. *Construction and Building Materials*, 16(7) (2002) 409-416. [https://doi.org/10.1016/S0950-0618\(02\)00043-0](https://doi.org/10.1016/S0950-0618(02)00043-0)
- [48] Salaman A., Stepinac M., Matorić I., Klasić M., Post-earthquake condition assessment and seismic upgrading strategies for a heritage-protected school in Petrinja, Croatia. *Buildings*. 12(12) (2022) 2263. <https://doi.org/10.3390/buildings12122263>
- [49] Naaman AE., *Ferrocement and laminated cementitious composites*. Techno Press, Ann Arbor 3000(1) (2000).
- [50] ElGawady M., Lestuzzi P., Badoux M., *Retrofitting of masonry walls using shotcrete. The 2006 New Zealand Society for Earthquake Engineering Conference, Yeni Zelanda, (2006).*

- [51] Karantoni FV., Fardis MN., Effectiveness of seismic strengthening techniques for masonry buildings. *Journal of Structural Engineering*, 118(7) (1992) 1884-1902. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1992\)118:7\(1884\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1992)118:7(1884))
- [52] Augenti N., Nanni A., Parisi F., Construction failures and innovative retrofitting. *Buildings*, 3(1) (2013) 100-121. <https://doi.org/10.3390/buildings3010100>
- [53] ElGawady M., Lestuzzi P., Badoux M., A review of conventional seismic retrofitting techniques for URM. 13th International Brick and Block Masonry Conference, Amsterdam, Hollanda, (2004)
- [54] Abrams D., Lynch J., Flexural behavior of retrofitted masonry piers. *The KEERC-MAE Joint Seminar on Risk Mitigation for Regions of Moderate Seismicity*, Illinois, Amerika, (2001).
- [55] Kadam SB., Singh Y., Li B., Out-of-plane behaviour of unreinforced masonry strengthened using ferrocement overlay. *Materials and Structures*, 48(10) (2015) 3187-3203. <https://doi.org/10.1617/s11527-014-0390-8>
- [56] Fauzan., Ismail FA., Hakam A., Zaidir., Amalia SH., Experimental study on masonry building strengthened with ferrocement layers. *GEOMATE Journal*, 14(45) (2018) 84-90. <https://doi.org/10.21660/2018.45.7305>
- [57] Garofano A., Ceroni F., Pecce M., Modelling of the in-plane behaviour of masonry walls strengthened with polymeric grids embedded in cementitious mortar layers. *Composites Part B: Engineering*, 85 (2016) 243-258. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.09.005>
- [58] Tomazevic M., *Earthquake-resistant design of masonry buildings*. World Scientific, Singapur 1 (1999).
- [59] Borri A., Corradi M., Sisti R., Buratti C., Belloni E., Moretti E., Masonry wall panels retrofitted with thermal-insulating GFRP-reinforced jacketing. *Materials and Structures*, 49 (2016) 3957-3968. <https://doi.org/10.1617/s11527-015-0766-4>
- [60] Binda L., Saisi A., State of the art of research on historic structures in Italy. (2001) https://www.researchgate.net/publication/237440027_State_of_the_Art_of_Research_on_Historic_Structures_in_Italy Erişim 31 Mayıs 2024.
- [61] Sunrise Updates. <https://www.sunrisetools.co.uk/blog/post/8-how-to-pointing-repointing-brickwork> Erişim 24 Mayıs 2024
- [62] Tetley R., Madabhushi G., Vulnerability of adobe buildings under earthquake loading. *International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering*, Thessaloniki, Yunanistan, (2007).
- [63] Tinazzi D., Arduini M., Modena C., Nanni A., FRP structural re-pointing of masonry assemblages. 3rd International Conference on Advanced Composite Materials in Bridges and Structures, Ottawa, Kanada, (2000).
- [64] Alcaino P., Santa-Maria H., Experimental response of externally retrofitted masonry walls subjected to shear loading. *Journal of Composites for Construction*, 12(5) (2008) 489-498. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0268\(2008\)12:5\(489\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0268(2008)12:5(489))
- [65] Moropoulou A., Bakolas A., Anagnostopoulou S., Composite materials in ancient structures. *Cement and Concrete Composites*, 27(2) (2005) 295-300. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2004.02.018>
- [66] Apostolopoulou M., Aggelakopoulou E., Siouta L., Bakolas A., Douvika M., Asteris PG., Moropoulou A., A methodological approach for the selection of compatible and performable restoration mortars in seismic hazard areas. *Construction and Building Materials*, 155 (2017) 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.210>
- [67] Pusat SE., Tarihi yapıların onarımında kullanılacak harç üretimi. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi (2002).
- [68] Akbulut DE., Tarihi yapıların onarımında kullanılacak harçların seçimine yönelik bir öneri. Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi (2006).
- [69] Hamid AA., Mahmoud A., El Magd SA., Strengthening and repair of unreinforced masonry structures: state-of-the-art. 10th International Brick and Block Masonry Conference, Calgary, Kanada, (1994).
- [70] Rai DC., Goel SC., Seismic strengthening of unreinforced masonry piers with steel elements. *Earthquake Spectra*, 12(4) (1996) 845-862. <https://doi.org/10.1193/1.1585913>
- [71] Taghdi M., Seismic retrofit of low-rise masonry and concrete walls by steel strips. Doktora Tezi, University of Ottawa (1998).
- [72] Prota A., Marcarì G., Fabbrocino G., Manfredi G., Aldea C., Experimental in-plane behavior of tuff masonry strengthened with cementitious matrix-grid composites. *Journal of Composites for Construction*, 10(3) (2006) 223-233. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0268\(2006\)10:3\(223\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0268(2006)10:3(223))

- [73] Triantafillou TC., Fardis MN., Strengthening of historic masonry structures with composite materials. *Materials and Structures*, 30 (1997) 486-496. <https://doi.org/10.1007/BF02524777>
- [74] Amiraslanzadeh R., Ikemoto T., Miyajima M., Fallahi A., A comparative study on seismic retrofitting methods for unreinforced masonry brick walls. 15th World Conference on Earthquake Engineering, International Association for Earthquake Engineering, Lisbon, Portekiz, (2012).
- [75] Al-Manaseer A., Neis W., Load tests on post-tensioned masonry wall panels. *Structural Journal*, 84(6) (1987) 467-472. <https://doi.org/10.14359/2768>
- [76] Korkmaz SZ., Korkmaz HH., Türer A., Elastik art-germe şeritleriyle, yığma yapıların güçlendirilmesi. *Yığma Yapıların Deprem Güvenliğinin Artırılması Çalışmayı Bildirileri*, Ankara, Türkiye, (2005).
- [77] Teng JG., Chen J., Smith ST., Lam L., Behaviour and strength of FRP strengthened RC structures: a state-of-the-art review. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Structures and Buildings*, 156(1) (2003) 51-62. <https://doi.org/10.1680/stbu.2003.156.1.51>
- [78] ElGawady M., Lestuzzi P., Badoux M., A review of retrofitting of unreinforced masonry walls using composites. 4th Int. Conf. On Advanced Composite Materials in Bridges and Structures, Alberta, Kanada, (2004).
- [79] Mahmood H., Ingham JM., Diagonal compression testing of FRP-retrofitted unreinforced clay brick masonry wallettes. *Journal of Composites for Construction*, 15(5) (2011) 810-820.
- [80] Fırat FK., Eren A., Tarihi yığma yapılarıdaki hasarlı kemerler üzerinde FRP etkisinin incelenmesi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 30(4) (2015) 659-670. <https://doi.org/10.17341/gummfd.46980>
- [81] Petrovčić S., Kilar V., Design considerations for retrofitting of historic masonry structures with externally bonded FRP systems. *International Journal of Architectural Heritage*, 16(7) (2022) 957-976. <https://doi.org/10.1080/15583058.2020.1853278>
- [82] Saleem MU., Numada M., Amin MN., Meguro K., Seismic response of PP-band and FRP retrofitted house models under shake table testing. *Construction and Building Materials*, 111 (2016) 298-316. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.073>
- [83] Burgoyne C., Does FRP have an economic future?. 4th Conference on Advanced Composite Materials in Bridges and Structures, Calgary, Kanada, (2004).
- [84] Sathiparan N., Mayorca P., Nesheli KN., Guragain R., Meguro K., Experimental study on in-plane and out-of-plane behavior of masonry wallettes retrofitted by PP-band meshes. *Seisan Kenkyu*, 57(6) (2005) 530-533. <https://doi.org/10.11188/seisankenkyu.57.530>
- [85] Macabuag J., Guragain R., Bhattacharya S., Seismic retrofitting of non-engineered masonry in rural Nepal. . *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Structures and Buildings*, 165(6) (2012) 273-286. <https://doi.org/10.1680/stbu.10.00015>
- [86] Meguro K., Soti R., Navaratnaraj S., Numada M., Dynamic testing of masonry houses retrofitted by bamboo band meshes. *JSCE Journal of Earthquake Engineering*, 68(4) (2012) I_760-I_765. https://doi.org/10.2208/jscejsee.68.I_760
- [87] Carozzi FG., Poggi C., Bertolesi E., Milani G., Ancient masonry arches and vaults strengthened with TRM, SRG and FRP composites: Experimental evaluation. *Composite Structures*, 187 (2018) 466-480. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.12.075>
- [88] Anania L., Badalà A., D'Agata G., The post strengthening of the masonry vaults by the Ω -Wrap technique based on the use of C-FRP. *Construction and Building Materials*, 47 (2013) 1053-1068. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.05.012>
- [89] Valvona F., Toti J., Gattulli V., Potenza F., Effective seismic strengthening and monitoring of a masonry vault by using Glass Fiber Reinforced Cementitious Matrix with embedded Fiber Bragg Grating sensors. *Composites Part B: Engineering*, 113 (2017) 355-370. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.01.024>
- [90] Zampieri P., Simoncello N., Tetougueni CD., Pellegrino C., A review of methods for strengthening of masonry arches with composite materials. *Engineering Structures*, 171 (2018) 154-169. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.05.070>
- [91] Garmendia L., Larrinaga P., San-Mateos R., San-José JT., Strengthening masonry vaults with organic and inorganic composites: an experimental approach. *Materials & Design*, 85 (2015) 102-114. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.06.150>

- [92] Padalu PKVR., Vashisht R., Ramancharla PK., (2023). A Review on Construction Techniques and Structural Restoration of Ancient Masonry Buildings. In Goel MD, Kumar R, Gadve SS (ed) Structural Engineering Convention, Springer Nature Singapore, ss 335-350.
- [93] Roca P., Cervera M., Gariup G., Pela' L., Structural analysis of masonry historical constructions. Classical and advanced approaches. Archives of Computational Methods in Engineering, 17 (2010) 299-325. <https://doi.org/10.1007/s11831-010-9046-1>
- [94] Tomažević M., Klemenc I., Seismic behaviour of confined masonry walls. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 26(10) (1997) 1059-1071. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1096-9845\(199710\)26:10<1059::AID-EQE694>3.0.CO;2-M](https://doi.org/10.1002/(SICI)1096-9845(199710)26:10<1059::AID-EQE694>3.0.CO;2-M)
- [95] Brignola A., Frumento S., Lagomarsino S., Podestà S., Identification of shear parameters of masonry panels through the in-situ diagonal compression test. International Journal of Architectural Heritage, 3(1) (2008) 52-73. <https://doi.org/10.1080/15583050802138634>
- [96] Yardim Y., Lalaj O., Shear strengthening of unreinforced masonry wall with different fiber reinforced mortar jacketing. Construction and Building Materials, 102 (2016) 149-154. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.095>
- [97] Darbhanzi A., Marefat M., Khanmohammadi M., Investigation of in-plane seismic retrofit of unreinforced masonry walls by means of vertical steel ties. Construction and Building Materials, 52 (2014) 122-129. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.11.020>
- [98] Spina G., Ramundo F., Mandara A., Masonry strengthening by metal tie-bars, a case study. Paper presented at the Structural Analysis of Historical Constructions. 4th International Seminar on Structural Analysis of Historical Constructions, Padova, İtalya, (2004).
- [99] Ural A., Fırat FK., Tuğrulerçi Ş., Kara ME., Experimental and numerical study on effectiveness of various tie-rod systems in brick arches. Engineering Structures, 110 (2016) 209-221. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2015.11.038>
- [100] Tanrıverdi S., Yavuz C., Investigation of the effects of clamp depths on the flexural behavior of walls in masonry walls. Construction and Building Materials, 393 (2023) 132081. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132081>
- [101] Çelik T., Tanrıverdi Ş., Ural A., Fırat FK., Yığma yapılarda kullanılan kenetlerin yapı davranışına etkilerinin incelenmesi. Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, 21(3) (2021) 650-659. <https://doi.org/10.35414/akufemubid.874494>
- [102] Ural A., Kara ME., Uslu S., Kenet ve zıvanaların yığma duvarların kesme (kayma) davranışına etkisi, 5. Tarihi Eserlerin Güçlendirilmesi ve Geleceğe Güvenle Devredilmesi Sempozyumu, Erzurum, 537-548, (2015)
- [103] Da Porto F., Guidi G., Dalla Benetta M., Verlatto N., Combined in-plane/out-ofplane experimental behaviour of reinforced and strengthened infill masonry walls. 12th Canadian Masonry Symposium, British Columbia, Kanada, (2013).
- [104] Martins A., Vasconcelos G., Fangueiro R., Cunha F., Experimental assessment of an innovative strengthening material for brick masonry infills. Composites Part B: Engineering, 80 (2015) 328-342. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.06.012>
- [105] Çakmak AŞ., Moropoulou A., Mullen CL., Interdisciplinary study of dynamic behavior and earthquake response of Hagia Sophia. Soil dynamics and earthquake engineering, 14(2) (1995) 125-133. [https://doi.org/10.1016/0267-7261\(94\)00031-B](https://doi.org/10.1016/0267-7261(94)00031-B)
- [106] Aydınğün GŞ., Tarih boyunca yaşanan depremler sonrası Ayasofya onarımları. Deprem Sempozyumu, Kocaeli, (2005).
- [107] Kocaman İ., Mercimek Ö., Gürbüz M., Erbaş Y., Anıl Ö., The effect of Kahramanmaraş earthquakes on historical Malatya Yeni Mosque. Engineering Failure Analysis, 161 (2024) 108310. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2024.108310>
- [108] ICOMOS. Carte Del Resturo, (1931). https://www.icomos.org.tr/Dosyalar/ICOMOS_TR_tr0660878001536681682.pdf, Erişim 3 Mayıs 2024
- [109] UNESCO. Lahey Konvansiyonu, (1954). <https://unesco.org.tr/Home/Page/60?slug=Yerlerinden-Edilmiş-Kültür-Varlıkları-İhtisas-Komitesi>, Erişim 3 Mayıs 2024
- [110] ICOMOS. Venedik Tüzüğü, (1964). https://www.icomos.org.tr/Dosyalar/ICOMOS_TR_tr0243603001536681730.pdf, Erişim 3 Mayıs 2024
- [111] Kutlu İ., Şimşek D., Mardin Mimarlık Mirasında Mimarbaşı Lole'nin

Rolü. İDEALKENT, 16(44) (2024) 710-746.
<https://doi.org/10.31198/idealkent.1456731>

- [112] Bekar İ., Kutlu I., Ergün R., Importance performance analysis for sustainability of reused historical building: Mardin Sabanci City Museum and art gallery. *Open House International*, 49(3) (2024) 550-573. <https://doi.org/10.1108/OHI-04-2023-0080>
- [113] Semerci F., Mardin kireçtaşının yapı malzemesi olarak kullanımına yönelik analizlerinin yapılması: Kasımiye Medresesi örneği. *Journal of Architectural Sciences and Applications*, 2(2) (2017) 60-79.

Toolox 44 Çeliğinin Tornalanmasında Kesme Hızı, İlerleme ve Kesici Uç Yarıçapının Takım Aşınması ve Yüzey Pürüzlülüğüne Etkileri

Emel KURAM^{1*}  Nuray ÜÇÜNCÜ² 

¹Gebze Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Kocaeli, Türkiye

²Gebze Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Kocaeli, Türkiye

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 09/08/2024
Düzeltilme: 13/09/2024
Kabul: 21/09/2024

Anahtar Kelimeler

Toolox 44
Tornalama
Kesme Parametreleri
Kesici Uç Yarıçapı
Takım Aşınması
Yüzey Pürüzlülüğü

Article Info

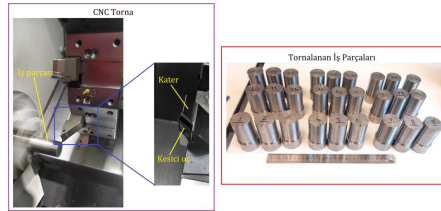
Research article
Received: 09/08/2024
Revision: 13/09/2024
Accepted: 21/09/2024

Keywords

Toolox 44
Turning
Cutting Parameters
Insert Radius
Tool Wear
Surface Roughness

Grafik Özet (Graphical/Tabular Abstract)

Bu çalışmada, Toolox 44 çeliğinin tornalanmasında kesme hızının, ilerlemenin ve kesici uç yarıçapının yüzey pürüzlülüğü ve takım aşınması üzerindeki etkileri incelenmiştir. / In this study, effects of cutting speed, feed and insert radius on surface roughness and tool wear in turning of Toolox 44 steel were examined.



Şekil A: Deney düzeneği / Figure A: Experimental setup

Önemli noktalar (Highlights)

- Bu çalışmada, Toolox 44 malzemesinin tornalanmasında kesme hızının, ilerlemenin ve kesici uç yarıçapının yüzey pürüzlülüğü ve takım aşınması üzerindeki etkileri incelenmiştir. / In this study, the effects of cutting speed, feed and insert radius on surface roughness and tool wear in turning of Toolox 44 material were examined.
- İncelenen şartlar altında, kesici uçlarda herhangi bir yığıntı talaş (built-up edge, BUE) ve talaş yüzeyinde krater aşınması gözlemlenmemiştir. Ancak kesici uçların yan yüzeylerinde serbest yüzey aşınması gözlemlenmiştir. / Under the conditions examined, no built-up edge (BUE) and crater wear on the rake surface were observed on the cutting inserts. However, flank wear was observed on the flank surfaces of the inserts.
- Bütün kesme hızlarında, genellikle kesici uç yarıçapı arttıkça yüzey pürüzlülüğü değeri azalmıştır. / At all cutting speeds, surface roughness value generally decreased as the insert radius increased.

Amaç (Aim): Toolox 44 çeliğinin tornalanmasında kesme hızının, ilerlemenin ve kesici uç yarıçapının yüzey pürüzlülüğü ve takım aşınması üzerindeki etkilerinin araştırılması amaçlanmıştır. / It was aimed to investigate the effects of cutting speed, feed and insert radius on surface roughness and tool wear in turning of Toolox 44 steel.

Özgünlük (Originality): Toolox 44 hakkında literatürde çok fazla bilgi bulunmaması nedeniyle bu araştırma bu malzeme ile ilgili yapılacak sonraki çalışmalara kılavuz niteliğinde olacaktır. Bu çalışmada, literatürden farklı olarak Toolox 44 çeliğinin tornalanmasında kesme hızının, ilerlemenin ve kesici uç yarıçapının yüzey pürüzlülüğü ve takım aşınması üzerine etkileri araştırılmıştır. / Since there is not much information about Toolox 44 in the literature, this research will serve as a guide for future studies on this material. In this study, unlike the literature, the effects of cutting speed, feed and insert radius on surface roughness and tool wear in turning of Toolox 44 steel were investigated.

Bulgular (Results): Bütün kesme hızlarında, genellikle kesici uç yarıçapı arttıkça yüzey pürüzlülüğü değeri azalmıştır. Ra değerini en çok etkileyen parametrelerin yüksekten düşüğe sırasıyla ilerleme, kesici uç yarıçapı ve kesme hızı olduğu görülmüştür. / At all cutting speeds, surface roughness value generally decreased as the insert radius increased. It was observed that the parameters that affect the Ra value the most were feed, insert radius and cutting speed, in order from high to low.

Sonuç (Conclusion): Toolox 44 malzemesinin tornalanmasında kesme hızı ve kesici uç yarıçapı hangi değerde olursa olsun Ra değerini çok fazla arttırdığından dolayı 0,3 mm/dev ilerleme değerinin kullanılmaması gerektiği sonucuna varılmıştır. / It was concluded that 0.3 mm/rev feed rate should not be used in turning Toolox 44 material, as it increased the Ra value too much, regardless of the cutting speed and insert radius.



Toolox 44 Çeliğinin Tormalanmasında Kesme Hızı, İlerleme ve Kesici Uç Yarıçapının Takım Aşınması ve Yüzey Pürüzlülüğüne Etkileri

Emel KURAM^{1*} Nuray ÜÇÜNCÜ²

¹Gebze Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Kocaeli, Türkiye

²Gebze Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Kocaeli, Türkiye

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 09/08/2024
Düzeltilme: 13/09/2024
Kabul: 21/09/2024

Anahtar Kelimeler

Toolox 44
Tormalama
Kesme Parametreleri
Kesici Uç Yarıçapı
Takım Aşınması
Yüzey Pürüzlülüğü

Öz

Bu çalışmada, Toolox 44 kalıp çeliğinin tormalanmasında kesme hızının, ilerlemenin ve kesici uç yarıçapının yüzey pürüzlülüğü ve takım aşınması üzerindeki etkileri incelenmiştir. Tormalama deneyleri, üçer farklı kesme hızı (80, 110 ve 140 m/dak), ilerleme (0,1, 0,2 ve 0,3 mm/dev), kesici uç yarıçapı (0,2, 0,4 ve 0,8 mm) ve sabit talaş derinliği (0,5 mm) kullanılarak kuru şartlar altında gerçekleştirilmiştir. İncelenen şartlar altında, kesici uçlarda herhangi bir yığıntı talaş (built-up edge, BUE) ve talaş yüzeyinde krater aşınması görülmemiştir. Ancak kesici uçların yan yüzeylerinde serbest yüzey aşınması gözlenmiştir. En küçük serbest yüzey aşınması, kesme hızının 140 m/dak, ilerlemenin 0,1 mm/dev ve kesici uç yarıçapının 0,4 mm olduğu şartlarda ölçülmüştür. 80 m/dak, 110 m/dak ve 140 m/dak kesme hızlarında, tüm kesici uç yarıçapları (0,2, 0,4 ve 0,8 mm) için ilerleme değerindeki artış ile ortalama yüzey pürüzlülük (Ra) değerinin arttığı bulunmuştur. Bütün kesme hızlarında, genellikle kesici uç yarıçapı arttıkça Ra değeri azalmıştır. Ra değerini en çok etkileyen parametrelerin yüksekten düşüğe sırasıyla ilerleme, kesici uç yarıçapı ve kesme hızı olduğu görülmüştür. Toolox 44 malzemesinin tormalanmasında kesme hızı ve kesici uç yarıçapı hangi değerde olursa olsun Ra değerini çok fazla arttırdığından dolayı 0,3 mm/dev ilerleme değerinin kullanılmaması gerektiği ve eğer bu malzemenin tormalanmasında 0,2 mm/dev ilerleme değeri kullanılacaksa, iyi bir yüzey kalitesi için uç yarıçapının 0,8 mm olarak seçilmesi gerektiği sonucuna varılmıştır.

Effects of Cutting Speed, Feed and Insert Radius on Tool Wear and Surface Roughness in Turning of Toolox 44 Steel

Article Info

Research article
Received: 09/08/2024
Revision: 13/09/2024
Accepted: 21/09/2024

Keywords

Toolox 44
Turning
Cutting Parameters
Insert Radius
Tool Wear
Surface Roughness

Abstract

In this study, effects of cutting speed, feed and insert radius on surface roughness and tool wear in turning of Toolox 44 mold steel were examined. Turning experiments were conducted at three different cutting speeds (80, 110 and 140 m/min), feed (0.1, 0.2 and 0.3 mm/rev), insert radius (0.2, 0.4 and 0.8 mm) and constant depth of cut (0.5 mm) under dry conditions. Under the conditions examined, no built-up edge (BUE) and crater wear on rake surface were observed on the cutting inserts. However, flank wear was observed on side surfaces of the inserts. The smallest flank wear was measured under conditions where cutting speed was 140 m/min, feed was 0.1 mm/rev, and insert radius was 0.4 mm. It was found that average surface roughness (Ra) value increased with increment in feed value for all insert radii (0.2, 0.4 and 0.8 mm) at cutting speeds of 80 m/min, 110 m/min and 140 m/min. At all cutting speeds, Ra value generally decreased as the insert radius increased. It was observed that the parameters that affected Ra value the most were feed, insert radius and cutting speed, in order from high to low. It has been concluded that the feed rate of 0.3 mm/rev should not be employed in turning of Toolox 44 material, as it increases Ra value too much, regardless of cutting speed and cutting edge radius and if a feed rate of 0.2 mm/rev is to be utilized in turning of this material, the tip radius should be selected as 0.8 mm for a good surface quality.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Talaşlı imalat ile işlenecek iş parçalarının yüksek dayanıma sahip olması istenmektedir. Bu nedenle talaşlı imalat öncesinde iş parçaları sertleştirme işlemine yani ısıl işleme tabi tutulabilmektedir.

Fakat ısıl işlem sonrasında iş parçası malzemesinde çarpılma, mikro çatlak oluşumu, yüzeyde yanma ve deformasyon gibi sorunlara neden olan iç gerilmeler oluşabilmektedir. Bu nedenle talaşlı imalatla ön sertleştirilmiş çelikler (örneğin Toolox 44 çeliği) kullanılabilir [1]. Toolox 44 çeliği, ön

sertleştirilerek, temperlenerek ve gerilim giderme prosesi uygulanarak temin edilen, düşük karbon metalurjisi ile üretilen bir kalıp ve mühendislik çeliğidir [1-3]. Toolox 44 çeliğine ait mekanik özellikler Tablo 1'de sunulmuştur. Toolox 44 sahip olduğu tokluk ve yorulma değerleri ile makine elemanlarının ömrünü belirgin bir şekilde arttırmaktadır. Yüksek sıcaklıklarda da sıcaklığındaki özelliklerini kaybetmemesi, Toolox 44 çeliğinin yüksek sıcaklıklarda aşınma plakası olarak kullanımına olanak tanımaktadır [3]. İşleme esnasında yüksek ölçüsel kararlılığa sahiptir [1]. 45 HRC sertliğe sahip olmasına rağmen kolay işlenebilir bir malzemedir. Bu da onun kalıp imalatında ve makine elemanlarında yaygın kullanılmasını sağlamaktadır [1, 3, 4]. Ön sertleştirilmiş olarak üretildiğinden Toolox 44 çeliği ikinci bir ısıl işleme ihtiyaç duymamaktadır. Bu nedenle talaşlı imalatta iş parçası malzemesi olarak kullanıldığında, zaman açısından avantaj sağlayabilmektedir. Fakat literatürde Toolox 44 malzemesinin talaşlı imalatı hakkında yapılan çalışmalar çok sınırlıdır. Literatürde, Toolox 44 malzemesinin tornalanmasında farklı kaplamaların takım ömrü, kesme kuvvetleri, sıcaklık ve talaş oluşumu üzerindeki etkileri belirlenmiştir [5]. Özlü [6], Toolox 44 çeliğinin tornalanmasında enerji tüketimi, kesme kuvveti, yüzey pürüzlülüğü ve titreşimi minimize edebilmek için deneysel ve istatistiksel çalışma yapmıştır. Tornalama deneyleri kuru işleme koşullarında Taguchi L27 ortogonal dizisine göre farklı kesme parametrelerinde (kesme hızı, ilerleme ve talaş derinliği) gerçekleştirilmiştir. Çıktı parametrelerini eş zamanlı olarak optimize etmek için Taguchi tabanlı gri ilişkisel analiz kullanılmıştır. Wojciechowski ve Mrozek [7] Toolox 44 çeliğinin mikro frezelemesinin mekanik ve teknolojik yönlerinin değerlendirilmesine odaklanmıştır. Deney, değişken dış başına ilerleme ve takım eksen eğim açısı değerleri ile mikro frezeleme testleri sırasında titreşimlerin ivmelenmesinin ölçülmesini içermektedir. Binali vd. [1] Toolox 44 çeliğinin TiAlN kaplı karbür kesici takım kullanarak farklı kesme hızlarında, ilerlemelerde ve talaş derinliklerinde frezelenmesinde meydana gelen takım aşınmalarını ve yüzey pürüzlülüğünü araştırmışlardır. Bayraktar ve Uzun [8] Nimax ve Toolox 44 kalıp çeliklerinin frezelenmesi esnasında farklı kesme hızlarının ve ilerlemelerin yüzey pürüzlülüğü, kesme kuvveti ve işlenmiş yüzey altı durumları üzerine etkilerini incelemişlerdir. Globisch vd. [9], sertleştirilmiş durumda kaba işleme ve ince talaş işleme işlemlerini gerçekleştirebilmek amacıyla yekpare karbür parmak freze için yenilikçi bir takım konsepti sunmuştur. Deneylerde Toolox 44 takım çeliğinin işlenmesi sırasında helis açısının proses

davranışı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Proses davranışını değerlendirmek için takım ömrü boyunca proses kuvvetlerinin gelişimi, talaş oluşumu, takım aşınması ve parça kalitesi analiz edilmiştir.

Genellikle çelik malzemelerden talaşlı imalat ile üretilen parçaların daha uzun ömürlü olması için yüksek sıcaklıklara ve yüksek mukavemete dayanım özelliğini arttırmak gerekmektedir. Bu durumda çoğunlukla talaşlı imalat ile işlendikten sonra parça ısıl işleme gönderilerek sertleşmesi sağlanmaktadır. Fakat Toolox 44 çeliği ön sertleştirilmiş olarak üretildiğinden ısıl işlem gerektirmemektedir. Bu nedenle zaman ve maliyet açısından avantaj sağlayabilmektedir. Ancak yapılan literatür taramasında Toolox 44 malzemesinin talaşlı imalatı hakkında yapılan çalışmaların çok sınırlı olduğu görülmüştür. Toolox 44 hakkında literatürde çok fazla bilgi bulunmaması nedeniyle bu araştırma bu malzeme ile ilgili yapılacak sonraki çalışmalara kılavuz niteliğinde olacaktır. Bu çalışmada, literatürden farklı olarak Toolox 44 kalıp çeliğinin tornalanmasında kesme hızının, ilerlemenin ve kesici uç yarıçapının yüzey pürüzlülüğü ve takım aşınması üzerine etkileri araştırılmıştır. Tornalama deneyleri, üçer farklı kesme hızı (80, 110 ve 140 m/dak), ilerleme (0,1, 0,2 ve 0,3 mm/dev), kesici uç yarıçapı (0,2, 0,4 ve 0,8 mm) ve sabit talaş derinliği (0,5 mm) kullanılarak kuru şartlar altında gerçekleştirilmiştir. Literatürde Toolox 44 çeliğinin tornalanmasında kesme hızının, ilerlemenin ve kesici uç yarıçapının takım aşınması ve kesici uç yarıçapının yüzey pürüzlülüğü üzerine etkilerinin incelendiği çalışma yoktur. Bu araştırma bu yönüyle literatürdeki diğer çalışmalardan farklıdır.

2. MATERYAL VE METOD (MATERIALS AND METHODS)

Tornalama deneyleri CNC torna tezgahında (DOOSAN marka LYNX2100) yapılmıştır. Deneylerde iş parçası malzemesi olarak 45 HRC sertliğinde Toolox 44 çeliği kullanılmıştır. Toolox 44 çeliğinin kimyasal bileşimi firmadan alınan bilgilere göre Tablo 2'de sunulmuştur [3]. İş parçalarının boyutları $\varnothing 50 \times 100$ mm olarak belirlenmiştir. İş parçası aynaya bağlanmıştır ve bir paso için 0,5 mm talaş derinliğinde 70 mm uzunluğunda boyuna tornalanmıştır. Her bir deney için 70 mm boyda 11 paso verilerek toplam 770 mm boy işlenmiştir. Deneyler ISO M kalitesine karşılı gelen DESKAR marka semente karbür (VBMT 1103) takma uç kullanılarak yapılmıştır. Takma uçlar rombik pozitif talaş açısı 5° ye ve 0,2, 0,4 veya 0,8 mm uç yarıçapına sahiptir. Uçlar Teknik marka

SVJBR 2525 M16 kodlu katere bağlanmıştır. Tormalama deneylerinde üç farklı ilerleme, kesme hızı ve kesici uç yarıçapı seçilerek deney planı oluşturulmuştur ve deney planı Tablo 3'te verilmiştir. Tormalama şartları takım üreticisinin

verdiği aralıkların en düşük ve en yüksek değerleri dikkate alınarak seçilmiştir. Tüm deneyler kuru şartlarda gerçekleştirilmiştir. Her deney için yeni bir kesici uç ile yeni bir iş parçası ve toplamda 27 adet kesici uç ile 27 adet iş parçası kullanılmıştır.

Tablo 1. Toolox 44 malzemesinin mekanik özellikleri [3] (Mechanical properties of Toolox 44 material) [3]

	+20 °C	+200 °C	+300 °C	+400 °C	+500 °C
Çekme mukavemeti (MPa)	1450	1380			
Akma mukavemeti (MPa)	1300	1200			
Uzama (%)	13	10			
Basma akma mukavemeti (MPa)	1250	1120	1120	1060	930
Darbe tokluğu (J)	30	60	80	80	
Sertlik (HRC)	45				

Tablo 2. Toolox 44 malzemesinin kimyasal bileşimi (% ağırlıkça) [3] (Chemical composition of Toolox 44 material (% by weight)) [3]

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	V	Ni
0,32	0,60-1,10	0,80	Max 0,010	Max 0,002	1,35	0,80	0,14	Max 1,00

Tablo 3. Deney şartları (Experiment conditions)

Deney No	Kesme Hızı (m/dak)	İlerleme (mm/dev)	Talaş Derinliği (mm)	Kesici Uç Yarıçapı (mm)
1	80	0,1	0,5	0,2
2	80	0,1	0,5	0,4
3	80	0,1	0,5	0,8
4	80	0,2	0,5	0,2
5	80	0,2	0,5	0,4
6	80	0,2	0,5	0,8
7	80	0,3	0,5	0,2
8	80	0,3	0,5	0,4
9	80	0,3	0,5	0,8
10	110	0,1	0,5	0,2
11	110	0,1	0,5	0,4
12	110	0,1	0,5	0,8
13	110	0,2	0,5	0,2
14	110	0,2	0,5	0,4
15	110	0,2	0,5	0,8
16	110	0,3	0,5	0,2
17	110	0,3	0,5	0,4
18	110	0,3	0,5	0,8
19	140	0,1	0,5	0,2
20	140	0,1	0,5	0,4
21	140	0,1	0,5	0,8
22	140	0,2	0,5	0,2
23	140	0,2	0,5	0,4
24	140	0,2	0,5	0,8
25	140	0,3	0,5	0,2
26	140	0,3	0,5	0,4
27	140	0,3	0,5	0,8

ISO 3685 standardına [10] göre takım aşınması olarak serbest yüzey aşınması dikkate alınmıştır.

Tormalama sonrası kesici uçlarda meydana gelen serbest yüzey aşınmaları, taramalı elektron

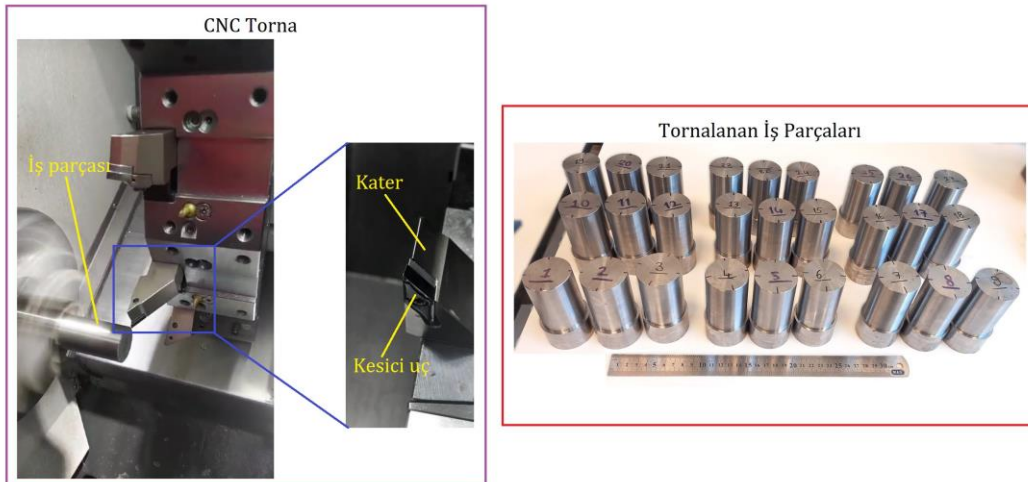
mikroskobu (SEM, Philips XL30) ile görüntülenerek ölçülmüştür. Uçlar için, aşınma değeri olarak kesici ucun serbest yüzeyindeki maksimum aşınma dikkate alınmıştır. Tornalanan yüzeylerin pürüzlülük değeri Mitutoyo Surf Test 301 profilometre kullanılarak belirlenmiş ve ISO 4287 standardında [11] belirtilen parametrelerden biri olan ortalama yüzey pürüzlülüğü (Ra) ölçülmüştür. Ölçümlerde örnekleme sayısı 5 ve örnekleme uzunluğu 0,8 mm olarak alınmıştır. Ra değeri iş parçası yüzeyi üzerinde 4 farklı noktadan ölçülmüştür ve analizlerde bu değerlerin ortalaması dikkate alınmıştır. Deneyde kullanılan tezgah, kater, kesici uç ve tornalanan iş parçaları Şekil 1’de ve takım aşınması ve yüzey pürüzlülüğü ölçümleri için kurulum Şekil 2’de gösterilmiştir.

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

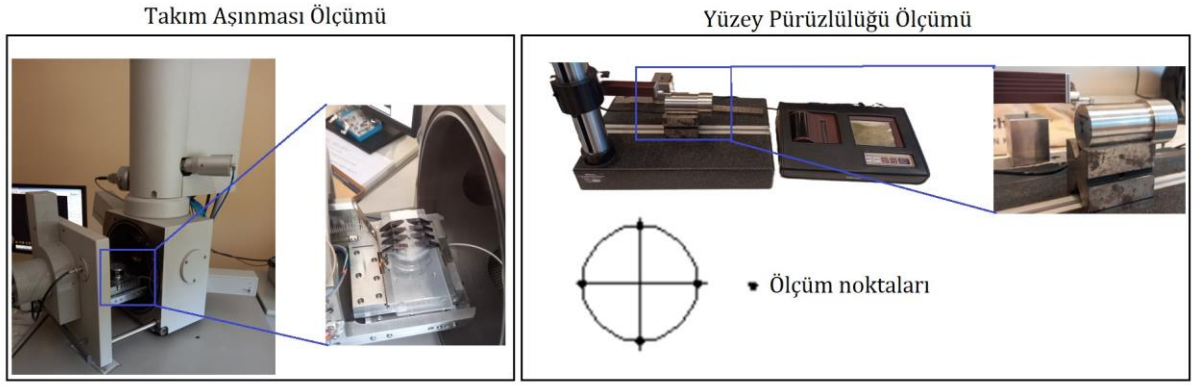
3.1. Takım Aşınması (Tool Wear)

Kullanılmamış kesici ucu ve tüm tornalama deneyleri sonrasında kesici uçların aşınma durumlarını gösteren SEM görüntüleri Şekil 3’te sunulmuştur. Tüm kesici takım kenarlarının yan yüzeyinde aşınma izleri görülmüştür. SEM görüntüleri incelendiğinde, kesici uçlarda herhangi bir yığıntı talaş (built-up edge, BUE) olmadığı sonucuna varılmıştır. Kesici ucun talaş yüzeyinde krater aşınması veya yan yüzeylerde çentik aşınması da görülmemiştir. Şekillerden görüldüğü gibi kesici uçların yan yüzeylerinde abrasiv aşınma mekanizmasının sebep olduğu serbest yüzey aşınması meydana gelmiştir, genellikle serbest yüzey aşınmalarının üniform olduğu sonucuna varılmıştır ve bu aşınmalar ölçülerek kesme hızının, ilerlemenin ve uç yarıçapının etkileri belirlenmiştir.

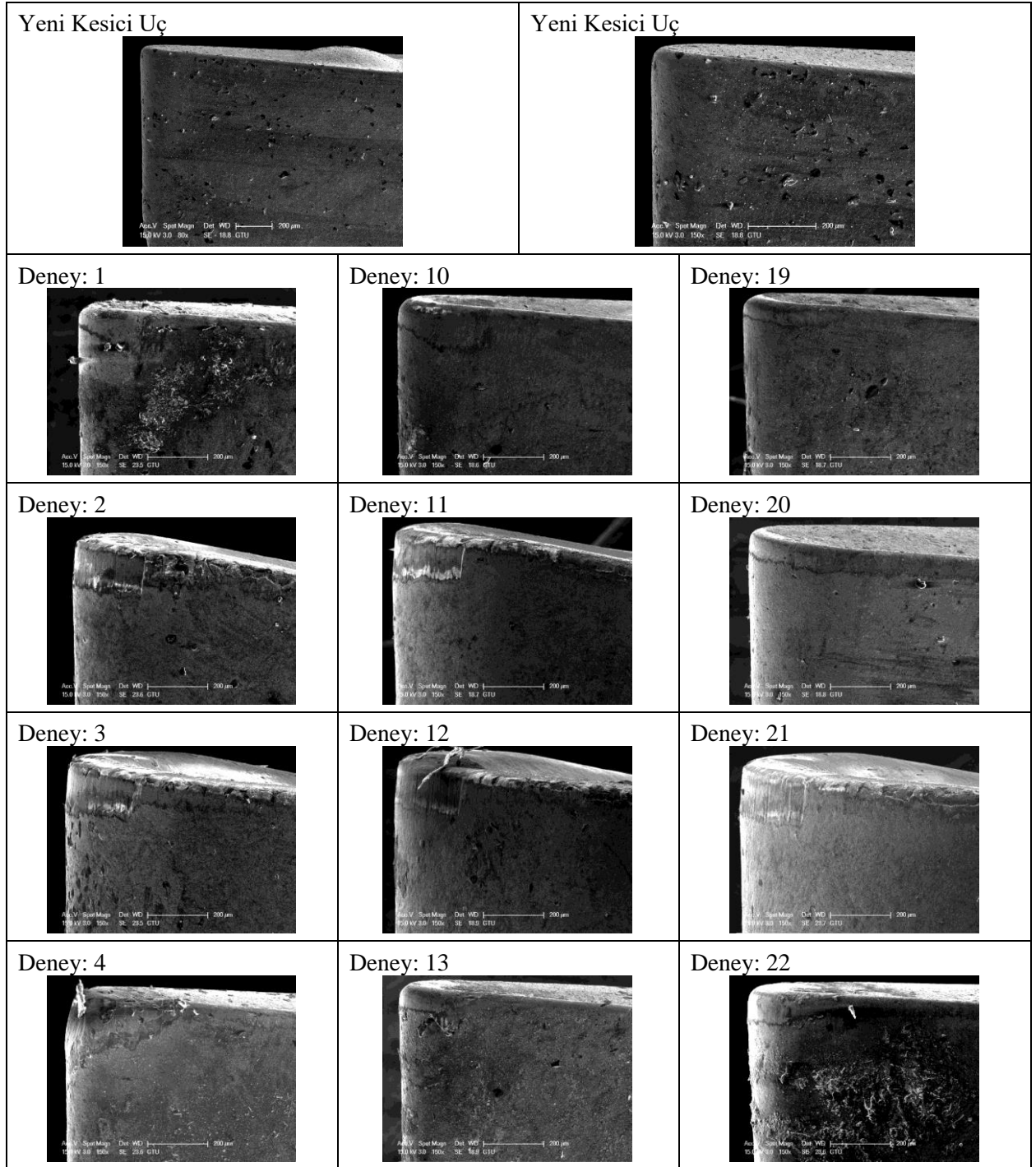
Serbest yüzey aşınması, iş parçası malzemesindeki sert bileşenlerin neden olduğu aşınmadır. Tornalama sırasında, iş parçası malzemesindeki sert karbür parçacıkları, başlangıçta takım yan yüzeyine sürtündüklerinde yoğun sürtünme oluşturur, bu da aşınma alanının genişliğinin kademeli olarak genişlemesine neden olur [12]. Kesme bölgesindeki abrasiv aşınma mekanizmasına neden olan ana etken kesici takımda oluşan mekanik yüklerdir [13]. Tüm kesme şartlarında yan kenar aşınması ile burun aşınmasının birleştiği de görülmüştür. Farklı faktörlerin değişen seviyeleri nedeniyle, tornalama sonrası ortaya çıkan aşınma alanlarının büyüklüğü beklendiği gibi farklı olmuştur ve araştırılan parametrelerin fazlalığı nedeniyle genel bir çıkarım yapmak zor olmuştur. Uç yarıçapının, baskın aşınma mekanizması üzerinde önemli bir etki göstermediği bulunmuştur ve benzer sonuç literatürde de ifade edilmiştir [12]. Bu nedenle kullanılan kesme parametrelerinin değerleri verilerek yorum yapılmaya çalışılmıştır. En düşük serbest yüzey aşınma değeri ve üniform aşınma 20. deneyde (kesme hızı 140 m/dak, ilerleme 0,1 mm/dev ve uç yarıçapı 0,4 mm) elde edilmiştir. En yüksek kesme hızında aşınma değerinin düşük çıkması literatürdeki sonuçlar ile uyumlu değildir [12]. Artan kesme hızı ile aşınma değerinin azalması, sıcaklığın artmasına bağlı olarak talaş akma dayanımının düşmesi ve talaş akışının kolaylaşması ile açıklanabilir. En ciddi serbest yüzey aşınma değeri 4. deneyde (kesme hızı 80 m/dak, ilerleme 0,2 mm/dev ve uç yarıçapı 0,2 mm) elde edilmiştir. Kesme hızı ve uç yarıçapı en düşük değerinde olduğu zaman kesici uç ciddi şekilde aşınma göstermiştir ve yan kenar aşınması ile burun aşınması birleşerek uçta deformasyona neden olmuştur.

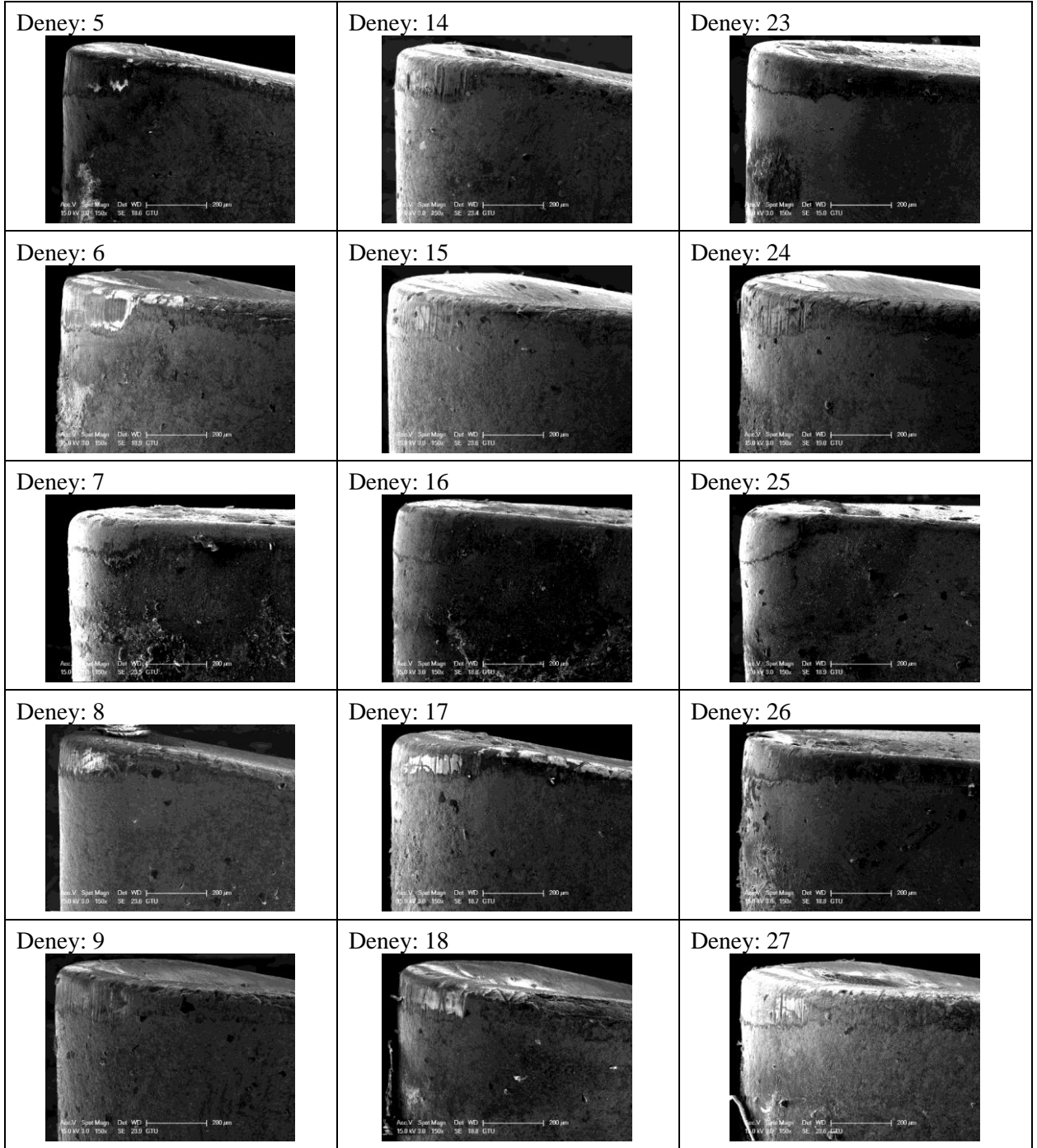


Şekil 1. Deneyde kullanılan tezgah, kater, kesici uç ve tornalanan iş parçaları (Machine tool, tool holder, insert used in the experiment and turned workpieces)



Şekil 2. Takım aşınması ve yüzey pürüzlülüğü ölçümleri (Tool wear and surface roughness measurements)





Şekil 3. SEM görüntüleri (SEM views)

80 m/dak, 110 m/dak ve 140 m/dak kesme hızlarında ilerleme ve kesici uç yarıçapının bir fonksiyonu olarak ölçülen serbest yüzey aşınması sonuçları Şekil 4'te verilmiştir. Serbest yüzey aşınması değerleri kesme parametreleri ve uç yarıçapı kombinasyonlarına bağlı olarak farklı sonuçlar sergilemiştir. 80 m/dak kesme hızında düşük serbest yüzey aşınması elde edebilmek için Toolox 44 çeliği 0,3 mm/dev ilerlemede 0,4 mm uç yarıçapına sahip kesici ile tornalanmalıdır. Genel olarak bakıldığında en düşük kesme hızı olan 80 m/dak değerinde yapılan deney grubunda (1.-9. deneyler) daha yüksek aşınma değerleri elde

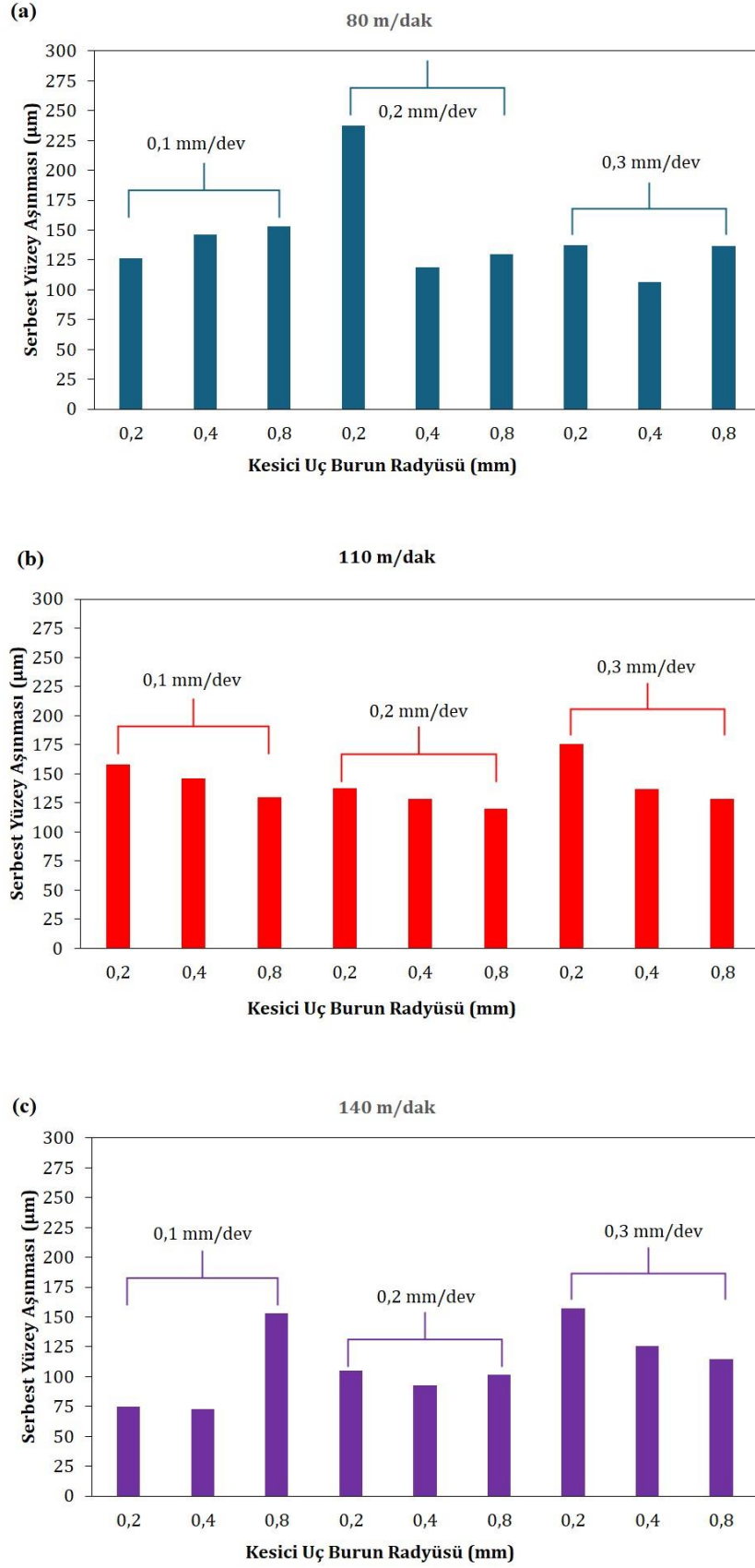
edilmiştir. Bu çalışmadaki en ciddi serbest yüzey aşınma değeri bu deney grubunda kesme hızının 80 m/dak, ilerlemenin 0,2 mm/dev ve uç yarıçapının 0,2 mm olduğu 4. deneyde 237,713 µm olarak ölçülmüştür. 110 m/dak kesme hızında düşük serbest yüzey aşınması elde edebilmek için ilerleme değeri 0,2 mm/dev ve uç yarıçapı 0,8 mm olarak seçilmelidir. Genel olarak en yüksek kesme hızı olan 140 m/dak değerinde yapılan deney grubunda (19.-27. deneyler) daha düşük aşınma değerleri ölçülmüştür. En küçük serbest yüzey aşınması, kesme hızı değerinin 140 m/dak, ilerleme değerinin 0,1 mm/dev ve kesici uç yarıçapının 0,4 mm olduğu

şartlarda 72,958 µm olarak ölçülmüştür. Artan kesme hızı ile aşınma değerinin azalması, sıcaklığın artmasına bağlı olarak talaş akma dayanımının düşmesi ve talaş akışının kolaylaşması ile açıklanabilir. Düzenli değişim trendi sadece 110 m/dak kesme hızında gözlenmiştir. Bu kesme hızı için tüm ilerleme değerlerinde uç yarıçapının artması ile serbest yüzey aşınması azalmıştır. Yüksek uç yarıçapında aşınmanın azaldığı literatürde de ifade edilmiştir [14].

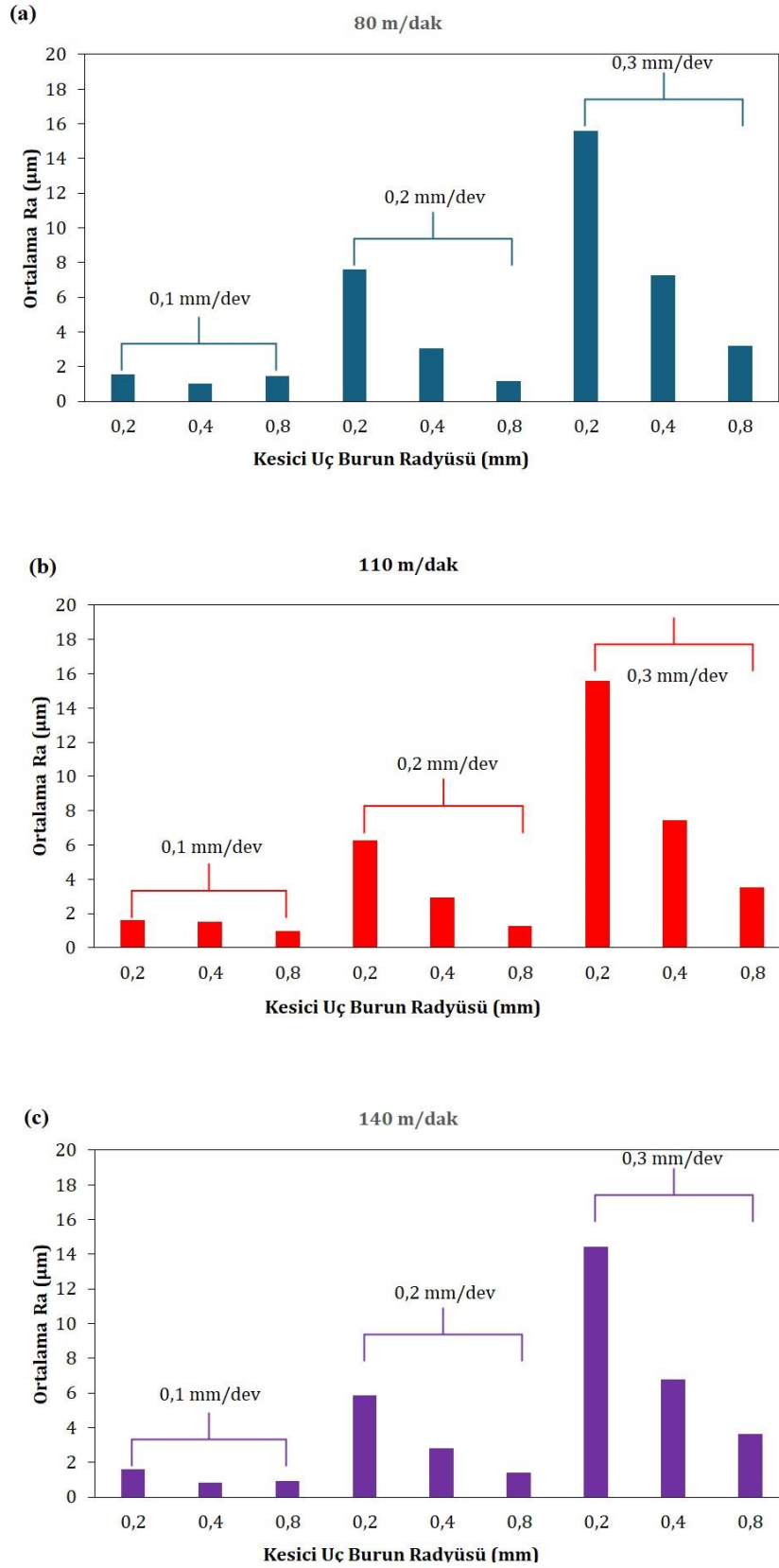
3.2. Yüzey Pürüzlülüğü (Surface Roughness)

Şekil 5'de 80 m/dak, 110 m/dak ve 140 m/dak kesme hızı değerlerinde ilerleme ve kesici uç yarıçapının bir fonksiyonu olarak ölçülen ortalama Ra değerleri sunulmuştur. 80 m/dak, 110 m/dak ve 140 m/dak kesme hızları değerlerinde, tüm kesici uç yarıçapları için ilerleme değerindeki artış ile yüzey pürüzlülüğü artmıştır. İlerleme değerinin artması kesme bölgesinde sürtünmeden dolayı sıcaklığı artırarak aşınmanın artmasına sebep olur ve yüzey kalitesini kötüleştirir [15-19]. Oluşan ısının takım-talaş ve takım-iş parçası arayüzeyinde yoğunlaştığı bilinmektedir [16-19] ve ilerlemenin artması ile yüzeyde kalıcı gerilmeler artmaktadır [20]. Bu nedenle de ilerlemenin artması ile yüzey pürüzlülüğü değerlerinin artması beklenen bir sonuçtur. 80 m/dak kesme hızında 0,2 mm uç yarıçaplı kesici takım ile tormalanan yüzeylerde, ilerleme değeri 0,1 mm/dev değerinden 0,3 mm/dev değerine yükseltildiğinde Ra değeri %912 artmıştır. Bu artış, 0,4 mm uç yarıçaplı kesici takım ile tormalanan yüzeylerde %628 ve 0,8 mm uç yarıçaplı kesici takım ile tormalanan yüzeylerde %122 olarak gerçekleşmiştir. 110 m/dak kesme hızında 0,2 mm, 0,4 mm ve 0,8 mm uç yarıçaplı kesici takımlar ile tormalanan yüzeylerde, ilerleme değeri 0,1 mm/dev değerinden 0,3 mm/dev değerine yükseltildiğinde Ra değerleri sırasıyla %860, %390 ve %262 artmıştır. 140 m/dak kesme hızında 0,2 mm, 0,4 mm ve 0,8 mm uç yarıçaplı kesici takımlar ile tormalanan yüzeylerde, ilerleme değeri 0,1 mm/dev değerinden 0,3 mm/dev değerine yükseltildiğinde Ra değerleri sırasıyla %793, %726 ve %294 artmıştır. Tüm kesme hızlarında, genellikle kesici uç yarıçapı arttıkça Ra değeri azalmıştır. Uç yarıçapının düşük değerden yüksek değere doğru değiştiğinde yüzey kalitesinin arttığı diğer çalışmalarda da rapor edilmiştir [21, 22]. Bhavsar [23] ayrıca uç yarıçapının yüzey pürüzlülüğü değerinin azaltılmasında ve takım ucu ve iş parçası arayüzünde sıcaklık oluşumunda önemli bir rol

oynadığını bildirmiştir. Literatürde bu sonuç, uç yarıçapındaki artış ile malzeme üzerinde sürtünme miktarının artması ile açıklanmıştır. Takım-iş parçası arasında artan sürtünme nedeniyle malzemenin özgül kesme direnci azalır ve malzeme üzerinden daha kolay talaş kaldırılır [20]. Bu nedenle kesici uç yarıçapı arttıkça yüzey pürüzlülük değerinde azalma meydana geldiği düşünülmektedir. Ayrıca, kesici uç yarıçapı azaldığında, işleme sırasında işlenen parçanın yüzey kalitesini bozan oluklar oluşur [24]. Kesici uç yarıçapı 0,2 mm'den 0,8 mm'ye yükseldiğinde daha az oluk oluşturulur. Bu yüzden de yüzey pürüzlülük değerleri artan uç yarıçapı ile azalmıştır. En fazla azalmalar ilerlemelerin 0,2 mm/dev ve 0,3 mm/dev olduğu şartlar altında elde edilmiştir. 80 m/dak kesme hızında ve 0,2 mm/dev ilerleme değerinde, uç yarıçapının 0,8 mm'ye artırılması Ra değerinde %85 oranında azalma ile sonuçlanmıştır. İlerleme değeri 0,3 mm/dev olduğunda ise, uç yarıçapının 0,8 mm'ye artırılması Ra değerinde %79 azalmaya sebep olmuştur. Kesme hızı 110 m/dak olduğunda, 0,2 mm/dev ve 0,3 mm/dev ilerleme değerlerinde, uç yarıçapının 0,8 mm'ye artırılması Ra değerlerinde sırasıyla %79 ve %77 oranlarında azalma ile sonuçlanmıştır. Bu azalış, kesme hızı 140 m/dak olduğunda, 0,2 mm/dev ile tormalanan yüzeylerde %76 ve 0,3 mm/dev ile tormalanan yüzeylerde %74 olarak gerçekleşmiştir. En düşük Ra değeri, kesme hızı değerinin 140 m/dak, ilerleme değerinin 0,1 mm/dev ve kesici uç yarıçapının 0,4 mm olduğu şartlarda 0,8175 µm olarak ölçülmüştür. Bu çalışmada araştırılan parametreler arasında Ra değerini en çok etkileyen parametreler yüksekten düşüğe sırasıyla ilerleme, kesici uç yarıçapı ve kesme hızı olarak bulunmuştur. İlerlemenin yüzey pürüzlülüğünü etkileyen en önemli parametre olduğu literatürdeki çalışmalarda da ifade edilmiştir [25, 26]. Toolox 44 malzemesinin tormalanmasında kesme hızı ve kesici uç yarıçapı hangi değerde olursa olsun Ra değerini çok fazla arttırdığından dolayı 0,3 mm/dev ilerleme değerinin kullanılmaması gerektiği sonucuna varılmıştır. Eğer bu malzemenin tormalanmasında 0,2 mm/dev ilerleme değeri kullanılacaksa, iyi bir yüzey kalitesi için uç yarıçapı 0,8 mm olarak seçilmelidir. Benzer bir sonuç Kayır vd. [27] tarafından yapılan çalışmada da elde edilmiştir. Araştırmacılar AISI316Ti paslanmaz çeliğin küçük uç yarıçaplı (0,4 mm) takımlarla yüksek ilerleme ve yüksek kesme hızları değerlerinde tormalanmasının takım ömrü ve yüzey pürüzlülüğü yönünden uygun olmadığını ifade etmişlerdir [27].



Şekil 4. (a) 80 m/dak, (b) 110 m/dak ve (c) 140 m/dak kesme hızlarında ilerleme ve kesici uç yarıçapının bir fonksiyonu olarak ölçülen serbest yüzey aşınması değerleri (Flank wear values measured as a function of feed and insert radius at cutting speeds of (a) 80 m/min, (b) 110 m/min and (c) 140 m/min)



Şekil 5. (a) 80 m/dak, (b) 110 m/dak ve (c) 140 m/dak kesme hızlarında ilerleme ve kesici uç yarıçapının bir fonksiyonu olarak ölçülen ortalama Ra değerleri (Average Ra values measured as a function of feed and insert radius at cutting speeds of (a) 80 m/min, (b) 110 m/min and (c) 140 m/min)

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada, Toolox 44 kalıp çeliğinin tornalanmasında kesme hızının, ilerlemenin ve kesici uç yarıçapının yüzey pürüzlülüğü ve serbest yüzey aşınması üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Çalışmada aşağıda sunulan sonuçlar elde edilmiştir.

- Belirlenen parametrelerde Toolox 44 kalıp çeliğinin tornalanması sonrasında kesici uçlarda herhangi bir yığıntı talaş (built-up edge, BUE) ve talaş yüzeyinde krater aşınması olmadığı sonucuna varılmıştır. Kesici uçların yan yüzeylerinde serbest yüzey aşınması görülmüştür.
- En küçük serbest yüzey aşınması, kesme hızı değerinin 140 m/dak, ilerleme değerinin 0,1 mm/dev ve kesici uç yarıçapının 0,4 mm olduğu şartlarda ölçülmüştür.
- 80 m/dak, 110 m/dak ve 140 m/dak kesme hızları değerlerinde, tüm kesici uç yarıçapları (0,2, 0,4 ve 0,8 mm) için ilerleme değerindeki artış ile Ra değerinin arttığı bulunmuştur.
- Bütün kesme hızlarında, genellikle kesici uç yarıçapı arttıkça Ra değeri azalmıştır.
- Bu çalışmada dikkate alınan parametreler arasında Ra değerini en çok etkileyen parametrelerin yüksekten düşüğe sırasıyla ilerleme, kesici uç yarıçapı ve kesme hızı olduğu görülmüştür.
- Toolox 44 malzemesinin tornalanmasında kesme hızı ve kesici uç yarıçapı hangi değerde olursa olsun Ra değerini çok fazla arttırdığından dolayı 0,3 mm/dev ilerleme değerinin kullanılmaması gerektiği sonucuna varılmıştır. Eğer bu malzemenin tornalanmasında 0,2 mm/dev ilerleme değeri kullanılacaksa, iyi bir yüzey kalitesi için uç yarıçapı 0,8 mm olarak seçilmelidir.

ACKNOWLEDGMENTS (TEŞEKKÜR)

Sorumlu yazar (E.K.), Ağustos 2019'da geçirdiği beyin damar hastalığı sonrası yaptığı operasyonla ve tedaviyle hayatını kurtaran ve ikinci bir hayat fırsatı sağlayarak hayatına bir mucize katan doktoru, girişimsel nörolog Prof. Dr. Hasan Hüseyin Karadeli'ye sonsuz teşekkürlerini sunmaktadır. Yazarlar, deneysel çalışmalarda maddi/manevi desteğini esirgemeyen Baksan Makina A.Ş. çalışanlarına, CNC tornada numune parçaları hazırlayan Eren Gedik'e, yüzey pürüzlülüğü ölçümlerindeki yardımlarından ötürü tekniker Önder Gedik'e ve SEM incelemelerindeki yardımlarından ötürü öğretim görevlisi Ahmet Nazım'a teşekkür ederler.

The corresponding author (E.K.) expresses her endless gratitude to her doctor, interventional neurologist Prof. Dr. Hasan Hüseyin Karadeli, who saved her life with the operation and treatment he performed after her cerebrovascular disease in August 2019 and added a miracle to her life by providing her with a second life opportunity. The authors would like to thank the employees of Baksan Makina A.Ş. for their financial and moral support in the experimental studies, Eren Gedik who prepared sample parts on the CNC lathe, technician Önder Gedik for his help in surface roughness measurements, and lecturer Ahmet Nazım for his help in SEM examinations.

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)

Emel KURAM: Deneyle yapılmış, sonuçlarını analiz etmiş ve makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

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

Nuray ÜÇÜNCÜ: Deneyle yapılmış ve sonuçlarını analiz etmiştir.

She conducted the experiments and analyzed the results.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

There is no conflict of interest in this study.



KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Binali R., Ulaş H.B., Demir H., Toolox 44 malzemesinde talaş kaldırma miktarının yüzey pürüzlülüğü ve takım aşınması üzerindeki etkilerinin incelenmesi, Technological Applied Sciences (NWSATAS), 13 (2018) 19-28.
- [2] Naimi S., Hosseini S.M., Tool steels in die-casting utilization and increased mold life, Advances in Mechanical Engineering, 7 (2015) 286071.
- [3] www.ssab.com.

- [4] Hansson P., Modern prehardened tool steels in die-casting applications, *Materials and Manufacturing Processes*, 24 (2009) 824-827.
- [5] Daghini L., Nicolescu C., Influence of inserts coating and substrate on Toolox®44 machining, *Swedish Production Symposium '07*, (2007).
- [6] Özlü B., Evaluation of energy consumption, cutting force, surface roughness and vibration in machining Toolox 44 steel using Taguchi-based gray relational analysis, *Surface Review and Letters*, 29 (2022) 2250103.
- [7] Wojciechowski S., Mrozek K., Mechanical and technological aspects of micro ball end milling with various tool inclinations, *International Journal of Mechanical Sciences*, 134 (2017) 424-435.
- [8] Bayraktar Ş., Uzun G., Ön sertleştirilmiş Toolox 44 ve Nimax kalıp çeliklerinin işlenebilirliği üzerine deneysel çalışma, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 36 (2021) 1939-1947.
- [9] Globisch S., Friedrich M., Heidemann N., Döpper F., Tool concept for a solid carbide end mill for roughing and finishing of the tool steel Toolox 44, *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 8 (2024) 170.
- [10] ISO 3685, Tool-life testing with single-point turning tools, (1993).
- [11] ISO 4287, Geometrical product specifications (GPS) – Surface texture: Profile method – Terms, definitions and surface texture parameters, (1997).
- [12] Zhang X., Li M., Soo S. L., Yang X., Effects of chip breaker groove and tool nose radius on progressive tool wear and behavior when turning GH3536 nickel-based superalloys, *Tribology International*, 197 (2024) 109806.
- [13] Gupta M. K., Song Q., Liu Z., Sarikaya M., Mia M., Jamil M., Singla A. K., Bansal A., Pimenov D. Y., Kuntoğlu M., Tribological performance based machinability investigations in cryogenic cooling assisted turning of α - β titanium alloy, *Tribology International*, 160 (2021) 107032.
- [14] Rao A.S., Effect of nose radius on the chip morphology, cutting force and tool wear during dry turning of Inconel 718, *Tribology-Materials, Surfaces & Interfaces*, 17 (2023) 62-71.
- [15] Kılıçkap E., Çelik Y.H., Yardımeden A., Karbon elyaf takviyeli plastik kompozitlerin tornalanmasında yüzey pürüzlülüğü ve takım aşınmasına etki eden parametrelerin araştırılması, *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, 8 (2017) 175-180.
- [16] Nalbant M., Gökkaya H., Sur G., Application of Taguchi method in the optimization of cutting parameters for surface roughness in turning, *Materials and Design*, 28 (2007) 1379-1385.
- [17] Wang X., Feng C. X., Development of empirical models for surface roughness prediction in finish turning, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 20 (2002) 348-356.
- [18] Turgut Y., Çakmak I., AISI 1040 çeliğinin frezelenmesinde talaş kırıcı formunun yüzey pürüzlülüğü ve kesme kuvvetlerine etkisinin araştırılması, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 7 (2019) 482-494.
- [19] Akkurt M., Talaş Kaldırma Yöntemleri ve Takım Tezgâhları, Birsen Yayınevi, İstanbul, (1998).
- [20] Özdemir M., Yüzey pürüzlülüğü üzerinde kesme parametrelerinin etki oranlarının yüzey yanı yöntemi kullanarak analizi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 7 (2019) 639-648.
- [21] Hua Y., Liu Z., Effects of cutting parameters and tool nose radius on surface roughness and work hardening during dry turning Inconel 718, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 96 (2018) 2421-2430.
- [22] Kumar P. V. A., Patnaik L., Bharati K., Venkatesh V. S. S., Kumar S., Investigating tool wear rate and surface quality of hardened tool steel: a fuzzy-MARCOS analysis and response surface methodology study, *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, 18 (2024) 4137-4158.
- [23] Shah D., Bhavsar S., Effect of tool nose radius and machining parameters on cutting force, cutting temperature and surface roughness—an experimental study of Ti-6Al-4V (ELI). *Materials Today: Proceedings*, 22 (2020) 1977-1986.
- [24] Patel V.D., Gandhi A.H., Analysis and modeling of surface roughness based on cutting parameters and tool nose radius in turning of AISI D2 steel using CBN tool, *Measurement*, 138 (2019) 34-38.
- [25] Akgün M., Ulaş H.B. Demir H., İmalat çeliklerinin tornalanmasında kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü üzerine etkisinin analizi ve optimizasyonu,

- Gaziosmanpaşa Bilimsel Araştırma Dergisi (GBAD), 6 (2017) 50-58.
- [26] Yılmaz B., Güllü A., AISI 1050 çeliğın tornalanmasında kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü ve talaş oluşumu üzerine etkilerinin araştırılması, Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 26 (2020) 628-633.
- [27] Kayır Y., Aslan S., Aytürk A., AISI316Ti paslanmaz çeliğın tornalanmasında kesici uç etkisinin Taguchi yöntemi ile analizi, Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 28 (2013) 363-372.

Yenilenebilir Enerji Kaynaklarından Beslenen Bir Mikro Şebekenin Enerji Depolama Sistemleri Desteği ile Optimum Çalışması

Abdullah Kürşat AKTAR^{1*}  Murat KARAKILIÇ² 

¹Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi, Muğla Meslek Yüksekokulu, Elektrik ve Enerji Bölümü, Muğla, Türkiye

²Iğdır Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Iğdır, Türkiye

Article Info

Research article
Received: 14/08/2024
Revision: 16/09/2024
Accepted: 15/10/2024

Keywords

Electric vehicle
Energy storage
Dynamic pricing,
Microgrid
Renewable energy

Makale Bilgisi

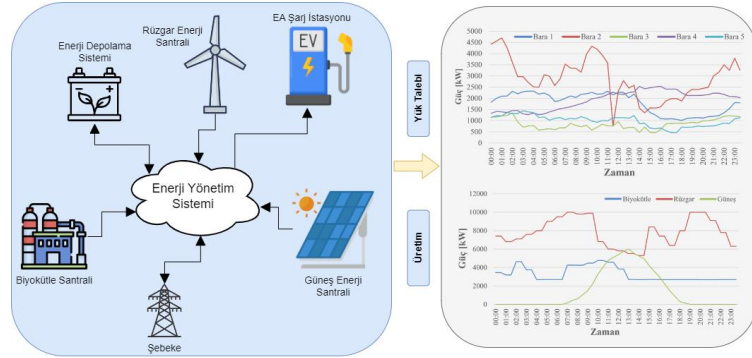
Araştırma makalesi
Başvuru: 14/08/2024
Düzeltilme: 16/09/2024
Kabul: 15/10/2024

Anahtar Kelimeler

Elektrikli araç
Enerji depolama
Dinamik fiyatlama
Mikro şebeke
Yenilenebilir enerji

Grafik Özet (Graphical/Tabular Abstract)

Bu çalışmada, kendine yetmesi amaçlanan fakat şebeke bağlantısı mevcut, elektrikli araç yükünü de karşılayacak bir mikro şebekenin tasarımı yapılmaktadır. Oluşturulan optimizasyon algoritması ile enerji santrallerinin sisteme vermeyi teklif ettikleri enerji miktarı ve fiyat bilgisi alınıp, yük talebi ve enerji depolama sistemlerinin mevcut durumları analiz edilerek optimum şebeke şartlarının oluşması hedeflenmektedir. /In this study, a microgrid which is intended to be self-sufficient but has a grid connection, is designed to meet the load demand of electric vehicles. Optimization algorithm aims to create optimum grid conditions by obtaining the amount of energy and price information that power plants offer to the system and analyzing the current conditions of load demand and energy storage systems.



Şekil A: Tasarlanan sistemin grafik gösterimi /Figure A: Graphical representation of the designed system

Önemli noktalar (Highlights)

- Günlük yük talebinin güvenilir şekilde karşılanması / Reliable supply of daily load demand.
- Mevcut yenilenebilir enerji sistemlerinin daha etkin kullanımı. / More effective use of existing renewable energy systems.
- Etkin şebeke yönetimi ile tüketici lehine avantajlı piyasa fiyatlarının sağlanması / Providing advantageous market prices in favor of the consumer through effective grid management.

Amaç (Aim): Yakın bölge yenilenebilir enerji santrallerinden faydalanarak teknik ve ekonomik olarak sürdürülebilir, kendine yeten bir sistem elde etmektir. / To achieve a technically and economically sustainable, self-sufficient system by utilizing renewable energy plants in the surrounding region.

Özgünlük (Originality): Elektrikli araç, yenilenebilir enerji ve enerji depolama sistemleri içeren çevreye duyarlı, verimli ve sürdürülebilir bir sistem oluşturulması / Creating an environmentally friendly, efficient and sustainable system that includes electric vehicles, renewable energy and energy storage systems

Bulgular (Results): ED sistemi işletmecisinin en fazla ekonomik faydayı 1463.896 \$ ile Durum 2'de elde edildiği görülürken, tüketici açısından en ekonomik şartlar Durum 3'te ortaya çıkmakta, ED sistemi işletmecisinin kazancında Durum 2'ye göre %45.59 düşüş gerçekleşmektedir. / While the most economic benefit for the ED system operator is obtained in Case 2 with \$1463,896, the most economic conditions for the consumer occur in Case 3, with a 45.59% decrease in the ED system operator's earnings compared to Case 2.

Sonuç (Conclusion): Arz talep dengesinin tüm durumlarda sağlandığı, ekonomik faydaların ise bazı durumlarda üretici bazı durumlarda tüketici lehine gerçekleştiği görülmektedir. / It is observed that the supply-demand balance is achieved in all cases and that economic benefits are realized in favor of the producer in some cases and the consumer in others.



Optimal Operation of a Microgrid Powered by Renewable Energy Sources with the Support of Energy Storage Systems

Abdullah Kürşat AKTAR^{1*} Murat KARAKILIÇ²

¹Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi, Muğla Meslek Yüksekokulu, Elektrik ve Enerji Bölümü, Muğla, Türkiye

²Iğdır Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Iğdır, Türkiye

Article Info

Research article
Received: 14/08/2024
Revision: 16/09/2024
Accepted: 15/10/2024

Keywords

Electric vehicle
Energy storage
Dynamic pricing,
Microgrid
Renewable energy

Abstract

The depletion of conventional fossil fuels, which are the main energy source of the electricity grid, and the international environmental concerns about them, as well as the challenges brought by the increasing installed power ratio of renewable energy sources (RES), which have an intermittent nature, in the system, are increasing the interest of system operators on the subject. Besides, especially in the first phase, the electrification of the light vehicle part of the transportation sector increases the pressure on the grid to an additional extent. In this study, a microgrid which is intended to be self-sufficient but has a grid connection, is designed to meet the load demand of electric vehicles (EV). The optimization algorithm aims to create optimum grid conditions by obtaining the amount of energy and price information that power plants offer to the system and analyzing the current conditions of load demand and energy storage (ES) systems. The economic and technical results of the algorithm designed through 4 different case studies are analyzed in terms of both producers and consumers. The results show that the supply and demand balance is achieved in all cases and economic benefits are realized in favor of the producer in some cases and the consumer in others.

Yenilenebilir Enerji Kaynaklarından Beslenen Bir Mikro Şebekenin Enerji Depolama Sistemleri Desteği ile Optimum Çalışması

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 14/08/2024
Düzeltilme: 16/09/2024
Kabul: 15/10/2024

Anahtar Kelimeler

Elektrikli araç
Enerji depolama
Dinamik fiyatlandırma
Mikro şebeke
Yenilenebilir enerji

Öz

Elektrik şebekesinin temel enerji kaynağı olan geleneksel fosil yakıtların tükenmesi ve onlara dair uluslararası çevresel kaygılar ile süresiz karaktere sahip yenilenebilir enerji kaynaklarının (YEK) sistem içerisindeki kurulu güç oranının her geçen gün artmasının getirdiği zorluklar sistem yöneticilerinin konu üzerine ilgisini artırmaktadır. Diğer yandan ulaşım sektörünün özellikle ilk aşamada hafif vasıta kısmının elektrikli hale gelmesi şebeke tarafında yükü bir miktar daha artırmaktadır. Bu çalışmada, kendine yetmesi amaçlanan fakat şebeke bağlantısı mevcut elektrikli araç (EA) yükünü de karşılayacak bir mikro şebekenin tasarımı yapılmaktadır. Oluşturulan optimizasyon algoritması ile enerji santrallerinin sisteme vermeyi teklif ettikleri enerji miktarı ve fiyat bilgisi alınıp, yük talebi ve enerji depolama (ED) sistemlerinin mevcut durumları analiz edilerek optimum şebeke şartlarının oluşması hedeflenmektedir. Oluşturulan 4 farklı durum çalışması üzerinden tasarlanan algoritmanın üretici ve tüketici açısından hem ekonomik hem teknik sonuçları analiz edilmektedir. Elde edilen sonuçlar oluşturulan algoritma sayesinde arz talep dengesinin tüm durumlarda sağlandığını, ekonomik faydaların ise bazı durumlarda üretici bazı durumlarda tüketici lehine gerçekleştiğini göstermektedir.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Küresel enerji talebinin beklentilere uygun şekilde yıllık %1.3 artış göstermesi ve enerji tedarik zincirinin aksamasına sebebiyet veren bölgesel çatışma seviyesini aşmış uluslararası anlaşmazlıklar, enerji fiyatları üzerinde önemli etki üretmektedir [1]. Artan tüketimi ve politik

kaygılarla bağlantılı olarak enerji güvenliği konuları dikkate alındığında yenilenebilir enerji kaynaklarından (YEK) üretilen elektrik enerjisinin her geçen gün payını büyütmesi beklenmektedir. Özellikle güneş ve rüzgâr enerjisi tarafındaki büyüme ile birlikte 2050 yılında birincil enerjinin fosil yakıt dışı payının %34 seviyesine kadar yükselbileceği öngörülmektedir [2]. YEK

alanındaki teknolojinin gelişme hızı, kamuoyunun yaklaşımı vb. etkenler de fosil yakıt dışı kaynaklara yönelimi artıracaktır.

Elektrik şebekesinde sadece fosil yakıtlardan beslenen merkezi büyük enerji santralleri bulunduğu şebeke yönetimi daha az değişken dikkate alınarak yapılırken, farklı kurulu güç seviyesinde YEK içeren enerji üretim tesislerinin dahil olması ile yönetim zor hale gelmektedir. Bu zorlukları elektrik şebekesini dijitalleştirerek aşmak ve şebekeye daha fazla YEK tesisi entegrasyonu sağlamak adına akıllı şebeke kavramı ortaya çıkmaktadır [3]. Ayrıca bu şebekelerde, üretim, iletim, dağıtım ve yeni gelişmekte olan depolama teknolojileri arasında bir bağ kurularak tüm paydaşlar açısından ekonomik ve teknik faydalar elde edilebilir [4]. Kurulu güç içerisinde YEK oranının artması elektrik şebekesinin hava koşullarındaki değişime daha duyarlı hale gelmesine sebebiyet verirken, buna bağlı olarak şebeke frekansının yönetilmesinde zorluklar meydana getirmektedir. Teknolojinin getirdiği avantajlar sayesinde, bu tarz karmaşık yapıya sahip şebekelerin analiz edilerek frekans kararlılığını geliştirmek için çevrimiçi araçlar geliştirilebilmektedir [5].

Farklı bir bakış açısı ile YEKlerin kesintili doğasından kaynaklı belirsizlikleri azaltmak ve çok amaçlı kullanımı teşvik etmek için nükleer enerji gibi farklı tip kaynaklarla desteklenen entegre enerji sistemleri kullanarak elektrik enerjisi yanında hidrojen ve temiz su üretimi yapılabilir [6]. Ayrıca bu tarz sistemlerde uzaktan kontrol edilen yükler, sabit ve mobil enerji depolama (ED) sistemleri ve rota planlaması yapılan elektrikli araçlar (EA) bulunduğu karmaşık yapının getirdiği zorluklar için akıllı şebeke yönetimi sayesinde esneklik oluşturulabilir [7]. Diğer yandan, otobüs ve tren gibi toplu taşıma faaliyetlerinin ihtiyaç duyduğu enerjinin elektrik şebekesinden sağlıklı şekilde temin edilmesi taşıma kapasitesi, bataryanın doluluk durumu, şebekenin yük seviyesi gibi değişkenler dikkate alınarak çevrimiçi optimizasyon yöntemleri ile mümkün olabilir [8]. Talep tarafının akıllı sistemlerle yönetimi tüketici tarafında enerjiye güvenli erişimi sağlarken, elektrik şebekesinin daha etkili kullanılması ile üretim ve iletim tarafında yapılacak yeni yatırımların daha ilerideki bir zamana geciktirilmesini de sağlayabilir [9].

Uluslararası çerçevede değerlendirildiğinde, şebekenin dönüşümü sırasında ekonomik, teknik ve özellikle çevresel kaygıların aynı anda giderilmesi düşüncesi ortak bir hedef olarak kendini

göstermektedir. Bu yüzden yapılan birçok araştırmada belirsizlikleri dikkate alarak işletme maliyetlerini düşürmek, CO2 salımını azaltmak ve gerilim kalitesini yükseltmek amacıyla şebeke optimizasyonu yapılmaktadır [10,11]. Şebeke modellerinin birçoğunda ED sistemleri mekanik, termal, elektrokimyasal, elektriksel ve kimyasal kategorileri altında kendini göstermektedir. Çeşitli depolama teknolojileri üzerinde çalışmalar yoğun bir şekilde sürmekte ve bu teknolojilerden mS mertebesinde cevap zamanına sahip, batarya olarak bilinen elektrokimyasal depolayıcılar ile süper kapasitör olarak bilinen elektriksel depolayıcılar sistem içerisinde kullanımda bir adım önde görünmektedir [12]. Diğer yandan ülkelerin sahip oldukları yerel imkanlar dahilinde depolama teknolojileri hibrit olarak da kullanılabilir. Buna örnek olarak Avustralya'nın yüksek YEK potansiyelinin sisteme entegre edilmesi için önerilen pompajlı hidro enerji, sıkıştırılmış hava ve yeşil hidrojen enerji depolama sistemlerinin hibrit olarak kullanıldığı çalışma gösterilebilir [13]. Diğer yandan, Endonezya'nın karbon sıfır hedefi üzerine yapılan çalışmada 2021 – 2045 yılları arasındaki senaryolar çalışarak 2045 yılına ulaşıldığında enerji güvenliği konusunda zafiyet oluşturmadan %100 YEK üretimi ile beslenen sistemin sahip olması gereken ED sistem boyutları tespit edilmektedir [14].

Geleneksel şebekeden akıllı şebekeye geçiş hem üretim hem tüketim tarafında meydana gelen çeşitliliğin sonucu olarak zorunlu hale gelmektedir. Şebeke optimizasyonu, tahmin doğruluğu ve bilinçli karar verme gibi önemli konu başlıklarında büyük veriyi işleyerek önemli kararların verilmesinde makine öğrenmesi gibi teknikler kullanılabilir [15]. Şebekenin enerji akış seçenekleri, sistem bileşenleri, YEK kaynaklarının kurulu olduğu sahalara ait meteorolojik veriler, şebekedeki YEK payı gibi birçok değişken ve parametre analiz edilerek şebekenin optimum işletilmesi sağlanabilir [16]. Geniş çerçeveden değerlendirme yapılmadan akıllı şebekeye veya EAlar için akıllı şarj yöntemlerine geçilmesi durumunda sistemdeki yetersiz YEK oranı nedeniyle CO2 salımında azalma yerine artışla karşılaşılabilir [17].

Bireysel kullanıcıların şebeke bağımlılığını azaltmak ve çeşitli faydalar sağlamak amacıyla sahip oldukları YEK sistemlerini, EA ve küçük kapasiteli ED sistemini kullanarak dinamik elektrik fiyatlarının işlediği bir piyasada akıllı ev sistemlerini kullanmaları önemli yöntemlerden biridir [18]. Diğer yandan bahsedilen sistemlerin mikro şebeke boyutunda yönetilmesi daha fazla

teknik ve ekonomik avantajlar sağlayabilir. Dahası nesnelerin interneti uygulamaları kullanılarak YEK içeren, akıllı, kablosuz EA şarj yönetim sistemleri üzerine çalışmalar yapıldığı düşünüldüğünde çok sayıda EA'nın bu teknolojiyi kullanması ile ortaya çıkan yük talebinin toplu bir şekilde yönetilmesi gerekliliği de anlaşılmaktadır [19].

Sistemde kayda değer sayıda EA'nın ve ED sistemlerinin bulunması, değişken karaktere sahip güneş ve rüzgâr enerjisini dengeleme, pik yük zamanını kaydırarak şebeke üzerindeki baskıyı azaltma ve piyasa fiyatlarını olumlu etkileme konusunda büyük ve yeni bir esneklik kaynağı olarak karşımıza çıkmaktadır [20]. Böylece artan EA yükü nedeniyle şebekelerde gerekli hale gelen altyapı geliştirmelerinin ötelenmesi hatta iptal edilmesi imkanına kavuşulurken, yeni teknolojiler üzerine yapılan araştırmaların olgunlaşması için zaman kazanılır [21,22,23].

1.1. İçerik ve Katkılar (Content and Contributions)

Bu çalışmada, çeşitli tüketici türlerinin bulunduğu, ana kaynak olarak biyokütle, rüzgâr ve güneş enerji sistemlerinden beslenen, ED sistemlerine sahip şarj istasyonları bulunan mikro şebeke ele alınmaktadır. Biyokütle, rüzgâr ve güneş enerjisi tesisi işletmecileri gün içinde değişken üretim ve fiyat teklifleri ile piyasaya elektrik enerjisi satmaktadır. Güneş enerjisi tesisi işletmecisinin sahibi olduğu ED sistemleri çift yönlü enerji akışı ile dilediği zaman dilimlerinde elektrik enerjisini piyasadan satın alıp veya piyasaya satabilmektedir. ED sisteminin operasyonları mikro şebekenin enerji dengesini sağlamada ve piyasa fiyatlarının yükselmesini engellemede kullanılmaktadır. Şarj istasyonu işletmecisi EA kullanıcılarının hizmet talebine sahip olduğu soket sayısının en üst düzeyde yanıt vermeye çalışmaktadır.

Çalışmanın amacı mikro şebekeden beslenen kullanıcıların enerji güvenliğini temin ederken, piyasa fiyatlarının yine kullanıcılar lehine minimum düzeyde kalmasını sağlamaktır. Bu nedenle, yük talebini ve enerji santrallerine ait enerji üretim fiyat ve miktar teklifini toplayarak optimum işletimi tespiti hedefleyen bir kısıtlı optimizasyon algoritması geliştirilir. Sistem tasarımında, enerji arzında yaşanabilecek beklenmeyen durumların üstesinden gelebilmek adına şebeke bağlantısı olduğu varsayılmaktadır. Ayrıca, YEK kaynaklı üretimin ED sistemleri sayesinde farklı zaman diliminde kullanım amaçlı depolanması hedeflenir.

Bu çalışmanın katkıları aşağıdaki gibidir:

- Amaçlanan enerji yönetim algoritması, oluşturulan mikro şebekenin ada sistemi uygulaması gibi sadece YEK ile beslenerek ve ED sistemleri yardımıyla güvenli enerji tedariki sunmasını araştırmaktadır.

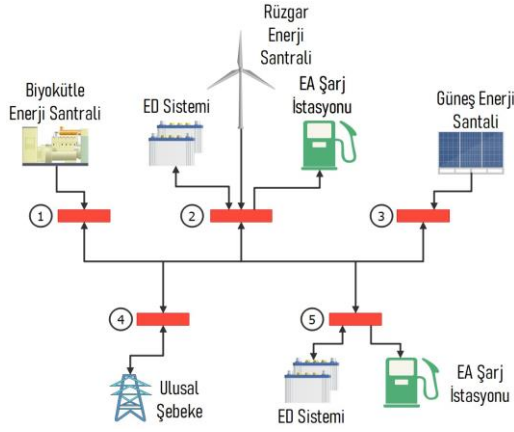
- ED sisteminin ekonomik operasyonları incelenerek bataryadan şebekeye ve şebekeden bataryaya işlemleri ile farklı durum incelemeleri üzerinden karlılığı analiz edilmektedir.

- Tamamı YEK kurulu gücüne sahip bir sistemdeki güneş enerjisi kurulu güç oranı değişiminin hem üretici hem tüketici açısından teknik ve ekonomik sürdürülebilirliğe etkisi irdelenmektedir.

Çalışmanın bundan sonraki kısmı şu şekilde organize edilmektedir. Bölüm 2'de, tasarlanan sistemin yapısı eşitlikleri ile sunulmaktadır. Bölüm 3'te, optimizasyon algoritmasının etkinliği 4 farklı durum üzerinden değerlendirilmektedir. Son olarak, Bölüm 4'te çalışmanın sonuçları sunulmaktadır.

2. MATERYAL VE METOD (MATERIAL AND METHOD)

Çalışmada önerilen modelde Şekil 1'de gösterildiği gibi, çeşitli yükleri içeren 5 baralı bir dağıtım sistemi ele alınmaktadır. Sistemdeki yük talebinin karşılanması için farklı bara noktalarına bağlı rüzgâr, güneş ve biyokütle yenilenebilir enerji kaynaklarını (YEK) kullanan enerji santralleri bulunmaktadır. Biyokütle enerji santralının mikro şebekeye yakın bölgedeki evsel ve ticari işletmelere ait atık veya artık maddelerden sürekli olarak beslendiği varsayılmaktadır. Bu nedenle enerji üretim değerlerinin sürekli olması beklenmektedir. Diğer yandan, rüzgâr ve güneşin değişken yapısından kaynaklanabilecek üretim yetersizliği problemlerini aşabilmek için sistemde 2 adet enerji depolama (ED) sistemi yer almaktadır. Tasarlanan sistemin kendine yeten bir sistem olması öncelenirken, beklenmeyen durumların enerji teminini sekteye uğratmaması için şebeke bağlantısı olması dikkate alınmaktadır. Güneş enerjisi santralleri, ED sistemlerinin işletmecisi tarafından yönetilmektedir. Ayrıca, bu sistemler enerji piyasa fiyatlarının oluşumunda rol üstlenerek fiyatların daha aşağı seviyelerde kalması ve ekonomik fayda elde edilmesi amacıyla da kullanılmaktadır. Günümüz elektrik sistemlerinin doğal yükleri haline gelmek üzere olan elektrikli araçlar (EA) için de her biri aynı anda 25 EA şarj kapasitesine sahip 2 adet şarj istasyonu bulunmaktadır.



Şekil 1. Önerilen modele ait blok diyagram (Block diagram of the proposed model)

Tasarlanan sistemin amacı liyakat sistemine göre oluşan piyasa fiyatını en alt sınırdaki tutmak ve ED sistemi operasyonlarını en ekonomik şekilde gerçekleştirmektir. Bu amaç için geliştirilen optimizasyon algoritmasına ait matematiksel ifadeler Eşitlik (1) – (13) ile verilmektedir.

Eşitliklerde alt indis olarak yer alan i , ea ve t kümeleri sırasıyla bara, elektrikli araç ve zamanı ifade etmektedir. Karma tam sayılı doğrusal olmayan programlama yöntemine dayalı çalışan Eşitlik (1)'de verilen amaç fonksiyonunda yer alan $PP_{i,t}$ enerji santrallerine ait üretilen güç değerlerini, $\lambda_{i,t}^{PP}$ santrallerin fiyat tekliflerini, $u_{i,t}$ teklifi kabul edilen santrali ayırt eden ikili değişkeni, $P_{i,t}^{ED\text{şarj}}$ ED'nin şarj gücünü, $P_{i,t}^{EDdeşarj}$ ED'nin deşarj gücünü ve $\lambda_{i,t}^{Piyasa}$ oluşan piyasa fiyatını temsil etmektedir. Min GD adı verilen eşitlik tüm bara ve zaman aralıklarındaki güç değerini minimize etmeyi temsil eder. Eşitlik (2)'de P_t^G değişkeni ile her t zaman diliminde dağıtım sistemine arz edilen güç hesaplanırken, Eşitlik (3) sayesinde evsel ve ticari yükler $P_{i,t}^{Yük,toplam}$, $P_{i,t}^{ED\text{şarj}}$ ve EA kaynaklı şarj gücü $P_{i,ea,t}^{I,şarj}$ dikkate alınarak toplam talep P_t^L tespit edilir.

Şarj olmak amacıyla istasyonlardan birine bağlanan EA'nın durumu, $u_{i,ea,t}^{EA\text{şarj}}$ ikili değişkeni ile kontrol edilerek Eşitlik (4)'te gösterildiği gibi bir şarj soketinin sağlayabileceği gücü açmayacak şekilde şarj olması sağlanır. Diğer yandan ED sistemine ait güç akışı Eşitlik (5) ve (6)'da sırasıyla şarj ve deşarj operasyonlarını yönetmek üzere kısıtlanır. İkili değişkenler $u_{i,t}^{ED\text{şarj}}$ ve $u_{i,t}^{EDdeşarj}$ sayesinde Eşitlik (7)'de ifade edildiği gibi herhangi bir baradaki ED sisteminin t zaman diliminde sadece şarj veya

deşarj olması temin edilir. Yapılan operasyonlar ile optimum işletme yapısının tespiti için ED sisteminin Enerji Doluluk Durumunun (EDD) sürekli takip edilmesi gerekmektedir. ED sisteminin Şarj Verimliliği $\$V^{ED}$ ve Deşarj Verimliliği DV^{ED} dikkate alınarak ve şarj ile artan, deşarj ile azalan enerji miktarı bir önceki zaman dilimine ait $EDD_{i,(t-1)}^{ED}$ ile işleme tabi tutularak son durumdaki $EDD_{i,t}^{ED}$ Eşitlik (8)'e göre hesaplanır. Ayrıca, Eşitlik (9) ile ED sisteminin kapasitesi ve deşarj olabileceği minimum seviye tanımlanırken, Eşitlik (10) ile algoritmaya başlangıç değeri atanır.

$$\text{Min GD} = \sum_t \sum_i (PP_{i,t} \cdot \lambda_{i,t}^{PP} \cdot u_{i,t} + (P_{i,t}^{ED\text{şarj}} - P_{i,t}^{EDdeşarj}) \cdot \lambda_{i,t}^{Piyasa}) \quad (1)$$

Aşağıdaki denklemlere bağlı olarak:

$$P_t^G = \sum_i (PP_{i,t} \cdot u_{i,t} + P_{i,t}^{EDdeşarj}) \quad \forall t \quad (2)$$

$$P_t^L = \sum_i (P_{i,t}^{Yük,toplam} + P_{i,t}^{ED\text{şarj}}) + \sum_{ea} \sum_i P_{i,ea,t}^{I,şarj} \quad \forall t \quad (3)$$

$$0 \leq P_{i,ea,t}^{I,şarj} \leq R_i^{I,şarj} \cdot u_{i,ea,t}^{EA\text{şarj}} \quad \forall i, ea, t \quad (4)$$

$$0 \leq P_{i,t}^{ED\text{şarj}} \leq R_i^{ED\text{şarj}} \cdot u_{i,t}^{ED\text{şarj}} \quad \forall i, t \quad (5)$$

$$0 \leq P_{i,t}^{EDdeşarj} \leq R_i^{EDdeşarj} \cdot u_{i,t}^{EDdeşarj} \quad \forall i, t \quad (6)$$

$$u_{i,t}^{ED\text{şarj}} + u_{i,t}^{EDdeşarj} \leq u_{i,t}^{ED} \quad \forall i, t \quad (7)$$

$$EDD_{i,t}^{ED} = EDD_{i,(t-1)}^{ED} + \sum_i \left(\$V^{ED} \cdot P_{i,t}^{ED\text{şarj}} - \frac{P_{i,t}^{EDdeşarj}}{DV^{ED}} \right) \cdot \Delta T \quad \forall i, t \quad (8)$$

$$EDD_{i,t}^{ED,min} \leq EDD_{i,t}^{ED} \leq EDD_{i,t}^{ED,max} \quad \forall i, t \quad (9)$$

$$EDD_{i,t}^{ED} = EDD_{i,t}^{ED,ilk} \quad \text{if } t = 1 \quad (10)$$

$u_{i,ea,t}^{EA\text{şarj}}$ ikili değişkeni kullanılarak yönlendirme ve bağlantı yapma ile ilgili bazı kısıtlar oluşturulur. Eşitlik (11)'de görüldüğü gibi herhangi bir t zaman diliminde bir istasyona yönlendirilen araç sayısının istasyonun soket kapasitesinin aşmaması sağlanır. Ayrıca, EA'nın bulunduğu yer tespit edildiğinden ilgili EA'ya sağlanacak enerji miktarının güç eşitliklerinde hangi bara noktasından temin edildiği de tespit edilir. Diğer yandan şarj talebinde bulunan bir EA'nın sadece i barasına bağlı olması Eşitlik (12) ile sağlanır. Son olarak hizmet verilen EA sayısının tüm istasyonların soket sayısına eşit veya küçük olması Eşitlik (13) ile temin edilir.

$$\sum_{ea} u_{i,ea,t}^{EA\text{şarj}} \leq n_{soket_i} \quad \forall i, t \quad \text{if } i = 2 \text{ and } i = 5 \quad (11)$$

$$\sum_i u_{i,ea,t}^{EA\text{şarj}} \leq 1 \quad \forall ea, t \quad (12)$$

$$\sum_{ea} \sum_i u_{i,ea,t}^{EA\text{şarj}} \leq n_{soket_top} \quad \forall t \quad (13)$$

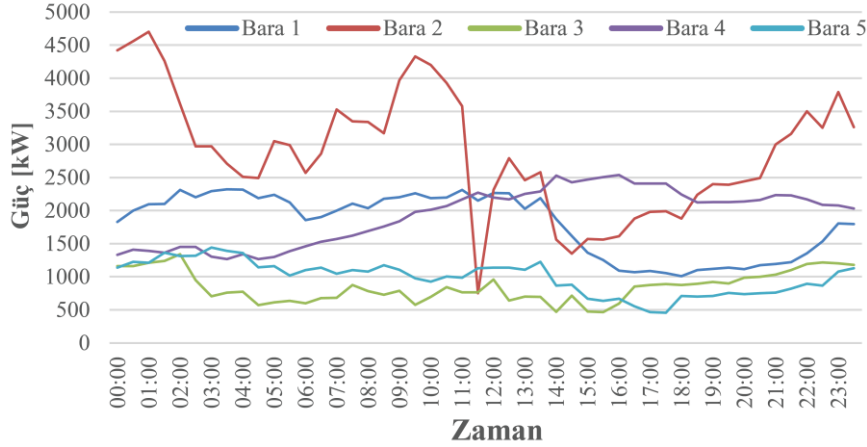
Tasarlanan sisteme ait güç akışı ve EA yönlendirmesine ait eşitlik ve kısıtlar (1) – (13) arasında açıklanmaktadır.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA (RESULT AND DISCUSSION)

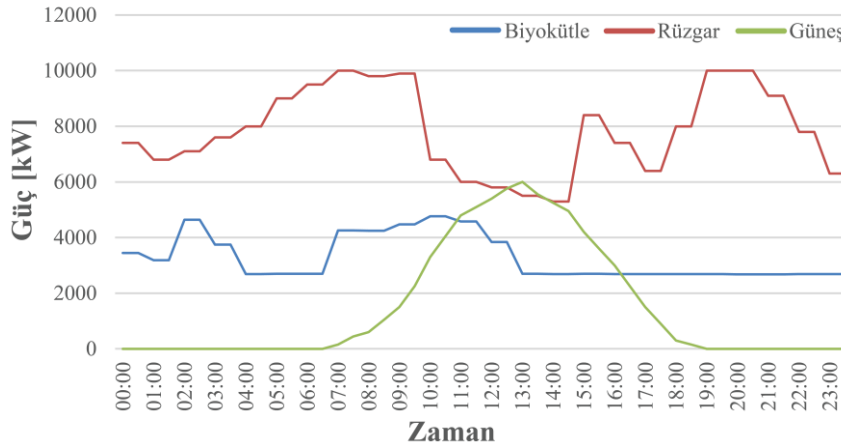
3.1. Giriş Verisi (Input Data)

Türkiye’de yerel bir elektrik dağıtım firmasından temin edilerek oluşturulan 5 baralı dağıtım

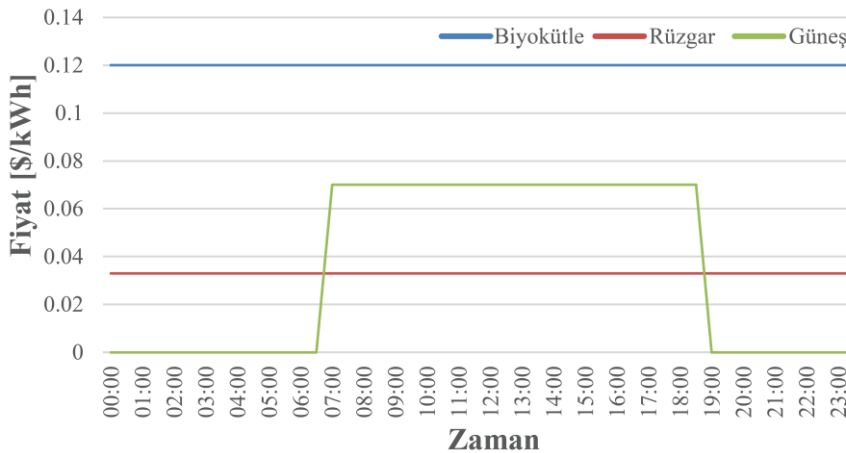
sisteminde yer alan evsel ve ticari yüklere ait yük talebinin zamana göre değişimi Şekil 2’de görülmektedir. Dağıtım sisteminin 1 nolu noktasına bağlı biyokütle enerji santrali, 2 nolu noktasına bağlı rüzgâr enerji santrali ve 3 nolu noktasına bağlı güneş enerji santralinin sisteme vermeyi teklif ettikleri güç miktarları ve fiyat teklifleri sırasıyla Şekil 3 ve Şekil 4’te verilmektedir. Ayrıca kendine yeten bir sistem amaçlanmış olsa da 4 nolu noktadan ulusal şebekeye bağlı olduğu varsayılmaktadır.



Şekil 2. Eysel ve ticari kullanıcıların yük talebi (Load demand of residential and commercial users)



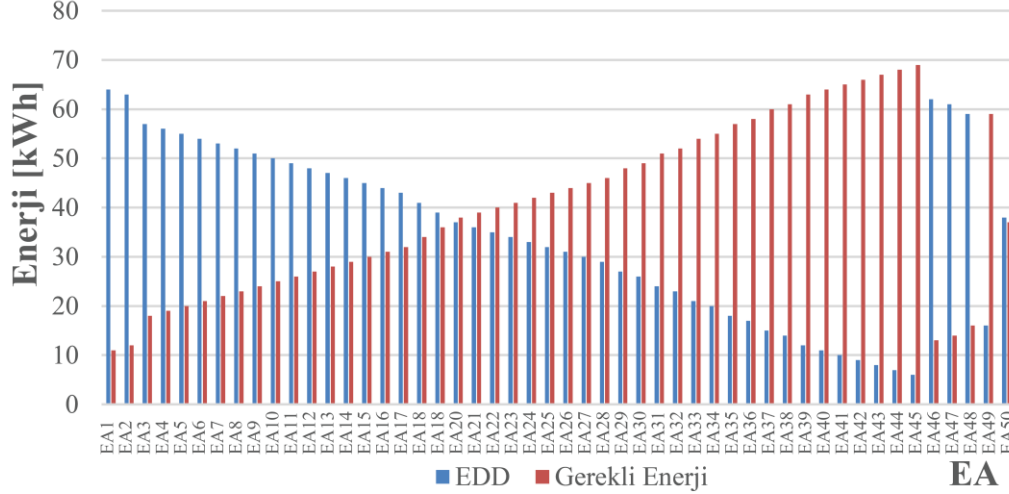
Şekil 3. Enerji santrallerine ait güç üretim teklifleri (Power generation bids for power plants)



Şekil 4. Enerji santrallerinin fiyat teklifi (Price bids for power plants)

Sistem tasarımı esnasında piyasada yer alan ve yaygın kullanılan EAlar incelenip 75 kWh bataryaya sahip Tesla Model Y [24] aracı tercih edilmektedir. Sistem karmaşıklığı oluşturmamak adına tek tip araç tercih edilirken, istenildiği takdirde

birden fazla batarya karakteristiğine sahip araç sisteme entegre edilebilir. Diğer yandan, şarj talebinde bulunan EAların farklı EDD'ye sahip bataryaları olduğu ve buna bağlı olarak talep ettikleri enerji miktarının Şekil 5'te gösterildiği gibi birbirinden farklı olduğu varsayılmaktadır.



Şekil 5. EAların EDD ve tam şarj için gereken enerji miktarı (SOE of EVs and the amount of energy required for a full charge)

EAların bağlandıkları şarj soketinden çekeceği güç miktarı tam şarj için ihtiyaç duyduğu enerji miktarı ile ilişkilidir. Diğer yandan sistemde yer alan 2 adet ED sisteminin elektrik şebekesine verebileceği ve şebekeden alabileceği güç miktarı kurulu sistemin izin verdiği ölçüde gerçekleşmektedir. Şarj soketleri ve ED sistemine ait güç akış parametreleri ve kısıtlar Tablo 1'de gösterilmektedir. ED sisteminin kapasitesi 15000 kWh, minimum doluluk değeri 1500 kWh olarak tanımlanırken, test periyoduna başlangıç değeri 7500 kWh olarak belirlenir. ED sistemin seçiminde mikro şebekeye yeterli olabilmesi adına şebekeye enerji sağlayan santrallerin kurulu güç değeri üzerinden değerlendirme yapılmaktadır. Değişken kurulu güç

değerlerinin uygulandığı durum çalışmalarında en düşük 15000 kW ve en fazla 27000 kW değeri uygulanırken, 27000 kW durum çalışmasında 12000 kW güneş enerjisinden oluşmaktadır. Güneş enerjisi santralının kapasite faktörünün düşük olduğu dikkate alındığında ED sisteminin en yüksek kurulu güç değerinde yeterli olması beklenir. Test periyodunun bitiminde net sıfır enerji durumunu oluşturabilmek adına ED sisteminin başlangıç EDD değerinde olması temin edilir. Enerji alışverişi verimliliği %95 ve her bir soketin şarj gücü 150 kW olarak seçilir. Tasarlanan sistem farklı çalışma özelliklerine sahip durumlar üzerinden değerlendirilerek ada sistemi olarak çalışabilirlik, ekonomik işletim ve teknik yeterlilik açısından analiz edilmektedir.

Tablo 1. Şarj soketi ve ED sistemine ait parametreler (Parameters of charging plug and ES system)

Parametre	Soket	ED Sistemi
\mathcal{V}	0.95	0.95
DV	0.95	0.95
$R^{ED\text{şarj}/\text{Soket}}$	150 kW/soket	3500 kW/soket
$R^{ED\text{deşarj}}$	-	3500 kW/soket
$EDD^{ED,ilk}$	-	7500 kWh
$EDD^{ED,min}$	-	1500 kWh
$EDD^{ED,maks}$	-	15000 kWh

3.2. Durum Çalışmaları (Case Studies)

Tasarlanan sistemin etkinliğini test etmek amacıyla Tablo 2’de detayları belirtilen 4 farklı durum oluşturulur:

- **Temel Durum:** Şarj istasyonu yok. ED sistemi ve YEK var.
- **Durum 1:** Şarj istasyonu var. ED sistemi ve güneş enerjisi hariç YEK var.
- **Durum 2:** Şarj istasyonu var. ED sistemi ve güneş enerjisi dahil YEK var.

- **Durum 3:** Şarj istasyonu var. ED sistemi ve daha büyük güneş enerjisi içeren YEK var.

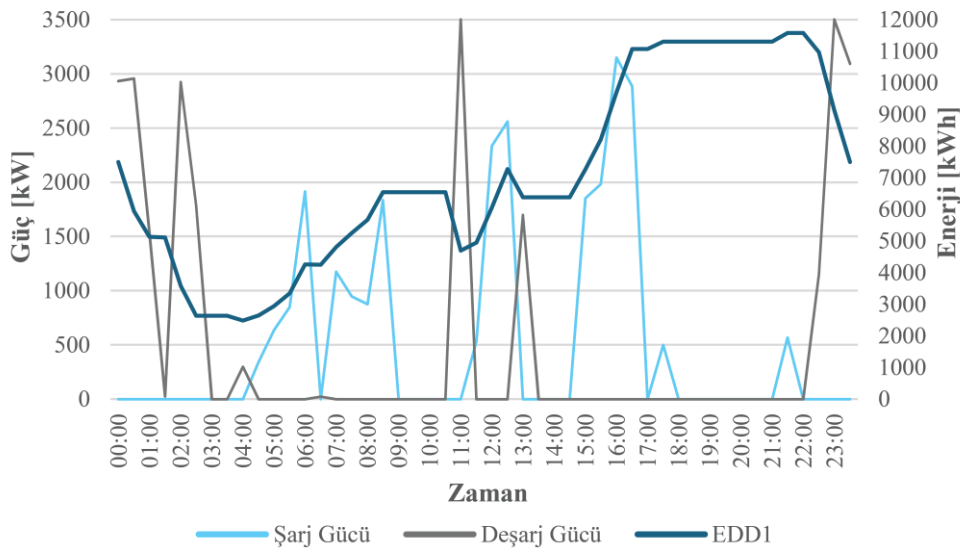
Dört vakanın tamamında 1 günlük test süresi 30 dakikalık zaman dilimi örneklemeleri üzerinden değerlendirilmektedir. Tasarlanan kısıtlı optimizasyon algoritması General Algebraic Modeling System (GAMS) programının 25.1.3 versiyonunda DICOPT çözücüsü kullanılarak test edilmektedir.

Tablo 2. Durum çalışmalarında incelenen durumlara ait detaylar (Details of the cases examined in case studies)

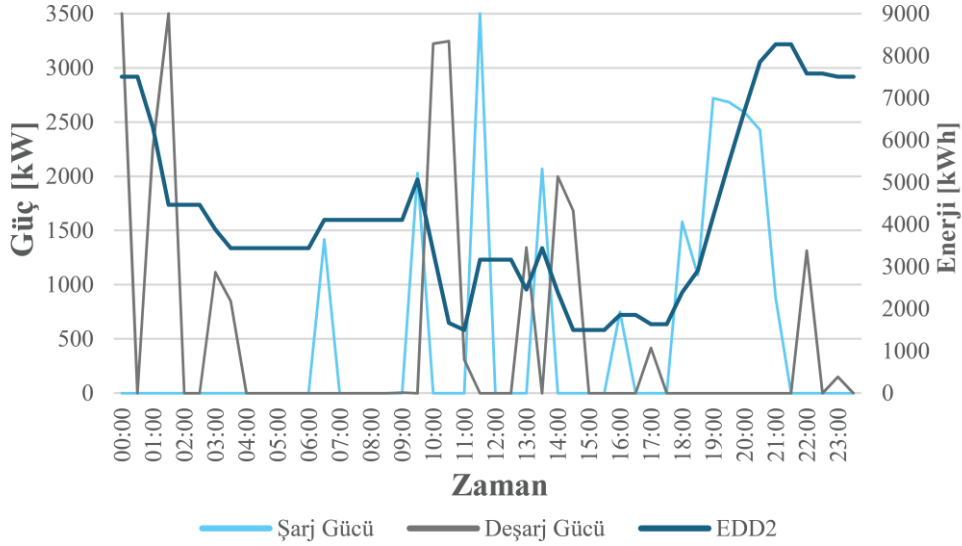
	Temel Durum	Durum 1	Durum 2	Durum 3
Şarj İstasyonu	-	+	+	+
Enerji Depolama Sistemi	+	+	+	+
Biyokütle Enerjisi	5 MW	5 MW	5 MW	5 MW
Rüzgâr Enerjisi	10 MW	10 MW	10 MW	10 MW
Güneş Enerjisi	6 MW	-	6 MW	12 MW

Temel Durumda, sistem ilk aşama olarak tasarlanırken, EAların henüz sistemde olmadığı sadece YEK içeren elektrik şebekesinin ED sisteminden faydalanarak ada modunda çalışabilirliğinin irdelendiği bir durum olması amaçlanır. Diğer yandan bu tarz bir sistemin çalışmasının sürdürülebilir olması çevresel kaygıların üst düzey olduğu bir dönemde dikkate değer avantajlar getirebilir. Optimizasyon

sonuçlarından da görüldüğü üzere Bara 2 ve Bara 5’e bağlı 2 eşdeğer ED sistemi test süresi boyunca efektif olarak kullanılmakta ve sonuçlar üzerinde olumlu veya olumsuz etki üretmemesi amacıyla tüm şarj ve deşarj işlemlerinin sonunda başlangıç EDD değerine sahip olmaktadır. Bara 2 ve Bara 5’e bağlı ED sistemlerine ait EDD ve şarj – deşarj eğrileri sırasıyla Şekil 6 ve Şekil 7’de gösterilmektedir.



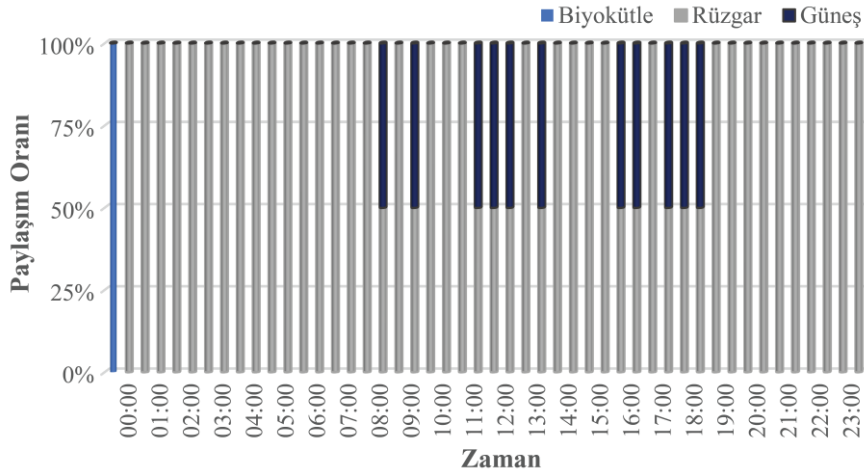
Şekil 6. Temel Durumda Bara 2’deki ED sistemine ait güç ve enerji değerleri (Power and energy values of the ES system at Bus 2 in Base Case)



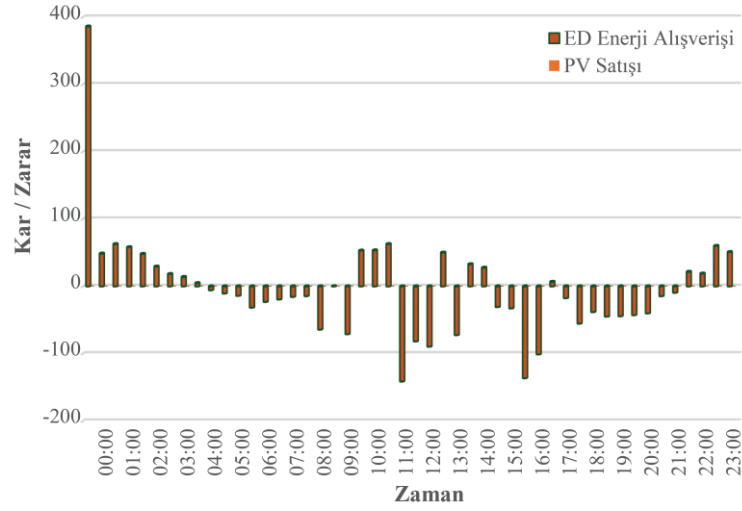
Şekil 7. Temel Durumda Bara 5'teki ED sistemine ait güç ve enerji değerleri (Power and energy values of the ES system at Bus 5 in Base Case)

Temel durumda, yük talebi teklif veren enerji santrallerinden seçim yapılarak karşılanmaya çalışılırken, ED sistemlerinin de yardımıyla piyasa fiyatı en alt seviyede tutulmaya çalışılır. Biyokütle enerji santralının fiyat teklifi tüm zaman dilimlerinde yüksek olduğundan ve ED sistemlerinin kullanımıyla daha ucuz olan rüzgâr ve güneş enerjisi teklifleri değerlendirilmektedir. Rüzgâr enerjisinin neredeyse tüm zaman dilimlerinde, güneş enerjisinin ise güneşlenme süresindeki çoğu zaman diliminde tercih edildiği Şekil 8'de görülmektedir. Hiçbir enerji santrali için önceden bir alım garantisi bulunmaması güneşlenme süresi içerisinde bazı zaman aralıklarında güneş enerjisi santralının teklifinin değerlendirilmemesi sonucunu doğurmaktadır. Diğer bir ifade ile optimizasyon algoritması karar alma sırasında yük talebi, ED sistemi doluluk oranı ve santrallerin fiyat tekliflerini değerlendirerek

optimum kararı verirken herhangi bir enerji santraline öncelik tanımamaktadır. Ayrıca her zaman diliminde elektrik şebekesinin arz talep dengesi ve piyasa fiyatının minimizasyonu hedeflendiğinden ED sisteminin kar veya zarar etmesi mümkün olabilmektedir. Şekil 9'da ED sistemlerinin şebekeye enerji verdiği zaman dilimlerinde kazanç elde ettiği, enerji dengesi sağlamak amacıyla enerji aldığı zaman dilimlerinde ödeme yaptığı görülmektedir. Ayrıca güneş enerjisinin santrallerinin şebekeye elektrik enerjisi vermesine rağmen Şekil 9'da kar olarak görünmemesi sistem fiyatının daha yukarıda gerçekleşmemesinden kaynaklanmaktadır. İşletme karının mümkün olduğu fakat ek bir kar olmadığı şeklinde de ifade edilebilir. Temel durumda test periyodu sonunda ED sisteminden kaynaklı toplamda 151.147\$ ödeme yapılmaktadır.

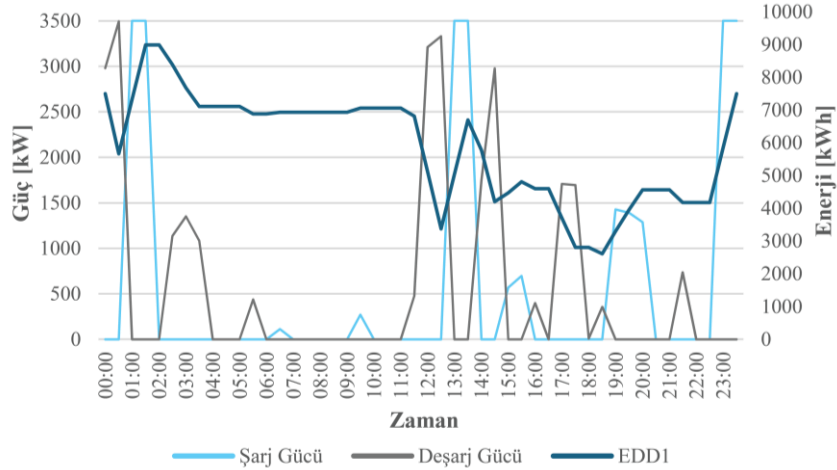


Şekil 8. Temel Durumda optimizasyon algoritmasının enerji santrali seçimi (Power plant selection of optimization algorithm in Base Case)

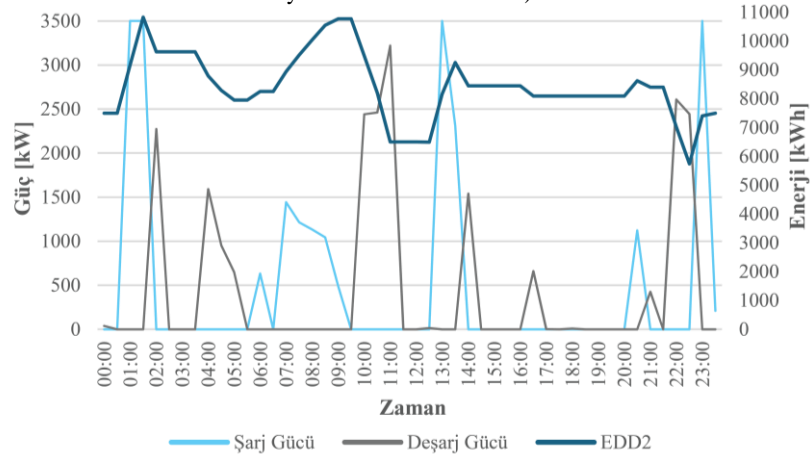


Şekil 9. Temel Durumda enerji alışverişi sonucu oluşan kar/zarar grafiği (Profit/Loss graph in the Base Case)

Durum 1’de EAların şarj talebi için yerleştirilen şarj istasyonları elektrik şebekesine yük olarak eklenirken, güneş enerjisi santrali sistem dışı bırakılmaktadır. Bu durumda daha fazla yük talebi ve daha az enerji santralinin bulunduğu bir elektrik şebekesi ortaya çıkmaktadır. Bu şebekede yer alan ED sistemlerinin kesintisiz enerji temini açısından daha fazla rol oynaması beklenir. Bu durumda elde edilen sonuçlar 2 farklı ED sistemi için Şekil 10 ve Şekil 11’de görülmektedir. Bara 2’deki ED sisteminin test süresi boyunca 3000 kWh ile 9000 kWh arasında değişen EDD değerine sahip olduğu ve 14:00 – 22:00 saatleri arasında daha aktif kullanıldığı görülmektedir. Diğer yandan Bara 5’teki ED sisteminde EDD değerinin 5750 kWh ile 11000 kWh arasında değiştiği ve gereksiz şarj deşarj işlemlerinden kaçınıldığı görülmektedir.



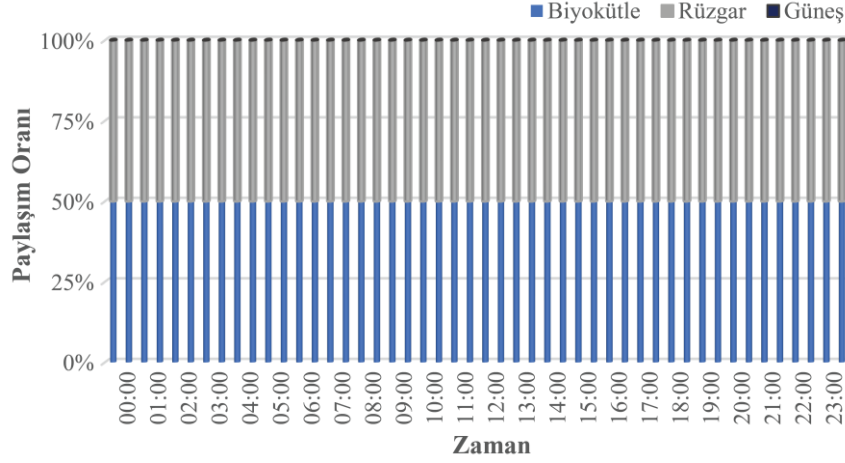
Şekil 10. Durum 1’de Bara 2’deki ED sisteminin güç ve enerji değerleri (Power and energy values of the ES system at Bus 2 in Case 1)



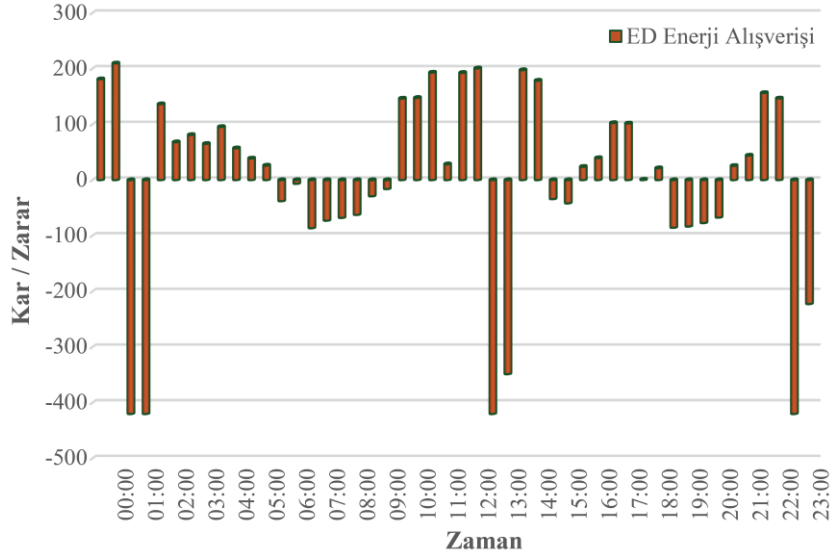
Şekil 11. Durum 1’de Bara 5’teki ED sisteminin güç ve enerji değerleri (Power and energy values of the ES system at Bus 5 in Case 1)

Şebekede güneş enerjisinin olmaması ve kısıtlı sayıda enerji santralının bulunması, enerji piyasa fiyatının kolayca yükselmesine sebebiyet vermektedir. Durum 1’de tüm zaman dilimlerinde, teklif veren iki santral de Şekil 12’de görüldüğü üzere şebekeye enerji vermekte ve piyasa fiyatı en yüksek fiyat olan 0.12 \$/kWh olarak gerçekleşmektedir. Ayrıca arzın düşük talebin ise yüksek olduğu bir durumda ED sistemlerinin güç dengesini sağlamak için yaptığı operasyonlarda her bir zaman dilimine ait kar zarar işlemleri Şekil 13’te görülürken, toplamda 113.371 \$ ödeme yaptığı hesaplanmaktadır. Günün 3 farklı zaman diliminde

eksi yönde meydana gelen büyük değerler, bu zaman dilimlerinde büyük miktarda enerji depolanması gerçekleştiğini göstermektedir. Bu zaman dilimlerinin algoritma tarafından tercih edilmesi, enerji fiyatındaki ve arz – talep arasındaki optimum dengenin sağlanması ile ilgilidir. Ayrıca, depo edilen enerji diğer zaman aralıklarında ihtiyaca göre daha az miktarlarda şebekeye destek amacı ile geri verilmektedir. Temel Durum’a kıyasla şartların daha zor olduğu dikkate alındığında güvenli ve sürdürülebilir bir şekilde enerji temin edilirken ödenen ücrette %24.99 azalma meydana gelmektedir.



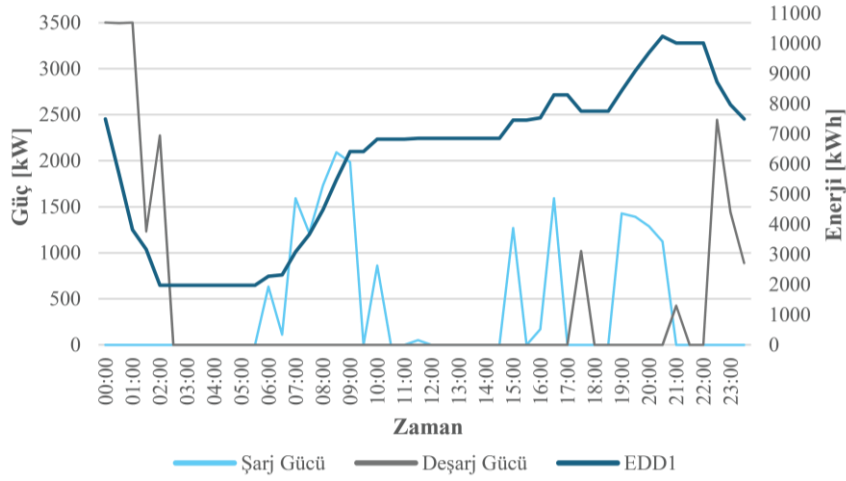
Şekil 12. Durum 1’de optimizasyon algoritmasının enerji santrali seçimi (Power plant selection of optimization algorithm in Case 1)



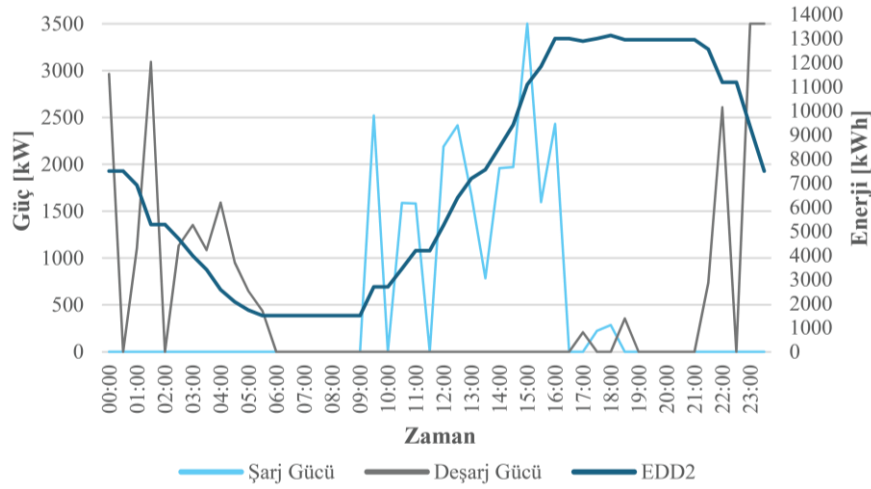
Şekil 13. Durum 1’de enerji alışverişi sonucu oluşan kar/zarar grafiği (Profit/Loss graph in Case 1)

Durum 2’de bir önceki duruma ek olarak piyasada teklif veren santral sayısında ve toplam kurulu güç değerinde artış sağlamak amacıyla güneş enerjisi sistemleri dahil edilmektedir. Diğer yandan yeni durumda farklı bir fiyat teklifi de sunulduğundan, piyasadaki enerji fiyatı oluşumunda daha gerçekçi bir ortama yaklaşılması hedeflenmektedir. Baralarda yer alan ED sistemlerinin Şekil 14 ve Şekil 15’te verilen grafiklerinden de anlaşıldığı üzere ilk olarak minimum EDD değerine kadar

deşarj olmaktadır. Daha sonra güneş enerjisinden alınan enerjinin sisteme dahil olması ile her iki ED sisteminin şarj olmaya başladığı görülmektedir. Son olarak, akşam periyoduna gelindiğinde tekrardeşarj olarak başlangıç EDD değerinde süreci tamamlamaktadır. Yapılan tüm şarj vedeşarj işlemleri sayesinde arz ve EAların getirdiği yük de dahil olmak üzere talep arasındaki denge tutturulmaktadır.



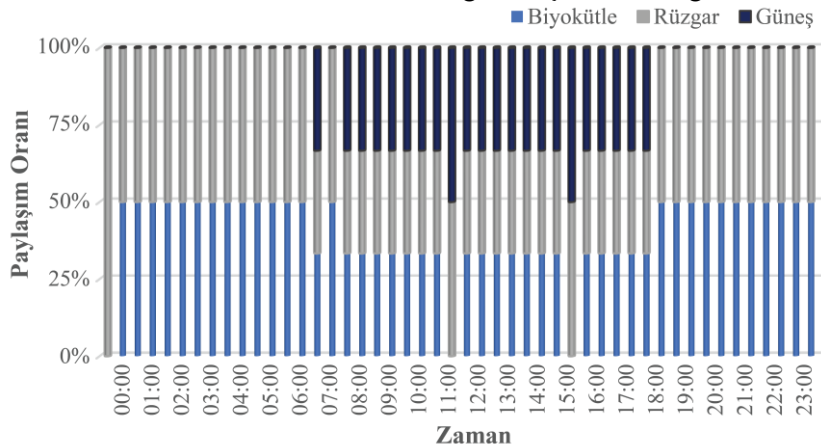
Şekil 14. Durum 2'de Bara 2'deki ED sistemine ait güç ve enerji değerleri (Power and energy values of the ES system at Bus 2 in Case 2)



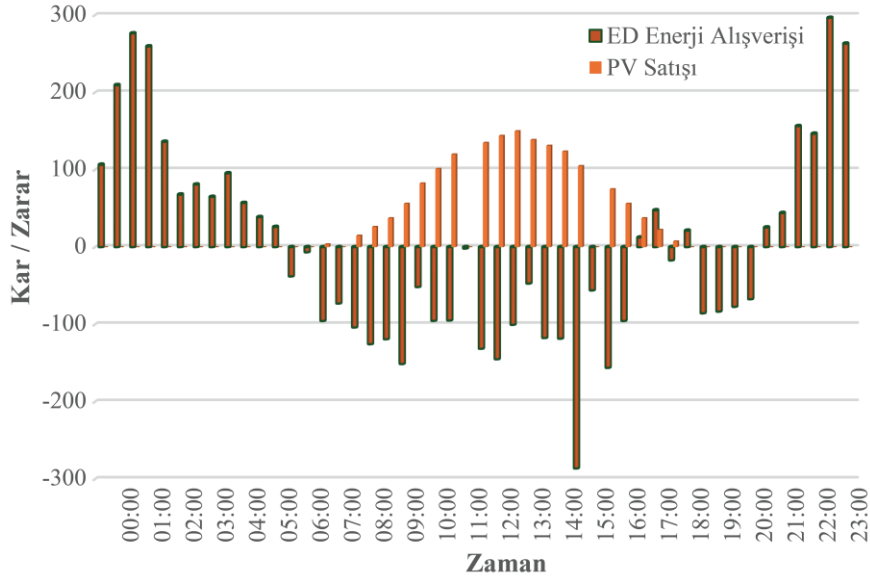
Şekil 15. Durum 2'de Bara 5'teki ED sistemine ait güç ve enerji değerleri (Power and energy values of the ES system at Bus 5 in Case 2)

Kısıtlı optimizasyon algoritması tarafından seçilen enerji santralleri Şekil 16'da gösterilmektedir. Güneş enerjinin teklif verdiği aralıklarda sisteme enerji vermesi uygun görülmektedir. ED sistemlerinin kapasitesinin imkân verdiği ölçülerde işletmecinin kar etmesi amacıyla da işlemler gerçekleştirilmektedir. Güneş enerjisi santrali aktif iken daha yüksek teklif veren bir santral kabul edildi ise

piyasa fiyatı daha yukarıda olduğundan, aradaki fiyat farkı işletmeciye kar olarak yansımaktadır. Durum 2'de ED sistemlerinin operasyonları ile 105.104 \$ ödeme yapma zorunluluğu ortaya çıkarken, güneş enerjisi sistemlerinden 1569 \$ ekstra kazanç sağlayarak toplamda 1463.896 \$ gelir elde eder. Her bir zaman dilimine ait kâr zarar değerleri Şekil 17'de gösterilmektedir.



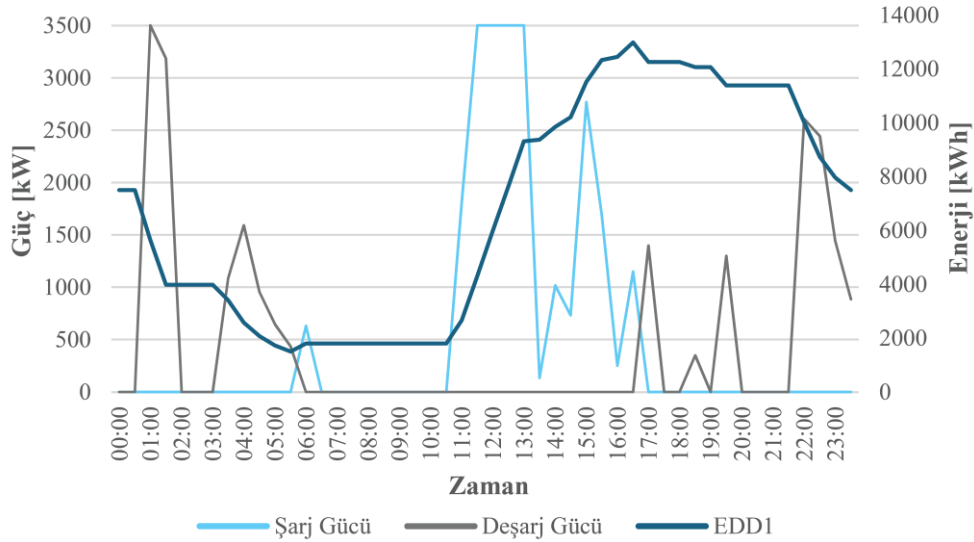
Şekil 16. Durum 2'de optimizasyon algoritmasının enerji santrali seçimi (Power plant selection of optimization algorithm in Case 2)



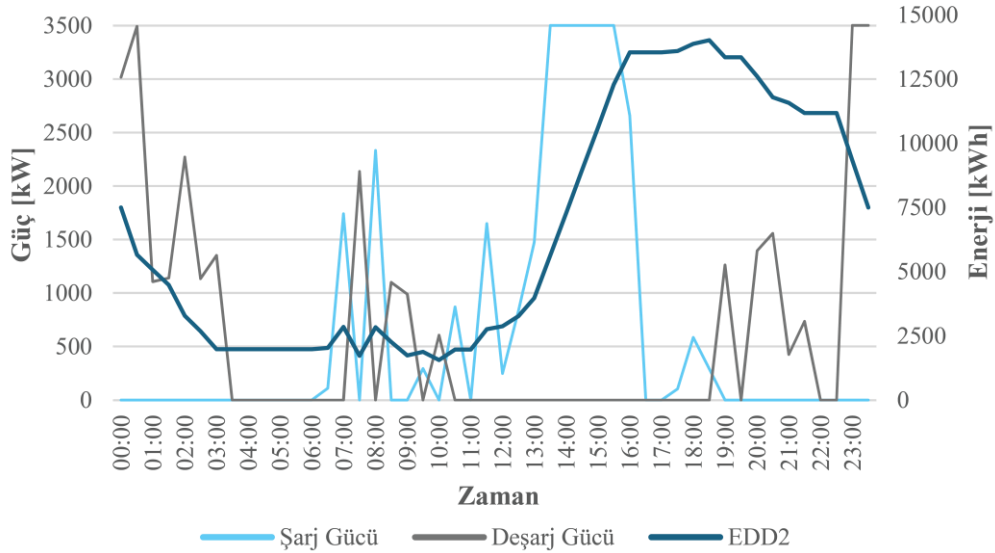
Şekil 17. Durum 2’de enerji alışverişi sonucu oluşan kar/zarar grafiği (Profit/Loss graph in Case 2)

Durum 3’te bir önceki durumdan farklı olarak güneş enerjisi kurulu gücü 2 katına çıkarılmaktadır. Daha önce biyokütle, rüzgâr ve güneş enerjisi kurulu güç değerleri sırasıyla 5 MW, 10 MW ve 6 MW olarak tasarlanmıştır. Kurulu güç içerisindeki oranı %28.57’den yeni durumda %44.44 değerine yükselmektedir. Bilindiği üzere güneş enerjisinden günün belirli bir periyodunda faydalandığından, kurulu güç içerisindeki payının yükselmesi hatta içerisinde bulunduğu sistemin eşik değerinin üzerinde olması enerji temininde ve şebeke

yönetiminde bazı sıkıntıların oluşmasına yol açabilir. Bu tarz sistemlerde ED sistemlerinden faydalanarak şebekeye teknik anlamda destek oluşturmak önemlidir. Durum 3’te ED sistemlerinin şarj deşarj işlemlerine ait eğriler Şekil 18 ve Şekil 19’da verilmektedir. Her iki ED sisteminin de kapasitesi imkanları dahilinde şarj ve deşarj işlemlerini yaptığı ve test süresi sonunda başlangıç değerine ulaşarak net sıfır enerji alışverişi ile süreci tamamladığı anlaşılmaktadır.



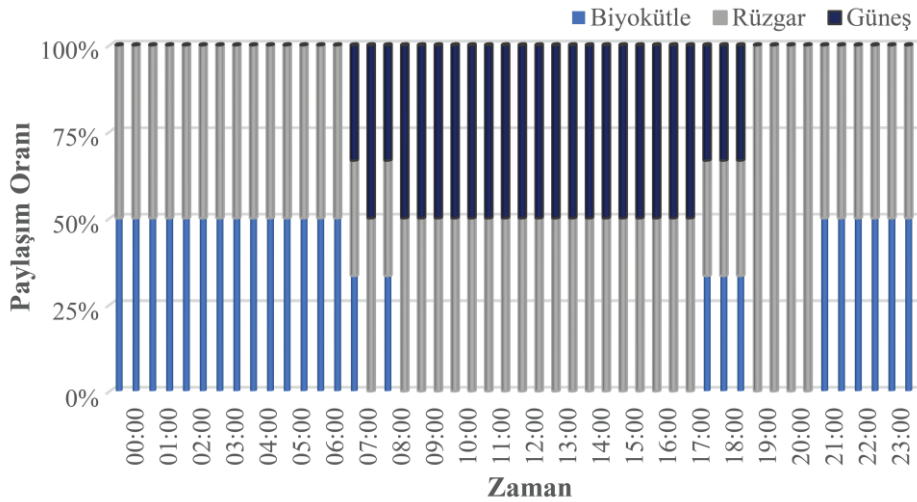
Şekil 18. Durum 3’te Bara 2’deki ED sisteme ait güç ve enerji değerleri (Power and energy values of the ES system at Bus 2 in Case 3)



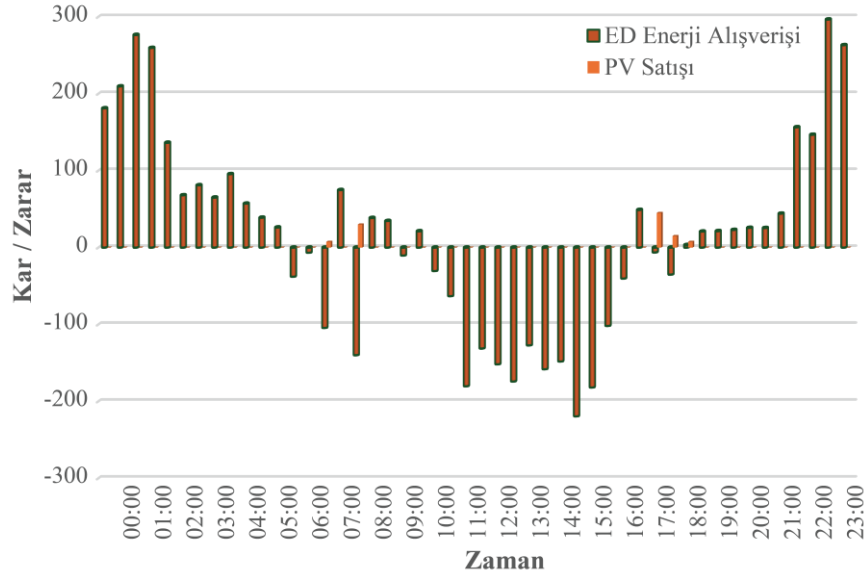
Şekil 19. Durum 3'te Bara 5'teki ED sistemine ait güç ve enerji değerleri (Power and energy values of the ES system at Bus 5 in Case 3)

Yüksek kurulu güç oranına sahip bir güneş enerjisi santralının sistemde yer alması, oluşturacağı teknik ve ekonomik değişimler açısından farklı bir bakış sunabilir. Durum 2'de gerçekleşen santral seçimi grafiği ile Durum 3'teki karşılaştırıldığında güneş enerji kapasitesindeki artışın biyokütle enerji santralının teklifleri üzerinde büyük düşüş olarak etki ürettiği Şekil 20'de görülmektedir. En yüksek teklife sahip biyokütle enerji santralının tercih edilmemesi piyasa fiyatının daha düşük seviyede oluşmasını sağlamaktadır. Bu durum tüketici açısından bakıldığında avantajlı olarak görünse de güneş enerjisinin olmadığı zaman dilimlerinde hem

fiyatlar yüksek seyredecek hem de ilgili kurulu güç devre dışı kalacaktır. Diğer yandan güneş enerjisi işletmecisi, piyasa fiyatı kendi teklifi üzerinde oluştuğunda ekstra kar etmekteyken, güneş enerjisi kurulu gücünün artmasıyla birlikte piyasa fiyatının daha düşük seyrettiği zaman dilimlerinde ekstra kar edememekte, piyasa fiyatının yüksek olduğu zaman dilimlerinde ise üretimi olmadığından satış yapamamaktadır. Şekil 21'de görüldüğü üzere güneş enerjisi kaynaklı kar 105 \$ seviyesinde çok düşük ve ED sistemi işlemleri ile elde edilen kazanç 691.52 \$, toplamda ise 796,52 \$ olarak gerçekleşmektedir.



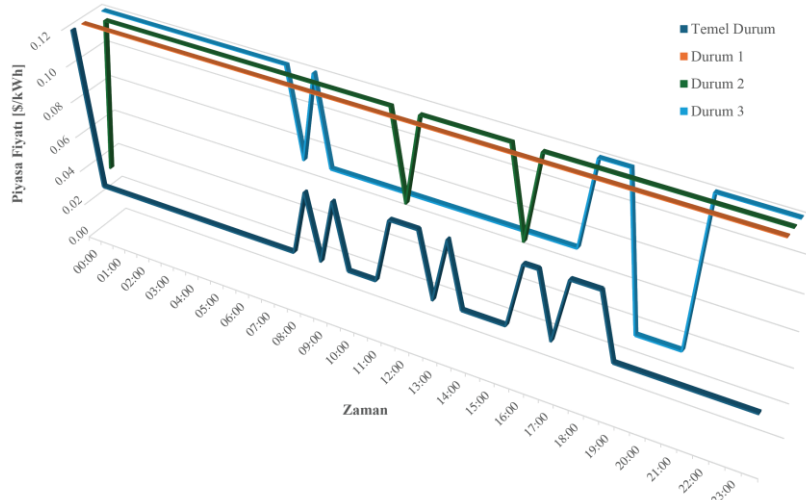
Şekil 20. Durum 3'te optimizasyon algoritmasının enerji santrali seçimi (Power plant selection of optimization algorithm in Case 3)



Şekil 21. Durum 3'te enerji alışverişi sonucu oluşan kar/zarar grafiği (Profit/Loss graph in Case 3)

Yük talebi aynı olan farklı çalışma şekillerine sahip durumlar incelendiğinde piyasa fiyat oluşumunun birbirinden farklı olduğu gözlenmektedir. Şekil 22'de verilen zamana göre değişen piyasa fiyat grafiğinde en iyi fiyat oluşumunun Durum 3'te gerçekleştiği görülmektedir. Burada kısıtlı optimizasyon algoritmasının seçimleri ile güneş enerjisinden daha fazla faydalanılması etkili

olmaktadır. Tablo 3'te verilen ED sistemleri ve güneş enerji santrali işletmecisinin kar ve zarar durumu analiz edildiğinde, sadece zarar edilen durumlar olduğu gibi yüksek kar edilen durumlar da mevcuttur. Bu farklılıklar aynı zamanda elektrik şebekesinin teknik olarak sürdürülebilirliği öncelendiğinde değişkenlik göstermektedir.



Şekil 22. Durumlara ait piyasa fiyatlarının zaman göre değişimi (Variation of market prices by time in all cases)

Tablo 3. Durumlara ait kar / zarar değerleri (Profit/Loss values in all cases)

	ED Sistemi (\$)	Güneş Enerjisi (\$)	Toplam (\$)
Temel Durum	-151.147	-	-151.147
Durum 1	-113.371	-	-113.371
Durum 2	-105.104	1569	1463.896
Durum 3	691.52	105	796.52

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Elektrik şebekesi işletilmesinde, YEK ve EAların sistem içerisindeki payının artması ile farklı bakış açılarına sahip yeni çalışma şekillerinin araştırılması kaçınılmaz bir durum olmaktadır. Her geçen gün teknik, yasal imkanların gelişmesi ve sosyal kabul oranının artması ile şebeke yönetimi klasik yöntemlerin dışına çıkmaktadır. Yakın geleceğe kadar merkezi enerji santrallerinden beslenen elektrik şebekesi günümüzde YEKler ile dağıtık enerji sistemlerinin yaygınlaştığı bir noktaya doğru evrilmektedir. Bu çalışmada, merkezi bir şebekeye bağlı fakat ada şeklinde yani kendi kendine yetebilen bir mikro şebeke tasarımının teknik ve ekonomik çalışabilirliği incelenmektedir.

Tasarlanan sistemde yer alan 2 adet ED sistemi, 50 EA'ya aynı anda hizmet verebilen şarj altyapısı, biyokütle, rüzgâr ve güneş enerji sistemleri kısıtlı optimizasyon algoritması tarafından yönetilerek optimum çalışma koşulları saptanmaktadır. Arz ve talep arasındaki denge sağlanırken, en uygun piyasa fiyatının oluşması amaçlanmaktadır. Tüm durumlarda ada sistemi şeklinde çalışmayla enerji dengesi sağlanırken, ED sistemi işletmecisinin ekonomik faydası açısından en iyi sonucun 1463.896 \$ ile Durum 2'de elde edildiği görülmektedir. Bunun sonucun elde edilmesinde enerji santrallerinin toplam kurulu gücü ile enerji depolama sistemi kapasitesi arasındaki dengenin etkili olduğu söylenebilir. Sistemde Durum 3'teki gibi güneş enerjisi kurulu gücünün daha fazla olması piyasa fiyatının daha düşük oluşmasına neden olmakta ve ED sistemi işletmecisinin ek ekonomik fayda elde etmesini engellemektedir. Diğer yandan tüketici açısından en ekonomik şartlar Durum 3'te ortaya çıkmakta, bu durumda ED sistemi işletmecisinin kazancında Durum 2'ye göre %45.59 düşüş gerçekleşmektedir. Durum 3'te tüketicinin daha fazla güneş enerjisi kurulu gücü sayesinde daha fazla uygun elektrik enerjisine ulaşabildiği görülmektedir. Sistem içerisinde birim enerji üretim maliyeti düşük santrallerin yer alması son tüketici açısından önem arz etmektedir. Ayrıca, yapılan farklı durum çalışmaları mevcut elektrik şebekelerinde kurulu güç içerisindeki YEK oranının değişiminin üretebileceği sonuçlar hakkında da ipuçları sunmaktadır.

Dahası, elde edilen sonuçlar ile ED sisteminin net enerji değişimi sıfır olacak şekilde tüm durumlarda kullanılarak ve ekonomik kaygılardan bağımsız hareket edilerek, teknik olarak kendine yeten bir mikro sistem içerisinde önemli görev üstlendiği

ispat edilmektedir. Gelecek çalışmalar kapsamında, daha büyük kapasiteli ED sistemlerinin sağlayacağı teknik ve ekonomik faydalar irdelenebilir. Ayrıca, mikro şebekelerin ekonomik analizine ve maliyet optimizasyonuna odaklanarak, ilk yatırım, bakım ve işletme giderleri gibi unsurların daha derinlemesine incelenmesini içerebilir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının, özellikle hidrojen ve jeotermal gibi alternatiflerin entegrasyonu ve performansı da araştırılmalıdır. Diğer yandan, kullanıcı tabanlı talep yönetimi ile enerji tüketimindeki dalgalanmaların etkisi optimize edilebilir. Mikro şebekelerin güvenliği, siber güvenlik ve doğal afetlere karşı performansları da önemli araştırma konuları arasında yer aldığı farklı durum çalışmaları ile sistem dayanıklılığı incelenebilir.

ETİK STANDARTLARIN BEYANI

(DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

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

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

Abdullah Kürşat AKTAR: Test düzeneğinin oluşturulması, yazılım ve simülasyon çalışmaları, sonuçların analiz edilmesi ve makalenin yazım işlemi.

Murat KARAKILIÇ: Literatür taraması, veri setinin hazırlanması, görselleştirme ve sonuçların analiz edilmesi.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

KAYNAKLAR (REFERENCES)




- [1] Uluslararası Enerji Ajansı (IEA), "World Energy Outlook 2023," IEA Publ., 2023.
- [2] Enerji Bilgi Dairesi (EIA), "International Energy Outlook 2023," ABD Enerji Bakanlığı, pp. 1–70, 2023.
- [3] M. Khalid, "Smart grids and renewable energy systems: Perspectives and grid integration challenges," 2024. doi: 10.1016/j.esr.2024.101299.
- [4] Z. Zheng, M. Shafique, X. Luo, and S. Wang, "A systematic review towards integrative energy management of smart grids and urban energy systems," 2024. doi: 10.1016/j.rser.2023.114023.

- [5] F. Sattar, S. Ghosh, Y. J. Isbeih, M. S. El Moursi, A. Al Durra, and T. H. M. El Fouly, "A predictive tool for power system operators to ensure frequency stability for power grids with renewable energy integration," *Appl Energy*, vol. 353, 2024, doi: 10.1016/j.apenergy.2023.122226.
- [6] R. S. El-Emam, A. Constantin, R. Bhattacharyya, H. Ishaq, and M. E. Ricotti, "Nuclear and renewables in multipurpose integrated energy systems: A critical review," 2024. doi: 10.1016/j.rser.2023.114157.
- [7] K. Liang, H. Wang, D. Pozo, and V. Terzija, "Power system restoration with large renewable Penetration: State-of-the-Art and future trends," 2024. doi: 10.1016/j.ijepes.2023.109494.
- [8] S. Liu et al., "Joint operation of mobile battery, power system, and transportation system for improving the renewable energy penetration rate," *Appl Energy*, vol. 357, 2024, doi: 10.1016/j.apenergy.2023.122455.
- [9] Q. Yang, J. Wang, J. Liang, and X. Wang, "Chance-constrained coordinated generation and transmission expansion planning considering demand response and high penetration of renewable energy," *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 155, 2024, doi: 10.1016/j.ijepes.2023.109571.
- [10] M. Al-Dhaifallah, M. M. Refaat, Z. Alaas, S. H. E. A. Aleem, E. E. El-kholy, and Z. M. Ali, "Multi-objectives transmission expansion planning considering energy storage systems and high penetration of renewables and electric vehicles under uncertain conditions," *Energy Reports*, vol. 11, pp. 4143–4164, Jun. 2024, doi: 10.1016/J.EGYR.2024.03.060.
- [11] M. I. Saleem and S. Saha, "Assessment of frequency stability and required inertial support for power grids with high penetration of renewable energy sources," *Electric Power Systems Research*, vol. 229, 2024, doi: 10.1016/j.epsr.2024.110184.
- [12] A. Emrani and A. Berrada, "A comprehensive review on techno-economic assessment of hybrid energy storage systems integrated with renewable energy," 2024. doi: 10.1016/j.est.2024.111010.
- [13] Wangmo, A. Helwig, and J. Bell, "What energy storage technologies will Australia need as renewable energy penetration rises?," *J Energy Storage*, vol. 95, p. 112701, Aug. 2024, doi: 10.1016/J.EST.2024.112701.
- [14] A. Amiruddin, A. Liebman, R. Dargaville, and R. Gawler, "Optimal energy storage configuration to support 100 % renewable energy for Indonesia," *Energy for Sustainable Development*, vol. 81, p. 101509, Aug. 2024, doi: 10.1016/J.ESD.2024.101509.
- [15] A. D. A. Bin Abu Sofian, H. R. Lim, H. Siti Halimatul Munawaroh, Z. Ma, K. W. Chew, and P. L. Show, "Machine learning and the renewable energy revolution: Exploring solar and wind energy solutions for a sustainable future including innovations in energy storage," 2024. doi: 10.1002/sd.2885.
- [16] M. Alhuyi Nazari, V. Blazek, L. Prokop, S. Misak, and N. Prabakaran, "Electric vehicle charging by use of renewable energy technologies: A comprehensive and updated review," *Computers and Electrical Engineering*, vol. 118, p. 109401, Sep. 2024, doi: 10.1016/J.COMPELECENG.2024.109401.
- [17] Z. Zhong, W. Hu, and X. Zhao, "Rethinking electric vehicle smart charging and greenhouse gas emissions: Renewable energy growth, fuel switching, and efficiency improvement," *Appl Energy*, vol. 361, p. 122904, May 2024, doi: 10.1016/J.APENERGY.2024.122904.
- [18] D. Kanakadhurga and N. Prabakaran, "Smart home energy management using demand response with uncertainty analysis of electric vehicle in the presence of renewable energy sources," *Appl Energy*, vol. 364, p. 123062, Jun. 2024, doi: 10.1016/J.APENERGY.2024.123062.
- [19] 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.
- [20] M. Jansen, R. Gross, and I. Staffell, "Quantitative evidence for modelling electric vehicles," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 199, p. 114524, Jul. 2024, doi: 10.1016/J.RSER.2024.114524.
- [21] J. Gerlach et al., "Navigating the energy transition: Identifying critical success factors for ancillary services provision and sustainable energy solutions in Germany," *Heliyon*, vol. 10, no. 5, p. e27643, Mar. 2024, doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e27643.
- [22] A. K. Aktar, A. Taşçıkaraoğlu, and J. P. S. Catalão, "Scheduling of mobile charging stations with local renewable energy sources," *Sustainable Energy, Grids and Networks*, vol. 37, 2024, doi: 10.1016/j.segan.2023.101257.
- [23] 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.

[24] Elektrikli Araç Özellikleri Çevrimiçi
Erişim: <https://ev-database.org/>

Microstructural, mechanical, and corrosion properties of S355J2 structural steels joined by MIG welding

Uğur Çaligülü¹ , Cihan Özorak^{2*} , Afif Daniş¹ 

¹Firat University, Faculty of Technology, Department of Metallurgy and Materials Engineering, Elazığ-Turkey

²Kastamonu University, School of Civil Aviation, Department of Aircraft Maintenance and Repair, Kastamonu-Turkey

Article Info

Research article
Received: 24/09/2024
Revision: 25/10/2024
Accepted: 02/11/2024

Keywords

S355J2 Structural Steel
MIG Welding
Corrosion
Microstructure
Mechanical Properties

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 24/09/2024
Düzeltilme: 25/10/2024
Kabul: 02/11/2024

Anahtar Kelimeler

S355J2 Yapısal Çelik
MIG Kaynağı
Korozyon
Mikroyapı
Mekanik Özellikler

Graphical/Tabular Abstract (Grafik Özet)

In this study, the microstructural, mechanical, and corrosion properties of S355J2 structural steels welded by metal inert gas (MIG) welding method were investigated. Single surface and double surface welded structures were formed by MIG welding method using 2 different amperage values (200A, and 260A).

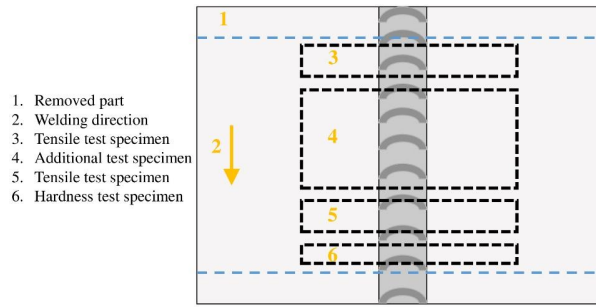


Figure A: Butt-to-face joint test sample preparation areas according to TS EN ISO 15614-1 standard/ **Şekil A:** TS EN ISO 15614-1 standardına göre uç uca birleştirme deney numunesi hazırlama alanları

Highlights (Önemli noktalar)

- The gas metal arc welding capability of S355J2 structural steel, which is widely preferred in the oil and offshore sector, was investigated according to EN ISO 15614-1 standard. / Petrol ve açık deniz sektöründe yaygın olarak tercih edilen S355J2 yapı çeliğinin gaz altı kaynak kabiliyeti EN ISO 15614-1 standardına göre araştırılmıştır.
- The microstructure images were examined under an optical microscope, it was observed that the material had a ferritic and pearlitic structure. In addition, it was observed that the welding current increased and the grain size increased in double-sided welding. / Mikro yapı görüntüleri optik mikroskop altında incelendiğinde, malzemenin ferritik ve perlitik yapıya sahip olduğu gözlemlendi. Ayrıca, kaynak akımının arttığı ve çift taraflı kaynakta tane boyutunun arttığı tespit edilmiştir.
- Corrosion test results showed that the welded joint welded at 260A welding current and double-sided was more resistant to corrosion in 1M HCl solution than other samples. / Korozyon testi sonuçları, 260A kaynak akımında ve çift taraflı olarak kaynaklanan kaynaklı birleştirmenin, 1M HCl çözeltisinde diğer numunelere göre korozyona karşı daha dayanıklı olduğunu göstermiştir.

Aim (Amaç): In this study, the gas welding capability of S355J2 structural steel, which is widely preferred in the oil and offshore sectors, was investigated. / Bu çalışmada petrol ve açık deniz sektöründe yaygın olarak tercih edilen S355J2 yapı çeliğinin gaz altı kaynak kabiliyeti incelenmiştir.




Originality (Özgünlük): It was investigated whether the strength changed as a result of changing the welding method and amperage value of the welding process. / Kaynak işleminin kaynak metodu ve amper değerinin değişmesi sonucu dayanımın değişip değişmediği araştırılmıştır.

Results (Bulgular): Tensile test results showed that there was an increase in both yield strength and tensile strength in double-sided welding and 260A welding current. / Çekme testi sonuçları, çift taraflı kaynak ve 260A kaynak akımında hem akma dayanımında hem de çekme dayanımında artış olduğunu göstermiştir.

Conclusion (Sonuç): Considering all test results, it was seen that the most suitable welding parameters were 260A and double-sided welding sample. / Tüm test sonuçları göz önüne alındığında en uygun kaynak parametrelerinin 260A ve çift taraflı kaynak numunesi olduğu görülmüştür.



Microstructural, mechanical, and corrosion properties of S355J2 structural steels joined by MIG welding

Uğur Çaligülü¹ , Cihan Özorak^{2*} , Afif Daniş¹ 

¹Firat University, Faculty of Technology, Department of Metallurgy and Materials Engineering, Elazığ-Turkey

²Kastamonu University, School of Civil Aviation, Department of Aircraft Maintenance and Repair, Kastamonu-Turkey

Article Info

Research article
Received: 24/09/2024
Revision: 25/10/2024
Accepted: 02/11/2024

Keywords

S355J2 Structural Steel
MIG Welding
Corrosion
Microstructure
Mechanical Properties

Abstract

In this study, the microstructural, mechanical, and corrosion properties of S355J2 structural steels welded by metal inert gas (MIG) welding method were investigated. Single surface and double surface welded structures were formed by MIG welding method using 2 different amperage values (200A, and 260A). The microhardness, tensile strength, corrosion and microstructure properties of the welded specimens were investigated. The structural and mechanical effects of different current values used on the material were analysed. Microstructure investigations show that fine grained structures start to coarsen and grain boundaries start to decrease due to welding heat input in the HAZ region. The highest hardness value was measured in the welded joint at 260A value in single surface welding due to rapid cooling and rapid solidification. Increases in yield strength and tensile strength were determined with increasing welding current and in the double-sided welding procedure. In the potentiodynamic corrosion test carried out in HCl solution, it was determined that the double-sided welded joint at 260A welding amperage and the double-sided welded joint at 260A was the most resistant to corrosion among the samples subjected to corrosion tests.

MIG kaynağı ile birleştirilen S355J2 yapısal çeliklerinin mikro yapısal, mekanik ve korozyon özellikleri

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 24/09/2024
Düzeltilme: 25/10/2024
Kabul: 02/11/2024

Anahtar Kelimeler

S355J2 Yapısal Çelik
MIG Kaynağı
Korozyon
Mikroyapı
Mekanik Özellikler

Öz

Bu çalışmada, metal inert gaz (MIG) kaynak yöntemi ile kaynaklanan S355J2 yapı çeliklerinin mikro yapısal, mekanik ve korozyon özellikleri incelenmiştir. MIG kaynak yöntemi ile 2 farklı amper değeri (200A ve 260A) kullanılarak tek yüzey ve çift yüzey kaynaklı yapılar oluşturulmuştur. Kaynaklanan numunelerin mikro sertlik, çekme dayanımı, korozyon ve mikro yapı özellikleri incelenmiştir. Kullanılan farklı akım değerlerinin malzeme üzerindeki yapısal ve mekanik etkileri analiz edilmiştir. Mikro yapı incelemeleri, ince taneli yapıların HAZ bölgesinde kaynak ısısı girdisi nedeniyle kabalaşmaya başladığını ve tane sınırlarının azalmaya başladığını göstermektedir. En yüksek sertlik değeri, tek yüzey kaynakta hızlı soğuma ve hızlı katılma nedeniyle kaynaklı bağlantıda 260A değerinde ölçülmüştür. Kaynak akımının artırılmasıyla ve çift taraflı kaynak işleminde akma dayanımı ve çekme dayanımında artışlar belirlenmiştir. HCl çözeltisinde yapılan potansiyodinamik korozyon deneyinde, 260A kaynak amperinde çift taraflı kaynaklı birleştirmenin, korozyon deneyine tabi tutulan numuneler arasında ise çift taraflı kaynaklı birleştirmenin korozyona en dayanıklı olduğu belirlenmiştir.

1. INTRODUCTION (GİRİŞ)

Structural steels are generally used in bridges, industrial construction, breakwaters, shipbuilding, oil and offshore gas platforms and railways. The main properties required in structural steels are high yield strength, tensile strength, elongation and easy

weldability. The reasons for the significant use of structural steel in the mentioned areas today are its easy accessibility, economic suitability, high yield and tensile strength [1]. Since they do not contain alloying elements, their properties are controlled by their carbon percentage. The increase in carbon content increases the yield and tensile strengths and

hardenability, and decreases the ductility and toughness values. Structural steels, which are steels with low carbon content, deform more than steels with high carbon content. They have low hardenability values due to their unalloyed and low carbon content, so they cannot be hardened as a result of heat treatment. Only softening and stress relieving processes can be applied as heat treatment [2]. For this reason, the welding capabilities of S355J2 structural steel, one of the most widely used materials in the world, were investigated according to EN ISO 15614-1 standard. S355J2 structural steel has low carbon content, pearlitic+ferritic fine grain structure and high yield and tensile values. Therefore, it has encouraged to investigate different welded joining methods for the material to work without losing its values and properties after the welding process.

Metal inert gas (MIG) welding method is a joining process that is used to increase the welding arc stability by using shielding inert gas; the arc between the electrode and work pieces fed into the welding zone melts the metallic material. It is very suitable for use in semi-/full automatic manufacturing system. This allows us to save time and create fast delivery times [3]. Since smaller diameter electrodes are used compared to arc welding, it has high current density and high metal deposition rate in the same current range. Since slag is not released, there is no slag cleaning work after each pass made with covered electrodes and the welding quality is improved since there is no possibility of slag residue in the weld [4,5].

When examined in the literature, it has been observed that structural steels are used in scientific studies to find the most suitable welded manufacturing methods by using many welded manufacturing methods and welding variables in order to maximise the mechanical properties of the material. Ertürk et al. [6] stated that for structural steels, a carbon content less than $C \leq 0.22$ reduces the possibility of capillary cracks in the weld seam, and the amount of martensite formed in the weld seam at the time of welding should not exceed 30% by reducing the amount of carbon in the content. Eleman [7] investigated the effects of new and old generation MIG-MAG gas metal arc welding machines on welding. It has been observed that the new generation machines have better penetration, spatter problem occurs much less, while root

formation occurs in the welding process with the traditional welding machine, it has been observed that the rupture occurs on the weld seam. The microstructure and mechanical behavior of S355J2 steel base metal, welded joints, and repair welded joints were examined by Yu et al. [8]. According to their testing, the microhardness of repair welded joints drops by roughly 20 HV as the heat affected zone and weld metal's grain size increase. When taking into account the cyclic loading behavior, the repair welded joints showed a higher degree of softening than the welded joints and exhibited continuous softening. The impact of repair welding on the microstructure, mechanical characteristics, and fatigue characteristics of S355J2 steel T-joints in orthotropic bridge decks was examined by Zhao et al. [9]. According to the test results, the heat-affected coarse zone's increased grain size resulted in a about 30 HV decrease in the hardness of the connection.

In this study, the gas metal arc welding capability of S355J2 structural steel, which is widely preferred in the oil and offshore sector, was investigated according to EN ISO 15614-1 standard. For this reason, S355J2 structural steel was welded by MIG gas metal arc welding method using 2 different amperage values; 100% argon shielding gas, SG2 welding wire and constant welding speed as single surface and double surface welding and the microstructure, mechanical and corrosion properties of the welded joint were examined in detail.

2. EXPERIMENTAL STUDIES (DENEYSEL ÇALIŞMALAR)

In the study, S355J2 structural steel was commercially available in dimensions of 100 mm x 100 mm x 5 mm. Commercial 1.2 mm gas wire and 100% argon gas was used as shielding gas. Since the wall thickness of the S355J2 plates used was 5 mm, no pre-annealing process was performed. The materials to be welded were joined by MIG gas metal arc welding method using 200A and 260A at different amperage values as S355J2-S355J2 plate pairs, keeping the shielding gas, welding wire and welding speed constant. Single and double sided surfaces of S355J2 plates were welded using MIG method. The chemical composition and mechanical properties of the S355J2 material used in Table 1 are given in Table 2.

Table 1. Chemical composition of S355J2 structural steel (S355J2 yapısal çeliğin kimyasal bileşimi)

Grade	Chemical composition (wt.%)						
	C	Si	Mn	P	S	Cu	Fe
S355J2	0,22	0,55	1,6	0,025	0,025	0,55	Balance

Table 2. Mechanical properties of S355J2 structural steel (S355J2 yapısal çeliğin mekanik özellikleri)

Grade	Yield strength (N/mm ²)	Tensile strength (N/mm ²)	Elongation (%)	Impact energy (J)	
				- 20 °C	+ 20 °C
S355J2	355	510	17	27	40

During the welding process, a Lincoln PF46 type welding machine was used. The welding process was carried out at 200A and 260A amperes, 24-27V welding voltage and argon protective gas atmosphere. The prepared single and double sided surface welded specimens were subjected to SEM-EDX, XRD, tensile, hardness, corrosion and tensile,

hardness and grain structure tests and samples were cut from the welded sections to examine the grain structure under optical microscope. The samples prepared for metallographic examination were cut from the welded materials according to TS EN ISO 15614-1 standards from the areas specified in Figure 1 for the tests.

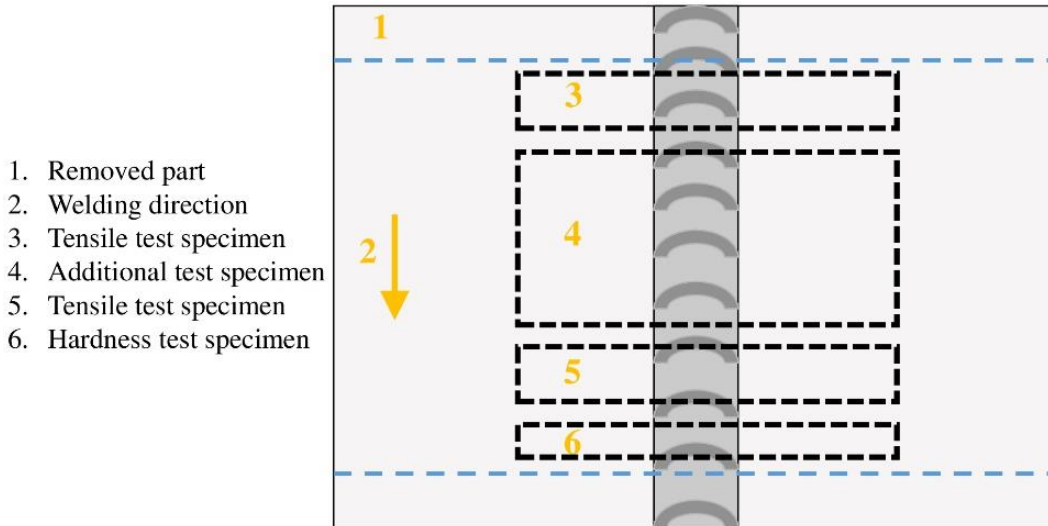


Figure 1. Butt-to-face joint test sample preparation areas according to TS EN ISO 15614-1 standard (TS EN ISO 15614-1 standardına göre uç uca birleştirme deney numunesi hazırlama alanları)

Welded samples were polished after surface sanding and etched in nital solution. Microhardness measurements were carried out using an AOB brand microhardness device. These measurements were made from a total of 20 different places under a load of 300 g, at 1 mm intervals and within a period of 20 seconds. A general evaluation was made by taking the average of these measurements. Tensile tests were carried out on a Shimadzu brand limited tensile device with a load of 50 kN, at a tensile speed of 3 mm/minute and in accordance with the TSE 138 EN 10002-1 standard. The Reference 3000 potentiostat/galvanostat/ZRA instrument was utilized to evaluate the samples for corrosion. The samples were ultrasonically cleaned for 45 minutes

at 35 °C with acetone, followed by 15 minutes at 35 °C with distilled water and 15 minutes at 60 °C with ethanol, and finally dried at 60 °C before beginning the corrosion study. The cleaned samples' open circuit potentials were measured for around fifteen minutes in a 1M HCl solution. The graphite electrode used as counter electrode. Reference electrode were represented by the Ag/AgCl electrode. Potentiodynamic polarization experiments and electrochemical impedance spectroscopy (EIS) measurements were performed on all samples. For every sample, three experiments were run. Samples were cleaned, a fresh solution was utilized, and the outcomes were averaged for each experiment. Microstructure analysis of the

samples and evaluation of the broken surfaces were made with a Zeiss brand scanning electron microscope and a Nikon brand optical microscope.

3. RESULTS AND DISCUSSION (SONUÇLAR VE TARTIŞMA)

The optical photographs of the specimens welded with single/double sided surface using 200A welding current are shown in Figure 2 and the optical photographs of the specimens welded with 260A welding current are shown in Figure 3. In Figure 2a and Figure 3a, single sided surface welding was performed, while in Figure 2b and Figure 3b, double sided surface welding was performed. For each specimen, the welded joint consists of three zones: weld zone, HAZ and base metal. Porous (cellular) and dendritic solidification was observed in the specimens in the direction

opposite to the heat flow starting from the melting line towards the centre of the melt pool. However, planar solidification was observed at the interface in contrast to dendritic solidification. This can be explained by the high temperature gradient (ΔT) and low solidification rate (V) at the interface. Dendritic solidification is also observed when the $\Delta T/V$ ratio is low. From the weld zone to the base metal, a coarse grain zone (HAZ) and then a fine grain zone (base metal) were formed [10–12]. In the transition from single sided surface to double sided surface and from 200A to 260A, coarsening of the grains in the structure occurred due to the increase in heat input. In their study on the mechanical and microstructure of the welded structure of a low carbon steel, Eroglu et al. [13] reported that the grain size increases in the weld zone and HAZ with increasing heat input.

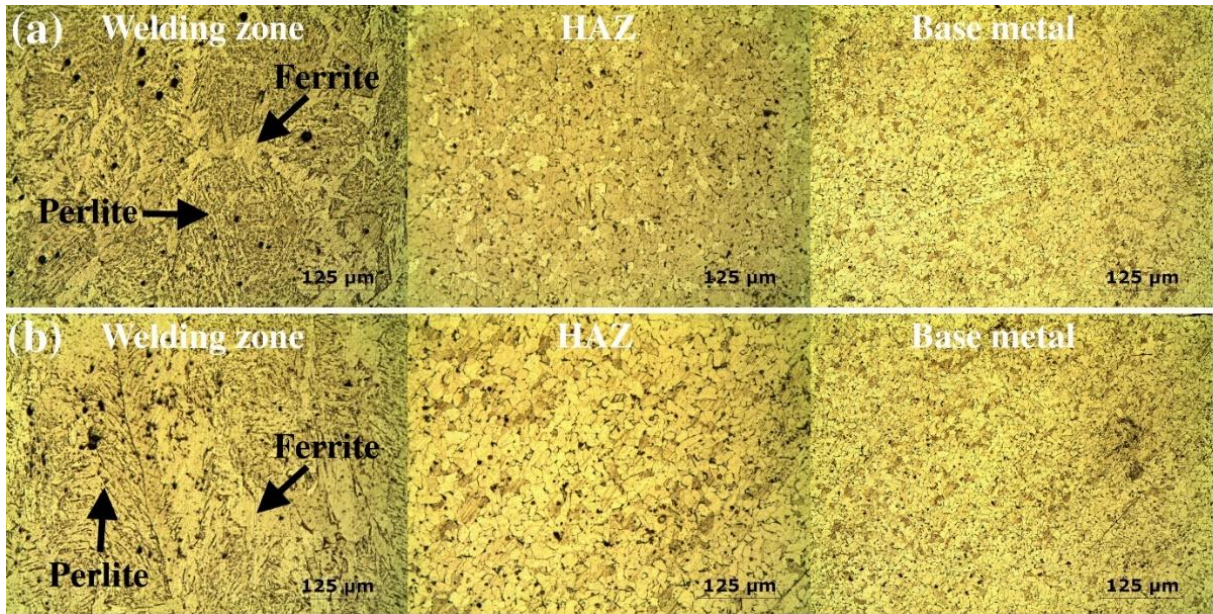


Figure 2. Optical photographs of the specimens welded at 200A welding current: (a) single sided surface and (b) double sided surface (200A kaynak akımında kaynaklanmış numunelerin optik fotoğrafları: (a) tek taraflı yüzey ve (b) çift taraflı yüzey)

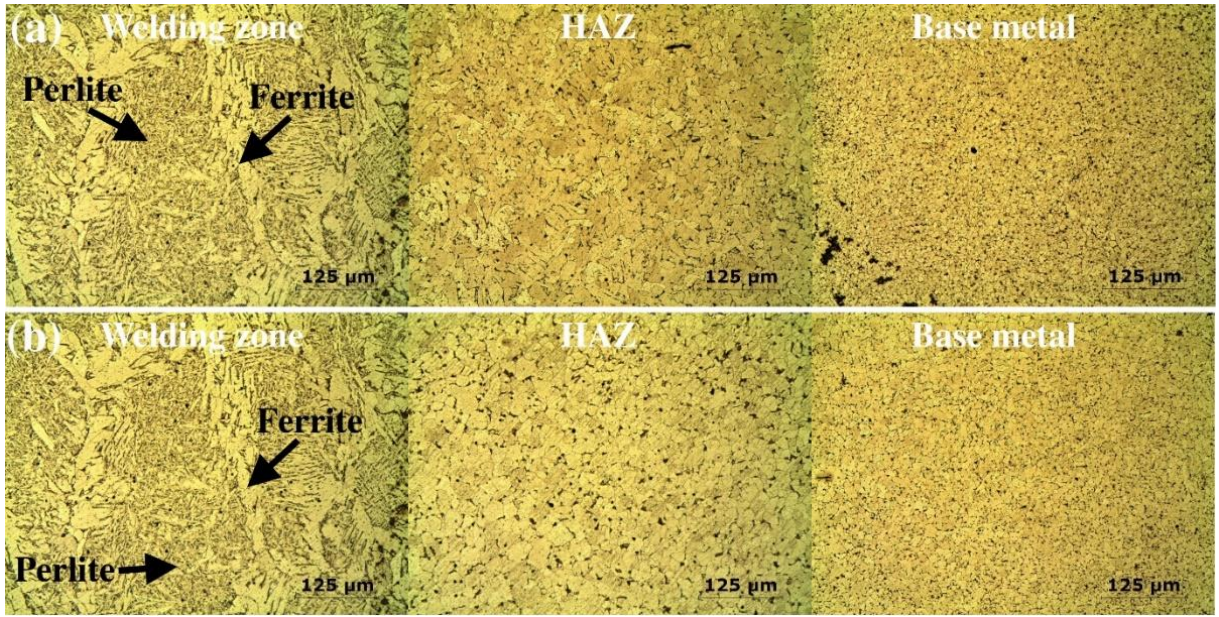


Figure 3. Optical photographs of the specimens welded at 260A welding current: (a) single sided surface and (b) double sided surface (260A kaynak akımında kaynaklanmış numunelerin optik fotoğrafları: (a) tek taraflı yüzey ve (b) çift taraflı yüzey)

Figure 4 shows the SEM-EDS analysis of the weld zone of the specimen welded on both sides at 260A welding current. EDS analysis of the structure consists of 0.21% C, 0.53% Si, 1.51% Mn, and 97.75% Fe. This chemical composition is consistent

with the chemical composition of the base metal given in the experimental studies section. In addition, the absence of any oxygen in the structure indicates that the weld zone is effectively protected by argon gas.

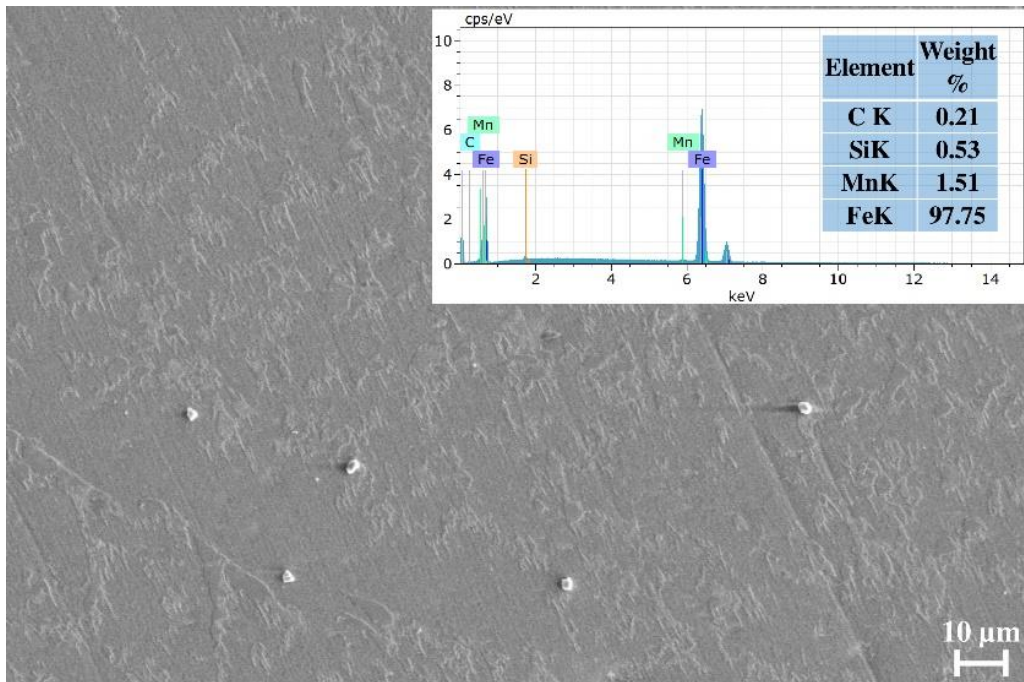


Figure 4. SEM-EDS analysis of the weld zone at 260A welding current and double-sided welded specimen (260A kaynak akımında kaynak bölgesinin ve çift taraflı kaynaklı numunenin SEM-EDS analizi)

The hardness graph of the samples is given in Figure 5. As a result of the tests, hardness values were generally high in the area where the weld seam was located due to rapid cooling and solidification in the weld zone. The highest hardness value was 219.9

HV on 260A single sided surface and the lowest was 132.5 HV on 200A double sided surface. The average hardness value was 180.49 HV for 260A single sided surface welded material and the lowest value was 160 HV for 200A single sided surface

welded material. The hardness value in the weld seam and HAZ region increased with increasing amperage value. It is thought to be caused by grain growth and dendritic solidification as a result of sudden cooling and sudden solidification with heat input during the welding process in the area of the weld seam. The fact that the hardness in the welding region is greater than the HAZ can be explained as

the high heat in the welding region is trapped in the HAZ region and reduces the hardness in this region [14-15]. Therefore, the reduced hardness in the HAZ may be attributed to the occurrence of grain development and the presence of ferrite phase in this area, as previously documented by other researchers [15-16].

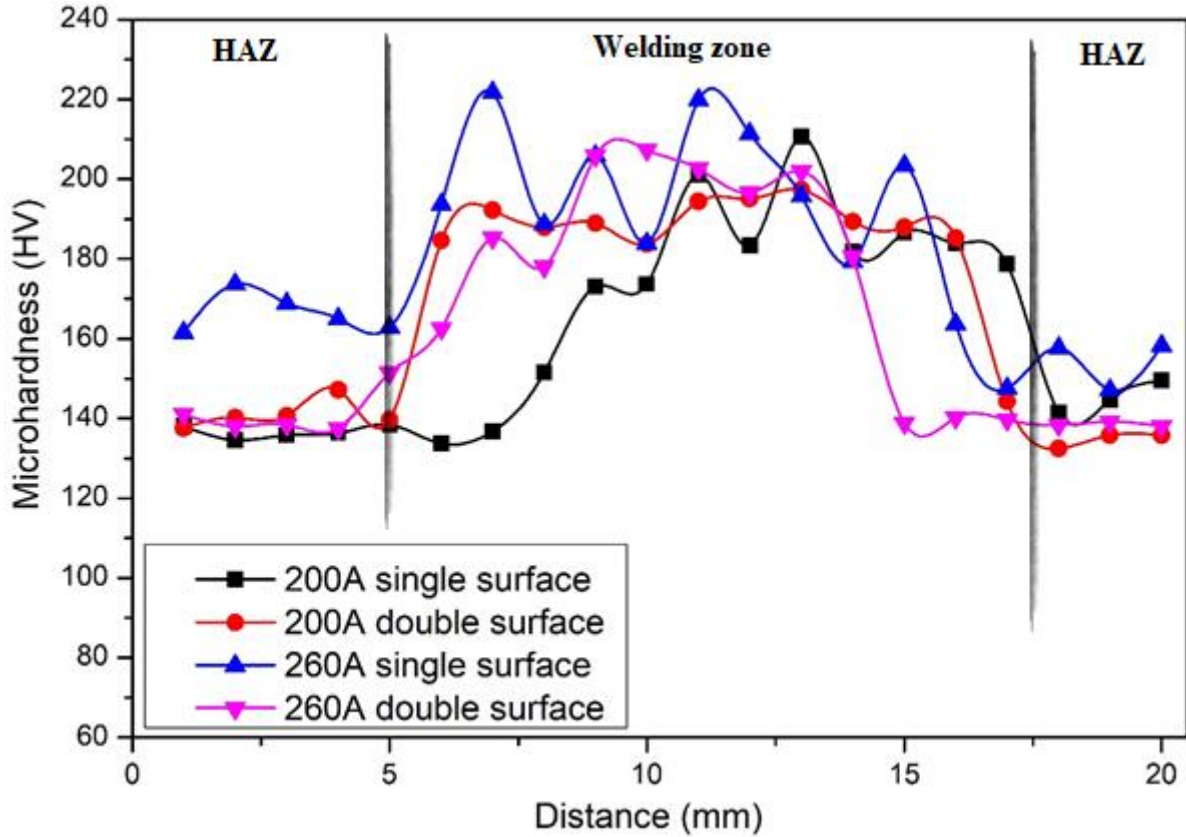


Figure 5. Hardness graph of the samples (Numunelerin sertlik grafiği)

The yield strength and tensile strength graphs of the specimens are given in Figure 6. When the data obtained are analysed, it is observed that the yield and tensile strength of the material is low in single sided surface welded specimens and high in double sided surface welded specimens. In addition, as the welding current increased, the yield strength and tensile strength of the welded specimens increased. More penetration was achieved both in double-sided welding and with increasing welding current. While the ruptures occurred at the weld area in the single-sided welded specimens, they occurred at the neck in the double-sided welded specimens. Figure

7 shows the occurrence of single and double sided welds in different regions in 260A. In single-sided welding, fracture occurred due to insufficient strength of the welded area. No necking was observed in this fracture. However, after double-sided welding, no fracture occurred in the welded area with higher strength, necking and subsequent fracture occurred in the base metal. 17 Tuncel and Aydın [18] studied the effect of welding type and pulse frequency on the tensile properties of Nd:YAG laser welded DP600 steel sheets. Double-sided joints have been reported to have significantly higher tensile properties than single-sided joints.

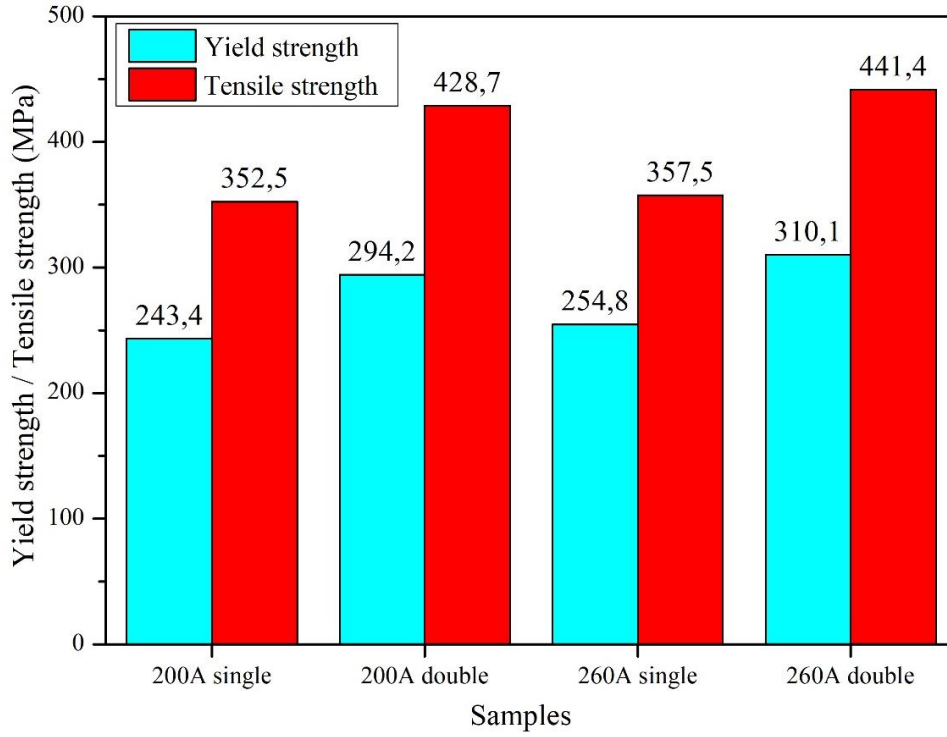


Figure 6. Tensile strength and yield strength of specimens (Numunelerin çekme dayanımı ve akma dayanımı)

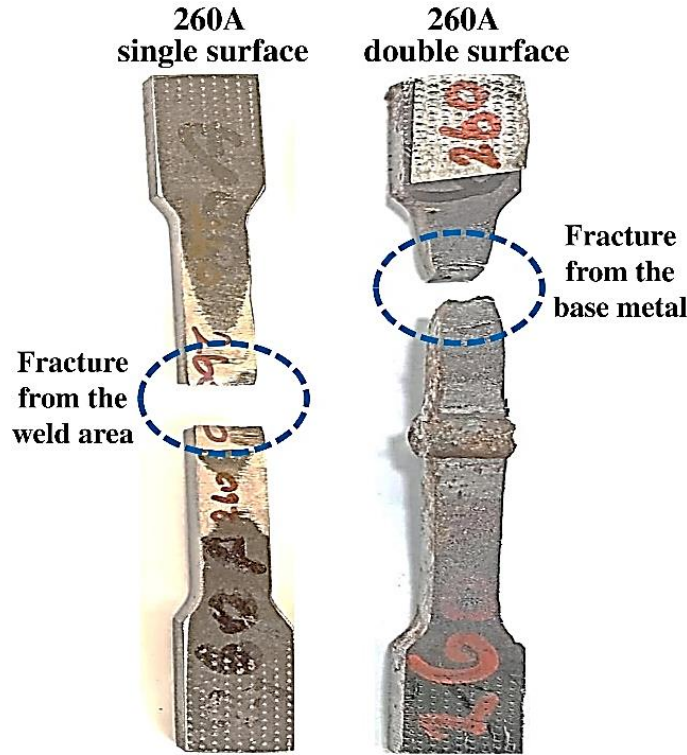


Figure 7. Macro view of fracture after tensile testing of single-sided and double-sided welded specimens at 260A welding current (260A kaynak akımında tek taraflı ve çift taraflı kaynaklı numunelerin çekme testinden sonra kırılmanın makro görünümü)

SEM photographs of the fracture surfaces obtained after the tensile test are given in Figure 8. It is seen that the degree of ductile fracture decreases with increasing welding current in single-sided / double-sided welding processes at 200A and 260A welding currents, and the degree of ductility decreases again

in the transition from single-sided welding to double-sided welding at the same ampere value. In the case of ductile fracture, dimple formations are observed. In the case where the degree of ductility decreases, it is seen that the dimples decrease.

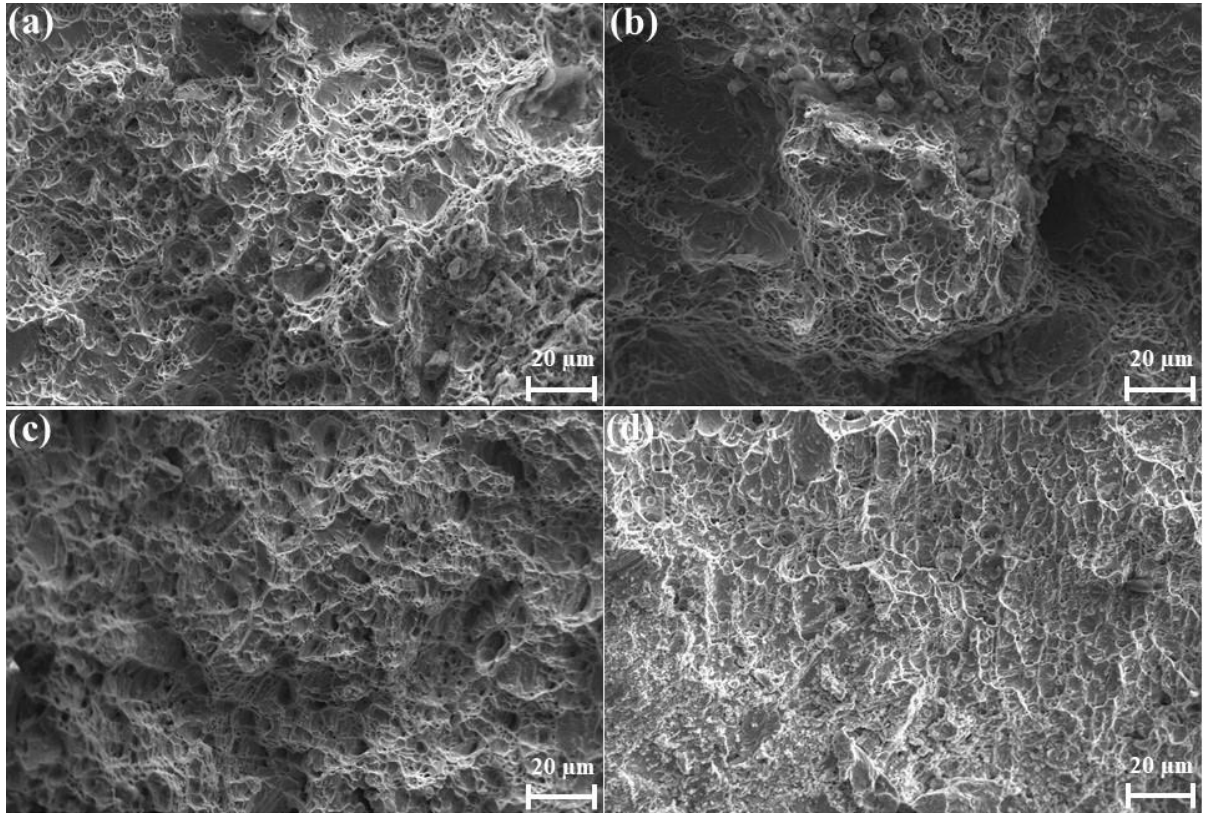


Figure 8. Fracture surfaces of the specimens: (a) 200 A single-sided, (b) 260 A single-sided, (c) 200 A double-sided, (d) 260 A double-sided (Numunelerin kırılma yüzeyleri: (a) 200 A tek taraflı, (b) 260 A tek taraflı, (c) 200 A çift taraflı, (d) 260 A çift taraflı)

Potentiodynamic polarization tests were conducted in a 1 M HCl solution to assess the impact of four distinct samples on corrosion. Figure 9 displays the tafel curves acquired for four distinct samples in a 1M HCl environment. The i_{corr} values were derived using the tafel extrapolation method. Table 3 displays the outcomes of potentiodynamic polarisation studies. The polarization curves depicted in the Figure 9 and the data presented in Table 3 indicate that the corrosion rate of the 260A single surface welded sample is significantly elevated. The current potential curves of the

samples showed a rise in both cathodic and anodic regions, as well as current values, when immersed in a 1 M HCl solution. Borko et al. [19] investigated the corrosion characteristics of the welded junction of S355J2 structural steel. The findings indicated that the base material exhibited the greatest corrosion resistance at a concentration of 0.01M NaCl, while the weld metal demonstrated the lowest corrosion resistance at a concentration of 1M NaCl. According to Tafel results, the lowest corrosion rate was 10.64 mpy on the 260A double sided surface.

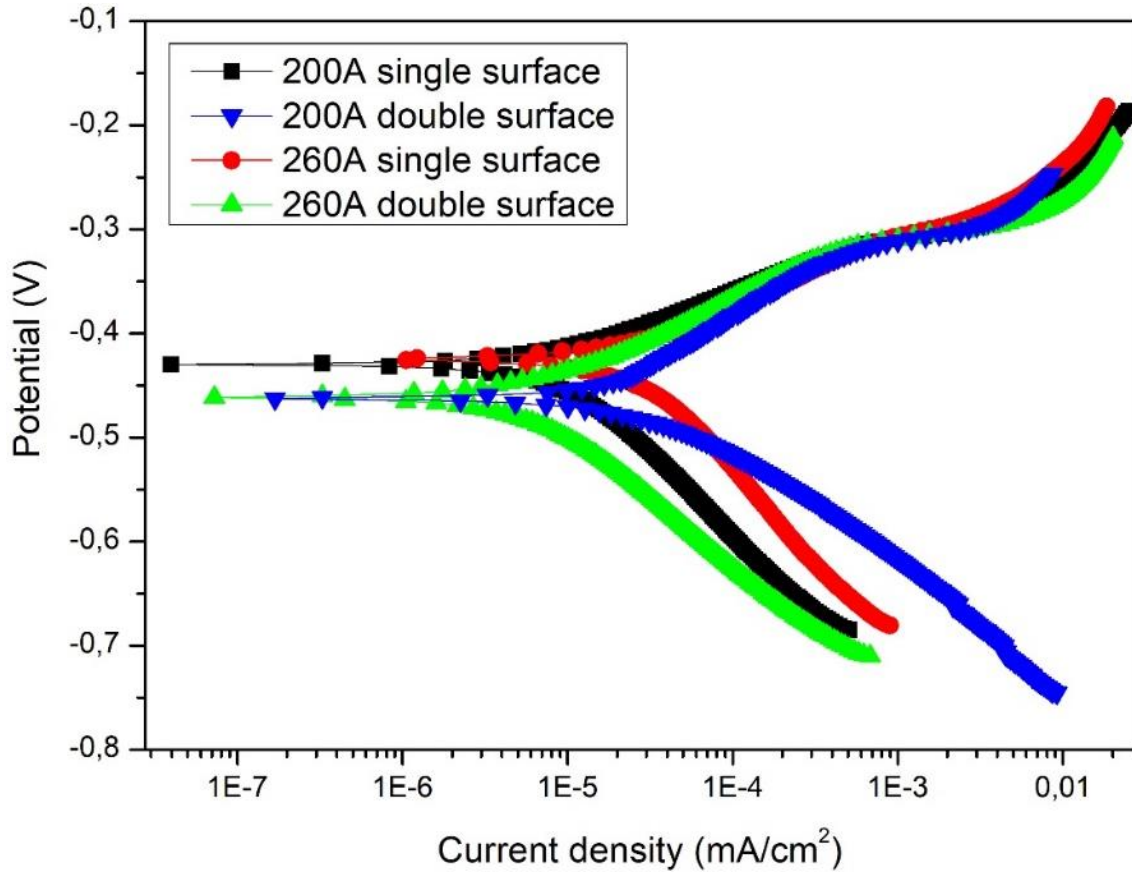


Figure 9. Potentiodynamic polarisation curves (Potansiyodinamik polarizasyon eğrileri)

Table 3. Electrochemical results of the samples (Numunelerin elektrokimyasal sonuçları)

Samples	E _{cor} (V)	I _{cor} (μAcm ⁻²)	β _a (e ⁻³ V/decade)	β _c (e ⁻³ V/decade)	Corrosion rate (mpy)
200A single sided surface	-0.430	8.60	65.40	144.7	15.71
200A double sided surface	-0.463	16.30	98.90	70.30	29.84
260A single sided surface	-0.425	33.70	87.10	221.5	61.55
260A double sided surface	-0.462	5.82	72.60	129.0	10.64

The Nyquist diagrams of single-sided and double-sided specimens welded at various amperages are presented in Figure 10. The Nyquist diagrams resulting from reactions in solution exhibit a capacitive loop characterized by suppressed

semicircles. The capacitive loop is associated with the load transfer mechanism that regulates the dissolution of the welded specimens in a 1 M HCl solution and the formation of a protective film layer on the surface [20].

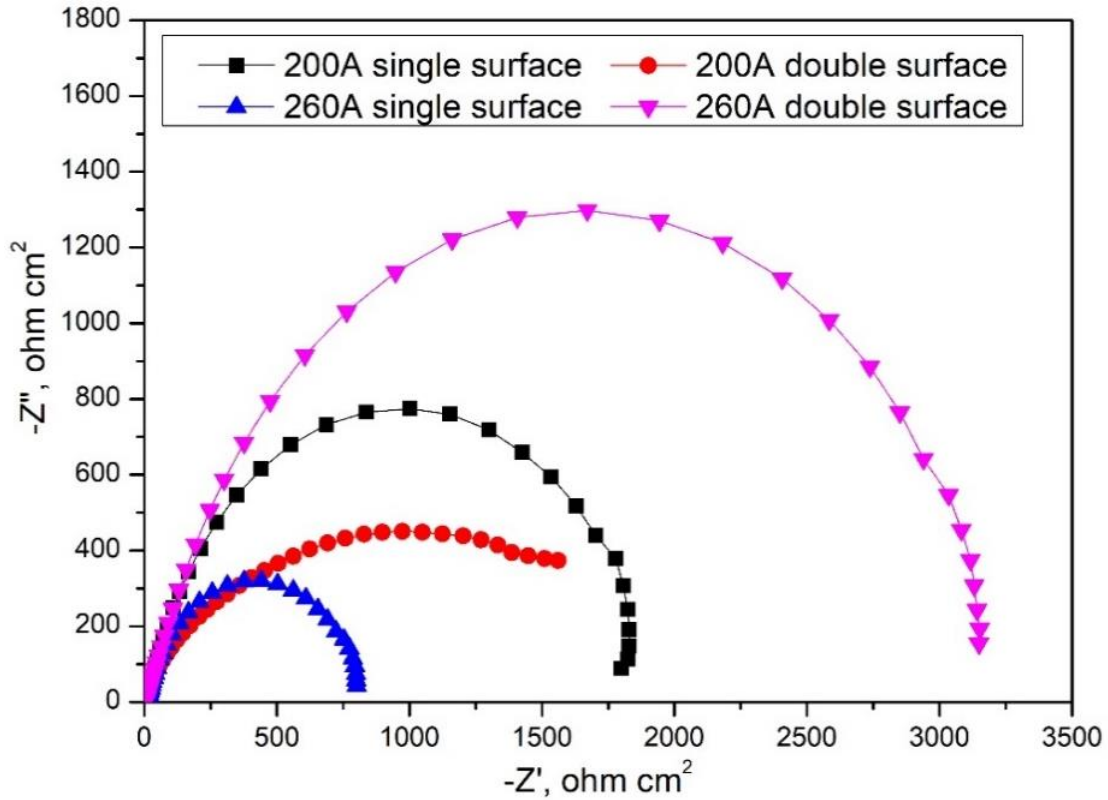


Figure10. Nyquist diagrams of the specimens (Nyquist diagrams of the specimens)

The system is composed of three components: solution resistance (R_s), polarisation resistance (R_p), and a stabilized phase element (CPE) coupled in parallel. The R_p values represent the measured load transfer resistance levels in the given environment. Furthermore, the value of R_p can be found in Table 4. Table 4 demonstrates that the polarisation resistances fluctuate based on the welding current and the welding type (single and double side). Nyquist diagrams show the capacitive

loop as compressed semicircles. The larger the diameter of the semicircles, the slower the corrosion rate. When Nyquist diagrams were examined, it was seen that the sample with the highest r_p value was 2633 ohms on the 260A double sided surface. It was determined that this sample had the best corrosion resistance. When comparing Nyquist diagrams with Tafel diagrams, the corrosion rates of the samples showed similar results.

Table 4. Impedance spectrum results of samples (Numunelerin empedans spektrum sonuçları)

Properties	Samples			
	200A single sided surface	200A double sided surface	260A single sided surface	260A double sided surface
R_p (Ω)	1582	712	679	2633
R_s (Ω)	4.775	5.738	7.242	5.078
CPE (F)	12.87×10^{-6}	7.75×10^{-6}	30.58×10^{-6}	5.64×10^{-6}

4. CONCLUSIONS (SONUÇLAR)

In this study, the microstructure, mechanical and corrosion properties of S355J2 structural steels welded with the MIG welding method at different welding currents and different welding types (single and double-sided) were examined. The results obtained are summarized below:

- When the microstructure images were examined under an optical microscope, it was observed that the material had a ferritic and pearlitic structure. In addition, it was observed that the welding current increased and the grain size increased in double-sided welding.
- According to the microhardness results, the highest hardness value was found to be 219.9 HV in the single-sided welded connection at 260A

welding current, and the lowest hardness value was 132.5 HV in the double-sided welded connection at 200A welding current.

- Tensile test results showed that there was an increase in both yield strength and tensile strength in double-sided welding and 260A welding current. When the fractured surface and SEM images were examined, it was seen that a ductile fracture mechanism occurred. It was determined that the degree of ductility decreased with increasing heat input.

- Corrosion test results showed that when both Tafel and Nquist diagrams were examined, the highest corrosion rate was observed in the 260A single sided surface sample with 61.55 mpy and 679 ohm. The best corrosion resistance was observed in the 260A double sided surface sample with 10.64 mpy and 2633 ohm. Corrosion test results showed that the welded joint welded at 260A welding current and double-sided was more resistant to corrosion in 1M HCl solution than other samples.

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)

Uğur ÇALIGÜLÜ: He analyzed the results and performed the writing process.

Deney sonuçlarını analiz etmiş ve maklenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

Cihan ÖZORAK: He conducted the corrosion experiments, analyzed the results and performed the writing process.

Korozyon deneyleri yapmış, sonuçlarını analiz etmiş ve maklenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

Afif DANIŞ: He conducted the experiments, performed the writing process.

Deneyleri yapmış, 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] Y. Kaya, Journal of Polytechnic 21, 597 (2018).
- [2] E. Celasun, Heat Treatment and Welding of S355J2 Steel with Different Submerged Arc Welding Wires and Investigation of Their Effect on Weldability, Institute of Science and Technology, 2012.
- [3] H. F. Çapın, The Welding of S235 JR Non-Alloyed Steel Pipes with Orbital Welding Equipment at Vertical Position and the Optimization of the Application, Institute of Science and Technology, 2014.
- [4] S. Anik, Gedik Education Foundation Welding Technology Education Research and Inspection Institute (1991).
- [5] D. Yildirim, The Examination of Weldability of 2205 Duplex Stainless Steel and S355J2 Structural Steel, Institute of Science and Technology, 2018.
- [6] İ. Ertürk, T. Durukan, and B. Şentürk, in Xth Welding Technology National Congress and Exhibition (2017).
- [7] B. Eleman, Comparison of Macrostructure and Mechanical Properties of Welding Seams as a Result of S355 Quality Steel Welded by New Generation (Inverter) and Traditional MIG/MAG Welding Machines, Yıldız Technical University, 2022.
- [8] B. Yu, Z. Chen, P. Wang, and X. Song, Journal of Constructional Steel Research 205, 107878 (2023).
- [9] P. Zhao, B. Yu, P. Wang, Y. Liu, and X. Song, Materials 16, (2023).
- [10] Z. Zhu, X. Ma, P. Jiang, G. Mi, and C. Wang, Journal of Materials Research and Technology 10, 960 (2021).
- [11] S. A. David, S. S. Babu, and J. M. Vitek, JOM 55, 14 (2003).
- [12] M. Li, Y. He, and G. Sun, Materials & Design 25, 355 (2004).
- [13] M. Eroğlu, M. Aksoy, and N. Orhan, Materials Science and Engineering: A 269, 59 (1999).
- [14] E. Gharibshahiyan, A. H. Raouf, N. Parvin, and M. Rahimian, Materials & Design 32, 2042 (2011).
- [15] R. Yan, K. Mela, F. Yang, H. El Bamby, & M. Veljkovic, Thin-Walled Structures, 184, 110479 (2023).

- [16] R. Kaçar and K. Kökemli, *Materials & Design* 26, 508 (2005).
- [17] S. Mehra, P. Dhanda, R. Khanna, N. S. Goyat, & S. Verma. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 3(11), 1-6 (2012).
- [18] O. Tuncel and H. Aydin, *Materials Science* 26, 173 (2020).
- [19] K. Borko, B. Hadzima, and F. Pastorek, *Periodica Polytechnica Transportation Engineering* 47, 342 (2019).
- [20] H. Lgaz, K. Subrahmanya Bhat, R. Salghi, Shubhalaxmi, S. Jodeh, M. Algarra, B. Hammouti, I. H. Ali, and A. Essamri, *Journal of Molecular Liquids* 238, 71 (2017).

A Review on Wave Energy Harvesting Technologies

Alaaddin YILMAZER¹, Ali Ekber ÖZDEMİR^{*1}

¹Ordu University, Fatsa Faculty of Marine Sciences, Fatsa, ORDU, Turkey

Article Info

Review article
Received: 10/10/2024
Revision: 10/11/2024
Accepted: 24/11/2024

Keywords

Wave Energy Harvesters
Renewable Energy
Electrical Energy
Tidal Energy
Energy Conversion

Makale Bilgisi

Derleme makalesi
Başvuru: 10/10/2024
Düzeltilme: 10/11/2024
Kabul: 24/11/2024

Anahtar Kelimeler

Dalga Enerji Hasatçıları
Yenilenebilir Enerji
Elektrik Enerjisi
Gelgit Enerjisi
Enerji Dönüşümü

Graphical/Tabular Abstract (Grafik Özet)

In this study a historical development of wave energy harvesters has been reviewed. Additionally, classification strategies of wave energy harvesters have been explained based on literature.

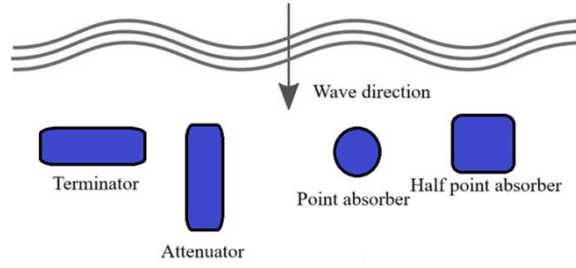


Figure A: Classification According to Wave Direction and Location /Şekil A: Dalga Yönü ve Lokasyonuna Göre Sınıflandırma

Highlights (Önemli noktalar)

- This study describes the historical development of wave energy harvesters. /Bu çalışmada dalga enerji hasatçılarının tarihsel gelişimi açıklanmaktadır.
- Classifications of wave energy harvesters' strategies based on literature have been examined. /Dalga enerjisi hasat stratejilerinin literatüre dayalı sınıflandırmaları incelenmiştir.
- Advantages and disadvantages of wave energy harvesters have been expressed. /Dalga enerji hasatçılarının avantajlı ve dezavantajlı yönleri açıklanmıştır

Aim (Amaç): This study aims to present the historical development and classification of wave energy harvesters based on literature. /Bu çalışma dalga enerji hasatçılarının tarihsel gelişimi ve sınıflandırmasının literatür temelinde sunmayı amaçlamaktadır.

Originality (Özgünlük): In order to be able to explain the most important aspect of wave energy harvesters, an extensive literature search was carried out. /Dalga enerji hasatçılarının en önemli yönlerini açıklayabilmek için oldukça derin bir literatür taraması yapılmıştır.

Results (Bulgular): Although the world, and Turkey in particular, has a great potential for wave energy and a long history of studies in this field, the amount of energy produced by wave energy harvesters is still far below what it should be. /Dünyada ve özellikle Türkiye'de dalga enerjisi açısından büyük bir potansiyel bulunmasına ve bu alanda uzun bir çalışma geçmişine sahip olunmasına rağmen, dalga enerjisi hasatçıları tarafından üretililecek enerji miktarı, olması gerekenin çok altındadır.

Conclusion (Sonuç): This study provides a detailed classification and examines the historical development of wave energy devices from different perspectives. It also provides a thorough literature review to inform and guide future research efforts in the field of wave energy. /Bu çalışma ayrıntılı bir sınıflandırma sunar ve dalga enerjisi cihazlarının tarihsel gelişimini farklı perspektiflerden inceler. Ayrıca dalga enerjisi alanındaki gelecekteki araştırma çabalarını bilgilendirmek ve yönlendirmek için kapsamlı bir literatür incelemesi sağlar.



A Review on Wave Energy Harvesting Technologies

Alaaddin YILMAZER¹, Ali Ekber ÖZDEMİR^{*1}

¹Ordu University, Fatsa Faculty of Marine Sciences, Fatsa, ORDU, Turkey

Article Info

Review article
Received: 10/10/2024
Revision: 10/11/2024
Accepted: 24/11/2024

Keywords

Wave Energy Harvesters
Renewable Energy
Electrical Energy
Tidal Energy
Energy Conversion

Abstract

With the rapid development of technology, the demand for electrical energy is increasing every year. Although electrical energy is a very clean form of energy in its direct use, the use of fossil fuels in the production process causes environmental problems. In this context, renewable energy sources are of critical importance in terms of clean and sustainable energy production. Wave energy stands out as a relatively under-researched topic in this field. Our country, which is surrounded by sea on three sides and has an inland sea, needs to invest more in wave energy and support more studies in this field. This study analyses the historical development of wave energy and aims to provide a perspective for future research.

Dalga Enerjisi Hasat Teknolojileri Üzerine Bir İnceleme

Makale Bilgisi

Derleme makalesi
Başvuru: 10/10/2024
Düzeltilme: 10/11/2024
Kabul: 24/11/2024

Anahtar Kelimeler

Dalga Enerji Hasatçıları
Yenilenebilir Enerji
Elektrik Enerjisi
Gelgit Enerjisi
Enerji Dönüşümü

Öz

Teknolojinin hızla gelişmesiyle birlikte elektrik enerjisine olan talep her geçen yıl artmaktadır. Elektrik enerjisi doğrudan kullanımında oldukça temiz bir enerji türü olmasına rağmen üretim sürecinde fosil yakıtların kullanılması çevre sorunlarına yol açmaktadır. Bu bağlamda yenilenebilir enerji kaynakları temiz ve sürdürülebilir enerji üretimi açısından kritik öneme sahiptir. Dalga enerjisi bu alanda nispeten az araştırılmış bir konu olarak öne çıkmaktadır. Üç tarafı denizlerle çevrili ve bir iç denize sahip olan ülkemizin dalga enerjisine daha fazla yatırım yapması ve bu alanda daha fazla çalışmayı desteklemesi gerekmektedir. Bu çalışma dalga enerjisinin tarihsel gelişimini analiz etmekte ve gelecekteki araştırmalar için bir perspektif sunmayı amaçlamaktadır.

1. INTRODUCTION (GİRİŞ)

The need for energy has led to the continuous evolutionary development of energy production methods to meet this need and paved the way for the diversification of energy production methods. Although the effective use of steam power led to a great leap in technology, the biggest breakthrough in civilization was undoubtedly the invention of electrical energy. Energy is defined as the capacity to do work. The energy required to move an object one meter with one Newton of energy is one Joule unit [1]. Energy has many forms such as kinetic, potential, thermal, electrical, chemical, nuclear and radiation. For a long time in its historical development, the first and most basic energy source of mankind has been fire. Before the industrial revolution, water and wind power were other important sources of energy used by mankind.

However, these sources could not go beyond the principle of direct use of mechanical energy in the primitive periods of civilization. For example, the first windmill powered by wind power and used to grind grains was invented by the Persians in the 800s AD [2]. These windmills, which were widely used regionally in Arabia, China and India, started to be used in Europe between 1100 and 1200 AD. These windmills, which were primarily used for grinding grain and pumping water, were also used to drain flood plains in the Netherlands [3]. As an important innovation in antiquity, water-based energy was widely used by Roman and Greek societies in the 1st century BC. Horizontal axis water wheels, which were first used for agricultural irrigation, were also used in grain grinding processes over time. The mechanical energy obtained from the water wheels rotating on the horizontal axis was transferred to a vertical shaft

and rotated the grinding stones, thus grinding grains such as wheat and corn into flour. This technology was adopted and widely used by many civilizations towards the end of the 1st century AD. In 1086 AD there were more than 5000 watermills in England, and this number exceeded 4000 by 1300 AD. While water mills were initially used to grind corn and grain, over time they were also used in a variety of industrial processes such as running bellows for iron production, paper making, timber cutting, olive oil production and powering textile mills [4]. Civilization made a significant leap with the use of steam power. The first recorded steam engine in history was the 'aeolipile' developed by Heron of Alexandria in the 1st century AD. This device, when heated, sprays water vapours out and allows it to rotate around an axis [5]. The first steam engine patent was obtained by Thomas Savery in 1698. The steam engine developed by Savery was designed to extract water from mines. The machine worked by evaporating water and condensing it in a secondary tank, creating a vacuum [6]. During the 1600-1800s, many different devices using steam power effectively were developed. However, the fact that these devices are difficult to control, have low reliability, short life span and the amount of energy they consume is very high has caused their usage areas to remain limited. In parallel with the development of steam power technology in these years, the research and conceptualization of electricity-related concepts also began. For example, in 1600, William Gilbert described the Earth's magnetic field in his work 'De Magnete' and explained the attraction of electrical substances to other substances [7]. In 1663, Otto von Guericke invented a device that can attract or repel substances with electric charge, which can be defined as an electrostatic generator today. However, he did not define the relationship of this device with electricity [8]. In 1785, Charles-Augustin de Coulomb published the law of electrostatic force (Coulomb's law), which explains that the electrostatic attraction or repulsion force between two-point charges is directly proportional to the product of the magnitudes of the charges and inversely proportional to the square of the distance between them [9]. This work is considered as the beginning of the theory of electromagnetism. However, these studies were mostly on the conceptualization of the nature of electricity and electromagnetism. During the industrialization process, the increasing application of steam engines led to a large increase in the demand for coal. Between 1800 and 1889, the global coal production volume increased from 11.6 million tons to 485 million tons [10]. By 1900, 95% of global energy was derived from coal.[11] The use

of Newcomen and Watt steam engines made it possible for miners to dig deeper and thus extract more coal.[12] This shows the huge impact of steam engines on production, transport and employment [10]. The Second Industrial Revolution was characterized by the widespread use of electrical energy and the expansion of its fields of application. Following Faraday's discovery of electromagnetic induction, in 1866 Varley, Wheatstone and Siemens discovered the principle of reversibility of dynamos (usability as electric motors or generators). This coincided with the development of alternators for AC currents. In 1885, Stanley's development of the AC transformer led to the widespread use of AC currents and the development of distribution networks. The licensing of Nikola Tesla's AC and induction motor patents in 1888 was a significant advance in the field of electricity [11]. With the second industrial revolution, electrical energy replaced steam-powered systems and became the most dependent energy type of civilization. However, the discovery of electrical energy could not prevent the use of fossil fuels. The use of fossil fuels is increasing even today and causes very serious environmental problems such as global warming and climate change.[13] In the following section, the development of renewable energy will be briefly explained and then the development of wave energy, which is the main purpose of this study, will be examined in detail.

2.MATERIALS AND METHODS (MATERİYAL VE METOD)

2.1. Renewable Energy Sources and Their Share In Production (Yenilenebilir Enerji Kaynakları ve Üretimdeki Payı)

Since the oil crisis of the early 1970s, the need for alternatives to fossil fuel-based energy production has been universally recognized. This issue, which was initially raised only with concerns about energy costs, has become even more important in the last two decades due to factors such as increasing evidence that energy production and consumption lead to environmental degradation, industrial activities exacerbate this situation, population growth, economic growth and excessive consumption of the world's resources. According to the International Energy Agency, the distribution of CO₂ emissions caused by fossil fuel-based consumption between 1971 and 2021 is as given in Figure 1.

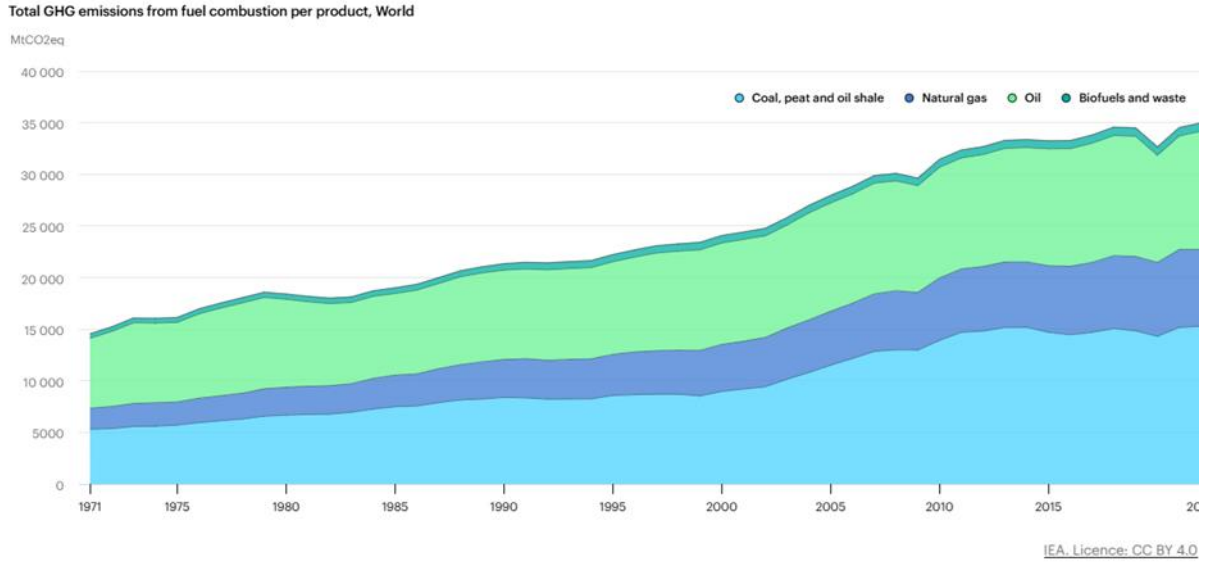


Figure 1. Total Greenhouse Gas Emissions from Fuel Consumption Worldwide [14] (Dünya Çapında Yakıt Tüketiminden Kaynaklanan Toplam Sera Gazı Emisyonları [14])

The most important option to overcome the negative effects of global climate change is undoubtedly to increase the use of renewable energy sources. For example, it has been reported that the increase in the use of wind and solar energy prevents a 4% increase in global fossil fueled energy production [15]. Regarding the orientation towards renewable energy sources, the change predicted by the International Energy Agency until 2028 is shown in Figure 2. Although the production segments of renewable energy sources vary according to years, it is seen that the largest share belongs to hydroelectric and solar energy. Concrete examples of renewable energy sources will reveal this situation more clearly. For example, the energy generation capacity of Three Gorges Dam, one of the largest hydroelectric dams in the world, is stated as 22.5GW [17]. However, Bhadla Solar Park,

Rajasthan, India, is one of the largest solar parks in the world with a total capacity of 2.255 GW [18]. Gansu Wind Farm in Gansu Province of China is the world's largest onshore wind farm with an installed capacity of 10 GW [19]. However, wave energy has the lowest share among renewable energy sources, despite the fact that a large part of the world's surface is covered by seas and oceans. For example, the MeyGen Tidal Project in the Pentland Firth area of Scotland is one of the largest tidal energy projects in the world, but has an installed capacity of only 398 MW, and the Swansea Bay Tidal Lagoon Project in Wales utilizes the power of the tides to generate up to 320 MW of electricity. [20-22]. However, the global potential of wave energy generated by breaking waves along the coastline alone is estimated to be around 2-3 Terawatts (TW) [23].

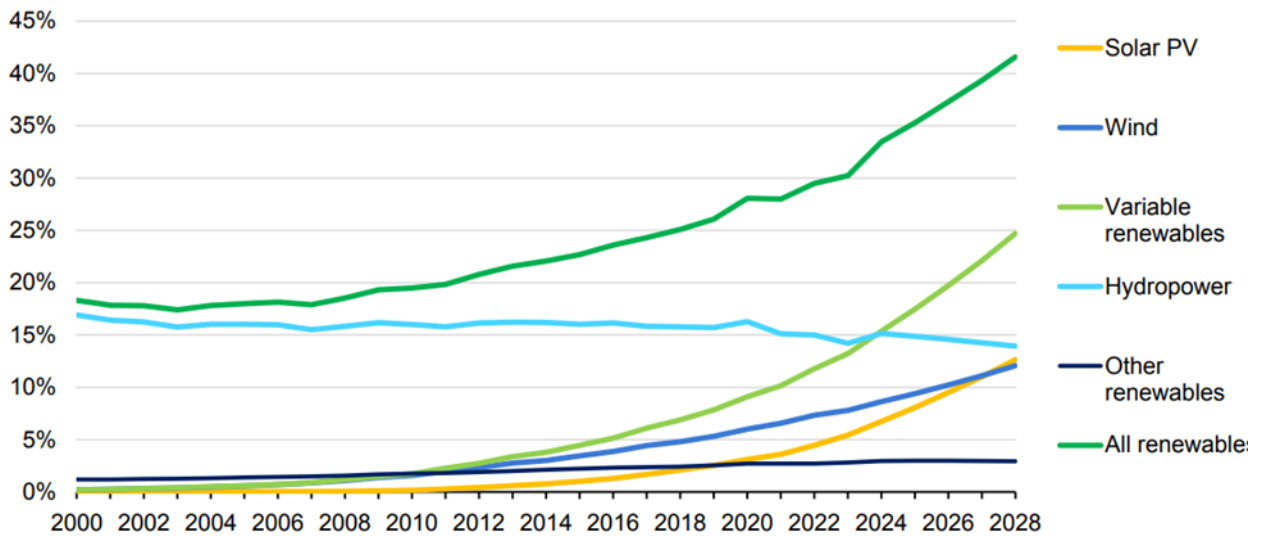


Figure 2. Change in renewable energy production between 2000 and 2028 [16] (2000 ile 2028 yılları arasında yenilenebilir enerji üretimindeki değişim [16])

2.2. Short History of Wave Energy Studies (Dalga Enerjisi Çalışmalarının Kısa Tarihi)

The first known proposals for utilising wave energy date back to the late 18th century. In 1799, French engineer Pierre-Simon Girard patented a pendulum device powered by the energy of waves. This device consisted of a lever mechanism attached to ships moored in a harbour, which moved up and down with wave motion. This movement was used to operate machinery on land. Girard's son Son de Marsique patented an early wave energy converter design in 1810. This design involved a buoy travelling up and down with the waves, converting mechanical energy into a mechanism to drive a pump or piston [24]. In the 1880s, J.M. Courtney of New York was granted a patent for a sound buoy design, another wave energy device based on buoys. This device consisted of a vertical cylindrical column that trapped a pocket of air at the top. As the waves interacted with the device, the air was expelled through a hole and retracted, activating a power receiver system and thus generating a warning sound. This device was used as a system to indicate the position of ships [25][23]. In 1895, Spanish engineer Isidoro Cabanyes received a patent for a device he called 'wave power machine'. The basic working principle of this device was based on pumps driven by rising and falling buoys that carried water to a high reservoir. The water in the reservoir, when released, drives a tribune to generate electrical energy. This process was based on the principle of converting the kinetic energy of the water into potential energy and passing it back through the tribune to generate electrical energy [26][24]. Thus, the way was paved for the production of electricity from wave power. In 1909, the first documented application for the conversion of wave energy into electrical energy was realized in California. During this period of intensive studies on electrical energy, California became the center of wave energy research. Several companies started to commercialize wave energy and develop wave engines. One of these companies, California Wave Power Company, converted the energy of waves into electrical energy and used it to operate small devices on the pier [27][25]. In 1910, French engineer Busso Balasek built an electric power plant that compresses and evacuates air by means of wave motion and thus provides energy by the reciprocating movement of a piston and produced 1000 Watts of energy from this plant [28][26]. Balasek drilled a vertical well at the top of a cliff by the sea, and the vertical piston he placed in this well moved with the rise and fall of the waves to drive a primitive turbine. This design is recognized as the first known oscillating water

column (WEC) design [29]. An important milestone in the history of wave energy began in the 1940s when Yoshio Masuda, a naval officer and engineer in the Japanese navy, came up with the idea of harnessing wave power for self-powered navigation buoys. Masuda developed a system in which air rising and falling with wave action inside a chamber integrated into the buoy moved a tribune. In 1947, Masuda built and tested small-scale models about 1 meter high in order to validate the SSK idea. Initial results were promising. In 1965, he started to build and test offshore a large prototype 20-meter-high navigation buoy based on the wave-powered SSK design off the coast of Japan [30][27]. In the 1970s, he played an important role in the development of the Kaimei, which is now recognized as the first commercial wave energy device. This device was characterized as the first successful attempt to generate electricity using wave energy on a large scale. Kaimei was designed as a floating barge with SSK chambers. In the history of wave energy, this design was the first application recognized as a milestone. This work paved the way for larger wave energy research programs investigating oscillating water columns [31][28]. From the first British patent on wave energy in 1855 to 1973, 340 patents were granted [32][29]. Ocean and wave energy technology patents exhibit a growth pattern that can be evaluated in four main phases from 1900 to the present. These four main phases are as follows [33],[31]:

- First Period (1900-1940): During this period, patent applications for ocean and wave energy technology were very limited. This was a period when technology was in its infancy and innovative ideas were developed by only a few individuals or small groups.
- Research and Development Period (1940-1970): During and after the Second World War, interest in diversifying energy sources increased. During this period, more research was conducted on ocean and wave energy technologies and an increase in patent applications was observed. Studies in this period were mostly conceptual and experimental.
- Commercial Application and Development Period (1970-2000): During this period, interest in renewable energy sources increased significantly, especially with the impact of energy crises. There was a significant increase in patent applications for OET technologies and some commercial applications were realized. This was a period of wider acceptance and investment in technology.

- Modern Era (2000-present): As global awareness of renewable energy sources and efforts to combat climate change increased, interest in ocean and wave energy technologies grew rapidly. During this period, patent applications increased significantly, and technology development accelerated. More sophisticated and efficient wave energy devices were developed and some of them started to be used commercially. The oil crises of 1973 and 1979 led to a revival of interest in ocean and wave energy technologies. The United Kingdom, Norway, Japan and many other countries provided significant financial support for wave and tidal energy research and development by establishing government-funded programs. This period triggered a surge in patent applications for ocean and wave energy technologies, which peaked in the early 1980s. However, this interest and investment declined towards 1995 as oil prices stabilized again. However, despite these opportunities, ocean and wave energy technologies have historically faced barriers to widespread deployment as alternatives to fossil fuel-based systems due to their lack of infrastructural integration with main energy systems, commercial viability, etc. [33][32]. Developed by Alan Wells at Queen's University in the 1970s, the turbine had symmetrical blades designed to direct airflow in both directions over the same turbine rotor. This innovative design enabled power to be generated from both incoming and outgoing air currents in an oscillating water column. As a result of efforts to analyze and improve the aerodynamics and performance of the turbine for wave energy applications, Wells turbines have been adapted by many researchers for SSC devices [34][33]. In 1974, Stephen Salter of Edinburgh University designed a wave energy converter (Salter Duck). In Salter's paper [35][34] it was shown that wave energy could be converted into electrical energy with 80% efficiency. These findings attracted the attention of many researchers and universities in the field of wave energy and contributed significantly to the financial support of studies. Much of the research in the second half of the 1970s focused on the theoretical hydrodynamics of energy conversion. During this period, J. Falnes, K. Budal, D. V. Evans, J. N. Newman, C. C. Mei, J. Falnes, K. Budal, D. V. Evans, J. N. Newman and C. C. Mei independently analyzed the theoretical maximum efficiency of any wave energy converter and the conditions that must be met to achieve this efficiency. [31], [36], [35]. In the early 1980s, interest in sea wave energy started to decline with the decline in oil prices. Although prototype designs were developed during this period, the lack of sufficient information on wave power efficiency and the resistance of the systems to extreme weather

conditions, as well as the projected high costs of machinery and power transmission lines, were the main reasons for the decline. For these reasons, the British government-funded wave energy program was closed in 1982. A 500-kW wave energy turbine built in Norway was severely damaged by unfavorable climatic conditions and decommissioned in 1988. Until the 1990s, wave energy research in Europe continued largely at an experimental and academic level [37- 39]. Sea wave energy research started to gain importance again in 1991 when the European Commission included wave energy in its R&D program on renewable energies. During this period, interest and investments in wave energy technologies increased, R&D activities accelerated and efforts to diversify renewable energy sources intensified [32]. Although interest in wave energy has increased since the 1970s, fluctuations in research funding have slowed down research in this field from time to time. However, in the last decade of the 20th century, research in this field regained momentum. Although less investment has been made compared to wind and solar energy, wave energy research and development continues rapidly, and efficiency is constantly increasing thanks to new designs and devices. Although wave energy is still considered to be in the development stage, it is rapidly progressing towards becoming a commercially viable technology [34]. Since 2015, it is estimated that more than 1000 wave energy converter systems have been patented each year worldwide and thousands of existing patents have been registered. A large number of devices are in development stages and many full-scale plants are either already in operation or in the testing phase. As a result of this ever-expanding technological development, new classification techniques are constantly being established [40][41].

2.3. Classification of Wave Energy Converters

(Dalga Enerjisi Dönüştürücülerinin Sınıflandırılması)

Wave energy converters (WECs) can be classified under many different categories. The study on the classification of wave energy converters by Falnes and Budar in 1975 is one of the first studies in this field. In this study, wave energy converters were classified according to wave propagation direction, size and placement. This classification [41][42]:

- Terminators: Devices operating perpendicular to the wave direction, such as overlapping structures or oscillating wave surge converters. For example, Stephen Salter's Edinburgh Duck is classified as a terminator.

- Attenuators: Structures such as Pelamis that align parallel to the wave direction and attenuate the wave along their length.

- Point Absorbers: Smaller devices such as floating buoys that absorb energy from all directions.

- Semi-Point Absorbers: Devices that work in a similar way to point absorbers but are significantly larger in size.

This classification, shown schematically in Figure 3, has enabled a better understanding and development of wave energy technologies and explained how different devices convert wave energy.

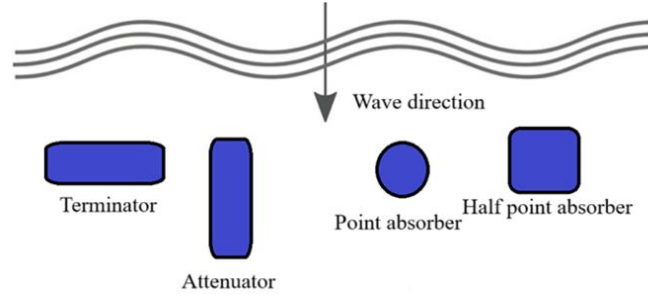


Figure 3. Classification According to Wave Direction and Location (Dalga Yönü ve Lokasyonuna Göre Sınıflandırma)

In 1988, Hegerman and Heller carried out a more detailed classification process. This classification has addressed in detail how wave energy converters work in different environments and is considered to be the first comprehensive classification in this field. In the study conducted by Hegerman and Heller, wave energy converters are basically classified under three different categories: according to wave capture methods, according to their structural characteristics and according to the power transmission systems used for energy conversion. Falnes and Lovseth defined oscillating water columns as a separate class and simplified this categorical distinction and divided it into six categories [42][43]. The first study on the current accepted classifications can be given as an example

of the work done by Falcao in 2010 [31][44]. This classification is based on the operating principles of wave energy converters and can be summarized with a diagram as shown in Figure 4. The difficulty of classifying wave energy converters is due to the fact that the applications have different design features according to many conditions. In addition to basic design parameters such as the effort to obtain maximum efficiency from wave energy, many main variables such as resistance to corrosion and harsh weather conditions, maintenance, repair and operating costs, transmission of the generated energy have made it difficult to classify wave energy converters as a result of the diversification of applications.

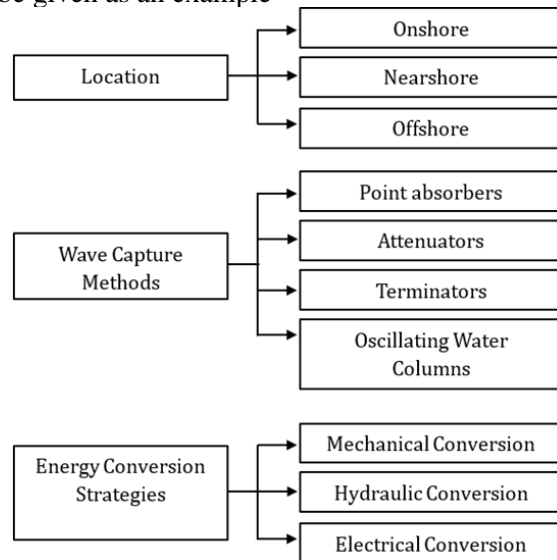


Figure 4. Block representation of the classification made by Falcao (Falcao tarafından yapılan sınıflandırmanın blok gösterimi)

The generally accepted study for classification was published in the report presented by the International Renewable Energy Agency (IRENA)

in 2014 and wave energy converters were classified as shown in Figure 5 [43], [45].

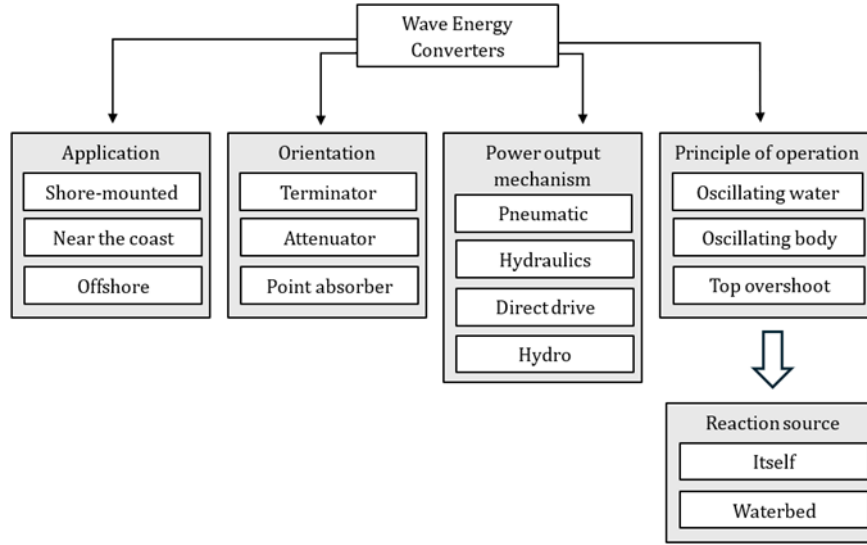


Figure 5. Block Diagram representation of the classification made by IRENA (IRENA tarafından yapılan sınıflandırmanın Blok Diyagram gösterimi)

The classification made by IRENA and the utilization rates of installed wave energy systems

according to this classification in the same period are shown in Figure 6 [43][45].

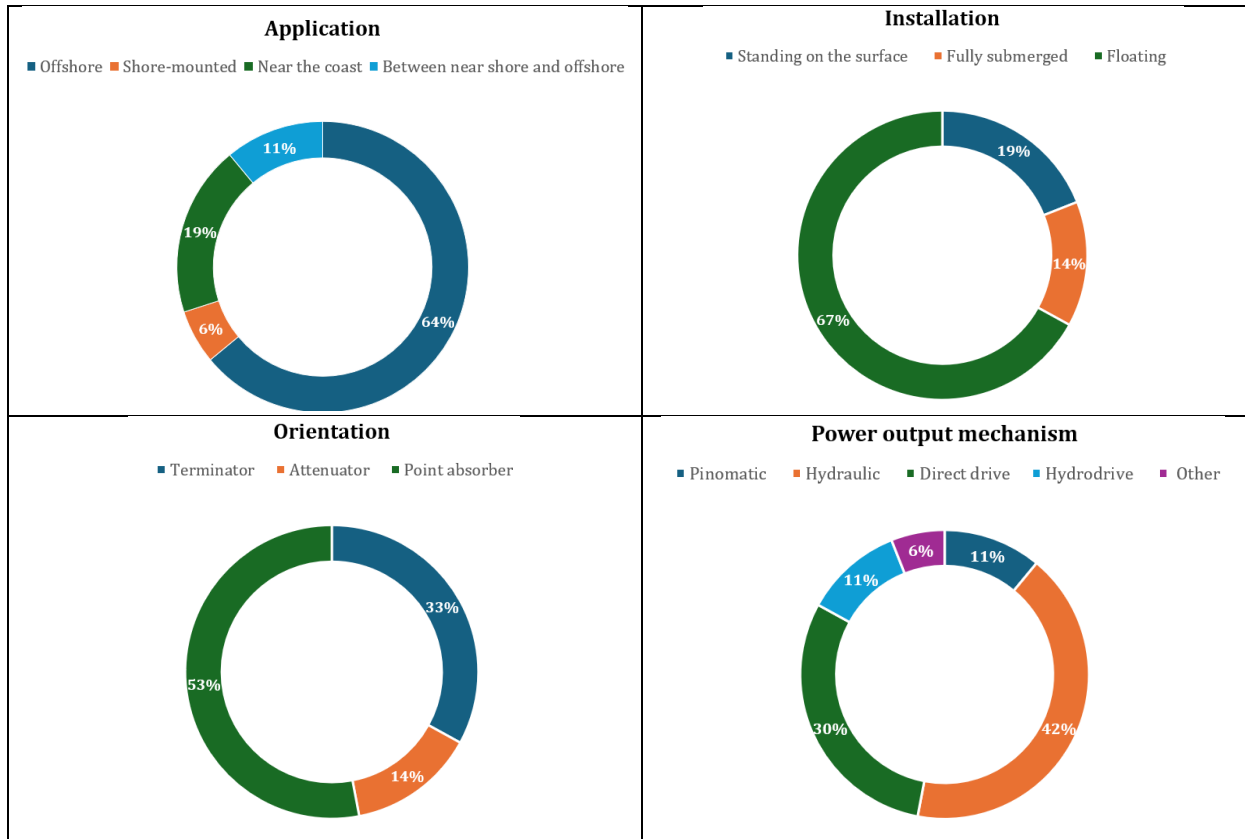


Figure 6. Utilizations rates of wave energy converters (Dalga enerjisi dönüştürücülerinin kullanım oranları)

- **Point absorbers:** The devices in this scope are mostly buoy type energy harvesters that generate electrical energy from the rising and falling motion provided by the wave. Systems in this scope are energy harvesters with relatively low power capacity. There are different configurations according to the power transmission systems for the devices in this scope. These can be direct-drive systems, hydraulic power transmission systems, air-pressurised (pneumatic) power transmission systems and hydro systems that directly rotate water turbines. In direct drive systems, a shaft is often used to transfer the rising and falling motion to a linear generator. In hydraulic and pneumatic powered systems, the float motion is used to pump working fluid or air through the system. Point absorbers can be highly efficient in energy capture due to their smaller size compared to the wavelength. [44 – 46].

- **Attenuators:** Devices in this scope are structures positioned parallel to the direction of the incident wave. The flexure or movement caused by the wave hitting the structures intersecting with the propagation direction is used for energy conversion. As the wave passes over the attenuator, it bends and bends, creating mechanical movement. For this reason, they mostly have an articulated structure that can be bent and twisted. As in point attenuators, they generate energy with the help of direct drive or hydraulic power transmission principles [44], [46],[48].

- **Terminators:** Terminator type wave energy harvesters are positioned perpendicular to the direction of wave propagation to convert wave energy into electrical energy and terminate the wave motion by hitting a hard object in the vertical direction or by directing the wave to the reservoir by means of a ramp. These devices have two different configurations. The first of these is called overshoot systems and the other is called oscillating systems. The overcome wave energy harvesting devices consist of floating or fixed structures that allow the incoming wave to overcome a ramp or embankment and fill into a reservoir to convert wave energy into electrical energy. The potential energy of the stored water is then converted into electrical energy through turbines or similar mechanical devices. Oscillating wave energy harvesters are structures designed to oscillate with the motion of waves to convert wave energy into electrical energy. They are usually mounted on the seabed and oscillate back and forth with wave fluctuations. This oscillating motion converts kinetic energy into electrical energy by operating hydraulic pistons or mechanical linkages connected

to turbines or generators. Systems operating on the terminator principle can capture a significant portion of the wave's energy [44] [50].

2.4. Working Principles of Wave Energy

Converters (Dalga Enerjisi Dönüştürücülerinin Çalışma Prensipleri)

This section describes the methods used to harvest the mechanical energy from the wave, independent of the energy conversion method.

- **Oscillating Water Column systems:** Oscillating water column (WEC) wave energy harvesters are a type of system used to convert wave energy into electrical energy. These devices consist of column-shaped chambers with a lower side open to wave action and an air tribune on the upper side. Waves move in and out of the SSS chamber, causing the water column to rise and fall. The rise of the water column compresses the air in the chamber. The lowering of the water column reduces the air pressure and allows air to enter the chamber. The air passes through the air tribune, causing the turbine to rotate. The rotation of the turbine drives a generator that produces electricity. These systems can efficiently capture energy over a wide range of wave frequencies. They can be designed as offshore floating and shore-fixed [31], [51].

- **Wave Interactive Body or Oscillating Devices:** These devices are generally considered to be in the class of point absorbers described above. It converts the relative motion between a floating component and a fixed base or multiple floating components into electrical energy. They take advantage of all oscillatory motions caused by waves, including rise (up and down), surge (forward and backward) and tilt (slope). By utilizing the motion energy of a buoy or hull affected by wave motion, it is converted into electrical energy by intermediate hydraulic systems or by direct drive to generators. These systems are generally designed to convert the available energy that can be obtained from complex wave movements into energy that can be utilized at the highest level. According to the classification by IRENA, it is divided into subclasses as fixed to the seabed and self-oscillating. In addition, it can be categorized as single-hull ascending buoy systems, two-hull ascending systems, underwater ascending systems, tilting devices, seabed hinged systems and multi-hull systems. They are used in offshore and near shore applications [31], [43], [44].

- **Overtopping wave energy harvesting devices:** As discussed above in the terminator section, these devices consist of floating or fixed structures that

allow the incoming wave to overcome a ramp or embankment and fill a reservoir to convert wave energy into electrical energy. The potential energy of the stored water is then converted into electrical energy through turbines or similar mechanical devices [44].

- **Pressure Difference Transducers:** Underwater pressure difference devices are systems that are located under the sea surface and convert the pressure changes created by the waves into energy. Such devices generate energy by using dynamic pressure differences caused by wave movements under water. Underwater pressure differential devices collect energy using changes in water pressure near the seabed, usually during wave passage. The water pressure increases when the wave crest passes through the area where the device is located and decreases as the wave bottom passes. The moving components inside the device react to the changing pressures during wave passage, causing them to move up and down or oscillate. These pressure changes cause the piston inside the device to move up and down. This movement is converted into mechanical energy and electrical energy is obtained through a generator. These devices are placed close to the seabed. Since the devices in this class are completely under the sea, they are included in the wave-interactive hull class, but the wave interaction is not directly caused by the wave, but indirectly due to the pressure difference created by the wave causing the upward movement [44].

- **Pressure Delayed Osmosis method:** These systems are systems that generate energy by utilizing the salinity differences of sea water. These devices obtain energy by utilizing the osmotic pressure difference that occurs in areas such as estuaries or salt lakes where fresh water and saltwater meet. The semi-permeable membrane allows fresh water to pass through to the salt water, while blocking the salt molecules. This process causes the water in the area with a high salt concentration to increase, which leads to an increase in pressure. The increased pressure moves the water and drives a piston in hydraulic systems or directly drives a turbine, converting mechanical energy into electrical energy. Mechanical energy is converted into electrical energy through a generator [47], [52].

- **Thermal Wave Energy Converters:** Thermal wave energy converters are innovative systems that aim to generate electricity by utilizing thermal energy in seawater. Thermal wave energy converters utilize the heat capacity of seawater and the energy differences resulting from the formation

of different temperature layers of water by wave action. These devices generally generate energy using the temperature differences of seawater and thermal fluctuations caused by waves.

Ocean Thermal Energy Conversion Systems generate energy by utilizing the temperature differences at different depths of seawater. It generally utilizes the temperature difference between warm surface water and cold deep water. Two types of cyclic systems are used. These are closed loop and open loop systems. Closed Loop OTEC; Hot surface water vaporizes a liquid (usually ammonia) at a low boiling point. The vapour generates electricity by turning a turbine. Cold deep water completes the cycle by turning the vapour back into liquid. Open Loop OTEC: Hot surface water is vaporized directly in a vacuum and this vapour spins a turbine to generate electricity. The vapour is then condensed and re-liquefied with cold deep water. It is used in a hybrid system where these two cycle systems are used together.

- **Wave Assisted Thermal Energy Systems:** These systems generate energy from the temperature differences at the surface and bottom of the water caused by wave action. Waves store thermal energy by increasing the temperature differences at the surface and bottom of the water. This energy is collected through heat exchangers and converted into electrical energy in a thermal cycle.

- **Wave Heat Pumping Systems:** Wave motion creates thermal gradients in the water. These gradients are converted into electrical energy by collecting energy through heat pumps. This technology is still in the development stage, and research on seawater thermal energy continues.

- **Ocean Thermal Gradient Energy:** Energy is generated using the variation of seawater temperature along the depth (thermal gradient). The temperature difference between the sea surface and the seabed causes heat flow. Hot water at the surface vaporizes a liquid with a low boiling point, while cold deep water condenses the vapour and this cycle generates energy. Such systems are still under development and are being tested in deep-sea research projects. Ocean and sea waters have relatively constant temperature differences throughout the year, enabling continuous energy production. The availability of large ocean areas can potentially provide high amounts of energy production. Therefore, these systems can play an important role in renewable energy production by utilizing the thermal energy of the seas. These systems have great potential, especially in tropical

regions and where seawater temperature differences are significant [48].

2.5. Energy Conversion Methods in Wave

Energy Harvesters (Dalga Enerjisi Dönüştürücülerinde Enerji Dönüşüm Metotları)

There are a limited number of energy conversion methods for converting wave energy into electrical energy. In this section, these methods will be explained.

- **Reverse Electrodialysis:** Electrochemical cells are used to convert chemical reactions into electrical energy. In salinity difference energy production, electrochemical cells are used to generate electricity from the ion flow between fresh water and saline water. Fresh water and saline water move between electrodes through a semi-permeable membrane. Water of different salinity levels moves ions through the membrane. These travelling ions create an electric current by moving between the electrodes. REDstack's Afsluitdijk project in the Netherlands is an example of such systems [49], [53].

- **Electromagnetic induction:** These systems are the most widely used energy conversion method in wave energy harvesters. Basically, the mechanical energy from the wave is transferred to a generator and an electric current is generated in the conductor under the changing magnetic flux by the movement of permanent magnets or a coil bundle. These systems can be analyzed under two categories depending on the structure of the generator used. These are systems with linear generators and rotary generators. In linear generator structures, the mechanical movement provided by the wave works on the principle of moving the coil or permanent magnet blocks forward and backward along a linear line. Rotary generator systems, as the name suggests, the wave motion is converted into rotational motion with a complete or certain angle change [44]. [54].

- **Piezoelectric energy conversion:** Piezoelectric materials are materials that are polarized as negative on one side and positive on the other side as a result of the stress in their crystal structure under mechanical pressure applied to them. Electrical energy can be generated by using this potential difference between the surfaces of the material. However, the energy efficiency of these systems is quite low. In addition, piezoelectric materials have a fragile structure. Another important disadvantage is that they have a water-soluble structure.

Therefore, the structures where these systems are used must be isolated from water [50].

- **Triboelectric energy conversion:** Triboelectric conversion is an energy conversion method based on the charge exchange that occurs on the surfaces of materials due to friction. In such systems, electrical energy is generated by storing the static electric charges generated by friction in a capacitor. However, although the energy efficiency is quite low in this method, friction-induced wear and heating problems constitute other important disadvantages of these systems [51].

3.CONCLUSIONS (SONUÇLAR)

The increasing need for energy and the environmental problems caused by the methods used to meet this need have led to an increasing interest in clean and renewable resources. In this context, seas and oceans can be considered as resources with great energy potential. However, it is seen that the lowest share among renewable energy sources belongs to wave energy systems. The reasons for this can be briefly summarized as follows:

- **High Initial Investment Cost:** Wave energy technology is still under development and therefore the initial investment cost is relatively high.

- **Variability:** The amount of wave energy can vary depending on the weather and season, which can make it difficult to integrate it into the grid.

- **Environmental Impact:** Wave power plants can damage marine life and coastlines.

- **Technical Challenges:** Wave energy devices need to be designed and built to withstand the harsh conditions of the marine environment.

- **Visual and Noise Pollution:** Wave power plants can create visual and noise pollution.

- **Limited Compatibility:** Wave power plants are limited to coastal areas with strong waves.

However, with the developing technology, the cost per watt of wave energy systems is decreasing year by year. In this context, it is predicted that the share of wave energy harvesters and new harvesting methods among renewable energy sources will increase significantly in the near future [52]. Especially considering the marine resources of our country, the necessity of investing much more in this resource is clearly seen. The aim of this study is to provide a general classification of wave energy

systems, and a brief description of the technologies used in this field and to emphasize the importance of wave energy systems in the light of scientific data.

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)

Alaaddin YILMAZER: He conducted a literature review on history of wave energy harvesters and performed the writing process.

Dalga enerjisi hasatçıların tarihçesi hakkında literatür taraması yapmış ve yazım sürecini gerçekleştirmiştir.

Ali Ekber ÖZDEMİR: He conducted a literature review on classification methodologies of wave energy harvesters and performed the writing process.

Dalga enerjisi toplayıcılarının sınıflandırma metodolojileri konusunda literatür taraması yapmış ve yazım sürecini gerçekleştirmiştir.

CONFLICT OF INTEREST (ÇIKAR ÇATIŞMASI)

There is no conflict of interest in this study.

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

REFERENCES (KAYNAKLAR)

- [1] Abraham, Tamir. (2017). Energy via Art. Arts and social sciences journal, 8(2):1-3. <https://doi:10.4172/2151-6200.1000259>
- [2] Mishmastnehi, M. (2021). Technological Heritage of Persian Windmills. Iran, 1–17. <https://doi.org/10.1080/05786967.2021.1960885>
- [3] Langdon, J. (1984). Technological Adaptation in Europe: The Case of the Windmill. Technology and Culture, 25(3), 520-545.
- [4] Langdon, J., & Watts, M. (2005). Tower Windmills in Medieval England: A Case of Arrested Development? Technology and Culture, 46(4), 697–718. <http://www.jstor.org/stable/40060955>

- [5]] Rossi, C., & Russo, F. (2009). Ancient Engineers' Inventions: Precursors of the Present. Springer.
- [6] Britannica, T. Editors of Encyclopaedia (2024, April 5). Thomas Savery. Encyclopedia Britannica. <https://www.britannica.com/biography/Thomas-Savery>
- [7] Sander, C. (2022). Magnetism in Renaissance Science. In: Sgarbi, M. (eds) Encyclopedia of Renaissance Philosophy. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-14169-5_944
- [8] Britannica, T. Editors of Encyclopaedia (2024, May 9). Otto von Guericke. Encyclopedia Britannica. <https://www.britannica.com/biography/Otto-von-Guericke>
- [9] Assis, Andre & Bucciarelli, Louis. (2023). Coulomb's Memoirs on Torsion, Electricity, and Magnetism Translated into English.
- [10] Daemen, J. J. K. (2004). Coal Industry, History of. C. J. Cleveland (Ed.), Encyclopedia of Energy (ss. 457-473). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B0-12-176480X/00043-7>
- [11] Smil, V. (2004). World History and Energy. İçinde C. J. Cleveland (Ed.), Encyclopedia of Energy (ss. 549-561). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B0-12-176480X/00025-5>
- [12] Periman, R. D. (2004). Early Industrial World, Energy Flow in. İçinde C. J. Cleveland (Ed.), Encyclopedia of Energy (ss. 849-858). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B0-12-176480-X/00010-3>
- [13] Dincer, I. (1998). Energy and Environmental Impacts: Present and Future Perspectives. Energy Sources, 20(4-5), 427-453. <https://doi.org/10.1080/00908319808970070>
- [14] IEA (2024): Share of GHG emissions and total energy supply by product, World, 2021, <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-product/greenhouse-gas-emissions-from-energy-highlights>, IEA. Licence: CC BY 4.0 [20 mayıs 2024]
- [15] Energy: Global rise in electricity demand met entirely with renewables, report finds, in Engineering & Technology, vol. 17, no. 10, pp. 5-5, Nov. 2022, <https://doi:10.1049/et.2022.1008>.
- [16] IEA, Renewables 2023 Analysis and forecasts to 2028, <https://iea.blob.core.windows.net/assets/96d66a8b-d502-476b-ba94->

- [54ffda84cf72/Renewables_2023.pdf](#) [29 Mayıs 2024]
- [17] Desiree Tullos, Assessing the influence of environmental impact assessments on science and policy: An analysis of the Three Gorges Project, *Journal of Environmental Management*, Volume 90, Supplement 3, 2009, Pages S208-S223, ISSN 0301-4797, <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2008.07.031>.
- [18] Ryan Stock, Benjamin K. Sovacool, Left in the dark: Colonial racial capitalism and solar energy transitions in India, *Energy Research & Social Science*, Volume 105, 2023, 103285, ISSN 2214-6296, <https://doi.org/10.1016/j.erss.2023.103285>.
- [19] Appendix A - China's 10GW Wind Power Base Planning, Editor(s): Ningbo Wang, Chongqing Kang, Dongming Ren, Large-Scale Wind Power Grid Integration, Academic Press, 2016, Page 313, ISBN 9780128498958, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-849895-8.15001-8>.
- [20] Qusay Hassan, Sameer Algburi, Aws Zuhair Sameen, Tariq J. Al-Musawi, Ali Khudhair Al-Jiboory, Hayder M. Salman, Bashar Mahmood Ali, Marek Jaszczur, A comprehensive review of international renewable energy growth, *Energy and Built Environment*, 2024, ISSN 2666-1233, <https://doi.org/10.1016/j.enbenv.2023.12.002>.
- [21] H. Xia, X. Wang, J. Shi, N. Jia, Y. Duan, Research on analysis method of tidal current energy resource characteristics, *Marine Technol. Soc. J.* 56 (6) (2022) 10–17. <https://doi.org/10.4031/MTSJ.56.6.5>
- [22] A. Procter, Demand Led Tidal Lagoon Power and Hydrogen Energy Storage-Supervisory Control and Optimisation, Uni, 2022 / Procter, A. (2022). Demand Led Tidal Lagoon Power and Hydrogen Energy Storage-Supervisory Control and Optimisation. University of South Wales (United Kingdom).
- [23] Z. L. Wang, T. Jiang, L. Xu. Toward the blue energy dream by triboelectric nanogenerator networks. *Nano Energy*, 39, 2017, Pages 9-23, ISSN 2211-2855; <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2017.06.035>.
- [24] Ross, D. 1995. *Power from the Waves*. Oxford University Press, USA.
- [25] Heath, T. V. (2012). A review of oscillating water columns. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 370(1959), 235-245. <https://doi.org/10.1098/rsta.2011.0164>
- [26] Konispoliatis, D. (2024). Floating Oscillating Water Column Wave Energy Converters: A Review of Developments. *Journal of Energy and Power Technology*, 6(1), Article 1. <https://doi.org/10.21926/jept.2401005>
- [27] Müller, G. (2017). The Californian wave power craze of the late 19th and early 20th century. In *Proceedings of the 12th European Wave and Tidal Energy Conference (EWTEC)*. <https://www.researchgate.net/publication/33489394>
- [28] Li, H., Sun, X., & Zhou, H. (2022, August). Wave energy: history, implementations, environmental impacts, and economics. In *2nd International Conference on Materials Chemistry and Environmental Engineering (CONF-MCEE 2022)* (Vol. 12326, pp. 189-199). SPIE.Ea <https://doi.org/10.1117/12.2646119>
- [29] Morris-Thomas, M. T., Irvin, R. J., & Thiagarajan, K. P. (2007). An investigation into the hydrodynamic efficiency of an oscillating water column. *J. Offshore Mech. Arct. Eng.* Nov 2007, 129(4): 273-278. <https://doi.org/10.1115/1.2426992>
- [30] Aderinto, T., & Li, H. (2019). Review on power performance and efficiency of wave energy converters. *Energies*, 12(22), 4329. <https://doi.org/10.3390/en12224329>
- [31] Falcão, A. F. D. O. (2010). Wave energy utilization: A review of the technologies. *Renewable and sustainable energy reviews*, 14(3), 899-918. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2009.11.003>
- [32] Clément, A., McCullen, P., Falcão, A., Fiorentino, A., Gardner, F., Hammarlund, K., ... & Thorpe, T. (2002). Wave energy in Europe: current status and perspectives. *Renewable and sustainable energy reviews*, 6(5), 405-431. [https://doi.org/10.1016/S1364-0321\(02\)00009-6](https://doi.org/10.1016/S1364-0321(02)00009-6)
- [33] Saint Jean, M., Arfaoui, N., Brouillat, E., & Virapin, D. (2021). Patterns of technology knowledge in the case of ocean energy technologies. *Journal of Innovation Economics & Management*, 34(1), 101-133. <https://doi.org/10.3917/jie.034.0101>
- [34] Falcão, A. F., & Henriques, J. C. (2016). Oscillating-water-column wave energy converters and air turbines: A review. *Renewable energy*, 85, 1391-1424. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.07.086>
- [35] Salter, S. Wave power. *Nature* 249, 720–724 (1974). <https://doi.org/10.1038/249720a0>
- [36] Evans, D. V. (1976). A theory for wave-power absorption by oscillating bodies. *Journal of Fluid Mechanics*, 77(1), 1–25. <https://doi.org/10.1017/S0022112076001109>

- [37] Salter, S. H. (1989). World progress in wave energy—1988. *International Journal of Ambient Energy*, 10(1), 3–24. <https://doi.org/10.1080/01430750.1989.9675119>
- [38] Salter, S. (2008). Looking Back. In: Cruz, J. (eds) *Ocean Wave Energy. Green Energy and Technology (Virtual Series)*. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-540-74895-3_2
- [39] Cruz, J. (2007). *Ocean wave energy: current status and future perspectives*. Springer Science & Business Media. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-74895-3>
- [40] IRENA, E. (2020). *Innovation outlook: ocean energy technologies*. International Renewable Energy Agency Abu Dhabi, United Arab Emirates.
- [41] Budar, K., & Falnes, J. (1975). A resonant point absorber of ocean-wave power. *Nature*, 256(5517), 478-479. <https://doi.org/10.1038/256478a0>
- [42] Falnes, J., & Løvseth, J. (1991). Ocean wave energy. *Energy policy*, 19(8), 768-775. [https://doi.org/10.1016/0301-4215\(91\)90046-Q](https://doi.org/10.1016/0301-4215(91)90046-Q)
- [43] Mofor, L., Goldsmith, J., & Jones, F. (2014). *Ocean Energy: Technology Readiness, Patents, Deployment Status and Outlook*, International Renewable Energy Agency (IRENA) Report, Paris, August 2014.
- [44] López, I., Andreu, J., Ceballos, S., De Alegría, I. M., & Kortabarria, I. (2013). Review of wave energy technologies and the necessary power-equipment. *Renewable and sustainable energy reviews*, 27, 413-434. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.07.009>
- [45] Guo, B., Wang, T., Jin, S., Duan, S., Yang, K., & Zhao, Y. (2022). A review of point absorber wave energy converters. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(10), 1534. <https://doi.org/10.3390/jmse10101534>
- [46] Thomas, G. (2008). *The Theory Behind the Conversion of Ocean Wave Energy: a Review*. In: Cruz, J. (eds) *Ocean Wave Energy. Green Energy and Technology(Virtual Series)*. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-540-74895-3_3
- [47] Skilhagen, S.E. (2010). Osmotic power — a new, renewable energy source. *Desalination and Water Treatment*, 15, 271-278. <https://doi.org/10.5004/DWT.2010.1759>
- [48] World Energy Council. (2016). *World energy resources*. World Energy Council.
- [49] Simoes, C., Vital, B., Sleutels, T., Saakes, M., & Brillman, W. (2022). Scaled-up multistage reverse electro dialysis pilot study with natural waters. *Chemical Engineering Journal*, 450, 138412. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.138412>
- [50] Wang, Z. L. (2006). Piezoelectric Nanogenerators Based on Zinc Oxide Nanowire Arrays. *Science*, 312(5771), 242–246. <https://doi.org/10.1126/science.1124005>
- [51] Zhu, G., Lin, Z.-H., Jing, Q., Bai, P., Pan, C., Yang, Y., ... Wang, Z. L. (2013). Toward Large-Scale Energy Harvesting by a Nanoparticle-Enhanced Triboelectric Nanogenerator. *Nano Letters*, 13(2), 847–853. [doi:10.1021/nl4001053](https://doi.org/10.1021/nl4001053)
- [52] Wang, Z. L., Jiang, T., & Xu, L. (2017). Toward the blue energy dream by triboelectric nanogenerator networks. *Nano Energy*, 39, 9–23. [doi:10.1016/j.nanoen.2017.06.035](https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2017.06.035)

Effects of Steam Addition to the Oxidizer on the Combustion Performance and Emissions of Coke Oven Gas: A Numerical Study

Osman KUMUK^{1*} 

¹Iskenderun Technical University, Iskenderun Vocational School of Higher Education, Unmanned Aerial Vehicle Technology and Operatorship Program, Iskenderun/HATAY

Article Info

Research article
Received: 29/11/2024
Revision: 13/12/2024
Accepted: 13/12/2024

Keywords

Combustion
Coke oven gas
Steam
CFD

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 29/11/2024
Düzeltilme: 13/12/2024
Kabul: 13/12/2024

Anahtar Kelimeler

Yanma
Kok fırını gazı
Su buharı
HAD

Graphical/Tabular Abstract (Grafik Özet)

This study numerically investigates the effects of steam addition to the oxidizer on the combustion performance and emissions of coke oven gas. / Bu çalışmada, oksitleyiciye buhar ilavesinin kok fırını gazının yanma performansı ve emisyonları üzerindeki etkileri sayısal olarak araştırılmıştır.

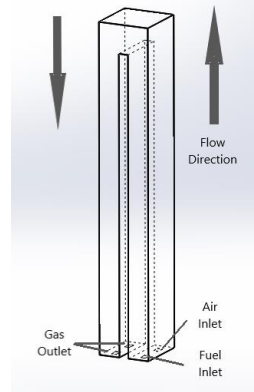


Figure A: Coke oven combustion chamber /Şekil A: Kok fırını yanma odası

Highlights (Önemli noktalar)

- The utilization of coke oven gases has been thoroughly analyzed. / Kok fırını gazlarının kullanımı kapsamlı bir şekilde analiz edilmiştir.
- Comparative assessments were conducted under conventional operating conditions and with the addition of steam. / Karşılaştırmalı değerlendirmeler geleneksel çalışma koşulları altında ve buhar ilavesiyle yürütülmüştür.
- Remarkably, ultra-low NOx emissions were achieved, highlighting the environmental benefits of this approach. / Dikkat çekici bir şekilde, bu yaklaşımın çevresel faydalarını vurgulayan ultra düşük NOx emisyonları elde edilmiştir.

Aim (Amaç): The main aim of this study is to investigate the temperature, emissions, and performance of a coke oven gas combustion chamber under steam addition using non-premixed combustion. / Bu çalışmanın temel amacı, buhar ilavesi ve ön karışimsız yanma altında bir kok fırını gazı yanma odasının sıcaklığını, emisyonlarını ve performansını araştırmaktır.

Originality (Özgünlük): An examination of the existing literature reveals that no studies have investigated the effects of diluting the oxidizer with water vapor on the combustion and emission parameters of coke oven gas in the combustion chamber of a coke oven. / Mevcut literatür incelendiğinde, bir kok fırınının yanma odasında, oksitleyicinin su buharı ile seyreltilmesinin kok fırını gazının yanma ve emisyon parametreleri üzerindeki etkilerini inceleyen bir çalışmanın bulunmadığı görülmektedir.

Results (Bulgular): The flue gas temperature at the furnace outlet was measured at 1372 K. When 40% steam was added to the oxidizer, the temperature decreased to 1249 K. The NOx emission level was 6.9 ppm without adding steam, dropping to 1.2 ppm with the 40% steam addition. / Fırın çıkışındaki baca gazı sıcaklığı 1372 K olarak ölçülmüştür. Oksitleyiciye %40 buhar eklendiğinde sıcaklık 1249 K'e düşmüştür. NOx emisyon seviyesi buhar eklenmeden 6.9 ppm iken, %40 buhar eklenmesiyle 1.2 ppm'e düşmüştür.

Conclusion (Sonuç): It can be seen that adding steam to the oxidizer successfully reduces NOx emissions without significantly affecting performance. / Oksitleyiciye buhar eklenmesinin, performansı önemli ölçüde etkilemeden NOx emisyonlarını başarılı bir şekilde azalttığı görülebilir.



Effects of Steam Addition to the Oxidizer on the Combustion Performance and Emissions of Coke Oven Gas: A Numerical Study

Osman KUMUK^{1*} ¹Iskenderun Technical University, Iskenderun Vocational School of Higher Education, Unmanned Aerial Vehicle Technology and Operatorship Program, Iskenderun/HATAY

Article Info

Research article

Received: 29/11/2024

Revision: 13/12/2024

Accepted: 13/12/2024

Keywords

Combustion

Coke oven gas

Steam

CFD

Abstract

This study investigates the effects of adding steam to the oxidizer on the combustion behavior of coke oven gas through numerical simulations. The analysis used the commercial computational fluid dynamics (CFD) software Ansys Fluent. The results obtained for the case where dry air was used as the oxidizer were compared with experimental data. The k- ϵ standard turbulence model was employed for turbulence modeling, while the PDF/Mixture Fraction combustion model and the P-1 radiation model were used for the three-dimensional numerical simulations. According to the simulation results, adding steam to the oxidizer slightly reduced the Coke Oven Gas (COG) temperature. When assessing the emissions, it was observed that NO_x emissions significantly decreased, while CO₂ emissions showed a slight reduction. However, CO emissions were found to increase slightly. In conclusion, the study indicates that adding steam to the oxidizer significantly mitigates the high NO_x emissions typically associated with using coke oven gas as an alternative fuel. The flue gas temperature at the furnace outlet was measured at 1372 K. When 40% steam was added to the oxidizer, the temperature decreased to 1249 K. The NO_x emission level was 6.9 ppm without adding steam, dropping to 1.2 ppm with the 40% steam addition. Consequently, it can be observed that adding steam to the oxidizer successfully reduces NO_x emissions without significantly affecting the performance.

Oksitleyiciye Buhar Eklenmesinin Kok Fırını Gazının Yanma Performansı ve Emisyonları Üzerindeki Etkileri: Sayısal Bir Çalışma

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi

Başvuru: 29/11/2024

Düzeltilme: 13/12/2024

Kabul: 13/12/2024

Anahtar Kelimeler

Yanma

Kok fırını gazı

Su buharı

HAD

Öz

Bu çalışma, oksitleyiciye buhar eklenmesinin kok fırını gazının yanma davranışı üzerindeki etkilerini sayısal simülasyonlar yoluyla araştırmaktadır. Analizler, ticari bir hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) yazılımı olan Ansys Fluent kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Kuru havanın oksitleyici olarak kullanıldığı durumdan elde edilen sonuçlar, deneysel verilerle karşılaştırılmıştır. Türbülans modellemesi için k- ϵ standart türbülans modeli kullanılırken, üç boyutlu sayısal simülasyonlar için PDF/Karışım Kesri yanma modeli ve P-1 radyasyon modeli uygulanmıştır. Simülasyon sonuçlarına göre, oksitleyiciye buhar eklenmesi, kok fırını gazının (KFG) sıcaklığını hafifçe azaltmıştır. Emisyonlar değerlendirildiğinde, NO_x emisyonlarının önemli ölçüde azaldığı, CO₂ emisyonlarının ise hafif bir düşüş gösterdiği gözlemlenmiştir. Sonuç olarak, bu çalışma, oksitleyiciye buhar eklenmesinin, alternatif bir yakıt olarak kullanılan kok fırını gazına genellikle eşlik eden yüksek NO_x emisyonlarını önemli ölçüde azalttığını göstermektedir. Fırın çıkışında ölçülen baca gazı sıcaklığı 1372 K olarak belirlenmiş ve oksitleyiciye %40 buhar eklendiğinde sıcaklık 1249 K'e düşmüştür. Buhar eklenmeden önce 6.9 ppm olan NO_x emisyon seviyesi, %40 buhar eklenmesiyle 1.2 ppm'e düşmüştür. Dolayısıyla, oksitleyiciye buhar eklenmesinin, performansı önemli ölçüde etkilemeden NO_x emisyonlarını başarıyla azalttığı gözlemlenmiştir.

1. INTRODUCTION (GİRİŞ)

Energy remains one of the most critical topics in contemporary research, as it has been essential for humanity from its existence to the present day. With the advancement of technology and the increasing

global population, the energy demand continues to rise. This growing demand has led to an intensified focus on using energy resources, contributing to the rapid depletion of fossil fuel reserves. The estimated depletion times for fossil energy sources such as

natural gas and oil are projected to be less than a century.

Moreover, the global distribution of these resources has led to various socio-economic and political challenges. However, the situation with coal is slightly different, as coal is more evenly distributed worldwide. Furthermore, coal is expected to remain a viable energy source for at least the next 200 years. This makes coal a more critical energy source in the medium term. Fuels remain the dominant energy source, accounting for more than 85% of global energy consumption due to their high energy content. The heat energy produced by the combustion of fossil fuels is either used directly in specific applications or converted into electrical energy via a cycle for others. However, burning these fuels releases harmful emissions such as CO, CO₂, NO_x, SO_x, and others, negatively impacting both environmental and human health. In particular, coal combustion produces high CO, NO_x, and SO_x emissions. Many countries worldwide have implemented restrictions to reduce these pollutants, prompting researchers to develop cleaner, more efficient fuel production methods and improved combustion systems. One such method is the coking process, which removes impurities from coal and produces coke, a high-carbon fuel [1].

When analyzed in terms of its components, Coke oven gas is considered a high-quality gaseous fuel because combustible components such as hydrogen and methane constitute nearly 80% of its composition. Moreover, synthetic fuels derived from coal gasification contain five primary components (H₂, CH₄, CO, CO₂, and N₂), which are generally consistent across different types of synthetic fuels despite some variations in their content. The literature review conducted for this study encompasses all gaseous fuels, and some relevant works are summarized below [2].

Coke, produced from blends of coke and bituminous coal, is primarily used in iron production in blast furnaces, accounting for approximately 90% of its consumption. Regenerative coke ovens dominate global production and contribute over 90% of total output. Guo and Tang [3] developed a CFD model using the PHOENICS package to simulate fluid flow, combustion, and heat transfer in coke ovens, showing its effectiveness in optimizing thermal processes and operations. Their study identified vital factors such as temperature, moisture content, and coal density influencing production efficiency. Zhao et al. [4] conducted an energy balance analysis emphasizing the role of heat storage and exhaust gas

temperature in selective non-catalytic reduction (SNCR) for flue gas desulfurization. They introduced the Total Thermal Storage Temperature (TTST) index to evaluate thermal storage. They validated their model with experimental data, demonstrating that optimized combustion and coke gas preheating could improve production efficiency while reducing exhaust emissions.

A study by Asai et al. [5] utilized a multi-injection burner to control the combustion oscillations of hydrogen-rich fuels and examined their combustion characteristics. The results showed that the convex burner used in the study reduced combustion instabilities while burning these fuels. Lee et al. [6] investigated the combustion characteristics of coal-derived synthetic fuels in an experimental setup. The study focused on reducing NO_x emissions by nitrogen dilution, achieving reductions of up to below five ppm. Another study by Lee et al. [7] explored synthetic fuels' combustion and emission characteristics with different compositions under gas turbine combustion conditions. In a subsequent study [8], they examined the effects of various diluents on emissions using the same gas turbine, concluding that the best results were achieved when steam was used as a diluent. A numerical study by Habib et al. [9] investigated synthetic fuels' combustion and emission characteristics with different compositions in a packaged boiler. The study found that fuels with a higher hydrogen content produced shorter flame lengths. Tian et al. [10] investigated the combustor characteristics of synthetic fuels composed of hydrogen, CO, and carbon dioxide in a non-premixed burner under humid air conditions. Their study revealed that increasing the moisture content of the air resulted in a reduction of NO_x emissions. Li et al. [11] numerically studied the effects of CO₂ and H₂O dilution on combustion and emission characteristics of synthetic fuels under partially premixed combustion conditions. The results, obtained using Large Eddy Simulation (LES) modeling, indicated that CO₂ significantly impacted flame structure more than H₂O.

The main aim of this study is to investigate the temperature, emissions, and performance of a coke oven gas combustion chamber under steam addition, using a swirl to achieve turbulent and non-premixed combustion. The studies above provide insights into various fuel combustion and emission control aspects. However, a gap in the literature is observed regarding investigating the effects of steam dilution on the combustion and emission parameters of coke oven gas. The coke oven gas mixture, whose composition will be presented in the

following sections, was numerically investigated under dry air conditions. In their numerical study, the coke oven gas was diluted with an oxidizer containing 10%, 20%, and 30% steam by volume, and the effects of this dilution on the combustion characteristics were investigated numerically, with constant minimum O₂ levels for a thermal power of 8 kW and an equivalence ratio of 0.83.

2. MATERIALS AND METHODS (MATERİYAL VE METOD)

2.1. Physical Model (Fiziksel Model)

Figure 1 depicts the structure of the coke oven combustion chamber, which has a total height of 5.1 meters [12]. The flow enters from a bridge passage, with the direction downward. The diagram also indicates the locations of the fuel inlet, air inlet, and gas outlet. The Coke Oven Gas (COG) and air are introduced through separate inlets, where they subsequently mix and undergo combustion within the chamber. This results in a non-premixed combustion process.

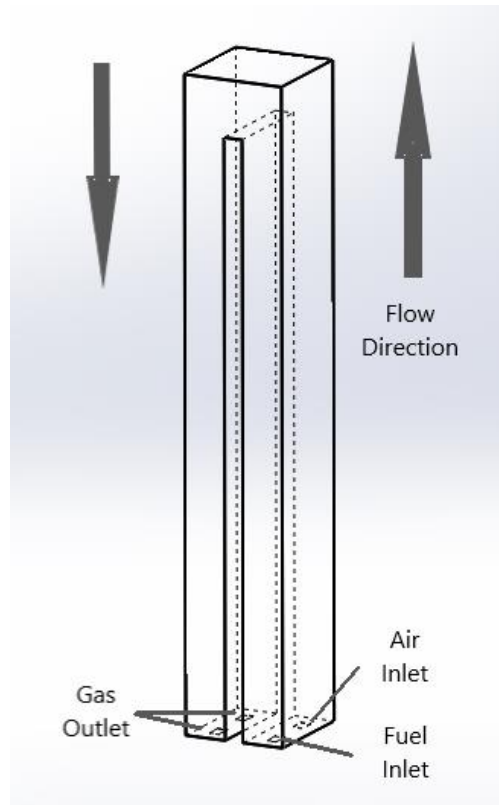


Figure 1. Coke oven combustion chamber (Kok fırını yanma odası)

2.2. Governing Equations (Temel Denklemler)

Mathematical models describing the combustion of gas mixtures are formulated under steady-state assumptions and rely on the three-dimensional forms of the continuity, momentum, energy, and species conservation equations. The general expression of the transport equation is presented as follows [13]:

$$\frac{\partial(\rho\Phi)}{\partial x} + \nabla \cdot \Phi(\rho\Phi u) = \nabla \cdot \Phi(\Gamma\nabla\Phi) + S_\Phi \quad (1)$$

Here, Φ represents the dependent variables. Γ , Φ denotes the transport coefficient for the S_Φ

represents the source term in the transport equation for Φ .

This study employs the Mixture Fraction / PDF Model as the combustion model. In this model, transport equations for each species are not solved directly. Instead, the concentration of each species is derived from the predicted mixture fraction fields [14].

The PDF model approach has been specifically developed to simulate turbulent diffusion flames. For the fuel/oxidizer system, the mixture fraction f can be expressed as the local fuel mass fraction as follows:

$$f = \frac{m_F}{m_F+m_O} \tag{2}$$

The mixture fraction f is a conserved quantity, and its value at each point in the flow field is calculated from the solution of the conservation equation for the time-averaged value of the turbulent flow field, as given below [13].

$$\frac{\partial(\rho\bar{f})}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i \bar{f})}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_t} \frac{\partial \bar{f}}{\partial x_i} \right) + S_m \tag{3}$$

Here, S_m is a source term related solely to mass transfer from liquid fuel droplets to the gas phase. In addition to the solution for the mean mixture fraction, a conservation equation is also solved for the mixture fraction variable. \bar{f}^2 is used in the closure model that defines the turbulence-chemistry interactions.

$$\frac{\partial(\rho\bar{f}^2)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i \bar{f}^2)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_t} \frac{\partial \bar{f}^2}{\partial x_i} \right) + C_g \mu_t \left(\frac{\partial \bar{f}^2}{\partial x_i} \right)^2 - C_d \rho \frac{\varepsilon}{k} \bar{f}^2 \tag{4}$$

Heat transfer by radiation occurs at high temperatures. In combustion chambers, the combustion temperature is typically high under stoichiometric combustion conditions, ranging from 1000 to 1600°C. Therefore, incorporating a radiation model in combustion processes allows for more accurate and better-predicted temperature distributions [14]. For instance, the P-1 model requires fewer computational steps to achieve efficient results. Additionally, it can be easily applied to complex geometries involving curvilinear coordinates. For these reasons, the P-1

radiation model has been chosen in this study to improve the accuracy of temperature and emission predictions in the numerical modeling of coke oven gas.

2.3. Boundary Conditions (Sınır Şartları)

The properties of the coke oven gas used in the study are presented in Table 1. The temperature of the coke oven gas has been set to 300 K, while the oxidizer temperature is adjusted to 300 K due to the addition of steam. The pressures of the COG and the oxidizer are assumed to be atmospheric.

3. RESULTS AND DISCUSSION (BULGULAR VE TARTIŞMA)

In computational studies, the flow volume is typically divided into cells. In this study, the flow volume within the combustion chamber has been subdivided into cells. However, to reduce computational time and achieve faster yet accurate results, decoupling the calculations from the number of cells is beneficial. Therefore, simulations with different cell numbers were conducted before the combustion modeling of the coke oven gas. The difference in the calculated emissions (NO_x) concentration between mesh sizes 1124441 and 3235475 was an average of 4.5%. For other parameters, deviations between mesh sizes of 3235475 and 5496942 were less than 3%. A grid system with 3235475 cells was chosen for the simulations to minimize computation time. The grid layout of the computational domain is illustrated in Figure 2.

Table 1. Coke oven gas content (Kok fırın gazı içeriği)

Coke Oven Gas	Volumetric (%)
CH ₄	27
H ₂	57
N ₂	8
CO ₂	6
CO	2

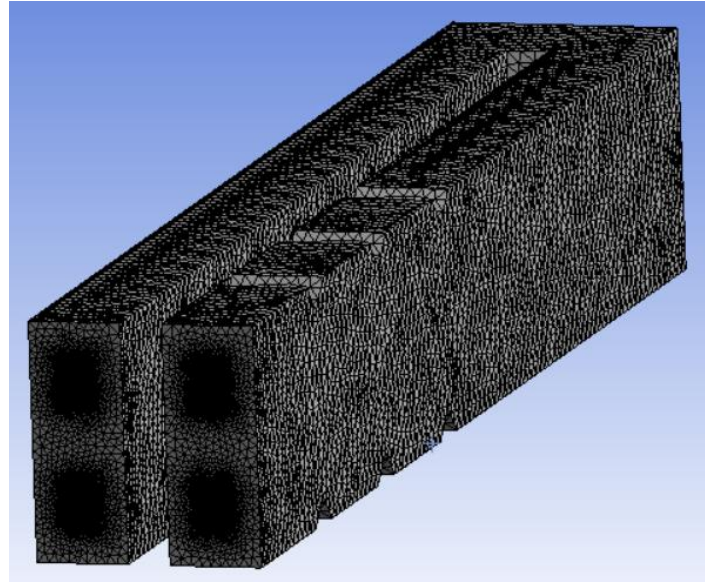


Figure 2. Mesh independence (Mesh bağımsızlığı)

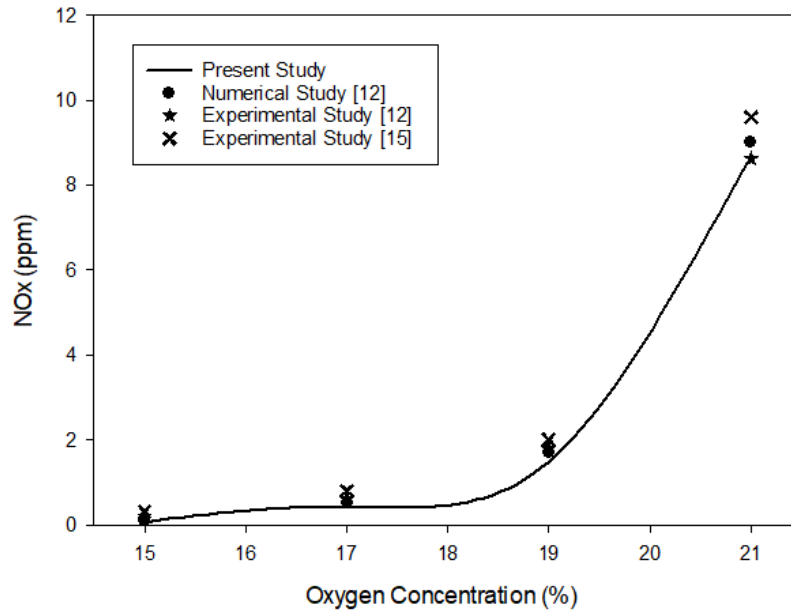


Figure 3. Comparison of measured and predicted gas outlet NO_x distributions [12,15] (Ölçülen ve tahmin edilen gaz çıkışı NO_x dağılımlarının karşılaştırılması)

The numerical model was validated to predict coke oven gas (COG) combustion under different oxidizer ratio conditions. Karyeyen et al. [15] noted that the composition of COG used in this study was similar to that used in their work, consisting of 10% N₂, 10% CO₂, 50% H₂, and 30% CH₄ by volume. The oxygen concentration was adjusted by varying the CO₂ flow rate. The coke oven gas and oxidizer mixture were combusted in a reactor with an internal diameter of 2 3/8 inches and a height of 7 7/8 inches. Figure 3 compares the NO_x emissions (ppm) from experimental data [12,15] with the model predictions. The numerical model results are in close agreement with the experimental measurements. The consistency between the simulation results and industrial and experimental

data leads to the conclusion that the model is reliable and applicable to the given combustion conditions.

The temperature distribution predictions resulting from the dilution of the combustion air with steam in the coke oven gas combustion process are shown in Figure 4. Initially, it was observed that the highest temperature levels for all combustion conditions were reached in the flame zone. Under dry air conditions, the predicted flame temperature was approximately 1845 K. As the steam content in the oxidizer was increased, the expected flame temperatures decreased to approximately 1820 K, 1805 K, 1780 K, and 1760 K, respectively. Furthermore, for all combustion scenarios, a

reduction in temperature was noted as the combustion chamber outlet was approached due to the effects of heat transfer through radiation and convection. Based on the predictions, the temperature at the combustion chamber outlet under dry air conditions was estimated to be around 1372 K. In contrast, the predicted outlet temperatures for the other combustion conditions were 1348 K, 1321 K, 1291 K, and 1249 K, respectively (Table 2).

When evaluating the temperature predictions at various measurement points throughout the combustion chamber, it was observed that adding steam to the oxidizer slightly decreased the coke oven gas combustion performance. However, based on these findings, it can be concluded that using water-vapor-enriched oxidizer in coke oven gas combustion does not significantly reduce the combustion performance.

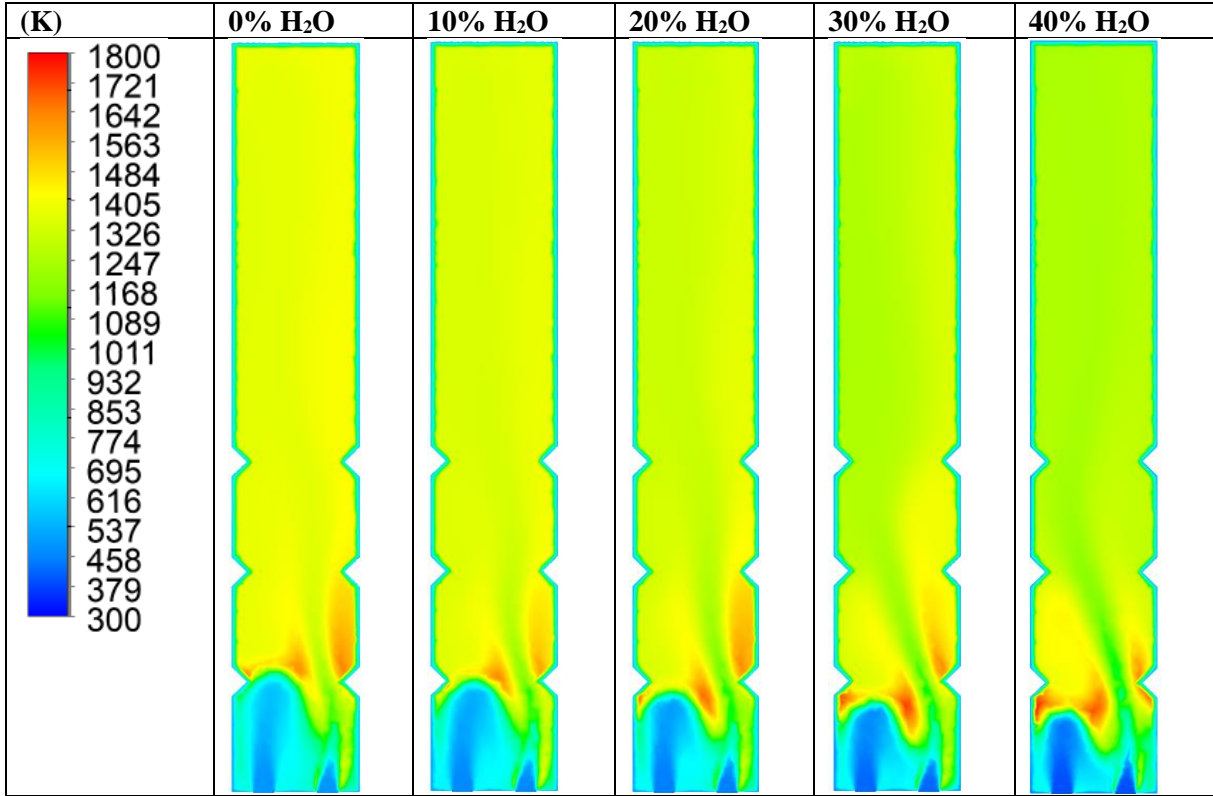


Figure 4. Temperature distribution in the combustion chamber at different H₂O concentrations (Farklı H₂O konsantrasyonlarında yanma odasındaki sıcaklık dağılımı)

Table 2. Temperature and NO_x emissions value at the outlet (Çıkıştaki sıcaklık ve NO_x emisyon değerleri)

	0% H ₂ O	10% H ₂ O	20% H ₂ O	30% H ₂ O	40% H ₂ O
Temperature Value (K)	1372	1348	1321	1291	1249
NO _x Value (ppm)	6,9	4,6	2,7	1,6	1,2

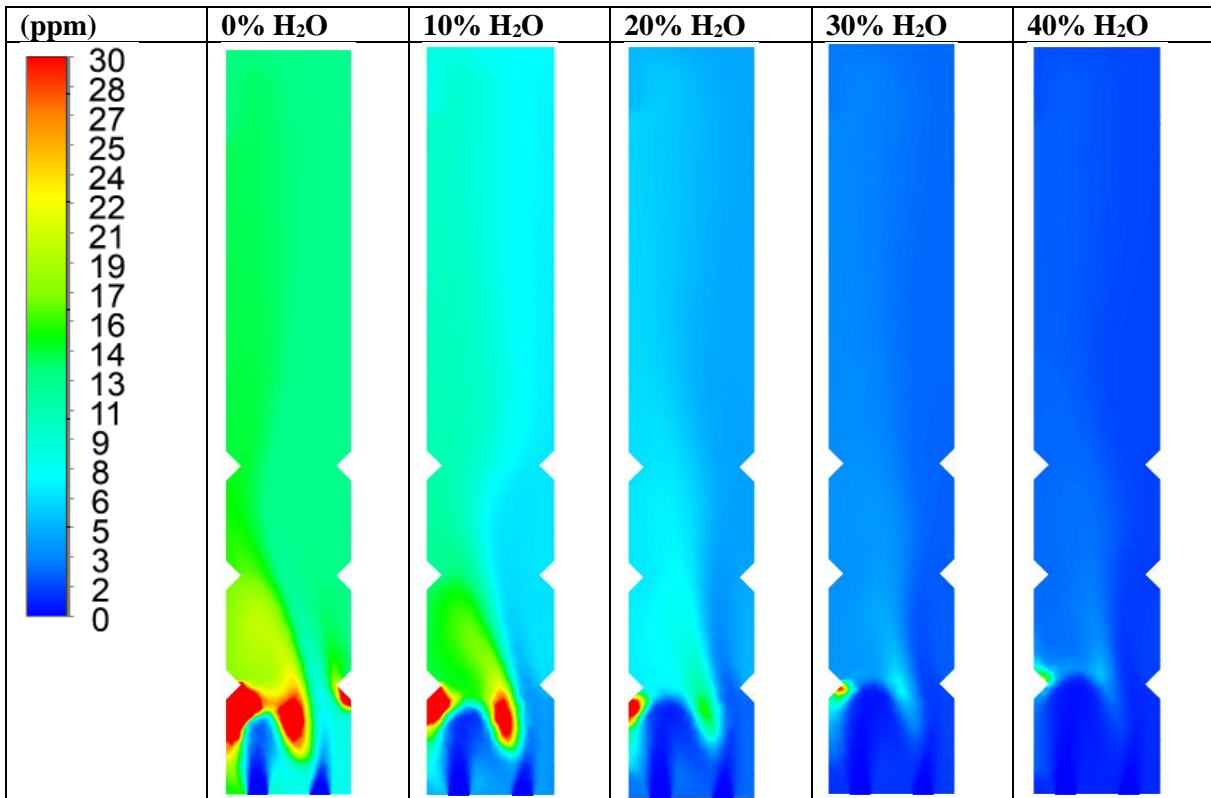


Figure 5. Emission distribution in the combustion chamber at different H₂O concentrations (Farklı H₂O konsantrasyonlarında yanma odasındaki emisyon dağılımı)

This study section examines the effects of diluting the oxidizer with steam on coke oven gas combustion post-combustion emissions. Initially, the radial NO_x distributions predicted using the Fluent program's NO_x-son processor are shown in Figure 5. According to the results, it can be quickly concluded that high NO_x formation occurs during the combustion process with dry air. At the combustion chamber outlet, the predicted NO_x level under dry air conditions was approximately 6.9 ppm. In this case, the contribution of free N₂ in the fuel, which behaves similarly to the N₂ in the air, to the formation of thermal NO_x plays a significant role. It is also evident from Figure 5 that substantial reductions in NO_x levels occur when the oxidizer is diluted with steam. With a 10% dilution, the NO_x level at the combustion chamber outlet drops to below 4.6 ppm, while at 20%, 30%, and 40% dilution, the levels further decrease to approximately 2.7 ppm, 1.6 ppm, and 1.2 ppm, respectively. In conclusion, when evaluated in terms of NO_x emissions, it can be determined that diluting the oxidizer with steam significantly reduces the NO_x emission levels during coke oven gas combustion.

4. CONCLUSIONS (SONUÇLAR)

- In this study, the effect of adding steam to the oxidizer used in coke oven gas combustion on the combustion characteristics of coke oven gas was numerically investigated. A commercial computational fluid dynamics (CFD) program, Ansys Fluent, was used for the numerical simulations. The models were developed in three dimensions, and post-combustion temperature and emission distributions were presented. Based on the predictions made through the simulations, it was concluded that adding steam to the oxidizer resulted in a slight reduction in temperature levels. However, it was also found that diluting the oxidizer with steam significantly reduced the NO_x emissions from the coke oven gas combustion. Considering all the results, it was concluded that coke oven gas could be used as an alternative fuel, and the high NO_x emissions associated with its combustion could be mitigated by adding steam to the oxidizer. The flue gas temperature at the furnace outlet was measured at 1372 K. When 40% steam was added to the oxidizer, the temperature decreased to 1249 K. The NO_x emission level was 6.9 ppm without adding steam, dropping to 1.2 ppm with the 40% steam addition. Consequently, it can be

observed that adding steam to the oxidizer successfully reduces NO_x emissions without significantly affecting the performance.

ACKNOWLEDGMENTS (TEŞEKKÜR)

The author would like to express their gratitude to TÜBİTAK 2218 and Gazi University for using Ansys Fluent software.

DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS (ETİK STANDARTLARIN BEYANI)

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

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

AUTHORS' CONTRIBUTIONS (YAZARLARIN KATKILARI)

Osman KÜMÜK: He developed the numerical model, conducted the analysis, and wrote the manuscript.

Sayısal modeli geliştirdi, analizleri yaptı ve makaleyi yazdı.

CONFLICT OF INTEREST (ÇIKAR ÇATIŞMASI)

There is no conflict of interest in this study.

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

REFERENCES (KAYNAKLAR)

- [1] Karyeyen S, İlbaş M. Oksitleyiciye su buharı ilavesinin kok fırını gazı yanma davranışlarına olan etkisinin sayısal olarak incelenmesi. Gazi Üniversitesi Fen Bilim Derg Part C Tasarım ve Teknol 2018;6:319–35.
- [2] Ilbas M, Karyeyen S. An experimental and numerical study on turbulent combustion of hydrogen-rich coal gases in a generated non-premixed burner. Fuel 2017;194:274–90.
- [3] Guo Z, Tang H. Numerical simulation for a process analysis of a coke oven. China Particuology 2005;3:373–8.
- [4] Zhao YJ, Feng JX, Huang SP, Hu SY. Analysis and evaluation of the influence of heat storage material on coke oven flue gas exothermic process. Therm Sci 2021;25:1095–108.
- [5] Asai T, Dodo S, Koizumi H, Takahashi H, Yoshida S, Inoue H. Effects of Multiple-Injection-Burner Configurations on Combustion Characteristics for Dry Low-NO_x Combustion of Hydrogen-Rich Fuels. Proc ASME Turbo Expo 2012;2:311–20.
- [6] Lee MC, Yoon J, Joo S, Yoon Y. Gas turbine combustion characteristics of H₂/CO synthetic gas for coal integrated gasification combined cycle applications. Int J Hydrogen Energy 2015;40:11032–45.
- [7] Lee MC, Seo S Bin, Chung JH, Kim SM, Joo YJ, Ahn DH. Gas turbine combustion performance test of hydrogen and carbon monoxide synthetic gas. Fuel 2010;89:1485–91.
- [8] Lee MC, Seo S Bin, Yoon J, Kim M, Yoon Y. Experimental study on the effect of N₂, CO₂, and steam dilution on the combustion performance of H₂ and CO synthetic gas in an industrial gas turbine. Fuel 2012;102:431–8.
- [9] Habib MA, Mokheimer EMA, Sanusi SY, Nemitallah MA. Numerical investigations of combustion and emissions of syngas as compared to methane in a 200 MW package boiler. Energy Convers Manag 2014;83:296–305.
- [10] Tian Y, Zang S, Ge B. Experimental investigation on the combustion performance of N₂ dilution in syngas non-premix combustion in humid air conditions. Appl Therm Eng 2016;107:560–4.
- [11] Li S, Li S, Mira D, Zhu M, Jiang X. Investigation of dilution effects on partially premixed swirling syngas flames using a LES-LEM approach. J Energy Inst 2018;91:902–15.
- [12] Li Z, Yi Q, Zhang Y, Zhou H, Zhao Y, Huang Y, et al. Numerical study and design strategy for a low emission coke oven system using oxy-fuel combustion of coke oven gas. J Clean Prod 2020;252:119656.
- [13] H. K. Versteeg WM. An introduction to computational fluid Dynamics. PEARSON Prentice Hall; 2007.

- [14] M. Ilbas. Studies of ultra low NOX burner. University of Wales, College of Cardiff, UK, 1997.
- [15] Karyeyen S, Feser JS, Gupta AK. Swirl assisted distributed combustion behavior using hydrogen-rich gaseous fuels. Appl Energy 2019;251:113354.

Investigation and Optimization of NPT Taper Threading Operations on St37-2 / S235JR, 11SMnPb37 and C45 (1.0503) Steels on CNC Lathes

Cüneyt KURTULUŞ¹, Emre AYHAN², Ahmet MAVİ^{3*}

¹Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Eğitimi ABD, Ankara, Türkiye

²Gazi Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Elektronik ve Otomasyon Bölümü, Ankara, Türkiye

³Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İmalat Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye

Article Info

Research article

Received: 27/11/2024

Revision: 18/12/2024

Accepted: 23/12/2024

Keywords

NPT
Konik diş
ANOVA
RSM

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi

Başvuru: 27/11/2024

Düzeltilme: 18/12/2024

Kabul: 23/12/2024

Anahtar Kelimeler

NPT
Tapered Thread
ANOVA
RSM

Grafik Özet (Graphical/Tabular Abstract)



Şekil: Deneylerin yapılışı / Figure: / Conducting experiments

Grafik Özet (Graphical/Tabular Abstract) Çalışmada CNC tezgâhlarda konik diş açma işlemlerinde etkin parametrelerin belirlenmesi ve deney sonuçlarından elde edilen modeller sunulmaktadır. In this study, the determination of effective parameters in bevel threading operations on CNC machines and models obtained from experimental results are presented.

Önemli noktalar (Highlights)

- Etkin parametrenin tespiti / Determination of the effective parameter
- Varyans analizi / Variance analysis
- Optimum kesme parametrelerinin tespiti / Determination of optimum cutting parameters

Amaç (Aim): Bu çalışmada, sanayide konik diş açma işlemlerinde kullanılan farklı kimyasal bileşimlere ve mekanik özelliklere sahip üç farklı malzemenin işlenmesi sırasında optimum kesme parametreleri ve etkin parametrenin tespiti için analizler yapılmıştır. Yapılan analizler sonucunda etkin parametre belirlenmiştir. / In this study, analyses were performed to determine the optimum cutting parameters and effective parameters during the machining of three different materials with different chemical compositions and mechanical properties used in conical gear cutting operations in the industry. As a result of the analyses, the effective parameter was determined

Özgünlük (Originality): Bu çalışmanın özgünlüğü, konik diş açma işlemlerinde kullanılacak istatistiksel modellerin elde edilmesidir. / The originality of this study is to obtain statistical models that can be used in taper threading operations.

Bulgular (Results): Yapılan deneyler sonucunda kesme kuvvetleri ile kesme hızı arasında ters orantı olduğu tespit edilmiştir. Yapılan istatistiksel analizlerde esas kesme kuvvetinin oluşmasında en etkin parametrenin sertlik olduğu anlaşılmıştır. / As a result of the experiments, it was determined that there is an inverse relationship between cutting forces and cutting speed. Statistical analysis revealed that hardness is the most effective parameter in the formation of the main cutting force.

Sonuç (Conclusion): ANOVA sonuçlarına göre F_c ve α değerleri üzerinde en büyük etkiye malzeme sertliğinin sahip olduğu tespit edilmiştir. Optimum değerlerin 11SMnPb37 malzemenin TiAlN PVD kaplamalı takım kullanılarak 63,6364 m/dak kesme hızında işlendiğinde elde edileceği sonucuna ulaşılmıştır. / According to the ANOVA results, it was found that the material hardness had the greatest effect on F_c and α values. It was concluded that the optimum values will be obtained when 11SMnPb37 material is machined at a cutting speed of 63.6364 m/min using TiAlN PVD coated tool.



CNC Torna Tezgâhlarında St37-2 / S235JR, 11SMnPb37 ve C45 (1.0503) Çeliklerine NPT Konik Diş Açma İşlemlerinin İncelenmesi Ve Optimizasyonu

Cüneyt KURTULUŞ¹ , Emre AYHAN² , Ahmet MAVİ^{3*}

¹Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Eğitimi ABD, Ankara, Türkiye

²Gazi Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Elektronik ve Otomasyon Bölümü, Ankara, Türkiye

³Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İmalat Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 27/11/2024
Düzeltilme: 18/12/2024
Kabul: 23/12/2024

Anahtar Kelimeler

NPT
Konik diş
ANOVA
RSM

Öz

Bu çalışmada, farklı sertliğe sahip malzemeler (St37-2/S235JR, 11SMnPb37 ve C45(1.0503)) üzerine NPT konik diş açma işlemi uygulanmış ve işleme parametrelerinin esas kesme kuvveti (F_c) ve eğim (α) üzerine etkileri deneysel olarak araştırılmıştır. Deneylerde dört farklı kesme hızı (50, 60, 70 ve 80 m/dak), 1,411 mm/dev adım ve PVD yöntemi ile kaplanmış iki farklı kaplamalı kesici takım (AlCrN+ AlCrSiN, TiAlN) kullanılmıştır. Kesme derinliği ise tüm deneylerde sabit 1,015 mm alınmıştır. Deney sonuçları üzerinde etkin parametrelerin belirlenmesi için varyans analizi (ANOVA) yapılarak, yanıt yüzeyi metodolojisi (RSM) yöntemiyle optimum işleme parametreleri tespit edilmiştir. ANOVA sonuçlarına göre F_c ve α değerleri üzerinde en büyük etkiye malzeme sertliğinin sahip olduğu tespit edilmiştir. Optimum değerlerin 11SMnPb37 malzemenin TiAlN PVD kaplamalı takım kullanılarak 63,6364 m/dak kesme hızında işlendiğinde elde edileceği sonucuna ulaşılmıştır.

Investigation and Optimization of NPT Taper Threading Operations on St37-2 / S235JR, 11SMnPb37 and C45 (1.0503) Steels on CNC Lathes

Article Info

Research article
Received: 27/11/2024
Revision: 18/12/2024
Accepted: 23/12/2024

Keywords

NPT
Tapered Thread
ANOVA
RSM

Abstract

In this study, NPT taper threading was performed on materials with different hardness (St37-2/S235JR, 11SMnPb37 and C45(1.0503)) and the effects of machining parameters on the main cutting force (F_c) and rake (α) were experimentally investigated. Four different cutting speeds (50, 60, 70 and 80 m/min), 1.411 mm/rev pitch and two different coated cutting tools (AlCrN+ AlCrSiN, TiAlN) coated by PVD method were used in the experiments. The depth of cut was taken as constant 1.015 mm in all experiments. Analysis of variance (ANOVA) was performed to determine the effective parameters on the experimental results and the optimum machining parameters were determined by response surface methodology (RSM). According to the ANOVA results, it was found that the material hardness had the greatest effect on F_c and α values. It was concluded that the optimum values will be obtained when 11SMnPb37 material is machined at a cutting speed of 63.6364 m/min using TiAlN PVD coated tool.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Konik vida işleme, otomotiv, havacılık, uzay, gemi yapımı ve diğer birçok endüstrideki uygulamalar için büyük öneme sahiptir. Konik vida açma hassas ve karmaşık bir işlemdir. Bu işlem özellikle ağır yüklerin taşınması ve geniş sıcaklık aralıklarında iş görececek yüksek kaliteli, dayanıklı parçaların üretilmesi için kullanılmaktadır. Konik vida açmada işleme parametrelerinin doğru tayin edilmesi ürünün performansı ve güvenilirliği üzerinde büyük bir etkiye sahiptir [1-2]. Yapılan araştırmalar konik vida açma işlemleri üzerinde, kesme hızı, ilerleme

hızı, kesme derinliği, iş parçası ve takım malzemesi, soğutma ve yağlama teknikleri gibi çeşitli faktörlerin etkisi olduğunu ortaya koymuştur [3]. Özellikle koniklik oranı, adım, devir sayısı ve ilerlemenin işleme üzerinde etkin parametreler olduğu görülmektedir [4].

Koniklik, torna tezgâhındaki iş parçasının vida profili boyunca döndürülen konik yüzeyin çapını belirler. Bu parametre, vida açma işlemi sırasında yüzeyin genel şekli ve eğim açısını etkiler. Genellikle, konik çapın daha büyük olması, daha geniş bir vida profili ve daha düşük bir eğim açısı

anlamına gelmektedir [5]. Adım genellikle milimetre cinsinden ölçülür ve daha büyük bir adım, daha geniş vida profilleri oluşturur. Ancak, adımın çok büyük olması vida profilinin kalitesini düşürebilir, bu nedenle adım büyüklüğü işleme sürecinde literatür incelemesi ve standartlara dikkat edilerek seçilmelidir [6]. Devir sayısı, iş parçasının işleme sırasında ne kadar hızlı döndüğünü belirler. Daha yüksek bir devir sayısı, daha hızlı bir işleme süreci anlamına gelir, aynı zamanda daha yüksek ısı stres ve potansiyel olarak daha düşük vida kalitesi riskini de beraberinde getirir. İlerleme, torna tezgâhındaki kesici aletin iş parçası boyunca ne kadar hızlı hareket ettiğini belirler. Daha yüksek bir ilerleme hızı, daha hızlı bir işleme süreci anlamına gelir, ancak aynı zamanda daha yüksek aşınma ve potansiyel olarak daha düşük vida kalitesi riskini de beraberinde getirir [7].

Konik vida açma işlemleri ve parametrelerine dair yapılan son çalışmalar, parametrelerin belirli bir CNC torna tezgâhında konik vida açma işleminin genel performansı ve kalitesi üzerinde doğrudan etkisi olduğunu göstermektedir. Tsai ve Wang konik vida açma işlemlerinde kesme parametrelerinin işleme hızı, iş parçası malzemesi ve kesici takım malzemesi gibi faktörlerle karmaşık bir yapıda olduğunu belirtmiştir. Aynı çalışmada, konik vida işleme parametrelerini optimize etmek için genetik algoritma ve Taguchi tekniğini kullanmışlardır. Çalışmada, uygulanan tekniklerin konik vida işleme işlemlerinin verimliliğini ve kalitesini önemli ölçüde artırabileceği sonucuna varılmıştır [8].

Diğer bir önemli çalışma, konik vida işleme işlemlerinde kesme hızının ve ilerlemenin etkisini inceleyen Li ve diğerleri (2008) tarafından yapılmıştır. Çalışma, yüksek bir kesme hızının ve ilerlemenin, daha hızlı bir işleme sürecine ve daha yüksek bir talaş kaldırma hızına yol açabileceğini, ancak aynı zamanda kesici aletin daha hızlı aşınmasına ve işleme kalitesinin düşmesine neden olabileceğini bulmuştur. Bu nedenle, optimum kesme hızı ve ilerlemenin seçilmesi, konik vida işleme işlemlerinin genel performansını en üst düzeye çıkarırken kesici aletin aşınmasını en aza indirebileceği vurgulanmıştır [9].

Jin ve Zhang (2009) tarafından yapılan bir çalışmada, CNC torna tezgâhlarında konik vida işleme işlemlerinin en iyileştirilmesine odaklanılmıştır. Bu çalışmada, işleme parametrelerini optimize etmek için genetik algoritma kullanılmıştır. Sonuçlar, bu yaklaşımın konik vida işleme işlemlerinin verimliliğini ve

kalitesini önemli ölçüde artırabileceğini göstermiştir [10].

Bir başka çalışmada Liao ve Chen (2010), konik vida işleme işlemlerinde kesme hızının, ilerlemenin ve derinliğin etkisini incelemiştir. Çalışma, yüksek bir kesme hızının ve ilerlemenin, daha hızlı bir işleme sürecine ve daha yüksek bir talaş kaldırma hızına yol açabileceğini, ancak aynı zamanda kesici aletin daha hızlı aşınmasına ve işleme kalitesinin düşmesine neden olabileceğini bulmuştur. Bu nedenle, optimum kesme hızı ve ilerlemenin seçilmesi, konik vida açma işlemlerinin genel performansını en üst düzeye çıkarırken kesici aletin aşınmasını en aza indireceği vurgulanmıştır [11].

Literatürde NPT konik diş açma yöntemi ile yapılan işleme süreçlerinin istatistiksel analizi ve yanıt yüzeyi metodolojisi (RSM) kullanılarak optimum işleme parametrelerinin belirlenmesi üzerine yapılan çalışmaların kısıtlı olduğu görülmektedir. RSM, problemler için en uygun çözümü elde etmek amacıyla tasarlanmış deneyler dizisi kullanan bir yöntem olması sebebiyle işleme operasyonlarının optimizasyonu için tercih edilmektedir [12]. Makadia ve Nanavati, tornalama işlemleri sonucunda yüzey pürüzlülüğünü azaltmak için, RSM yöntemini kullanarak işleme parametrelerinin optimizasyonu üzerine çalışmıştır [13]. Neşeli ve arkadaşları, yüzey pürüzlülüğü değerlerini düşürmek amacıyla RSM yöntemini AISI 1040 çeliğinin tornalanmasında kullanarak, işleme parametrelerinin optimizasyonunu gerçekleştirmiştir [14]. Kumar Gupta ve arkadaşları, titanyum alaşımının tornalama işlemlerinde kesme hızı, ilerleme hızı ve yaklaşma açısı gibi işleme parametrelerinin ve kesme sıvılarının RSM'ye dayalı optimizasyonu üzerine çalışmıştır [15].

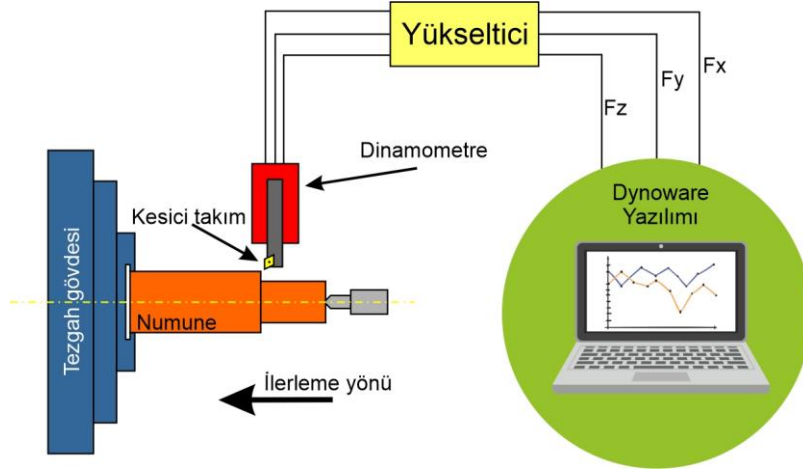
Bu çalışma ile konik vida açma işlemi üzerinde parametrelerin etkisi yapılacak olan deneyler ile incelenecek olup, istatistiksel yöntemler aracılığıyla optimum sonuçların elde edileceği vida açma parametreleri tespit edilecektir. Bu sayede süreç ile ilişkili parametrelerin incelenmesi ve anlaşılması için etkin bir yol sağlayacaktır.

2. MATERYAL VE METOD (MATERIAL AND METHOD)

2.1. Deney Düzenegi (Experimental Setup)

Deneyisel çalışmalar Gazi Üniversitesi İmalat Mühendisliği bölümü Makine atölyesinde bulunan iş mili hızı en fazla 3500 devir/dakika ve 10 kW güce sahip Johnford TC35 CNC torna tezgâhi

kullanılarak yapılmıştır. Deneylerin yapılması ve kesme kuvvetlerinin ölçümü için kullanılan düzenek Şekil 1’de verilmiştir.



Şekil 1. Kesme kuvveti ölçümü için deney düzeneği (The experimental setup for cutting force measurement)

2.2. İşparçası (Workpiece)

Deney malzemesi olarak otomat çeliği (11SMnPb37), transmisyon çeliği (St 37-2 / S235JR) ve C45 çeliği (1.0503) kullanılmıştır. Deney numunelerinin boyutları 260 mm boy ve 30 mm çapında olup, deney yapılacak kısımlar NPT 3/8 standardında tornalanarak hazırlanmıştır. Deney numunelerinin içeriği Tablo 1’de ve numunelere ait mekanik özellikler Tablo 2’de verilmiştir.

2.3 Takım (Tool)

Deneylerde kesici takım olarak, Kraft marka ER16-8NPT KR1020(2-4 µm TiAlN PVD ultra ince tanecikli kaplama), KR1220(2-4 µm nano AlCrN +

AlCrSiN PVD ultra ince tanecikli kaplama) olmak üzere iki çeşit dış vida sert maden uç kullanılmıştır. Kesici takımlara ait özellikler Şekil 2’de verilmiştir [16].

Kesici uç profili NPT dış açma işlemlerine uygun olup her deney için yeni bir takım ucu kullanılmıştır. Deneyler kesici takım firmasının önerileri ve literatürde belirtilen değerler dikkate alınarak 4 farklı kesme hızında (50, 60, 70 ve 80 m/dak) gerçekleştirilmiştir. Vida adımı olarak 1.411 mm ilerleme miktarı alınmıştır. Deneyler için CNC torna tezgâhında G76 dış açma döngüsü standartlara göre programlanmıştır.

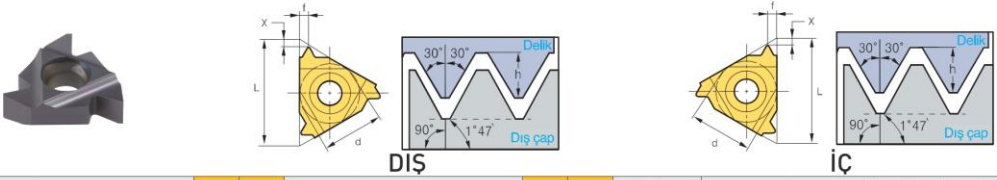
Tablo 1. Deney numunelerinin içerikleri (Contents of test specimens)

	İçerik (%)								
	C	Mn	P	S	N	Cu	Si	Pb	CR
St 37-2 / S235JR	0.2	1.4	0.04	0.04	0.012	0.55	-	-	-
11SMnPb37	0.14	1-1.5	0.11	0.34-0.4	-	-	0.05	0.2-0.35	-
C45 (1.0503)	0.43-0.5	0.5-0.8	0.045	0.045	-	-	0.4	-	0.4

Tablo 2. Deney numunelerinin mekanik özellikleri (The properties of the test specimens)

	St 37-2 / S235JR	11SMnPb37	C45 (1.0503)
Sertlik (HB)	195	205	177
Çekme dayanımı (MPa)	401	605	710
Akma dayanımı (MPa)	225	375	305
Kopma uzaması (%)	25	8	7

NPT BORU DİŞ (NPT)



Kod (Dış)	KR1020	KR1220	Kod (İç)	KR1020	KR1220	Hatve (tpi)	Boyutlar (mm)				
							d	L	hmin	X	f
ER 11-27NPT	●	●	NR 11-27NPT	●	●	27	6.35	11	0.66	0.7	0.8
11-18NPT	●	●	11-18NPT	●	●	18	6.35	11	1.01	0.8	1.0
11-14NPT	●	●	11-14NPT	●	●	14	6.35	11	1.33	0.8	1.0
16-27NPT	●	●	16-27NPT	●	●	27	9.525	16	0.66	0.7	0.8
16-18NPT	●	●	16-18NPT	●	●	18	9.525	16	1.01	0.8	1.0
16-14NPT	●	●	16-14NPT	●	●	14	9.525	16	1.33	0.9	1.2
16-11.5NPT	●	●	16-11.5NPT	●	●	11.5	9.525	16	1.64	1.1	1.5
16-8NPT	●	●	16-8NPT	●	●	8	9.25	16	2.42	1.3	1.8

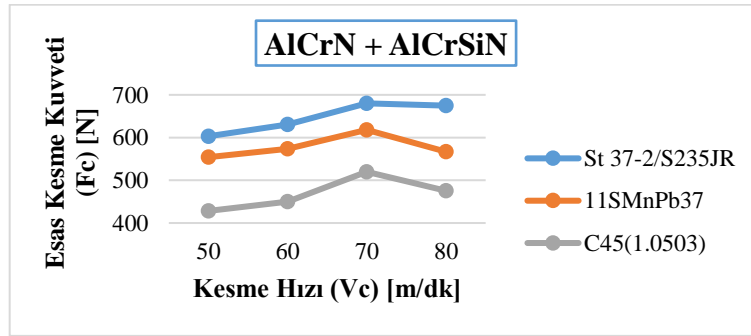
Şekil 2. NPT kaplamalı kesici uç teknik resmi ve sınıflandırması (Technical drawing and classification of npt coated cutting insert)

3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR (EXPERIMENTAL STUDIES)

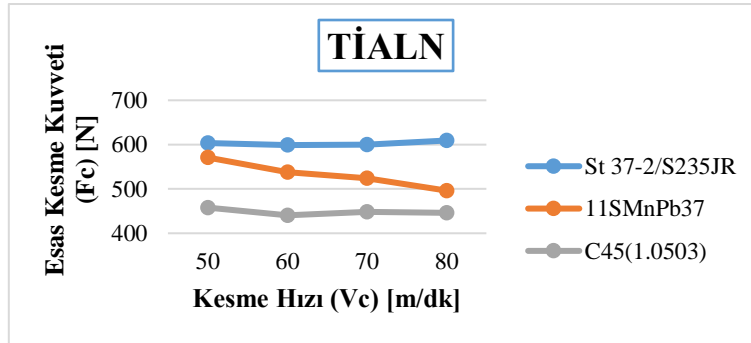
Bir önceki bölümde belirlenen deney parametreleri kullanılarak çalışma kapsamında 24 deney yapılmıştır. Kesme kuvvetlerinin ölçümleri deneyler ile eşzamanlı olarak KISTLER 9257B dinamometre kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu dinamometre “KISTLER Type 5019” bir sinyal yükselticiye (Multichannel Charge Amplifier) bağlanmış ve kesme kuvvetleri RS-232C ara kablo ile bilgisayara gönderilerek “DynoWare Type

2825A1-2” programı ile grafikler elde edilmiştir. Çalışmada değerlendirilecek olan NPT diş profili, adım ve eğim gibi verilerin ölçülmesi ise CARMAR RATIONAL CPJ 3015 profil projektör cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Tablo 3’te deney parametreleri ve deneylere ait sonuçlar verilmiştir.

Fc sonuçlarının yorumlanması amacıyla Şekil 3 ve Şekil 4’te verilen grafikler oluşturulmuştur. Söz konusu grafikler deney numunelerinin farklı kesme hızlarında ölçülen Fc değerlerini göstermektedir.



Şekil 3. AlCrN+ AlCrSiN PVD kaplamalı takım kullanılan deneylere ait Fc grafiği (Fc graph of experiments using AlCrN+ AlCrSiN PVD coated tools)



Şekil 4. TiAlN PVD kaplamalı takım kullanılan deneylere ait Fc grafiği (Fc graph of experiments using TiAlN PVD coated tools)

Tablo 3. Deney sonuçları tablosu (Experimental results)

Deney No	Deney Parametreler			Deney Sonuçları		
	Kesme Hızı (V_c) [m/dk]	Malzeme Sertliği (M) [HB]	Kesici Takım Kaplaması (K_j)*	Esas Kesme Kuvveti (F_c) [N]	Eğim Açısı (α) [°]	Adım (P) [mm]
1	50	195	AlCrN+ AlCrSiN PVD	554.10	1.8167	1.407
2	60	195	AlCrN+ AlCrSiN PVD	573.74	1.8167	1.407
3	70	195	AlCrN+ AlCrSiN PVD	618.06	1.8167	1.407
4	80	195	AlCrN+ AlCrSiN PVD	566.87	1.8000	1.407
5	50	205	AlCrN+ AlCrSiN PVD	428.29	1.8167	1.411
6	60	205	AlCrN+ AlCrSiN PVD	450.12	1.8000	1.411
7	70	205	AlCrN+ AlCrSiN PVD	519.86	1.8000	1.411
8	80	205	AlCrN+ AlCrSiN PVD	475.69	1.7667	1.411
9	50	177	AlCrN+ AlCrSiN PVD	603.06	1.7667	1.410
10	60	177	AlCrN+ AlCrSiN PVD	630.20	1.7833	1.410
11	70	177	AlCrN+ AlCrSiN PVD	680.09	1.8000	1.410
12	80	177	AlCrN+ AlCrSiN PVD	674.88	1.8000	1.410
13	50	195	TiAlN PVD	570.90	1.8000	1.408
14	60	195	TiAlN PVD	537.80	1.8000	1.408
15	70	195	TiAlN PVD	524.15	1.8167	1.408
16	80	195	TiAlN PVD	496.24	1.8167	1.408
17	50	205	TiAlN PVD	457.88	1.7833	1.411
18	60	205	TiAlN PVD	440.51	1.7833	1.411
19	70	205	TiAlN PVD	448.12	1.7667	1.411
20	80	205	TiAlN PVD	446.21	1.7667	1.411
21	50	177	TiAlN PVD	603.57	1.7667	1.410
22	60	177	TiAlN PVD	599.02	1.8000	1.410
23	70	177	TiAlN PVD	600.21	1.8167	1.410
24	80	177	TiAlN PVD	609.32	1.8333	1.410

*Çalışmanın devamında AlCrN+ AlCrSiN PVD K_1 ile TiAlN PVD ise K_2 ile ifade edilecektir.

Şekil 3 ve Şekil 4 incelendiğinde, Her iki kesici takım için de en iyi sonucun C45(1.0503) malzemede elde edildiği bunu sırasıyla 11SMnPb37

ve St 37-2 malzemelerin takip ettiği görülmektedir. En düşük kesme kuvvetlerinin TiAlN kaplamalı takımları için en yüksek kesme hızında, AlCrN+

AlCrSiN takımlarda ise en düşük kesme hızlarında ölçüldüğü görülmektedir. Şekillerde TiAlN kaplamalı takımların AlCrN+ AlCrSiN takımlara oranla daha düşük kesme kuvvetleri oluşturduğu görülmektedir. Ayrıca TiAlN kaplamalı takımlarla yapılan vida açma işlemlerinde kesme hızlarının artması ile esas kesme kuvvetlerinde bir düşüşün olduğu görülmektedir. Bu eğilim başlıca nedeni, talaşlı imalat işlemlerinde kullanılan güç çoğunlukla kayma düzleminde, kesici uç çevresinde ısıya dönüşür. Kayma düzleminde oluşan ısının büyük bir bölümü talaşa atılır ancak belli bir miktar ısı iş parçasına iletilir. İletilen bu ısı iş parçasının sertliğini azaltır. Sertlik azaldığında süneklik artacağından iş parçasından talaş kaldırmak kolaylaşır [17].

Ancak AlCrN+ AlCrSiN kaplamalı takımlarla yapılan işlemlerde kesme hızının artması ile esas kesme kuvvetlerinde bir artış eğilimi görülmektedir. Bu durumun sebebi, kesici takımlardaki aşınma miktarları ölçülmemekle birlikte; kesme hızının artmasıyla, iş parçası ve kesici takım arasında meydana gelen sürtünme, işlem sırasında ısının artmasına yol açar. Kesme işleminde ısının büyük kısmı kesici takımın ucunda birikir. Kesme hızının

artması, bu ısının daha hızlı bir şekilde oluşmasına ve dolayısıyla kesici takımın aşınma oranının artmasına yol açar. Bu, kesme kesici takımın ömrünü kısaltır ve işlem sırasında daha fazla güç harcanmasına neden olur [18].

Çalışmada, NPT konik diş açma işlemi üzerine işleme parametrelerinin etkisini somut olarak ortaya koymak amacıyla istatistiksel yöntemlerden faydalanılmıştır. Bu amaçla Minitab programında yer alan Yanıt Yüzeyi Metodolojisi (RSM) yaklaşımı kullanılmıştır. Bu yöntem süreçleri geliştirmek, iyileştirmek ve optimize etmek amacıyla kullanılan istatistiksel ve matematiksel bir yöntemdir [19]. Yanıt yüzeyi metodu deneysel çalışma ile bağımsız değişkenleri açıklayabilmek, verim ile değişkenler arasındaki bağıntıları elde etmek, ampirik istatistiksel modelleme ile süreç değişkenlerinin değerlerini bulmak için kullanılmaktadır [20].

Yanıt yüzeyi metodu kullanılarak esas kesme kuvveti (F_c) ve eğim açısı (α) için modeller oluşturulmuştur. Söz konusu modellere ait performans değerleri Tablo 4'te verilmiştir.

Tablo 4. Modellere ait performans parametreleri (Performance parameters of the models)

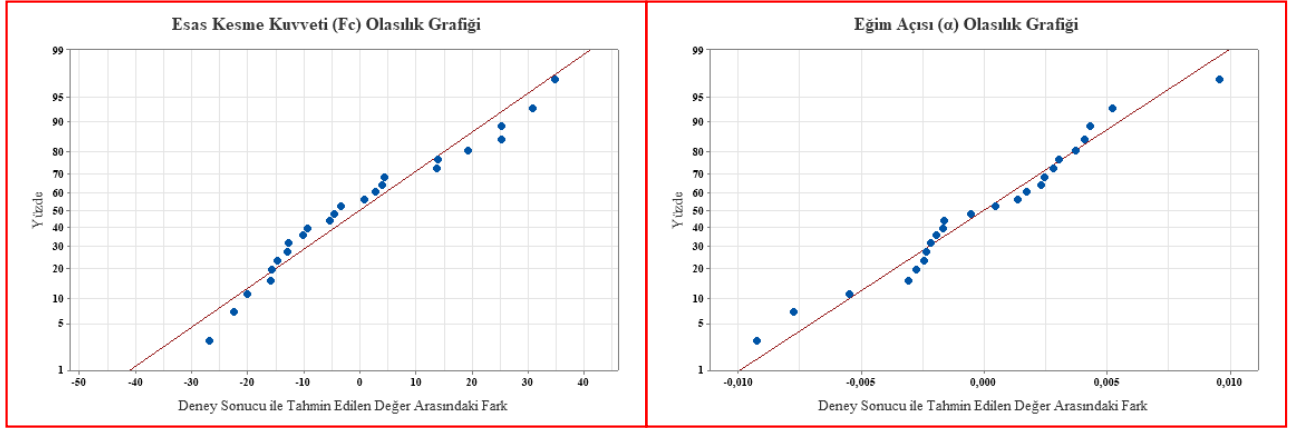
	S	R-sq (%)	R-sq(adj) (%)	R-sq(pred) (%)
F_c	21.8692	94.69	91.87	86.45
α	0.0052901	95.47	93.05	90.17

Tablo 4'te yer alan S parametresi, deney sonuçları ile modelin elde ettiği sonuçlar arasındaki farkın standart sapmasını ifade etmektedir. R-sq parametresi deney sonuçları ile modelin elde ettiği sonuçların uyumunu oransal olarak ifade etmektedir. R-sq(adj) parametresi, model tarafından hesaplanan sonuçların varyasyonunun, deney sayısına göre modeldeki tahminlerin ayarlanmış yüzdesini ifade etmektedir. R-sq(pred) parametresi ise modelin yeni deneylerin sonuçlarını tahmin ettiğinin oransal olarak göstergesidir.

Şekil 5'te modellerden elde edilen olasılık grafikleri verilmiştir. Grafiklerde yanıtların normal dağıldığı görülmektedir. Bu durum ANOVA analizinin yanıtları analiz etmek için uygun olduğunu ortaya koymaktadır. Modellere ait ANOVA sonuçları Tablo 5'te verilmiştir.

Tablo 5'teki F-değerleri incelendiğinde kesme kuvveti üzerinde malzeme sertliğinin en büyük etkiye sahip olduğu anlaşılmaktadır. Malzeme sertliğini kaplama türü ve kesme hızı takip etmektedir. Eğim açısı üzerinde ise sırasıyla malzeme sertliği, kesme hızı ve kaplama türü parametrelerinin etkin olduğu anlaşılmaktadır.

Tablo 5'te yer alan P-değerleri ise ilgili faktörün kesme kuvveti ve eğim üzerindeki istatistiksel önemini temsil etmektedir. P-değerinin 0.05 değerinden düşük veya eşit olmasının ilgili faktörün model için istatistiksel olarak anlamlı olduğu ifade edilmektedir [21]. Modellerin hesapladığı katsayılar ve bu katsayıların istatistiksel anlamlılığı dikkate alınarak elde edilen regresyon denklemleri Eşitlik 1-4 arasında Tablo 6'da verilmiştir.

Şekil 5. Fc ve α için olasılık grafikleri (Probability plots for Fc and α)Tablo 5. Fc ve α modellerine ait varyans analizi (ANOVA) sonuçları (ANOVA results for Fc and α models)

Terim	Serbestlik Derecesi	F_c					α				
		Düzeltilmiş Kareler Toplamı	Düzeltilmiş Ortalama Kareler Toplamı	F-Değeri	Yüzde Katkı Oranı (%)	P-Değeri	Düzeltilmiş Kareler Toplamı	Düzeltilmiş Ortalama Kareler Toplamı	F-Değeri	Yüzde Katkı Oranı (%)	P-Değeri
Model	8	128046	16006	33.47	8.12	0.000	0.008839	0.001105	39.48	7.95	0.000
Doğrusal etki	3	120534	40178	84.01	20.39	0.000	0.000806	0.000269	9.60	1.93	0.001
V_c	1	936	936	1.96	0.48	0.182	0.000366	0.000366	13.07	2.63	0.003
M	1	111167	111167	232.44	56.43	0.000	0.000434	0.000434	15.50	3.12	0.001
K_j	1	8430	8430	17.63	4.28	0.001	0.000006	0.000006	0.22	0.04	0.644
Karelerin etkisi	2	8004	4002	8.37	2.03	0.004	0.002539	0.001270	45.36	9.13	0.000
$V_c \times V_c$	1	758	758	1.58	0.38	0.227	0.000185	0.000185	6.60	1.33	0.021
M x M	1	7246	7246	15.15	3.68	0.001	0.002354	0.002354	84.12	16.94	0.000
İkili etkileşim	3	6220	2073	4.33	1.05	0.022	0.005933	0.001978	70.67	14.23	0.000
$V_c \times M$	1	366	366	0.76	0.18	0.396	0.003781	0.003781	135.12	27.21	0.000
$V_c \times K_j$	1	5420	5420	11.33	2.75	0.004	0.000752	0.000752	26.87	5.41	0.000
M x K_j	1	433	433	0.91	0.22	0.356	0.001400	0.001400	50.03	10.07	0.000
Hata	15	7174	478				0.000420	0.000028			
Toplam	23	135220		411,94			0.009259		496,64		

Tablo 6. Regresyon denklemleri (Regression equations)

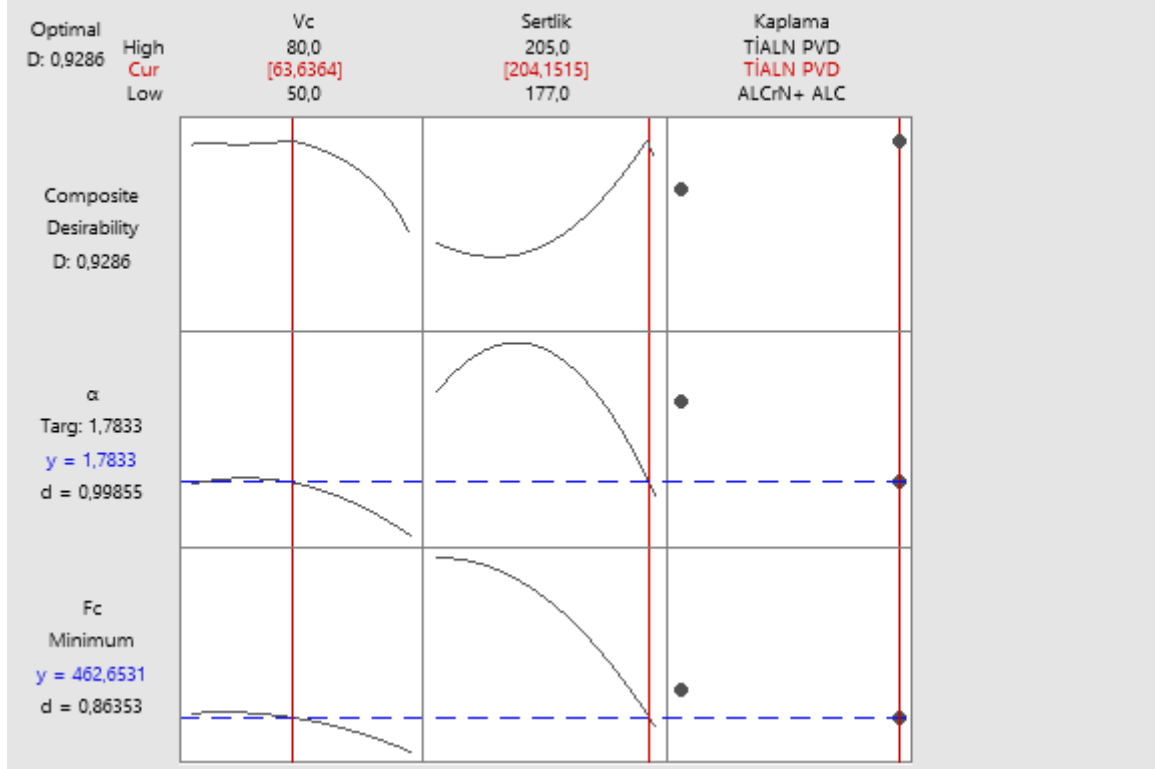
K_j	Regresyon Denklemi	Eşitlik Numarası
K_1	$F_c = -6492 + 14.97V_c + 74.9M - 0.0562V_c^2 - 0.2075M^2 - 0.0301V_cM$	Eşitlik 1
	$\alpha = -3.863 + 0.02197V_c + 0.05178M - 0.000028V_c^2 - 0.000118M^2 - 0.000097V_cM$	Eşitlik 2
K_2	$F_c = -6495 + 12.28V_c + 75.7M - 0.0562V_c^2 - 0.2075M^2 - 0.0301V_cM$	Eşitlik 3
	$\alpha = -3.678 + 0.02297V_c + 0.05046M - 0.000028V_c^2 - 0.000118M^2 - 0.000097V_cM$	Eşitlik 4

İki farklı kesici takım kaplaması kullanılması ve bu parametrenin kategorik değişken olması sebebiyle 4 farklı eşitlik elde edilmiştir. Esas kesme kuvveti ve eğim açısı için oluşturulan modeller ile deney setinde yer almayan parametreler için değerlerin hesaplanabilmesi mümkün kılınmaktadır. Ayrıca bu çalışmada, esas kesme kuvveti ve eğim açısı için

optimum sonuçların elde edilebileceği işleme parametrelerinin belirlenmesi üzerine de çalışmalar yapılmıştır. Bu noktada esas kesme kuvveti ve eğim açısı için istenen koşullar eş zamanlı dikkate alınarak çok kriterli karar verme yaklaşımı kullanılmıştır. Esas kesme kuvveti ve eğim açısının optimizasyonu için Minitab programında yer alan

“Response Optimizer” modülü kullanılmıştır. Optimizasyonda esas kesme kuvveti için en küçük, eğim açısının ise $1^{\circ} 47'$ (1.7833°) olması hedef

olarak belirlenmiştir. Optimizasyon sonuçları Şekil 7’de verilmiştir.



Şekil 7. “Response Optimizer” sonuçları (Response Optimizer results)

Şekil 7’den görüleceği üzere belirlenen optimizasyon koşullarının sertliği 204.1515 HB olan malzemenin TiAlN PVD kaplamalı takım ile 63.6364 m/dak kesme hızında işlendiğinde elde edileceği sonucuna varılmıştır. Deneylerde kullanılan 11SMnPb37 malzemenin sertliği 205 HB olması sebebiyle, optimum koşulların sağlanacağı malzeme olarak seçilebileceği ifade edilebilir. Yine Şekil 7’de verilen D (desirability) değeri istatistikte ve optimizasyon çalışmalarında bir sürecin veya sonuçların istenen bir hedefe ne kadar yaklaştığını ölçmek için kullanılan bir metriği ifade etmektedir. D değeri 0 ile 1 arasında bir sayıdır. 1’e yakın D değeri, sonuçların çok kriterli karar vermede başarılı olduğu anlamına gelir. Çalışmada elde edilen D değeri (0.9286) kabul edilebilir bir değerdir [22].

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Çalışmada standartlara uygun NPT konik diş açma işlemi üzerinde işleme parametrelerinin etkisini gözlemlemek adına deneyler yapılmıştır. Yapılan deneylerde malzeme sertliğinin, kesici takım

kaplamasının ve kesme hızı değerlerinin etkisi incelenerek sonuçlar elde edilmiştir.

Yapılan deneyler sonucunda en düşük kesme kuvvetinin C45(1.0503) malzemede ve en yüksek kesme hızında (80 m/dk)’da ölçüldüğü görülmüştür. En düşük kesme kuvvetlerinin TiAlN kaplamalı takımları için en yüksek kesme hızında, AlCrN+ AlCrSiN takımlarda ise en düşük kesme hızlarında ölçüldüğü görülmektedir.

Yapılan ANOVA analizine göre esas kesme kuvveti ve eğim açısı sonuçlarında en büyük etkiye malzeme sertliğinin sahip olduğu bilgisine ulaşılmıştır. Çalışmanın devamında, NPT konik diş açma işleminde optimum sonuçların elde edilebileceği parametreler RSM yöntemi kullanılarak elde edilmiştir. Esas kesme kuvvetinin en küçük olması, eğim açısının ise 1.7833° ($1^{\circ} 47'$) olması hedeflenerek yapılan optimizasyon sonucunda 11SMnPb37 malzemenin TiAlN PVD kaplamalı takım ile 63.6364 m/dak kesme hızında işlenmesi gerektiği sonucu elde edilmiştir. Ayrıca, çalışmada elde edilen denklemler (Eşitlik 1-4) kullanılarak farklı parametreler için esas kesme kuvveti ve eğim açısı değerleri kabul edilebilir doğrulukta hesaplanabilmektedir.

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)

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

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

Emre AYHAN: Elde edilen deney sonuçlarını analiz etmiş ve makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

He analyzed the experimental results and completed the writing process of the article.

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

He conducted the experiments, analyzed the results and performed 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] Show, M. C. (2005). Metal Cutting Principles. New York: Oxford University Press. Tutunea, D. F., & Marginean, G. (2013). CNC Machining Technology. Volume III: Procedures. Sibiu: "Lucian Blaga" University.
- [2] Jin, X., & Zhang, D. (2009). Multi-objective optimization of turning process in view of machining efficiency and carbon emission. Journal of Cleaner Production, 17(16), 1478-1487.
- [3] Lin, S. C., & Chen, I. K. (2012). The CNC system with thread cutting function. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 62(5-8), 771-778.
- [4] Nasr, M. N. A., & Kamrani, A. K. (2006). A new methodology for extracting manufacturing features from CAD system. Computers & Industrial Engineering, 51(3), 389-415.
- [5] Brecher, C., Esser, M., & Witt, S. (2015). Interaction of manufacturing process and machine tool. CIRP Annals, 64(2), 588-609.
- [6] Bolt, P. (2015). CNC Control Setup for Milling and Turning. New York: Industrial Press.
- [7] Das, A., Patel, S. K., Hotta, T. K., & Biswal, B. B. (2019). Statistical analysis of different machining characteristics of EN-24 alloy steel during dry hard turning with multilayer coated cermet inserts. Measurement, 134, 123-141.
- [8] Duzen, H., & Acar, E. (2016). Effects of cutting parameters on vibration and sound pressure level in turning of AISI 304 austenitic stainless steels. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 82(5-8), 1185-1196.
- [9] Tsai, M. Y., & Wang, P. J. (2007). Optimization of multi-pass turning with genetic algorithm and Taguchi's technique. Journal of Materials Processing Technology, 209(2), 661-667.
- [10] Li, H., Liu, Y., & Zhang, D. (2008). Tool life and surface roughness in machining 20CrMnTi alloy with coated carbide tool under different cooling/lubrication conditions. International Journal of Refractory Metal and Hard Materials, 26(3), 189-198.
- [11] Jin, X., & Zhang, Y. (2009). Research on cutting parameters for finish turning based on the taguchi method. Journal of Materials Processing Technology, 209(8), 3809-3814.
- [12] Liao, Y. S., & Chen, Y. C. (2010). A study on the high-speed finish turning of AISI 4340 hardened alloy steel by Al₂O₃/TiC mixed ceramic tool. Journal of Materials Processing Technology, 210(15), 2245-2251.
- [13] Mohsen Soori, Mohammed Asmael. (2022). A Review of the Recent Development in Machining Parameter Optimization. Jordan Journal of Mechanical and Industrial Engineering, 16 (2), 205-223.
- [14] Makadia, A.J.; Nanavati, J. (2013). Optimization of machining parameters for turning operations based on response surface methodology. Measurement, 46(4), 1521-1529.
- [15] Neşeli, S.; Yıldız, S.; Türkeş, E. (2011). Optimization of tool geometry parameters for turning operations based on the response surface methodology. Measurement, 44(3), 580-587.
- [16] Gupta, M.K.; Sood, P.; Sharma, V.S. (2016). Optimization of machining parameters and cutting fluids during nano-fluid based minimum quantity lubrication turning of titanium alloy by using evolutionary techniques. Journal of Cleaner Production, 135, 1276-1288.

- [16] Temak (2022). Kraft 2022 Ürün Katalođu. <https://temak.com.tr/wp-content/uploads/2022/11/Kraft-2022-U%CC%88ru%CC%88n-Katalog%CC%86u.pdf>
- [17] Singal R.K., Singal M., Singal R. (2009). "Fundamentals of Machining and Machine Tools", Wiley.
- [18] Çakır M.C., "Modern Talaşlı İmalatın Esasları", Uludağ Üniversitesi Güçlendirme Vakfı, Yayın No: 140 VİPAŞ Yayın No: 16 Bursa (1999).
- [19] Raymond HM, Douglas CM, Christine MAC (2009). Response Surface Methodology (3rd Edition). Canada: A John Wiley & Sons, Inc., Publication, 1-11.
- [20] Kathleen MC, Natalia YK, Jeff R (2004). Response Surface Methodology. CASOS Technical Report, 31.
- [21] Ayhan, E., Yurdakul, M., Cođun, C., & İç, Y. T. (2023). The entropy method integrated RSM model to evaluate hole geometries in electrochemical blind hole drilling. Australian Journal of Mechanical Engineering, 1–19.
- [22] Amel Chabbi, Mohamed Athmane Yallese, Ikhlas Meddour, Mourad Nouioua, Tarek Mabrouki, François Girardin (2017). Predictive modeling and multi-response optimization of technological parameters in turning of Polyoxymethylene polymer (POM C) using RSM and desirability function. Measurement, 95, 99-115.

Investigation of the Effect of Turbulence Models for CFD Simulations of a Moving Airfoil

Sinem KESKİN^{1*}  Mustafa Serdar GENÇ^{1*} 

¹Erciyes University, Wind Engineering and Aerodynamic Research Laboratory, Department of Energy Systems Engineering, Kayseri, Turkey

Article Info

Research article
Received: 26/11/2024
Revision: 06/12/2024
Accepted: 17/12/2024

Keywords

Pitching Airfoil
Turbulence Model
Pressure Distribution
Sinusoidal Motion

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 26/11/2024
Düzeltilme: 06/12/2024
Kabul: 17/12/2024

Anahtar Kelimeler

Çırpma Kanat
Türbülans Modeli
Basınç Dağılımı
Sinüzoidal Hareket

Graphical/Tabular Abstract (Grafik Özet)

The aerodynamic behavior of a NACA 0012 airfoil undergoing sinusoidal pitching motion is evaluated using various transition turbulence models. The study focuses on dynamic flow characteristics, boundary layer dynamics, and flow separation processes. / Sinüzoidal çarpma hareketi yapan bir NACA 0012 kanat profilinin aerodinamik davranışı çeşitli geçiş türbülans modelleri kullanılarak değerlendirilmiştir. Çalışma dinamik akış özellikleri, sınır tabaka dinamikleri ve akış ayırma süreçlerine odaklanmıştır.

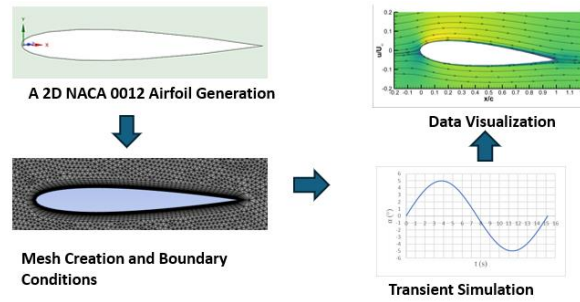


Figure A: Simulation workflow for pitching NACA 0012 airfoil / Şekil A: Çırpma NACA 0012 kanat profili için simülasyon iş akışı

Highlights (Önemli noktalar)

- SST, SST with intermittency, and Transition SST models are compared to capture boundary layer separation and transition for pitching NACA 0012 airfoil. / SST, aralıklı SST ve Geçiş SST modelleri, çarpma hareketi yapan NACA 0012 kanat profili için sınır tabaka ayrılmasını ve geçişini yakalamak amacıyla karşılaştırılmıştır.
- Significant hysteresis effects were observed in the pressure coefficient distributions during the pitch-up and pitch-down phases. / Yukarı ve aşağı çarpma aşamalarında basınç katsayısı dağılımlarında önemli histerezis etkileri gözlemlenmiştir.
- The results suggest that Transition SST models offer the most accurate predictions of unsteady flow behavior. / Sonuçlar, Geçiş SST modellerinin dinamik akış davranışının en doğru tahminlerini sunduğunu önermektedir.

Aim (Amaç): To investigate the aerodynamic response of a NACA 0012 airfoil undergoing sinusoidal pitching motion using different turbulence models. / Farklı türbülans modelleri kullanarak sinüzoidal pitching hareketi yapan bir NACA 0012 kanadının aerodinamik tepkisini araştırmak.

Originality (Özgünlük): This study provides new insights into the dynamic flow behavior of airfoils under pitching motion, comparing the effectiveness of different turbulence models in capturing boundary layer dynamics. / Bu çalışma, çarpma hareketi altında kanatların dinamik akış davranışına yeni bakış açıları sunmakta ve sınır katmanı dinamiklerini yakalamada farklı türbülans modellerinin etkinliğini karşılaştırmaktadır.

Results (Bulgular): The results demonstrate that advanced turbulence models, such as SST with intermittency and Transition SST, provide more accurate representations of boundary layer separation and transition in dynamic flows compared to the standard SST model. / Sonuçlar, SST ile kesiklilik ve Geçiş SST gibi gelişmiş türbülans modellerinin, standart SST modeline kıyasla dinamik akışlarda sınır katmanı ayrılma ve geçişini daha doğru bir şekilde temsil ettiğini göstermektedir.

Conclusion (Sonuç): The study finds that modeling dynamic flows, like boundary layer separation and vortex interactions, requires advanced transition models for accuracy in unsteady conditions. / Çalışma, dinamik akışların doğru modellenmesinin ileri geçiş modellerini gerektirdiğini göstermektedir.



Investigation of the Effect of Turbulence Models for CFD Simulations of a Moving Airfoil

Sinem KESKİN^{1*} Mustafa Serdar GENÇ^{1*}

¹Erciyes University, Wind Engineering and Aerodynamic Research Laboratory, Department of Energy Systems Engineering, Kayseri, Turkey

Article Info

Research article

Received: 26/11/2024

Revision: 06/12/2024

Accepted: 17/12/2024

Keywords

Pitching Airfoil

Turbulence Model

Pressure Distribution

Sinusoidal Motion

Abstract

This study presents a numerical investigation into the aerodynamic behavior of a pitching NACA 0012 airfoil under dynamic conditions. The analysis was carried out using a sliding mesh method in Fluent, incorporating sinusoidal pitching motion with various turbulence models, including SST, SST with intermittency, and Transition SST. The effects of different turbulence models on the aerodynamic performance of the airfoil at various angles of attack (AoA) were studied, focusing on the pressure coefficient (C_p), flow structure, and laminar separation bubble (LSB) formation. Additionally, the results for pitch-up and pitch-down motions were compared to evaluate the hysteresis effects and dynamic flow behaviors. The study found that the SST model exhibited inviscid flow characteristics, while the SST with intermittency and Transition SST models captured the boundary layer behavior more effectively, including the separation and reattachment processes. Significant differences were observed in the C_p distribution and turbulence characteristics, with pitch-down motion resulting in higher C_p values and more complex flow phenomena. The results contribute to the understanding of aerodynamic behavior during dynamic motions, offering insights into the role of turbulence models on airfoil performance.

Hareketli Bir Kanat Profiline CFD Simülasyonları İçin Türbülans Modellerinin Etkisinin Araştırılması

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi

Başvuru: 26/11/2024

Düzelme: 06/12/2024

Kabul: 17/12/2024

Anahtar Kelimeler

Çırpın Kanat

Türbülans Modeli

Basınç Dağılımı

Sinüzoidal Hareket

Öz

Bu çalışma, dinamik koşullar altında çırpın bir NACA 0012 kanat profiline aerodinamik davranışına ilişkin sayısal bir araştırma sunmaktadır. Analiz, SST, aralıklı SST ve Geçiş SST dahil olmak üzere çeşitli türbülans modelleriyle sinüzoidal çırpma hareketini birleştiren Fluent'te kayan bir ağ yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Farklı türbülans modellerinin, çeşitli hücum açılarında kanat profiline aerodinamik performansı üzerindeki etkileri, basınç katsayısı (K_b), akış yapısı ve laminer ayrılma kabarcığı (LAK) oluşumuna odaklanılarak incelenmiştir. Ek olarak, yukarı ve aşağı çırpma hareketlerinin sonuçları, histerezis etkilerini ve dinamik akış davranışlarını değerlendirmek için karşılaştırılmıştır. Çalışma, SST modelinin görünmez akış karakteristikleri sergilediğini, aralıklı SST ve Geçiş SST modellerinin ise ayrılma ve yeniden bağlanma süreçleri dahil olmak üzere sınır tabakası davranışını daha etkili bir şekilde yakaladığını bulmuştur. K_b dağılımında ve türbülans özelliklerinde önemli farklılıklar gözlemlendi. Aşağı çırpma hareketi daha yüksek K_b değerleri ve daha karmaşık akış fenomenleriyle sonuçlandı. Sonuçlar dinamik hareketler sırasında aerodinamik davranışın anlaşılmasına katkıda bulunarak, kanat profili performansında türbülans modellerinin rolüne dair açıklamalar sunar.

1. INTRODUCTION (GİRİŞ)

The demand for efficient aerodynamic designs is ever-increasing in fields such as renewable energy and aerospace engineering. Wind turbines, as a significant source of renewable energy, and modern aircraft, crucial for reducing fuel consumption and environmental impact, rely heavily on advanced

aerodynamic performance. Achieving such a performance requires a deep understanding of complex aerodynamic phenomena, particularly the behaviors of airflow in unsteady, dynamic conditions [1-3]. Accurately predicting flow phenomena is essential for designing systems that are both efficient and sustainable.

The process of laminar-to-turbulent transition is a fundamental aspect of aerodynamic analysis, influencing the performance of airfoils in various applications [4,5]. In static conditions, transition models can effectively capture the onset of turbulence and the separation of flow over the surface of an airfoil. However, under dynamic conditions, particularly when the airfoil undergoes a pitching motion, the complexity of the flow increases substantially [6]. The interaction between the changing angle of attack and the flow characteristics creates a much more intricate scenario, where the LSBs behave differently compared to static conditions. These bubbles, which are typically formed in regions of adverse pressure gradients, may grow, move, or collapse as the airfoil pitches, leading to highly dynamic and often unpredictable aerodynamic effects [7]. Kim and Chang [8] investigated the aerodynamic behavior of a sinusoidally pitching NACA 0012 airfoil at low Reynolds numbers between 2.0×10^4 and 5.0×10^4 . Smoke-wire flow visualization revealed the formation of trailing-edge vortices and complex wake structures, with hysteresis loops in the lift and pressure drag coefficients showing significant variation with Reynolds number. The results indicated that increasing Reynolds number led to earlier occurrences of boundary-layer events, such as laminar separation and transition, affecting the overall aerodynamic performance. The experimental study examined boundary layer transition on a rectangular wing experiencing unsteady pitching motions, with tests conducted at chordwise Mach numbers ranging from 0.2 to 0.6 and sweep angles of 0° , 15° , and 30° using surface hot-film sensors under different pitch rates and compressibility effects [9]. During sinusoidal pitching motions, the transition point shifts forward with increasing pitch rate and moves aft as the pitch rate decreases. At higher reduced frequencies, a pronounced hysteresis of up to 3.6° occurs between the transition and relaminarization angles, with this effect being more prominent between $x/c = 0.15$ - 0.30 than near the leading edge.

As the airfoil pitches, the pressure distribution over the surface changes, which causes the boundary layer to react accordingly. The dynamic nature of pitching introduces additional factors such as vortex shedding, fluctuating separation points, and rapid changes in the reattachment of the flow [10]. These factors interact with the transition process, altering the timing and location of transition onset and making it much more difficult to model. The transition process itself may become more erratic, with the boundary layer experiencing periods of stability followed by sudden breakdowns due to the

fluctuating pressure gradients. Hain et al. [11] examined the LSB on an SD7003 airfoil at $Re = 66,000$, focusing on dominant transition frequencies and bubble flapping using high-resolution time-resolved particle image velocimetry (TR-PIV). Unlike conventional PIV, TR-PIV effectively identifies different flow modes and vortex interactions, highlighting their role in turbulence generation. Observations showed vortex amplification in the shear layer above the bubble, driven by Kelvin-Helmholtz instabilities, which exhibited limited spanwise coherence. Eventually, these vortices transitioned to a three-dimensional turbulence breakdown as part of the transition process.

In static conditions, the airflow around an airfoil can be described as relatively stable, with steady-state separation and reattachment occurring in predictable patterns. Transition models, such as the Menter SST model [12], have been extensively validated in these conditions and are able to simulate the flow transition with reasonable accuracy. However, when an airfoil is subjected to pitching oscillation, the flow becomes time-dependent and highly unsteady [13]. Lian et al. [14] presented a combined numerical and experimental investigation of flow behavior around a pitching-plunging SD 7003 airfoil at $Re=0.6 \times 10^5$. Chen et al. [15] examined the behavior of transitional flows over a pitching-up cambered thin airfoil at low Reynolds numbers using an unsteady RANS (Reynolds-averaged Navier–Stokes) approach with the $k-\omega$ SST $\gamma-Re_{\theta t}$ turbulence transition model. For a stationary airfoil, short LSBs form near the leading edge, with bubble length increasing as the angle of incidence rises. In dynamic cases, trailing-edge separation dominates at low incidences, but as the angle increases, LSBs emerge near the leading edge, displaying significant variations in lift perturbations between different Reynolds numbers. At lower Reynolds numbers, vortex dynamics within LSBs cause greater lift disturbances, whereas higher Reynolds numbers yield more stable LSB behavior and reduced lift variations. Rezaei and Taha [16] addressed the non-linear lift response of a pitching airfoil under conditions where linear behavior is typically expected, using a validated $\gamma-Re_{\theta}$ transition model coupled with the $k-\omega$ SST turbulence model. The findings demonstrate that laminar-to-turbulent transition induces significant pressure variations near the trailing edge, leading to non-linear effects on lift dynamics and bound circulation. These insights provide a foundation for enhancing potential flow-based methods to better capture the non-linearities in lift dynamics caused by transitional flow behavior.

As a result, transition models that work well under steady conditions often fail to predict the unsteady behavior of the flow under dynamic conditions. The dynamic movement of the airfoil, especially at high frequencies or large amplitudes, introduces additional non-linearities into the flow that are not typically accounted for in steady-state transition models. This discrepancy between static and dynamic behavior highlights a significant gap in the current understanding of aerodynamic performance, particularly for applications like wind turbines or aircraft that experience varying and unsteady loading conditions during operation.

This study tackles the critical challenges associated with modeling dynamic flow phenomena, focusing on the behavior of LSB under unsteady conditions induced by pitching motion of a NACA 0012 airfoil. Unlike many previous studies that primarily investigate static or simplified flow scenarios, this research systematically evaluates the performance of advanced transition models (SST $k-\omega$, SST $k-\omega$ with intermittency, and Transition SST) in capturing the intricate dynamics of LSB formation during oscillatory motion. By comparing these models in a dynamic framework, this study not only identifies their relative strengths and weaknesses but also sheds light on the limitations of existing transition modeling approaches in replicating real-world unsteady aerodynamic behavior. The novelty of this work lies in its detailed exploration of how dynamic flow conditions affect the interaction between transition mechanisms and aerodynamic performance, particularly the pressure distribution. Additionally, the results provide a comprehensive benchmark for transition models under conditions that closely resemble operational environments in wind energy systems and aerospace applications. This research bridges a significant gap in the literature by offering new insights into dynamic LSB behavior and proposing pathways to enhance the fidelity of computational tools for designing and optimizing systems subjected to unsteady aerodynamic loads.

2. MATERIALS AND METHODS (MATERIAL VE METOD)

2.1. Geometry and Mesh Structure (Geometri ve Mesh Yapısı)

In this study, the aerodynamic performance of a NACA 0012 airfoil subjected to sinusoidal pitching motion was analyzed using computational fluid dynamics (CFD) simulations. The computational domain was carefully selected to ensure an accurate representation of the flow physics [17-20], particularly in capturing the boundary layer

dynamics, LSB formation, and transition behavior in the region of the airfoil. The airfoil used in the study is a NACA 0012 with a chord length of 1 meter, which provides a manageable environment for numerical simulations.

The computational domain was set up with the airfoil placed in a flow field. The inlet boundary was positioned at a distance of 10 times the chord length (10c) upstream of the airfoil, ensuring that the flow conditions were fully developed before encountering the airfoil [21-23]. Similarly, the outlet boundary was placed at 20 times the chord length (20c) downstream of the airfoil. This choice of domain size helps in minimizing the influence of boundary effects on the solution, ensuring that the flow is adequately captured both before and after the airfoil.

A triangular grid was employed in the numerical domain. To accurately resolve the boundary layer, 50 inflation layers were applied near the surface of the airfoil with growth rate. The number of inflation layers was chosen such that the near-wall mesh cells would maintain y^+ values well below 1, ensuring that the flow is properly resolved in the viscous sublayer and avoiding the need for wall functions. The detailed mesh structures were presented in Figure 1.

The overall mesh quality was thoroughly checked to ensure good orthogonality and smooth transitions in the grid spacing. The mesh was refined in the region of interest, particularly around the airfoil, where boundary layer phenomena and flow separation would occur, while the far-field mesh remained coarser to reduce computational expense. The final mesh consisted of approximately 200,000 elements.

2.2. Boundary Conditions, Solver Settings, Turbulence Models and Dynamic Motion

(Sınır Koşulları, Çözücü Ayarları, Türbülans Modelleri ve Dinamik Hareket)

For the simulations, the inlet velocity (U_∞) was set to 4.14 m/s, corresponding to a chord-based Reynolds number of 250,000. The flow was assumed to be incompressible, with constant density and viscosity, and the turbulent viscosity was modeled using various transition models to assess their impact on the flow under transient conditions. The stationary and rotating parts of the domain related to non-conformal interface boundary condition and no-slip wall were defined for airfoil surface (Figure 2).

The study focused on capturing the dynamic behavior of the airfoil as it underwent sinusoidal

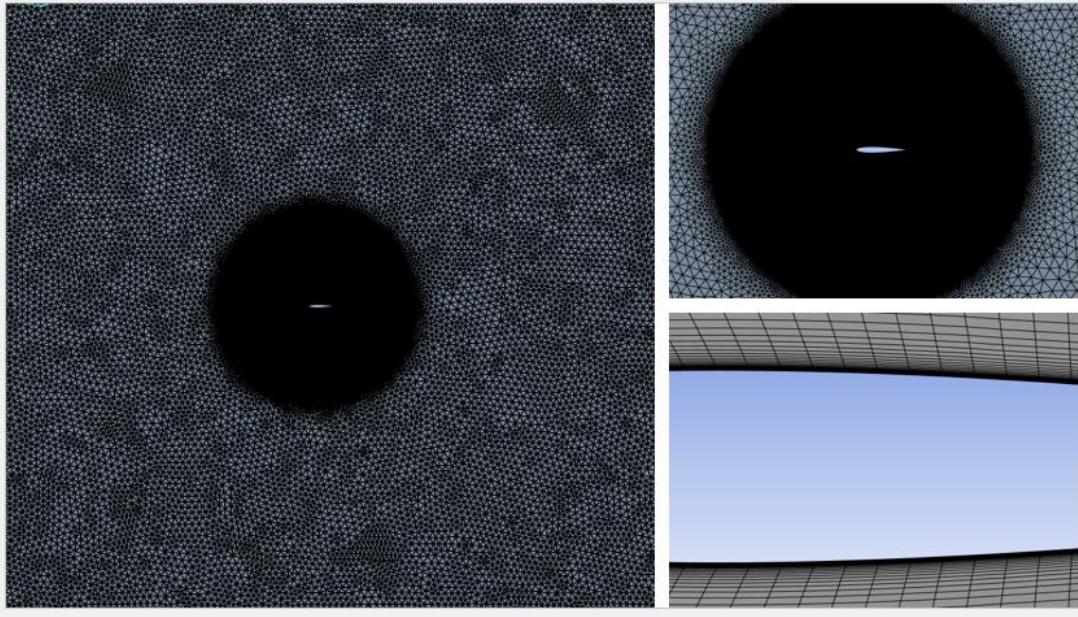


Figure 1. The mesh structure in the stationary region, rotating region and near to airfoil surface (Sabit, dönen ve kanat profili yüzeyine yakın bölgedeki ağ yapısı)

pitching motion. The sinusoidal motion was defined in terms of the angle of attack, with a mean angle of attack ($\alpha_0=0^\circ$), an amplitude of ($\alpha_1=5^\circ$) and a reduced frequency ($k=\omega c/2U_\infty$) of 0.05. The equation describing the motion is given below;

$$\alpha(t) = \alpha_0 + \alpha_1 \sin(\omega t) \quad (1)$$

where α is pitching angle, α_0 is mean angle of attack, α_1 the amplitude of the oscillation, ω is the angular frequency of the oscillation, and t is time. The pitching angle variation of sinusoidal motion with time was illustrated in Figure 3.

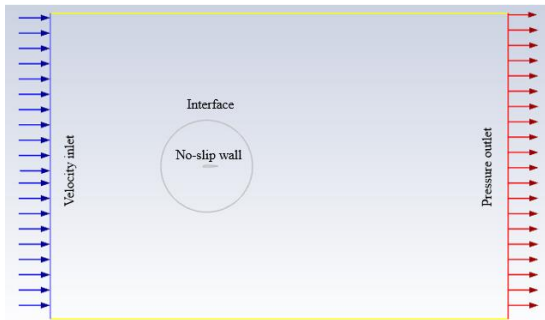


Figure 2. Boundary conditions in the numerical domain (Sayısal alandaki sınır şartları)

For the dynamic simulations involving pitching motion, each of the transition models was applied to capture the complex interaction between the moving airfoil and the unsteady flow field. The dynamic effects of pitching motion are expected to cause time-varying boundary layer separation, reattachment, and transition processes, making it crucial to select the appropriate model for each case. The transition models selected include:

- **SST k- ω model (SST)** is anticipated to provide a more accurate representation of the boundary layer, especially in regions with complex separation, but may require additional modifications to better handle dynamic transitions.
- **SST k- ω with intermittency (SSTI)** will be crucial in capturing the intermittency of transition during dynamic motion, as it accounts for the time-varying nature of flow separation and transition.
- **Transition SST (TSST)** model is expected to provide the most accurate predictions for transition, as it incorporates additional equations that account for both the onset of transition and the intermittency factor. This model is particularly suited for dynamic, time-varying flows like those encountered in pitching airfoils.

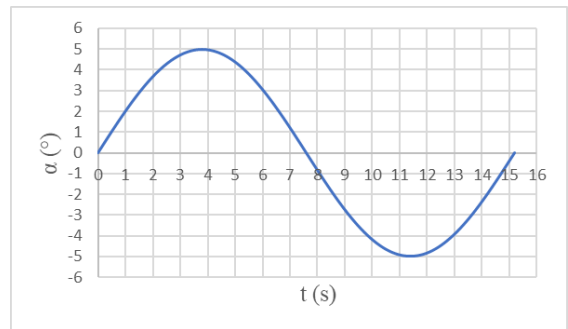


Figure 3. The variation in AoA over time (Zaman içindeki AoA değişimi)

2.3. Numerical Solver And Time Step Size

(Sayısal Çözücü ve Zaman Adımı Boyutu)

The simulations were conducted using the commercial CFD software ANSYS Fluent. The solver used was a coupled, pressure-based solver, which ensures that the pressure-velocity coupling is handled efficiently for unsteady flows. The governing equations for mass, momentum, and turbulence were solved using a second-order upwind scheme, providing a balance between accuracy and stability in the solution.

For the dynamic simulations involving pitching motion, a transient approach was used with a time step size of 0.005. The time step size was selected based on the frequency of the pitching motion, ensuring that the solution could capture the oscillatory behavior of the flow without introducing numerical instability. The total simulation time was long enough to capture several cycles of the pitching motion, allowing for the analysis of the flow characteristics over multiple oscillations.

3. RESULTS (BULGULAR)

In this section, the results obtained from various turbulence models for a pitching NACA 0012 airfoil undergoing sinusoidal motion are presented. The analysis focuses on pressure coefficient (C_p) distributions, non-dimensionalized velocity (u/U_∞) contours, and turbulence kinetic energy (TKE) contours at specific angles during the motion. These results provide insights into the aerodynamic performance, boundary layer behavior, and flow separation characteristics under dynamic conditions, allowing for a detailed evaluation of capability of each turbulence model in capturing the complex unsteady flow phenomena associated with sinusoidal pitching.

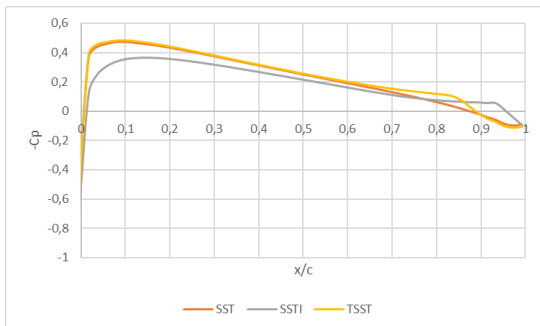


Figure 4. The pressure coefficient for $AoA=1^\circ$ and pitch-up position ($AoA=1^\circ$ ve yukarı çırpma pozisyonu için basınç katsayısı)

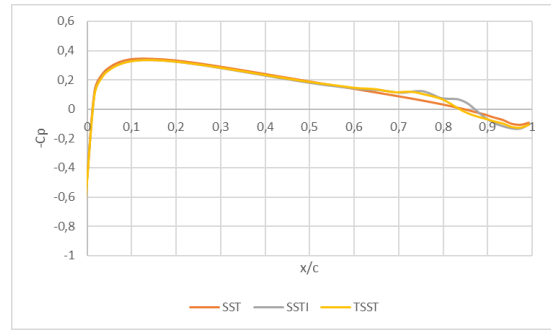


Figure 5. The pressure coefficient for $AoA=-1^\circ$ and pitch-down position ($AoA=-1^\circ$ ve aşağı çırpma pozisyonu için basınç katsayısı)

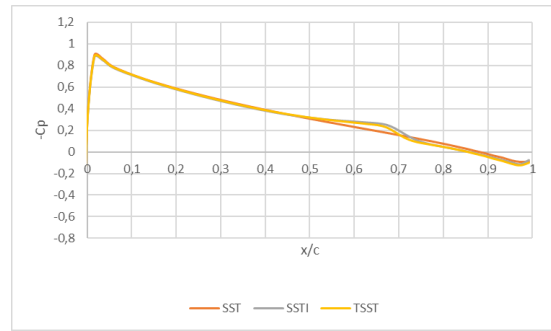


Figure 6. The pressure coefficient for $AoA=3^\circ$ and pitching-up position ($AoA=3^\circ$ ve yukarı çırpma pozisyonu için basınç katsayısı)

The pressure coefficient distributions for angles of 1° , 3° , and -1° were analyzed (Figure 4, Figure 5, Figure 6). At all three angles, the SST model exhibited C_p curves resembling those of inviscid flow, indicating limited resolution of boundary layer dynamics. In contrast, the SST with intermittency model and the Transition SST model provided more detailed solutions for boundary layer behavior and successfully captured flow separations. The case at 3° was further investigated using velocity contours normalized by the freestream velocity (u/U_∞), which supported the observations from the C_p curves. In the SST solution, the flow remained attached to the surface throughout the chord. However, the analysis with the SST with intermittency model revealed multiple discrete laminar separation bubbles along the chord. Meanwhile, the Transition SST model results showed a longer laminar separation region near the trailing edge. These findings highlight the varying capabilities of the models in capturing separation phenomena and boundary layer transitions as seen Figure 7a and 7b. It was observed that the transition occurs normally in the SST model results, there are different dynamics in the transition with bubble effect in the other two models when TKE contours were considered. (Figure 8).

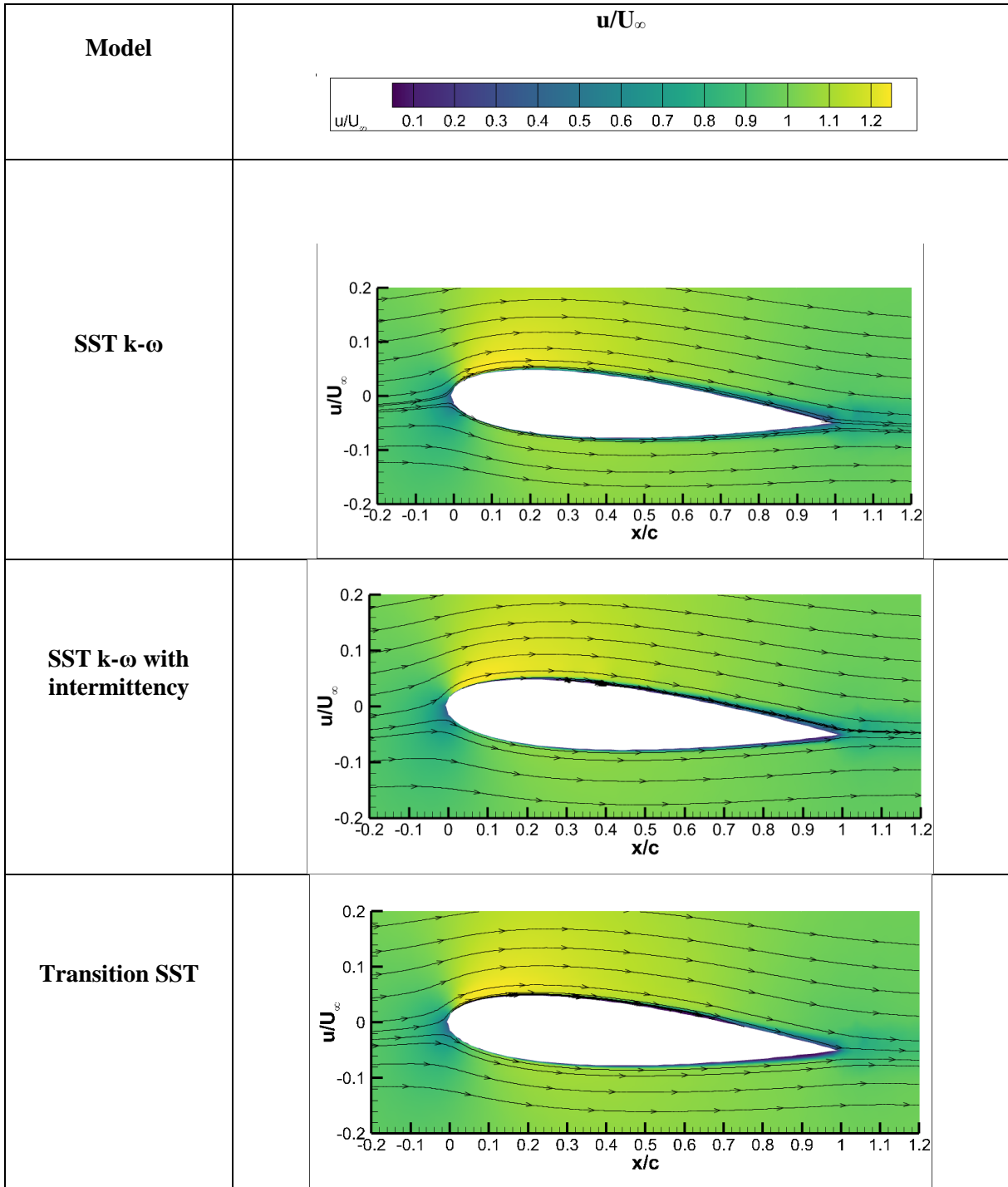


Figure 7a. The dimensioned velocity contour for $AoA=3^\circ$ and pitch-up position ($AoA=3^\circ$ ve yukarı çırpma pozisyonu için boyutlandırılmış hız konturu)

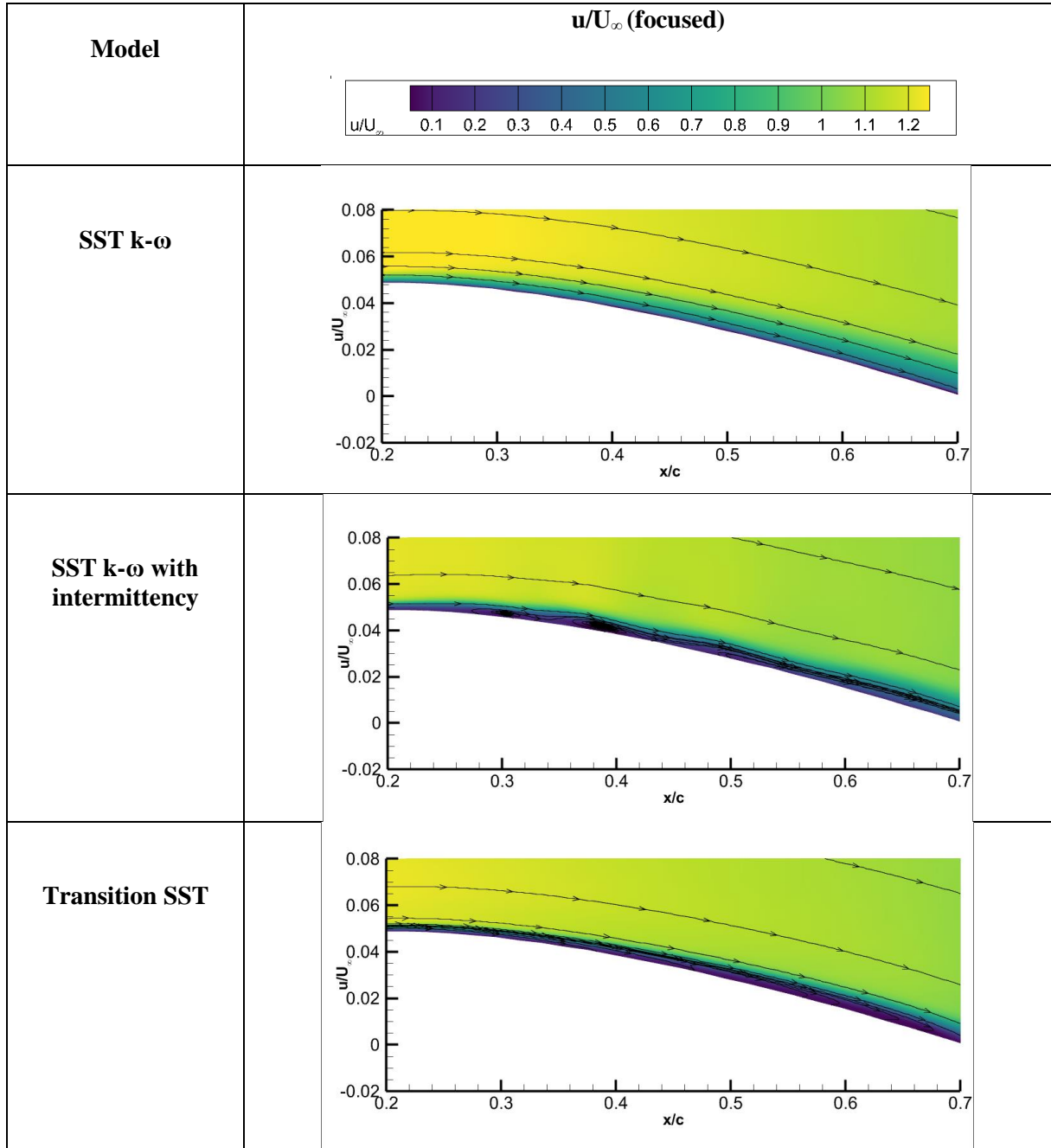


Figure 7b. The dimensioned velocity contour for $AoA=3^\circ$ and pitch-up position (focused) ($AoA=3^\circ$ ve yukarı çırpma pozisyonu için boyutlandırılmış hız konturu (odaklanmış))

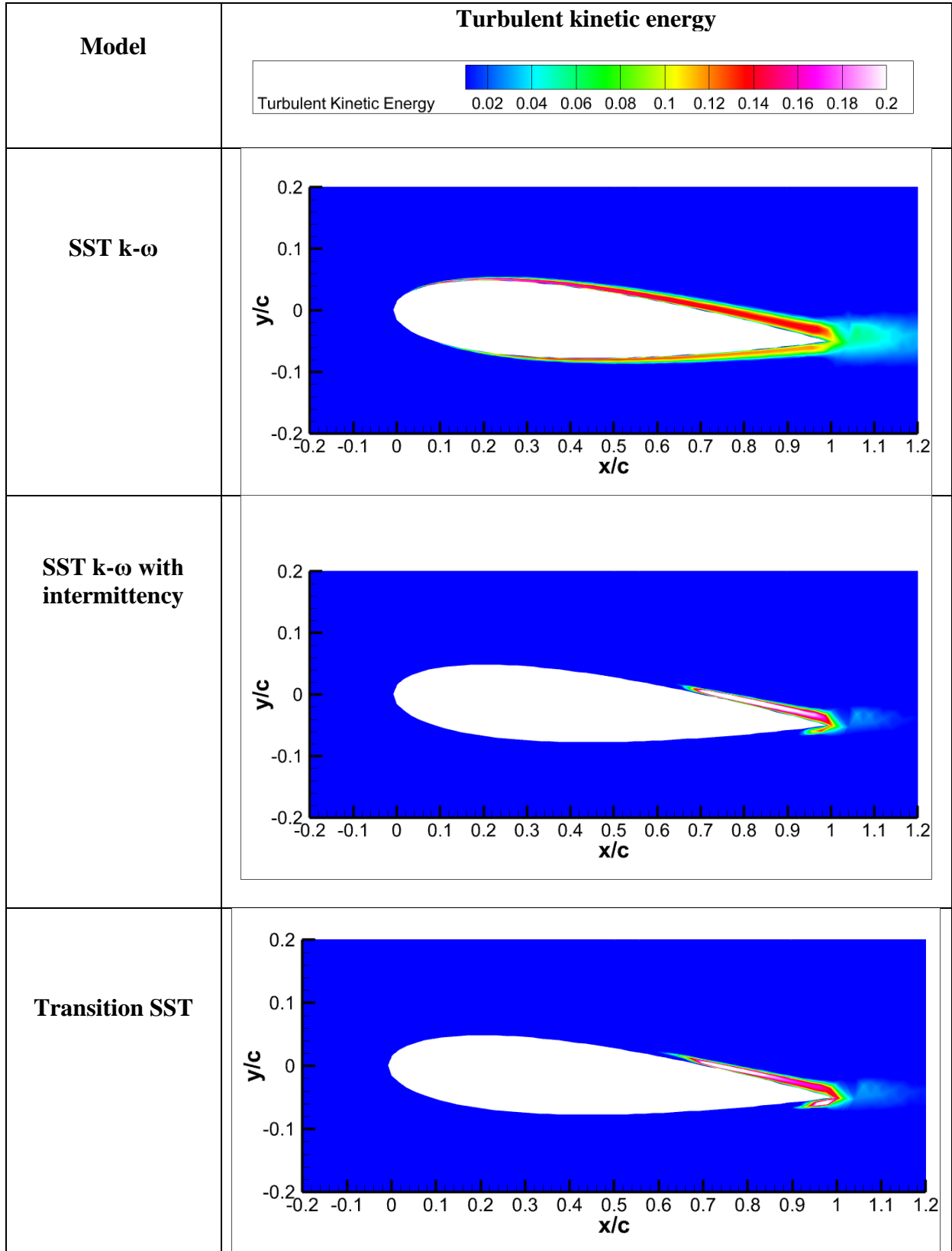


Figure 8. The turbulent kinetic energy contour for $AoA=3^\circ$ and pitch-up position ($AoA=3^\circ$ ve yukarı çırpma pozisyonu için türbülans kinetik enerji konturu)

Considering analysis results, C_p curves for the same angle of attack were examined during both the pitch-up and pitch-down phases of the sinusoidal motion. This comparison highlights the hysteresis effects and differences in aerodynamic behavior between the two phases, providing an important understanding of how the dynamic motion influences the pressure distribution and overall flow characteristics around the airfoil.

For angles of attack of 1° and 3° results obtained using the SST model reveal that the C_p values are

consistently higher during the pitch-down phase compared to the pitch-up phase as shown in Figure 9. This indicates a notable asymmetry in the aerodynamic response between the two phases. Additionally, in both angles, a sharper drop in C_p is observed during the pitch-down motion immediately after reaching the maximum value, suggesting a rapid change in pressure distribution. In contrast, the pitch-up phase exhibits a much smoother decline in C_p , indicating a more gradual adjustment of the flow to the changing angle of attack (Figure 9).

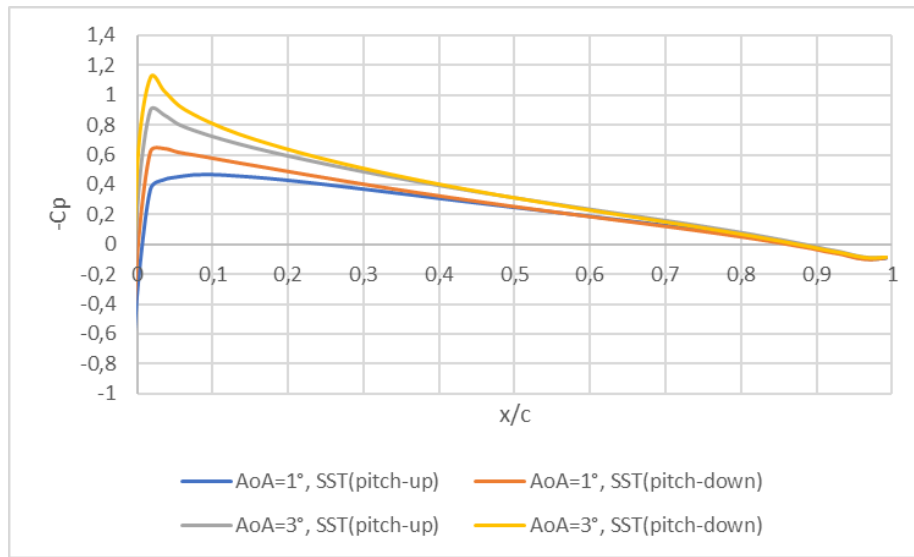


Figure 9. The pressure coefficient for $AoA=1^\circ$ and 3° with SST model under pitch-up and pitch-down positions (SST modeli ile aşağı ve yukarı çırpma pozisyonlarında $AoA=1^\circ$ ve 3° için basınç katsayısı)

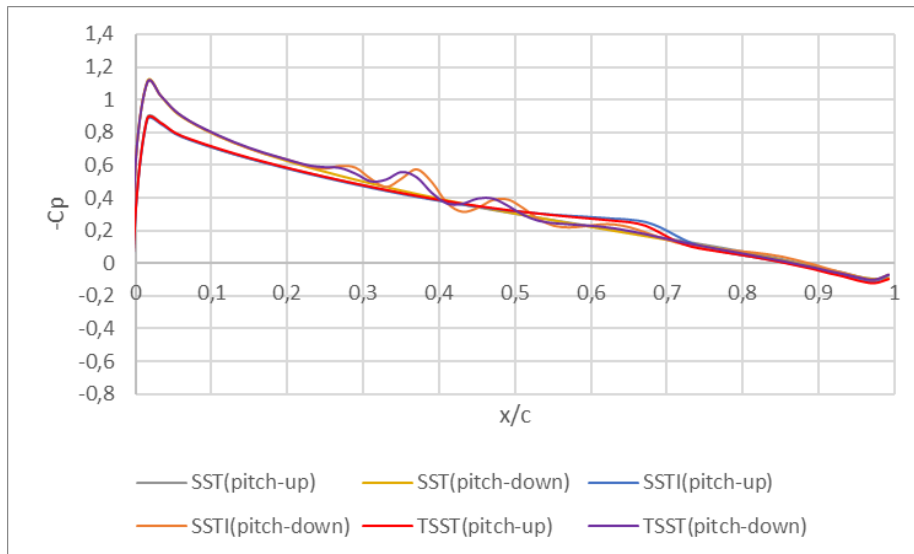


Figure 10. The pressure coefficient for $AoA=3^\circ$ with SST, SSTI, TSST models under pitch-up and pitch-down positions positions (SST, SSTI, TSST modelleri için aşağı ve yukarı çırpma pozisyonlarında $AoA=3^\circ$ için basınç katsayısı)

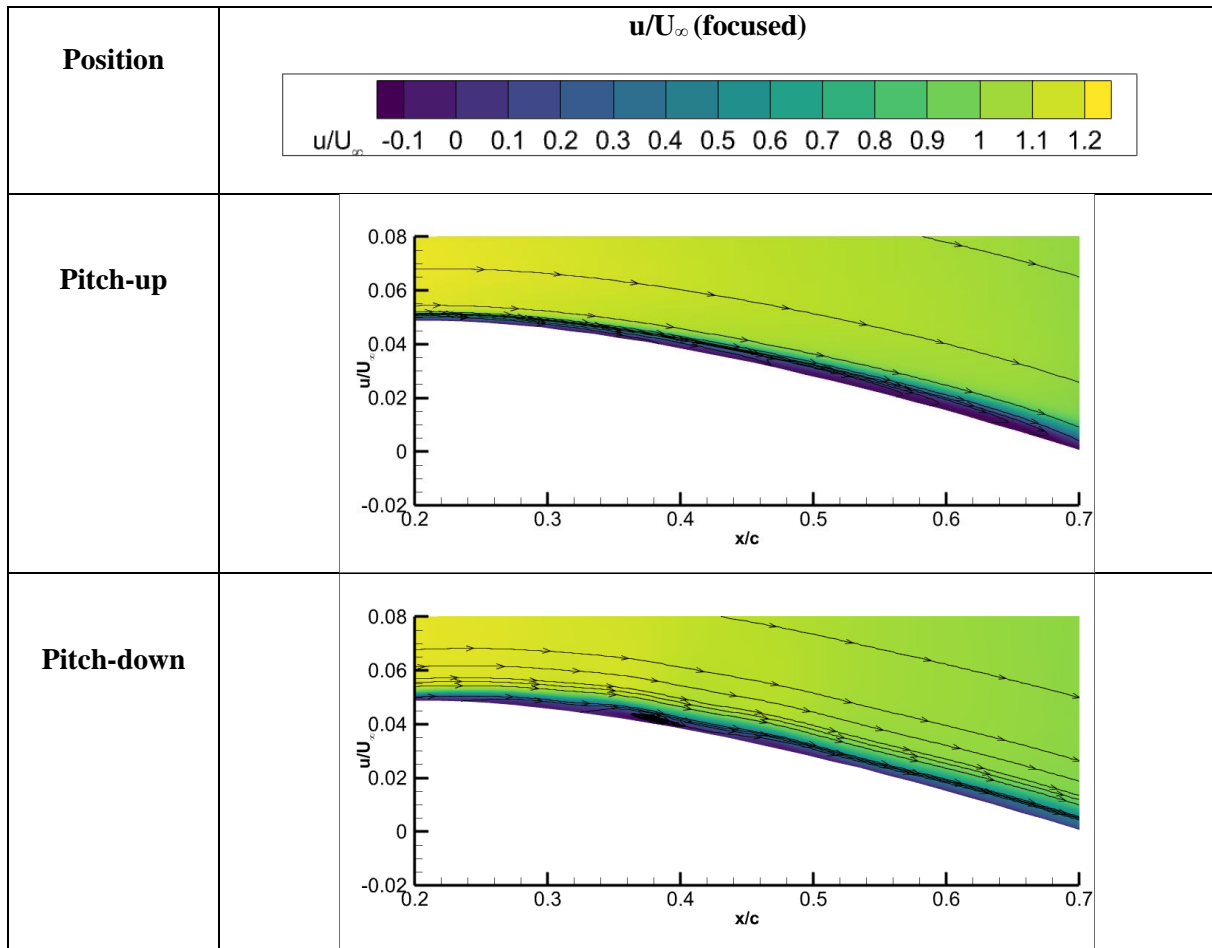


Figure 11. The dimensioned velocity contour for $AoA=3^\circ$ with TSST model under pitch-up and pitch-down positions (TSST modeli ile $AoA=3^\circ$ için aşağı ve yukarı çarpma pozisyonlarında boyutlandırılmış hız konturu)

The C_p curves also display noticeable hysteresis along the chord length, which appears similar for both 1° and 3° illustrated by Figure 10. This hysteresis reflects the lag in the aerodynamic response due to the dynamic nature of the motion, where the flow field and pressure distribution are influenced by the airfoil's recent motion history. The results emphasize the sensitivity of pressure distribution to the phase of the pitching motion, particularly in dynamic conditions, and highlight the effectiveness of the SST model in capturing these intricate flow behaviors.

Figure 10 presents the C_p distributions for three turbulence models at an angle of attack of 3° during both pitch-up and pitch-down phases. During the pitch-up phase, all three models exhibit relatively stable C_p curves, reflecting a smooth pressure distribution along the chord. In contrast, during the pitch-down phase, fluctuations in the C_p curves are observed in the results of the SST with Intermittency and Transition SST models. Figure 11 illustrates the streamlines obtained from the Transition SST model, highlighting the complex

flow structures observed during the pitching-down phase. The results reveal a more intricate flow pattern compared to the pitching-up phase.

These fluctuations are likely attributed to the interaction of the airfoil with vortices shed during its previous movements. As the airfoil moves downward, it encounters these residual vortices, which disrupt the flow and manifest as irregularities in the C_p distribution. On the other hand, the SST model shows a smoother trend during the pitch-down phase. This smoother response suggests a limitation in the SST model's ability to capture the physical interactions between the airfoil and the complex vortex structures in the wake. This result highlights the necessity of advanced transition models to accurately resolve such dynamic flow behaviors.

4. CONCLUSIONS (SONUÇLAR)

In this study, the aerodynamic performance of a NACA 0012 airfoil undergoing sinusoidal pitching motion was thoroughly analyzed using numerical simulations. The results demonstrated that the

turbulence models played a crucial role in capturing the dynamic flow characteristics, especially during the transition from laminar to turbulent flow. The SST model provided an inviscid solution, while the SST with intermittency and Transition SST models were able to better resolve the boundary layer separation and reattachment, offering more accurate representations of the flow dynamics. The C_p distributions for both pitch-up and pitch-down motions revealed significant hysteresis effects, with pitch-down motion resulting in higher peak C_p values and sharper decreases in C_p along the chord. Streamline and velocity contour analysis further revealed the complexity of the flow in pitch-down conditions, with interactions between vortex shedding and the boundary layer contributing to more pronounced flow instabilities. These findings underscore the importance of considering dynamic effects in aerodynamic simulations, especially for applications where unsteady motion significantly influences performance. Future work will focus on refining the turbulence models to enhance the accuracy of dynamic flow predictions and extend the study to a wider range of airfoil shapes and motion profiles.

ACKNOWLEDGMENTS (TEŞEKKÜR)

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

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)

Sinem KESKİN: She conducted the numerical analysis, post-processed the results and performed the writing process.

Sayısal analizleri yapmış, sonuçları son işleme tabi tutmuş ve yazım sürecini gerçekleştirmiştir.

Mustafa Serdar GENÇ: 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] Baik, Y. S., Bernal, L. P., Granlund, K., & Ol, M. V. (2012). Unsteady force generation and vortex dynamics of pitching and plunging aerofoils. *Journal of Fluid Mechanics*, 709, 37-68.
- [2] Brunton, S., & Rowley, C. (2009, January). Modeling the unsteady aerodynamic forces on small-scale wings. In 47th AIAA aerospace sciences meeting including the new horizons forum and aerospace exposition (p. 1127).
- [3] Catlett, M. R., Anderson, J. M., Badrya, C., & Baeder, J. D. (2020). Unsteady response of airfoils due to small-scale pitching motion with considerations for foil thickness and wake motion. *Journal of Fluids and Structures*, 94, 102889.
- [4] Hue, D., Vermeersch, O., Bailly, D., Brunet, V., & Forte, M. (2015). Experimental and numerical methods for transition and drag predictions of laminar airfoils. *AIAA Journal*, 53(9), 2694-2712.
- [5] D'Alessandro, V., Montelpare, S., Ricci, R., & Zoppi, A. (2017). Numerical modeling of the flow over wind turbine airfoils by means of Spalart-Allmaras local correlation based transition model. *Energy*, 130, 402-419.
- [6] Amiralaei, M. R., Alighanbari, H., & Hashemi, S. M. (2010). An investigation into the effects of unsteady parameters on the aerodynamics of a low Reynolds number pitching airfoil. *Journal of Fluids and Structures*, 26(6), 979-993.
- [7] Arena, A. V., & Mueller, T. J. (1980). Laminar separation, transition, and turbulent reattachment near the leading edge of airfoils. *AIAA journal*, 18(7), 747-753.
- [8] Kim, D. H., & Chang, J. W. (2014). Low-Reynolds-number effect on the aerodynamic characteristics of a pitching NACA0012 airfoil. *Aerospace Science and Technology*, 32(1), 162-168.
- [9] Lorber, P. F., & Carta, F. O. (1992, January). Unsteady transition measurements on a pitching three-dimensional wing. In California State Univ., The Fifth Symposium on Numerical and Physical Aspects of Aerodynamic Flows.
- [10] Poirel, D., & Yuan, W. (2010). Aerodynamics of laminar separation flutter at a

- transitional Reynolds number. *Journal of Fluids and Structures*, 26(7-8), 1174-1194.
- [11] Hain, R., Kähler, C. J., & Radespiel, R. (2009). Dynamics of laminar separation bubbles at low-Reynolds-number aerofoils. *Journal of Fluid Mechanics*, 630, 129-153.
- [12] Menter, F. R., Langtry, R. B., Likki, S. R., Suzen, Y. B., Huang, P. G., & Völker, S. (2006). A correlation-based transition model using local variables—part I: model formulation. *Journal of turbomachinery*, 128(3), 413-422.
- [13] Grille Guerra, A., Hosseinverdi, S., Little, J. C., & Fasel, H. F. (2022). Unsteady behavior of a laminar separation bubble subjected to wing structural motion. In *AIAA SciTech 2022 Forum* (p. 2331).
- [14] Lian, Y., Ol, M., & Shyy, W. (2008). Comparative study of pitch-plunge airfoil aerodynamics at transitional Reynolds number. In *46th AIAA aerospace sciences meeting and exhibit* (p. 652).
- [15] Chen, Z., Xiao, T., Wang, Y., & Qin, N. (2021). Laminar separation bubble dynamics and its effects on thin airfoil performance during pitching-up motion. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*, 235(16), 2479-2492.
- [16] Rezaei, A. S., & Taha, H. (2021). Circulation dynamics of small-amplitude pitching airfoil undergoing laminar-to-turbulent transition. *Journal of Fluids and Structures*, 100, 103177.
- [17] Özkan R., Genç M.S., Aerodynamic design and optimization of a small-scale wind turbine blade using a novel artificial bee colony algorithm based on blade element momentum (ABC-BEM) theory, *Energy Conversion and Management*, 283, 116937, 2023.
- [18] Yapıcı H., Genç M.S., Öztürk G., Transient temperature and thermal stress distributions in a hollow disk subjected to a moving uniform heat source, *Journal of Thermal Stresses*, 31 (5), 476-493, 2008.
- [19] Aktepe B., Demir H., Impact of Window Opening Shapes on Wind-Driven Cross Ventilation Performance in a Generic Isolated Building: A Simulation Study, *Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology* 12 (3), 758-768, 2024.
- [20] Demir H., Çimen M., Yılman Ö., Tekin E., Computational Fluid Dynamics Analysis of Drag Reduction in Bullet via Geometric Modifications, *Bayburt Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi* 7 (1), 47-56, 2024.
- [21] Genç M.S., Control of low Reynolds number flow over aerofoils and investigation of aerodynamic performance, PhD Thesis, Graduate School of Natural and Applied Sciences, Erciyes University, Kayseri, 2009.
- [22] Genç M.S., Kaynak Ü., Control of flow separation and transition point over an aerofoil at low Re number using simultaneous blowing and suction, *19th AIAA Computational Fluid Dynamics*, AIAA-3672, 2009.
- [23] Demir H., Kaya B., Investigation of the aerodynamic effects of bio-inspired modifications on airfoil at low Reynolds number, *Journal of Mechanical Engineering and Sciences* 17 (4), 9715–9724, 2023.

Hierarchical Encoding for Image Inpainting with StyleGAN Inversion

Aysegul DÜNDAR^{1*} 

¹Bilkent University, Department of Computer Science, Ankara, Turkey

Article Info

Research article
Received: 11/10/2024
Revision: 12/11/2024
Accepted: 12/12/2024

Keywords

Image Inpainting
Generative Adversarial
Networks

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 11/10/2024
Düzeltilme: 12/11/2024
Kabul: 12/12/2024

Anahtar Kelimeler

Resim boyama
Üretici Karşıt Ağlar

Graphical/Tabular Abstract (Grafik Özet)

This work proposes a hierarchical encoder for image inpainting, seamlessly encoding visible and missing features. / Bu çalışma, görsel ve eksik özellikleri yüksek kalitede kodlayan bir hiyerarşik kodlayıcı öneriyor.



Figure A: Inpainting results of our method. Our method is able to control the inpainting style.
Şekil A: Yöntemimizin inpainting sonuçları. Yöntemimiz, inpainting tarzını kontrol edebilme yeteneğine sahiptir.

Highlights (Önemli noktalar)

- A novel hierarchical encoder is proposed to seamlessly encode both visible and missing image features for more effective inpainting. / Görünür ve eksik görsel özellikleri sorunsuz bir şekilde kodlamak için yeni bir hiyerarşik kodlayıcı önerilmiştir.
- The work introduces a single-stage architecture that encodes both low-rate and high-rate latent features, optimizing the use of StyleGAN for inpainting tasks. / StyleGAN için iç boyama görevlerini optimize etmek amacıyla, düşük ve yüksek oranlı latent özellikleri kodlayan tek aşamalı bir mimari tanıtılmıştır.
- Extensive experiments show improvements over state-of-the-art models. / Kapsamlı deneyler, önerilen yöntemin mevcut en son modellere göre önemli iyileştirmeler sağladığını göstermektedir.

Aim (Amaç): The aim of this work is to improve image inpainting by proposing a novel approach that seamlessly encodes both visible and missing image features. / Bu çalışmanın amacı, görsel ve eksik özellikleri yüksek kalitede kodlayan yeni bir yaklaşım önererek iç boyama işlemini geliştirmektir.

Originality (Özgünlük): The originality of this work lies in the hierarchical encoder and single-stage architecture. / Bu çalışmanın özgünlüğü, hiyerarşik kodlayıcı ve tek aşamalı mimaride yatmaktadır.

Results (Bulgular): The results of this work show significant improvements in image inpainting performance compared to state-of-the-art models. / Bu çalışmanın sonuçları, mevcut en son modellere göre iç boyama performansında önemli iyileştirmeler göstermektedir.

Conclusion (Sonuç): The conclusion of this work is that the proposed hierarchical encoder and single-stage architecture significantly enhance the effectiveness of image inpainting. / Bu çalışmanın sonucu, önerilen hiyerarşik kodlayıcı ve tek aşamalı mimarinin, iç boyama etkinliğini önemli ölçüde artırdığıdır.



Hierarchical Encoding for Image Inpainting with StyleGAN Inversion

Aysegul DÜNDAR^{1*}

¹Bilkent University, Department of Computer Science, Ankara, Turkey

Article Info

Research article
Received: 11/10/2024
Revision: 12/11/2024
Accepted: 12/12/2024

Keywords

Image Inpainting
Generative Adversarial
Networks

Abstract

Image inpainting, the process of removing unwanted pixels and seamlessly replacing them with new ones, poses significant challenges requiring algorithms to understand image context and generate realistic replacements. With applications ranging from content generation to image editing, image inpainting has garnered significant interest. Traditional approaches involve training deep neural network models from scratch using binary masks to identify regions for inpainting. Recent advancements have shown the feasibility of leveraging well-trained image generation models, such as StyleGANs, for inpainting tasks. However, effectively embedding images into StyleGAN's latent space and addressing the challenges of diverse inpainting remain key obstacles. In this work, we propose a hierarchical encoder tailored to encode visible and missing features seamlessly. Additionally, we introduce a single-stage architecture capable of encoding both low-rate and high-rate latent features used by StyleGAN. While low-rate latent features offer a comprehensive understanding of images, high-rate latent features excel in transmitting intricate details to the generator. Through extensive experiments, we demonstrate significant improvements over state-of-the-art models for image inpainting, highlighting the efficacy of our approach.

StyleGAN Tersine Çevirisi ile Görsel İç Boyama için Hiyerarşik Kodlama

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 11/10/2024
Düzeltilme: 12/11/2024
Kabul: 12/12/2024

Anahtar Kelimeler

Resim boyama
Üretici Karşıt Ağlar

Öz

Görsel iç boyama, istenmeyen piksellerin kaldırılması ve bunların yerini yeni piksellerle sorunsuz bir şekilde doldurma süreci, algoritmaların görsel bağlamı anlamasını ve gerçekçi yerine koymalar üretmesini gerektiren önemli zorluklar sunar. İçerik üretiminden görsel düzenlemeye kadar pek çok uygulama alanı bulunan görsel iç boyama, önemli bir ilgi görmüştür. Geleneksel yaklaşımlar, iç boyama için bölgeleri belirlemek amacıyla ikili maskeler kullanarak derin sinir ağı modellerinin sıfırdan eğitilmesini içerir. Son gelişmeler, iyi eğitilmiş görsel üretim modellerinin (örneğin, StyleGAN'ler) iç boyama görevlerinde kullanılabilirliğini göstermiştir. Ancak, görselleri StyleGAN'ın latent uzayına etkin bir şekilde yerleştirme ve çeşitli iç boyama zorluklarını aşma, hala ana engelleri oluşturmaktadır. Bu çalışmada, görünür ve eksik özellikleri sorunsuz bir şekilde kodlamak için tasarlanmış hiyerarşik bir kodlayıcı önermekteyiz. Ayrıca, StyleGAN tarafından kullanılan düşük ve yüksek oranlı latent özellikleri kodlayabilen tek aşamalı bir mimari tanıtmaktayız. Düşük oranlı latent özellikler, görsellerin kapsamlı bir şekilde anlaşılmasını sağlarken, yüksek oranlı latent özellikler, karmaşık detayların üreticiye iletilmesinde mükemmel sonuçlar elde etmektedir. Bu makalede, kapsamlı deneylerle, iç boyama için mevcut en son modellere göre önemli iyileştirmeler sağladığımızı ve yaklaşımımızın etkinliğini vurgulamaktayız.

1. INTRODUCTION (GİRİŞ)

Image inpainting involves the removal of unwanted pixels and their replacement with new ones in a manner that renders the alterations indistinguishable. This task presents significant challenges, requiring the algorithm to comprehend the context of the image based on the available unerased partial data and generate new pixels that seamlessly blend with the surrounding content. Due

to its broad range of applications spanning from content generation to image editing, image inpainting algorithms have garnered considerable interest. The complexity of the task, coupled with its potential for enabling various applications, has made it a popular subject of research [1–9].

Traditionally, deep neural network models have been trained from scratch for image inpainting tasks. Binary masks are employed to delineate the

regions to be erased, after which images are multiplied by these masks to nullify the unwanted pixels. Leveraging paired data comprising erased and original images, networks are trained using various loss objectives, including pixel-wise reconstruction and adversarial losses [1–5, 10]. While previous models were randomly initialized and trained from scratch for this task, recent approaches demonstrate the feasibility of leveraging well-trained image generation models for inpainting tasks [6, 9]. These image generation models are trained on large-scale image datasets with substantial computational resources [7, 11–15]. They possess the capability to generate images with realistic details, indicating rich feature representations and a robust implicit understanding of images, rendering them suitable candidates for inpainting tasks.

Among generative models, StyleGANs [11, 13] have been extensively explored for both image editing [16–23] and inpainting tasks [9, 24, 25]. Successfully utilizing StyleGAN for editing and

inpainting presents a key challenge: correctly embedding a given image into StyleGAN’s latent space so that the input image can be reconstructed via StyleGAN from the embedded vector. In the case of inpainting, there is an additional challenge: embedding the erased image into StyleGAN’s latent space. While previous methods only embedded erased images and inpainted them with StyleGAN in a deterministic manner [24, 25], a recent method demonstrates the possibility of achieving diverse results by augmenting the embedded latent vectors with sampled ones [9]. Therefore, for diverse inpainting, another challenge arises: the encoder must encode the visible features of the input image while also being aware of the missing ones, allowing the new sampled codes to complete the features. For instance, when erasing a person’s hair, the encoder must encode all the facial features except the hair and be able to incorporate hair features from the sampled codes. This enables different hair colors and styles to be encoded among different samples, resulting in the generation of various images, as illustrated in Figure 1.



Figure 1. Inpainting results of our method. Our method is able to control the inpainting style via InterFaceGAN directions [18] for StyleGAN. (Yöntemimizin iç boyama sonuçları. Yöntemimiz, StyleGAN için InterFaceGAN yönlendirmeleri [18] aracılığıyla iç boyama tarzını kontrol edebilme yeteneğine sahiptir.)

In this work, we introduce a hierarchical encoder tailored to the intricate task of encoding visible features while seamlessly integrating missing features from sampled ones. Furthermore, we propose a single-stage architecture that encompasses encoding both low-rate and high-rate latent features utilized by StyleGAN. While low-rate latent features possess a comprehensive understanding of images, they may not capture all intricate details due to an inherent information bottleneck. While high-rate latent features may lack robust feature extraction capabilities necessary for understanding the context required for realistic

inpaintings, they excel in transmitting intricate image details to the generator.

In summary, our main contributions are as follows:

- We present a novel hierarchical encoder designed specifically for the complex task of encoding visible features while seamlessly integrating missing features obtained from sampled data. This encoder is tailored to address the challenges inherent in inpainting tasks, where the reconstruction of images necessitates a

comprehensive understanding of both visible and missing features.

- We propose a single-stage architecture capable of encoding both low-rate and high-rate latent features utilized by StyleGAN. While low-rate latent features offer a thorough understanding of images, they may lack the capacity to capture fine details due to inherent limitations of the low dimension. Conversely, high-rate latent features, while potentially deficient in robust feature extraction capabilities necessary for contextual understanding, excel in transmitting high-frequency image details to the generator, thereby enhancing the realism of the inpainted images.
- We conduct comprehensive experiments to evaluate the effectiveness of our framework. Our results demonstrate significant improvements over state-of-the-art models for image inpainting, showcasing the efficacy of our approach in addressing the challenges inherent in this task.

2. RELATED WORK (İLGİLİ ÇALIŞMALAR)

Image inpainting is a widely studied area owing to its diverse applications in image editing, object removal, and image extension [3, 26–29]. Effective inpainting requires a thorough understanding of context, prompting researchers to propose various techniques such as contextual encodings and semantic attention modules. These methods aim to guide the generation of erased pixels based on the valid (unerased) pixels [1, 4, 28, 30–32]. Additionally, specialized convolutional layers have been introduced to handle valid and invalid (erased) pixels differently, enhancing the encoding of valid pixel information [2, 3, 5]. Various approaches, including sketches, brush strokes, and semantic masks, have also been explored to guide image inpainting algorithms [3, 10, 26, 27]. These methods typically employ an encoder-decoder structure trained from scratch for the inpainting task.

In recent years, significant progress has been made in image generation methods, specifically by GANs, which involve sampling a point from a Gaussian distribution and learning to map it to a realistic image [7, 11–15]. This progress has sparked interest in utilizing the image generation capabilities of these networks for inpainting tasks.

Initially, architectural inspiration was drawn from these methods. For instance, CoModGAN [33] pro-

posed a StyleGAN-like architecture trained for inpainting, demonstrating successful diverse inpainting results while still being trained from scratch for the task. Subsequently, well-trained image generation algorithms, especially StyleGANv2, have been directly applied to inpainting [9, 24, 25]. Among these approaches, Yu et al. [24] learned an encoder to project images into the $W+$ space of StyleGAN. The encoder predicts $W+$ from erased images, from which an image is generated via StyleGAN, minimizing pixel-wise and feature-wise distances between the generated and unerased original image. This leads to deterministic outputs since only one $W+$ code is encoded for erased images. Wang et al. [25] adopted a similar approach, embedding the image into a deterministic latent code using an encoder.

Our work is primarily related to diverse inpainting with GAN inversion [9]. Yildirim et al. [9] demonstrated that encoded latent codes can be mixed with sampled ones to achieve diversity in inpainting results. While their method uses a feed-forward architecture, we employ a hierarchical approach to achieve diverse inpainting with higher-quality results. Additionally, our single stage architecture is more efficient and achieves better results.

3. MATERIALS AND METHODS (MATERİYAL VE METOD)

3.1. Architecture (Mimari)

In this work, we develop a StyleGAN-based image inpainting model. Our approach incorporates two key mechanisms to enhance the model's performance: augmenting missing features through the mapping network and facilitating seamless inpaintings by allowing high-rate latent features to bypass from the encoder directly to the StyleGAN generator. This section provides an in-depth explanation of both contributions.

Firstly, like previous inpainting methods [5, 9], we generate binary masks M with 1s defining the valid pixels and 0s defining the pixels we would like to erase. An input image, I , is erased by replacing the pixels we would like to erase with 0s. This is achieved by simply taking the dot product of mask and input image, $I_e = M \odot I$. We follow the approach of Yildirim et. al. [9] and use StyleGAN2's [13] mapping and generator networks to sample latent codes and synthesize images, respectively. These modules are pretrained and we do not tune them in our trainings.

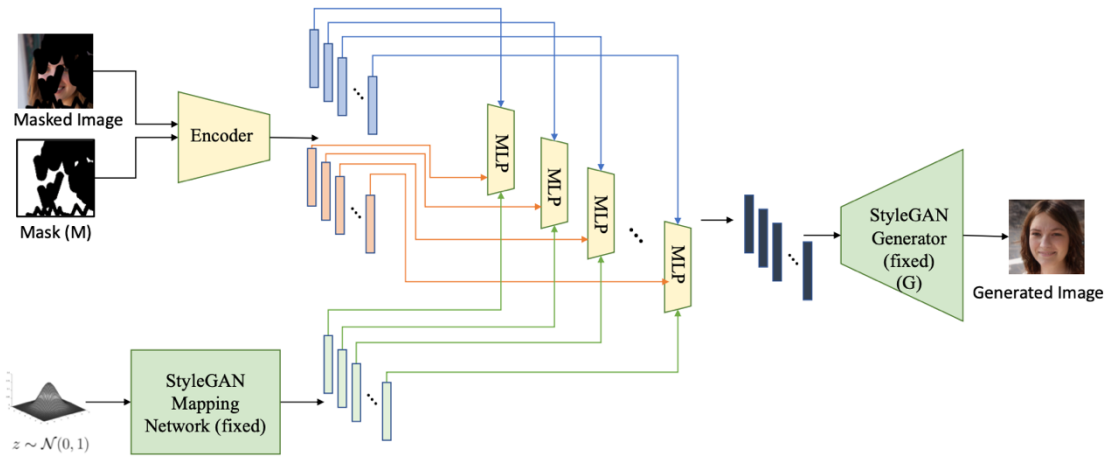


Figure 2. Overview of the proposed hierarchical image encoding framework. Through a hierarchical mixing mechanism, our model integrates visible information from masked images with missing details derived from mapped latent codes. The method sequentially generates output styles, ensuring awareness of previously determined styles. (Önerilen hiyerarşik görsel kodlama çerçevesinin genel bakışı. Hiyerarşik bir karıştırma mekanizması aracılığıyla, modelimiz maskelenmiş görsellerden görünür bilgiyi, haritalanmış latent kodlardan türetilen eksik detaylarla birleştirir. Yöntem, çıktıları sırasıyla üretir ve daha önce belirlenen stillerin farkında olmayı sağlar.)

Our encoder receives the erased image along with its corresponding mask, as illustrated in Fig. 2. We employ a straightforward encoder architecture based on [34] to map our erased images onto the latent space W^+ . Nonetheless, merely encoding the erased images might not suffice for effective inpainting. For instance, if the erased regions correspond to essential facial features such as eyes or hair, the encoded features may lack crucial information about these elements. Hence, we establish a secondary pathway to supplement the absent features from the erased image. This secondary pathway leverages StyleGAN's mapping network to sample random z vectors and derive corresponding W^+ codes, which naturally align with StyleGAN's latent space. The encoded latent code, W^{enc} , and the mapped latent code, W^{rand} , are both inputted into the mixing mechanism as shown in Figure 2.

In this paper, we propose a novel hierarchical mixing mechanism different than previous works. We anticipate the mixing network to integrate the visible information from the masked image with the absent details derived from the mapped latent codes. To mix the 14×512 sampled W^{rand} with the 28×512 encoded W^{enc} , we set 14 MLP (Multi-layer perceptron) layers. We employ a 28×512 feature encoding scheme with a specific purpose in mind. Among these features, half (14×512) are dedicated to representing the image features themselves, while the remaining half are tasked with indicating which features have been accurately encoded and which have been affected by image erasure. Therefore, for

each style code embedding, we use a single channel from W^{rand} and two channels from W^{enc} . Initially, we produce W^{out} for the coarse layers, representing the style codes directed towards StyleGAN's lowest resolution feature layers. Precisely, we first generate the W_1^{out} intended for the initial adaptive instance normalization layer of StyleGAN via a MLP that takes the first channel of W^{rand} and first two channels of W^{enc} , W_1^{rand} and $W_{1:2}^{enc}$, respectively. After that, in addition to the second channel of W^{rand} and the next two channels of W^{enc} , W_2^{rand} , and $W_{3:4}^{enc}$, we feed W_1^{out} to the next linear layer. By proceeding in this manner, the mixing mechanism remains cognizant of the styles that have been determined thus far. We generate the subsequent output styles sequentially using this approach. In our experiments, we show that using this hierarchical encoding greatly improves the results. MLP consists of two-layer linear networks. The first linear layer receives 3×512 input features and outputs 1×512 features. There is a ReLU activation following the first linear layer and the second linear layer has input and output dimensions set to 1×512 .

Our second contribution is to achieve seamless inpaintings by allowing high-rate latent features to bypass from the encoder directly to the StyleGAN generator. Previous methods leveraging StyleGAN for image editing [22, 34] and inpainting [9] recognize the limitations of using low-rate latent codes of W^+ . These codes often lack sufficient information to fully represent the image for the generator. The W^+ codes, being of size 14×512 ,

are considerably smaller than the input image size of $3 \times 256 \times 256$. This information bottleneck often leads to the loss of many details in the final generation if only $W+$ codes are employed. To address this issue, we utilize a skip encoder network, depicted in Figure 3, to convey high-detail image information into the generation pipeline. Previously, to address the same issue, DivInv [9] proposed taking the generated image from StyleGAN and feeding it into a second encoder and generation pipeline to achieve the final results. This second encoder and generation process incorporated skip connections. In this study, we introduce a more streamlined architecture, delivering high-rate features to the StyleGAN generator within a single-stage framework. Unlike previous methods, we

eliminate the need to generate images first and encode them again. Instead, we leverage the pretrained encoder and invoke the StyleGAN generator only once. We do that via a UNet architecture of Skip encoder operating within a spatial dimension of 64×64 . By simultaneously inputting both the encoded and generated features, the Skip encoder can identify the absent high-rate details from the image generation and incorporate them into the generation process. This feature space is referred to as F^+ in the ablation study. The output of the skip encoder serves as the features for StyleGAN. We achieve that by replacing the 64×64 generated features with the output of the Skip encoder.

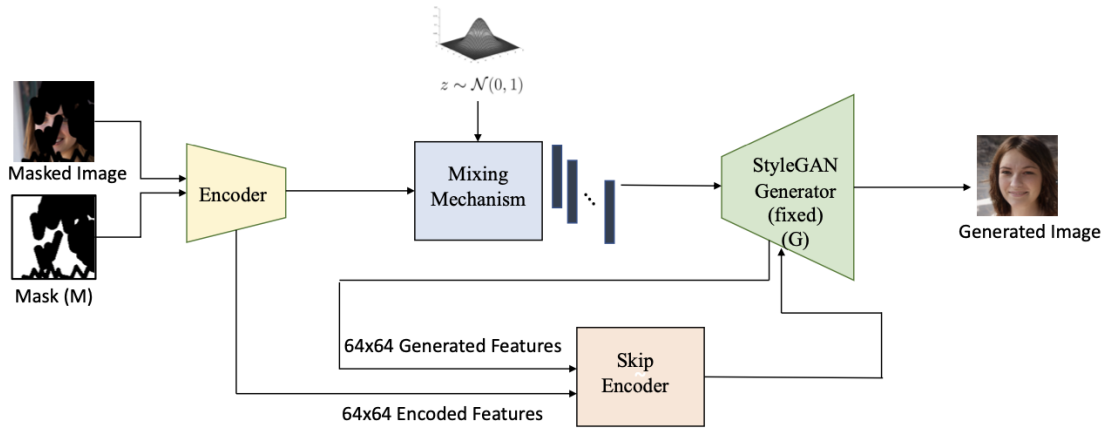


Figure 3. Architecture overview: Our study introduces an architecture, delivering high-rate features to the StyleGAN generator in a single-stage framework. Unlike prior methods, we bypass the generation-then-encoding process, instead leveraging a pretrained encoder and invoking the StyleGAN generator once.

This is facilitated by the Skip encoder, operating within a spatial dimension of 64×64 . By simultaneously inputting both encoded and generated features, the Skip encoder detects missing high-rate details in image generation, integrating them into the process. The output of the Skip encoder replaces the 64×64 generated features, serving as input features for StyleGAN. The detailed depiction of the Mixing mechanism in this figure has been omitted for brevity. For a comprehensive understanding of the Mixing mechanism, please refer to Figure 2. (Mimari Genel Bakışı: Çalışmamız, StyleGAN üreticisine yüksek oranlı özellikleri tek aşamalı bir çerçevede sunan bir mimari tanıtmaktadır. Önceki yöntemlerden farklı olarak, üretim-sonra-kodlama sürecini atlıyor ve bunun yerine önceden eğitilmiş bir kodlayıcı kullanarak StyleGAN üreticisini bir kez çağırıyoruz. Bu, 64×64 boyutunda bir uzaysal boyutta çalışan Skip kodlayıcı ile sağlanmaktadır. Hem kodlanmış hem de üretilmiş özellikleri aynı anda girdiler olarak vererek, Skip kodlayıcı, görsel üretimindeki eksik yüksek oranlı detayları tespit eder ve bunları sürece entegre eder. Skip kodlayıcısının çıktısı, 64×64 boyutundaki üretilmiş özelliklerin yerine geçer ve StyleGAN için giriş özellikleri olarak kullanılır. Bu şekildeki Mixing mekanizmasının ayrıntılı tasviri kısalık açısından çıkarılmıştır. Mixing mekanizmasının kapsamlı bir şekilde anlaşılması için lütfen Şekil 2'ye bakınız.)

3.2. Training Objectives (Mimari)

We train the framework with a combination of reconstruction and adversarial losses. Our framework outputs a generated image, I^o . Additionally, we obtain a final image by $I^f = M \odot I + (1 - M) \odot I^o$. The resulting image guarantees that unerased pixels remain unchanged throughout the process, as they are directly sourced from the input image. We adhere to the training pipeline outlined by Yildirim et al. [9], which

comprises two image generation stages. Initially, we sample a latent code z and generate an image, which is then subjected to erasure before being fed into the encoder. Subsequently, we either utilize the same z for the mapping network destined for the mixing mechanism or sample a new z . In the first scenario, where the same z is used, the model has access to the image features and is tasked with faithfully reproducing the original image pixel by pixel. Conversely, in the second scenario, a different z is sampled, and the model is solely expected to

accurately generate the unerased pixels while producing realistic overall images. We refer to the first and second settings network generations as I_g^o and I_r^o , respectively.

Reconstruction Losses. To ensure accurate pixel reconstruction, we employ a combination of L2 and perceptual losses. Specifically, we utilize perceptual losses derived from VGG (Φ) across various feature layers (j) when comparing images. For I_g^o , where the objective is to generate overall images, losses are applied to each pixel individually. Conversely, for I_r^o , which is tasked solely with faithfully reproducing unerased pixels, a mask is applied to exclude losses contributed from erased pixels as given below.

$$L_{rg} = \|I_g^o - I_g\|_2 + \|\phi_j(I_g^o) - \phi_j(I_g)\|_2$$

$$L_{rr} = \|(M \odot I_r^o) - I_r^e\|_2 + \|\phi_j(M \odot I_r^o) - \phi_j(I_r^e)\|_2$$

Adversarial Losses. We anticipate that these final images should exhibit realism, therefore, we employ adversarial guidance on both I_g^f and I_r^f . To achieve this, we utilize the pretrained discriminator from StyleGAN training, denoted as D , and train it alongside the encoder and mixing network.

$$L_{adv} = 2 \log D(I_g) + \log(1 - D(I_g^f)) + \log(1 - D(I_r^f))$$

Full Objective. Our final objective is the weighted sum of the adversarial and reconstruction losses as given below.

$$\lambda_a L_{adv} + \lambda_{rg} L_{rg} + \lambda_{rr} L_{rr}$$

We use the same training hyperparameters as Yildirim et al. [9] without any tuning, in order to emphasize the improvements resulting solely from architectural enhancements. The parameters are $\lambda_a = 8 \times 10^{-2}$, $\lambda_{rg} = 1$, and $\lambda_{rr} = 1$.

3. EXPERIMENTS (DENEYLER)

Dataset and Metric. We utilize the FFHQ human face dataset by Karras et al. [11], employing both their train and validation splits.

To evaluate the models, we use masks of varying sizes to control the percentage of the image that is erased. A mask with a range of 0 means the input image is not erased at all, while a range of 1.0

indicates the entire image is erased. The mask size determines the difficulty of the task: inpainting images with smaller erased regions is easier, while larger masks make the task more challenging. To assess different scenarios, we use three mask settings: an "easy" setting with mask ranges from 0.0 to 0.4, a "hard" setting with ranges from 0.4 to 1.0, and a third setting where the full range (0.0-1.0) is used. We generate the masks one time for the validation set and use them in all our evaluations.

For evaluation metrics, we employ the Fréchet Inception Distance (FID) [35] to assess realism, comparing the distribution of target images with inpainted images. If the inpainting is successful, there should not be visible boundaries between the erased and unerased pixels and the images should look like realistic faces since they are trained on FFHQ. FID is an important metric to assess the model's performance on these inpainting requirements.

We also evaluate the performance using the Learned Perceptual Image Patch Similarity (LPIPS) score [37], which compares the ground-truth original images with the inpainted images in feature level.

Baselines. To begin, we benchmark our method against state-of-the-art image inversion techniques including pSp [34], HFGI [17], and HyperStyle [36]. Utilizing the authors' released code, we train these models for inpainting tasks, augmenting the input with an additional channel for masks. The pSp model generates $W+$ predictions for image generation. In contrast, HFGI and HyperStyle employ a two-stage training approach. Initially, an encoder produces $W+$ predictions, followed by a second encoder that processes both the input image and StyleGAN-generated image with $W+$ predictions. The objective is to encode missing information into higher-rate latent codes. Subsequently, we conduct experiments with state-of-the-art image inpainting models for further comparisons. We perform inferences using CoModGAN's pretrained models [33], which propose training a StyleGAN-like model from scratch with co-modulation and skip connections tailored for inpainting tasks. Additionally, we utilize InvertFill [24] and DivInv [9] which are based on pretrained StyleGAN models. While DivInv serves as the closest comparison to our work, we surpass its performance with our enhanced hierarchical encoding architecture and streamlined single-stage high-rate feature bypassing. Our approach achieves superior results compared to theirs.

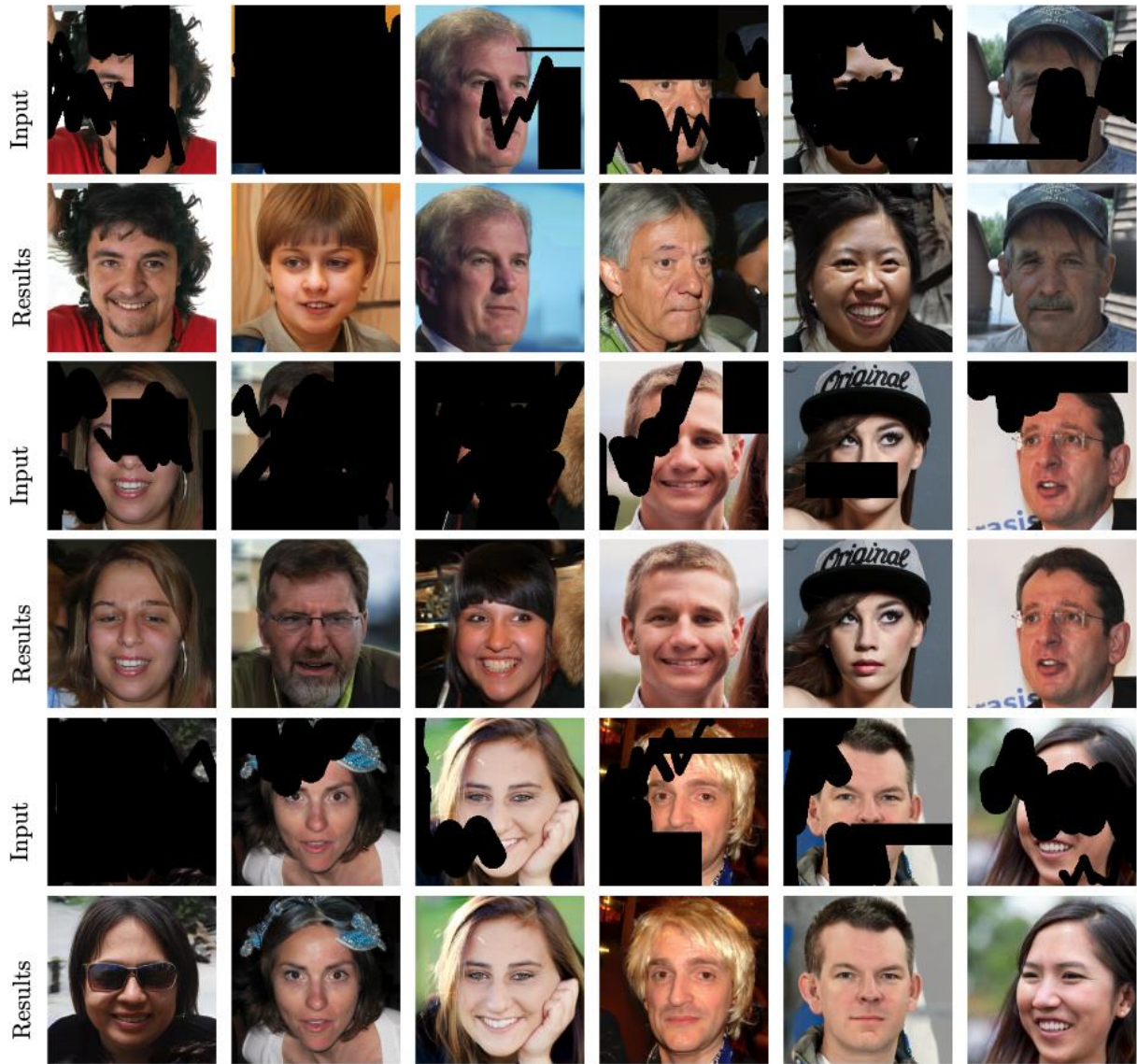


Figure 4. Inpainting results of our method. (Yöntemimizin iç boyama sonuçları.)

Qualitative Results. Fig. 4 shows the results of our methods on the FFHQ validation dataset. Our method achieves realistic inpainting results with small and large masks even when the mask is almost as large as the full image as shown in the second example from first row.

We also present inpainting and editing results in Figure 1. The images in the second row are generated by inpainting, following the framework outlined in Figure 2. The encoder and mapping networks produce, W^{enc} and W^{rand} , respectively. These codes pass through the MLP layers to generate the final W^{out} , which is used in the StyleGAN generator to produce the resulting images. In the third row, we apply edits to these W^{out} codes. Specifically, we leverage the directions learned by InterFaceGAN [18], which are

derived from an SVM trained in the $W+$ latent space of StyleGAN for attributes like hair color. The SVM is fitted using latent samples from images of people with blonde and non-blonde hair, yielding a direction vector that can modify the hair color to blonde. In the third row's results, we apply a step in this direction by adding the direction vector to the W^{out} from the second row. As a result, the hair color changes to blonde. Other than the addition we perform on W^{out} , we follow the exact same set-ups, and the features go through the skip encoder in the same way. Since we use a pretrained StyleGAN, our method seamlessly incorporates its existing editing capabilities within the inpainting pipeline.

Quantitative Results. We present the quantitative results in Table 1, where we compare our model with competing methods across three evaluation scenarios, as detailed in the Dataset and Metrics section. When considering all mask types—both

easy and difficult—the models designed for GAN inversion (pSp, HFGI, HyperStyle) perform worse than others, despite being trained for the inpainting task. On the other hand, models specifically designed for inpainting, such as CoModGAN and InvertFill, perform better, though still significantly worse than our approach. DivInversion is the closest competitor to our method, but we achieve nearly a 20% improvement, reducing the FID score from 5.92 to 4.85. A similar improvement is observed in the LPIPS score.

When the erased area is small (i.e., for easier masks), deterministic models like pSp, HFGI, HyperStyle, and InvertFill perform well, as they can recover most of the information from the unerased regions. In this scenario, InvertFill outperforms our model, with both models surpassing CoModGAN and DivInversion. Our method achieves the second-best result, coming close to InvertFill’s performance. However, as the difficulty level increases, deterministic models begin to struggle, while our approach continues to outperform them by significant margins.

Table 1. Quantitative results of our and competing methods on FFHQ validation dataset. Best results are highlighted in bold. (FFHQ doğrulama veri kümesindeki bizim ve rakip yöntemlerin nicel sonuçları. En iyi sonuçlar kalın yazı ile vurgulanmıştır.)

Models	All Masks (0.0-1.0)		Easy Masks (0.0-0.4)		Difficult Masks (0.4-1.0)	
	FID	LPIPS	FID	LPIPS	FID	LPIPS
pSp[34]	8.23	0.272	3.15	0.164	9.63	0.374
HFGI [17]	7.66	0.214	2.24	0.152	8.87	0.352
HyperStyle [36]	7.46	0.208	3.08	0.159	8.67	0.337
CoModGAN [33]	7.35	0.151	4.68	0.170	7.13	0.230
InvertFill [24]	7.45	0.152	1.13	0.123	9.58	0.235
DivInversion [9]	5.92	0.153	2.26	0.145	6.23	0.223
Ours	4.85	0.144	1.87	0.135	5.72	0.209

Ablation Study. We present the results of our ablation study in Table 2. Our work starts with DivInversion [9] and proposes a hierarchical encoder and single-stage architecture. We start presenting the results of DivInversion - First stage model which only encodes features in $W+$ space. This set-up is comparable with our hierarchical $W+$ encoding. Hierarchical encoder improves the FID from 16.65 to 13.61. Next, we compare the methods that also incorporate feature encodings in $F+$ space. DivInversion as well as many other methods propose a two-stage architecture, which goes through StyleGAN generator twice. First, they generate an image from $W+$ encoding, and then the second encoder takes this generated image and erased image to also predict $F+$ features, and final image is generated via StyleGAN again. First, we compare our hierarchical encoding in the two-stage architecture to validate the effectiveness of this encoding mechanism. As shown in Table 2, with this encoding FID’s improve from 5.92 to 5.20. Next, we replace the two-stage pipeline with our single stage one that predicts the $W+$ and $F+$ features with a single pass in the encoder which further improves the FID to 4.85.

Table 2. Ablation study conducted on all masks. (Tüm maskeler üzerinde yapılan ablation çalışması.)

Models	FID
DivInversion - First Stage	16.65
Hierarchical - $W+$ encoding	13.61
DivInversion - Two Stage	5.92
Hierarchical - Two Stage	5.20
Hierarchical - $W+$ and $F+$ encoding	4.85

4. CONCLUSIONS (SONUÇLAR)

In conclusion, image inpainting is vital for numerous applications, from editing to object removal. While traditional methods start from scratch, recent advances exploit pretrained models like StyleGANs. Our work is also built on pretrained StyleGAN because of its rich internal representations. In this work, we introduce a hierarchical encoder and single-stage architecture

that tackle the complexities of encoding visible and missing features. Our experiments confirm substantial enhancements over existing models. Our model is able to fill the erased areas even when they are as large as the whole image. Additionally, by using the editing directions explored via InterFaceGAN [18], we can edit images during inpainting as given in Figure 1.

ACKNOWLEDGMENTS (TEŞEKKÜR)

This work has been funded by The Scientific and Technological Research Council of Turkey (TUBITAK), 3501 Research Project under Grant No 121E097.

Bu çalışma, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından 3501 Araştırma Projesi kapsamında 121E097 numaralı proje desteğiyle finanse edilmiştir.

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)

Aysegül DUNDAR: She 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] D. Pathak, P. Krahenbuhl, J. Donahue, T. Darrell, and A. A. Efros, "Context encoders: Feature learning by inpainting," in Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition, pp. 2536–2544, 2016.

[2] G. Liu, F. A. Reda, K. J. Shih, T.-C. Wang, A. Tao, and B. Catanzaro, "Image inpainting for irregular holes using partial convolutions," in

Proceedings of the European conference on computer vision (ECCV), pp. 85–100, 2018.

[3] J. Yu, Z. Lin, J. Yang, X. Shen, X. Lu, and T. S. Huang, "Free-form image inpainting with gated convolution," in Proceedings of the IEEE/CVF international conference on computer vision, pp. 4471–4480, 2019.

[4] J. Li, N. Wang, L. Zhang, B. Du, and D. Tao, "Recurrent feature reasoning for image inpainting," in Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, pp. 7760–7768, 2020.

[5] G. Liu, A. Dündar, K. J. Shih, T.-C. Wang, F. A. Reda, K. Sapra, Z. Yu, X. Yang, A. Tao, and B. Catanzaro, "Partial convolution for padding, inpainting, and image synthesis," IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. 45, no. 5, pp. 6096–6110, 2022, <https://doi.org/10.1109/TPAMI.2022.3209702>.

[6] A. Lugmayr, M. Danelljan, A. Romero, F. Yu, R. Timofte, and L. Van Gool, "Repaint: Inpainting using denoising diffusion probabilistic models," in Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, pp. 11461–11471, 2022.

[7] R. Rombach, A. Blattmann, D. Lorenz, P. Esser, and B. Ommer, "High-resolution image synthesis with latent diffusion models," in Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, pp. 10684–10695, 2022.

[8] A. B. Yildirim, V. Baday, E. Erdem, A. Erdem, and A. Dündar, "Inst-inpaint: Instructing to remove objects with diffusion models," arXiv preprint arXiv:2304.03246, 2023.

[9] A. B. Yildirim, H. Pehlivan, B. B. Bilecen, and A. Dündar, "Diverse inpainting and editing with gan inversion," in Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision, pp. 23120–23130, 2023.

[10] H. Sivuk and A. Dündar, "Diverse semantic image editing with style codes," arXiv preprint arXiv:2309.13975, 2023.

[11] T. Karras, S. Laine, and T. Aila, "A style-based generator architecture for generative adversarial networks," in Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, pp. 4401–4410, 2019.

[12] H. Zhang, I. Goodfellow, D. Metaxas, and A. Odena, "Self-attention generative adversarial networks," in International conference on machine learning, pp. 7354–7363, PMLR, 2019.

[13] T. Karras, S. Laine, M. Aittala, J. Hellsten, J. Lehtinen, and T. Aila, "Analyzing and

- improving the image quality of stylegan,” in Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, pp. 8110–8119, 2020.
- [14] N. Yu, G. Liu, A. Dundar, A. Tao, B. Catanzaro, L. S. Davis, and M. Fritz, “Dual contrastive loss and attention for gans,” in Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision, pp. 6731–6742, 2021.
- [15] C. Saharia, W. Chan, S. Saxena, L. Li, J. Whang, E.L. Denton, K. Ghasemipour, R. Gontijo Lopes, B. Karagol Ayan, T. Salimans, et al., “Photorealistic text-to-image diffusion models with deep language understanding,” *Advances in Neural Information Processing Systems*, vol. 35, pp. 36479–36494, 2022.
- [16] O. Tov, Y. Alaluf, Y. Nitzan, O. Patashnik, and D. Cohen-Or, “Designing an encoder for style-gan image manipulation,” *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, vol. 40, no. 4, pp. 1–14, 2021, <https://doi.org/10.1145/3450626.3459838>.
- [17] T. Wang, Y. Zhang, Y. Fan, J. Wang, and Q. Chen, “High-fidelity gan inversion for image attribute editing,” in Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, pp. 11379–11388, 2022.
- [18] Y. Shen, J. Gu, X. Tang, and B. Zhou, “Interpreting the latent space of gans for semantic face editing,” in Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, pp. 9243–9252, 2020.
- [19] E. Härkönen, A. Hertzmann, J. Lehtinen, and S. Paris, “Ganspace: Discovering interpretable gan controls,” *Advances in Neural Information Processing Systems*, vol. 33, 2020.
- [20] O. Patashnik, Z. Wu, E. Shechtman, D. Cohen-Or, and D. Lischinski, “Styleclip: Text-driven manipulation of stylegan imagery,” in Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision, pp. 2085–2094, 2021.
- [21] Z. Chen, R. Jiang, B. Duke, H. Zhao, and P. Aarabi, “Exploring gradient-based multi-directional controls in gans,” in *European Conference on Computer Vision*, pp. 104–119, Springer, 2022.
- [22] H. Pehlivan, Y. Dalva, and A. Dundar, “Styleres: Transforming the residuals for real image editing with stylegan,” in Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, pp. 1828–1837, 2023.
- [23] A. B. Yildirim, H. Pehlivan, and A. Dundar, “Warping the residuals for image editing with stylegan,” arXiv preprint arXiv:2312.11422, 2023.
- [24] Y. Yu, L. Zhang, H. Fan, and T. Luo, “High-fidelity image inpainting with gan inversion,” in *Computer Vision—ECCV 2022: 17th European Conference, Tel Aviv, Israel, October 23–27, 2022, Proceedings, Part XVI*, pp. 242–258, Springer, 2022.
- [25] W. Wang, L. Niu, J. Zhang, X. Yang, and L. Zhang, “Dual-path image inpainting with auxiliary gan inversion,” in Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, pp. 11421–11430, 2022.
- [26] Y. Jo and J. Park, “Sc-fegan: Face editing generative adversarial network with user’s sketch and color,” in Proceedings of the IEEE/CVF international conference on computer vision, pp. 1745–1753, 2019.
- [27] W. Luo, S. Yang, H. Wang, B. Long, and W. Zhang, “Context-consistent semantic image editing with style-preserved modulation,” in *European Conference on Computer Vision*, pp. 561–578, Springer, 2022.
- [28] Y. Wang, X. Tao, X. Shen, and J. Jia, “Wide-context semantic image extrapolation,” in Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, pp. 1399–1408, 2019.
- [29] Y.-C. Cheng, C. H. Lin, H.-Y. Lee, J. Ren, S. Tulyakov, and M.-H. Yang, “Inout: Diverse image outpainting via gan inversion,” in Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, pp. 11431–11440, 2022.
- [30] H. Liu, B. Jiang, Y. Xiao, and C. Yang, “Coherent semantic attention for image inpainting,” in Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision, pp. 4170–4179, 2019.
- [31] J. Yu, Z. Lin, J. Yang, X. Shen, X. Lu, and T. S. Huang, “Generative image inpainting with contextual attention,” in Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition, pp. 5505–5514, 2018.
- [32] C. Xie, S. Liu, C. Li, M.-M. Cheng, W. Zuo, X. Liu, S. Wen, and E. Ding, “Image inpainting with learnable bidirectional attention maps,” in Proceedings of the IEEE/CVF international conference on computer vision, pp. 8858–8867, 2019.
- [33] S. Zhao, J. Cui, Y. Sheng, Y. Dong, X. Liang, E. I. Chang, and Y. Xu, “Large scale image completion via co-modulated generative adversarial networks,” in *International Conference on Learning Representations*, 2021.

- [34] E. Richardson, Y. Alaluf, O. Patashnik, Y. Nitzan, Y. Azar, S. Shapiro, and D. Cohen-Or, “Encoding in style: a stylegan encoder for image-to-image translation,” in Proceedings of the IEEE/CVF conference on computer vision and pattern recognition, pp. 2287–2296, 2021.
- [35] M. Heusel, H. Ramsauer, T. Unterthiner, B. Nessler, and S. Hochreiter, “Gans trained by a two time-scale update rule converge to a local nash equilibrium,” *Advances in neural information processing systems*, vol. 30, 2017.
- [36] Y. Alaluf, O. Tov, R. Mokady, R. Gal, and A. Bermano, “Hyperstyle: Stylegan inversion with hypernetworks for real image editing,” in Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, pp. 18511–18521, 2022.
- [37] Richard Zhang, Phillip Isola, Alexei A Efros, Eli Shechtman, and Oliver Wang. The unreasonable effectiveness of deep features as a perceptual metric. In Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition, pages 586–595, 2018

Harmoni Arama Varyantlarının EEG Gürültü Temizleme Problemi Üzerinden Kıyaslanması

Serhat Celil İLERİ¹  Selçuk ASLAN²  Sercan DEMİRCİ^{1*} 

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

²Erciyes Üniversitesi, Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Uçak Mühendisliği Bölümü, Kayseri, Türkiye

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 28/05/2024
Düzeltilme: 11/10/2024
Kabul: 15/11/2024

Anahtar Kelimeler

Büyük Veri Optimizasyonu
Harmoni Arama
Algoritması
EEG

Article Info

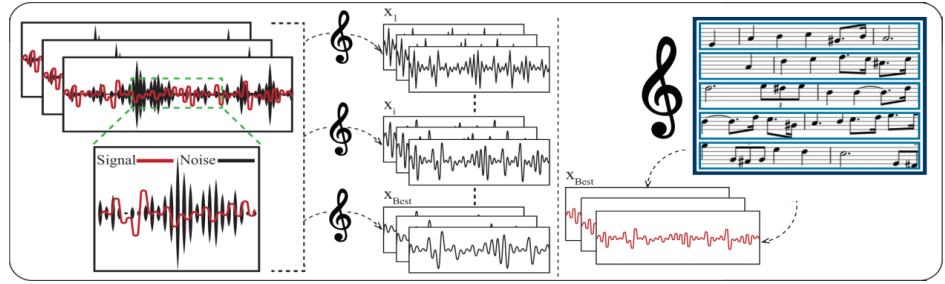
Research article
Received: 28/05/2024
Revision: 11/10/2024
Accepted: 15/11/2024

Keywords

Big Data Optimization
Harmony Search Algorithm
EEG

Grafik Özet (Graphical/Tabular Abstract)

Bu çalışma EEG sinyallerinden gürültü temizleme problemi üzerinde harmoni arama algoritması ve varyantlarının karşılaştırmalı performans analizi üzerine odaklanmaktadır. This study focuses on comparative performance analysis of the harmony search algorithm and its variants on noise removal from EEG signals.



Şekil A: HS algoritmasıyla EEG Optimizasyon Probleminin Görsel Temsili /

Figure A: Visual Representation of EEG Optimization Problem with HS Algorithm

Önemli noktalar (Highlights)

- EEG sinyallerindeki gürültü temizleme için HS algoritması ve varyantları incelenmiştir. / HS algorithm and its variants are investigated for noise removal in EEG signals.
- HS varyantları, büyük veri problemlerinde üstün performans sergilemiştir. / HS variants demonstrated superior performance in big data problems.
- Bazı HS varyantları HS algoritmasından daha iyi sonuçlar elde etmiştir. / Some HS variants achieved better results from HS.

Amaç (Aim): EEG gürültü temizleme probleminin çözümünde harmoni arama algoritması varyantlarının performansını karşılaştırmaktır. / To compare the performance of harmony search algorithm variants in solving the EEG noise removal problem.

Özgünlük (Originality): HS algoritmasının EEG gürültü temizleme problemi üzerindeki varyantlarının detaylı analizi yapılmıştır. / Detailed analysis of HS algorithm variants on EEG noise removal problem is conducted.

Bulgular (Results): Bazı HS varyantları EEG gürültü temizleme problemi üzerinde HS algoritmasından daha başarılı sonuçlar elde etmiştir. / Some HS variants have achieved better results than the HS algorithm on the EEG noise removal problem.

Sonuç (Conclusion): EEG gürültü temizleme problemi ve diğer gerçek hayat problemlerinde HS algoritması ile elde edilen sonuçlar, algoritmanın sonradan geliştirilen varyantları kullanılarak daha başarılı hale getirilebilir. / The results obtained with the HS algorithm in the EEG noise removal problem and other real-life problems can be made more successful by using later developed variants of the algorithm.



Harmoni Arama Varyantlarının EEG Gürültü Temizleme Problemi Üzerinden Kıyaslanması

Serhat Celil İLERİ¹ Selçuk ASLAN² Sercan DEMİRCİ^{1*}

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

²Erciyes Üniversitesi, Havacılık ve Uçay Bilimleri Fakültesi, Uçak Mühendisliği Bölümü, Kayseri, Türkiye

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 28/05/2024
Düzeltilme: 11/10/2024
Kabul: 15/11/2024

Anahtar Kelimeler

Büyük Veri Optimizasyonu
Harmoni Arama
Algoritması
EEG

Öz

Elektro-ensefalogram (EEG) taraması, beyinde oluşan elektriksel aktiviteleri ölçümleyerek beynin fonksiyonlarını başarılı şekilde yerine getirip getirmediği hakkında bilgi veren bir tıbbi görüntüleme sistemidir. İnsan kafatasına elektrotlar yerleştirilerek yapılan bu tarama sinyalleri kişinin vücudundaki diğer aktivitelerden ve dış faktörlerden dolayı gürültüye maruz kalmaktadır. Harmoni arama (HS) algoritması, müzik eserleri oluşturulurken gerçekleştirilen besteleme sürecinden esinlenen bir yarı-sezgisel algoritmadır. Bu çalışmada HS algoritması ve sonrasında geliştirilen varyantları ile EEG sinyallerinin gürültülerden temizlenmesi problemi optimize edilmeye çalışılmış ve varyantların bir büyük veri optimizasyon problemi olan bu problem üzerindeki başarımları kıyaslanmıştır. İncelenen sonuçlar, büyük veri optimizasyon problemleri üzerinde sonradan geliştirilen HS varyantlarının, HS algoritmasının ilk versiyonundan daha üstün performans gösterme kabiliyetine sahip olduğunu ortaya koymaktadır.

Comparison of Harmony Search Variants on EEG Noise Removal Problem

Article Info

Research article
Received: 28/05/2024
Revision: 11/10/2024
Accepted: 15/11/2024

Keywords

Big Data Optimization
Harmony Search
Algorithm
EEG

Abstract

Electro-encephalogram (EEG) scan is a medical imaging system that measures the electrical activities in the brain and gives information about whether the brain is functioning successfully. These scanning signals, which are made by placing electrodes on the human skull, are exposed to noise due to other activities in the person's body and external factors. The harmony search (HS) algorithm is a semi-heuristic algorithm inspired by the composing process when creating musical works. In this study, the problem of removing noise from EEG signals with the HS algorithm and its variants developed afterwards was tried to be optimized and the performances of the variants on this problem, which is a big data optimization problem, were compared. The examined results reveal that the subsequently developed HS variants demonstrate superior performance compared to the initial version of the HS algorithm in big data optimization problems.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Günümüzde çok farklı kaynaklardan elde edilen ve çok çeşitli amaçlarla kullanılmak için toplanan bilgilerin tamamına yakını dijital olarak üretilmekte, saklanmakta ve işlenmektedir. Hayatımızın her alanında günden güne daha da büyüyerek ve önem kazanarak gelişimini sürdüren dijital veriler endüstriden eğitime, sağlıktan güvenliğe, ulaşımdan haberleşmeye tüm sektörler için çağın gerekliliklerini sağlamak için geleneksel yöntemlerden daha güncel yöntem ve teknolojileri kullanmaya zorlamaktadır [1]. Veri işleme konusunda belirli bir ölçeğin üzerindeki tüm

kuruluşların üstesinden gelmeye çalıştığı önemli konulardan biri de büyük veri olarak bilinmektedir.

Büyük veri kavramı, ilk duyulduğunda sadece verinin boyutuyla alakalı olarak algılandı da aslında çok daha kapsamlı bir problemler ve çözümler bütünüdür. Bu kavramdaki büyüklük ifadesi, "hacim" (volume), "hız" (velocity), "çeşitlilik" (variety), "gerçeklik" (veracity) ve "değer" (value) kavramlarıyla açıklanmakta, bu ifadelerin İngilizcelerinin kısaltmalarının aynı harfle başlaması nedeniyle kısaca 5V olarak tanımlanmaktadır [2].

Hacim kavramı, büyük kelimesinin aklımıza ilk getirdiği anlam olan, verinin çok yüksek boyutlarda ve sayılarda olmasını ayrıyeten giderek daha da büyümesini ifade eder. Hız kavramı verinin ilgili kaynaklardan toplanma hızını, çeşitlilik kavramı ise verinin farklı kaynaklardan toplanarak bir araya getirilmesini açıklar. Gerçeklik kavramı da toplanılan verilerle birlikte veri kaynağının kalitesini, kullanılabilirliğini ve doğruluğunu; değer kavramı ise toplanması, depolanması ve işlenmesi için geleneksel yöntemlerin dışına çıkılarak yürütülen sürecin sonucunda elde edilen verinin kıymetini ifade etmektedir [2].

Abbass tarafından elektro-ensefalogram (EEG) taraması sinyallerinde çevresel faktörlerden dolayı beynin elektriksel aktivitesini analiz etmeyi güçleştiren gürültülerden arındırılması işlemi içeren bir büyük veri optimizasyon problemi literatüre sunulmuştur [3]. EEG taramasından elde edilen sinyali iki farklı parçaya ayırmayı amaçlayan bu problemde parçalardan ilki beyin aktivitelerini elde etmek için gerekli bilgiyi sağlamak üzere gürültülerden arındırılan sinyali barındırırken ikinci parça ise tarama sırasında sinyalde meydana gelen gürültüleri tutmaktadır.

Büyük veri optimizasyon problemleri araştırmacıların ilgisini çekmiş ve halihazırda literatürde bulunan yöntemlerin büyük veri optimizasyonu üzerindeki performansı ölçümlenmiştir. Genetik Algoritma (GA), Diferansiyel Gelişim (DE), Yapay Arı Kolonisi Algoritması (ABC), Havai Fişek Algoritması (FW), Ateşböceği Algoritması (FA) ve HS gibi birçok popüler algoritma ile EEG sinyallerinin gürültüden temizlenmesi tabanlı büyük veri işleme problemleri üzerine çalışmalar yapılmıştır [4-9]. Sinyallerin optimize edilmesini amaçlayan bu problem için daha başarılı sonuçlar üretmek için probleme özel olarak tarama sinyalinden yararlanan kaynak-bağımlı yöntemler de geliştirilmiştir [10-11].

Shi ve arkadaşları tarafından motor görüntüleri tabanlı Beyin-Bilgisayar Arayüzü (BCI) için yeni bir ikili HS varyantı (BHS) önerilmiş ve açık olarak yayınlanan iki EEG veri seti üzerinde test edilmiştir. Önerilen ikili yöntem ile önceki çalışmalardan daha az hesaplama zamanı ve daha iyi ortalama test doğruluğu elde edilmiştir [12].

Nakra ve Duhan tarafından motor görüntüleri sınıflandırmak için EEG sinyallerinin derin sinir ağları (DNN) ve HS algoritması tabanlı optimal öznelik seçimi üzerine çalışma yapılmış, ham EEG sinyalleri sırasıyla kanal seçimi, bant geçirgen filtre, anisotropik difüzyon filtresi, veri segmentasyonu,

öznelik çıkarımı adımlarının ardından HS algoritması kullanılarak öznelik seçimi yapılmış, ardından DNN kullanılarak sınıflandırma gerçekleştirilmiştir [13].

Bu çalışmada ise HS algoritmasının varyantları arasında ön plana çıkan varyantlar incelenerek bu varyantların EEG sinyallerinden gürültü gidermeyi amaçlayan büyük veri problemleri üzerindeki başarımları değerlendirilecektir. Bölüm 2'de EEG sinyali temelli büyük veri optimizasyon problemleri açıklanacak, Bölüm 3'te HS algoritması ve varyantlarının işleyişi anlatılacaktır. HS varyantlarından elde edilen deneysel sonuçlar Bölüm 4'te değerlendirilecektir. Bölüm 5'te çalışmanın sonuçları tartışılacak ve ileride üzerinde çalışılabilecek konulara değinilecektir.

2. EEG SİNYALİ TEMELLİ BÜYÜK VERİ OPTİMİZASYON PROBLEMLERİ (EEG SIGNAL BASED BIG DATA OPTIMIZATION PROBLEMS)

Abbass tarafından önerilen ve Evrimsel Hesaplamalar Kongresi 2015 (CEC2015) Büyük Optimizasyon özel oturumu (BigOpt) yarışma konusu olarak belirlenen problemde EEG taramasından elde edilen sinyallerin, tarama esnasında hastanın vücudundaki diğer aktivitelerden kaynaklı olarak veya diğer dış faktörlerin meydana getirdiği gürültülerin temizlenmesi, bu şekilde analizi ve işlenmesi çok daha kolay bir tarama sinyali elde edilmesi amaçlanmaktadır [14-15].

Farklı kanallardan eş zamanlı olarak saniyede 256 bayt verinin işlenmesini gerektiren sinyalin ikili tabandaki boyutu saniyede 20 Kilobayt olurken düz metin formatında ise 0.5 Megabit olarak hesaplanmaktadır. İşlenecek sinyaller 4, 12 ve 19 kanallı olup her bir sinyalin normal hali ile birlikte 0.1 düzeyinde ek gürültü eklenmiş hali olmak üzere toplamda 6 adet tek amaçlı optimizasyon problemi araştırmacılara sunulmuştur. Saniyelik değerlere bakıldığında işlenmesi gereken veri miktarı az gibi görünse de ortalama olarak bir saat süren EEG taraması oturumları işlenmesi gereken veriyi sürekli hale getirmektedir, bu da problemin bir büyük veri optimizasyon problemi olarak adlandırılmasına uygun hale getirmektedir. EEG problemlerinden 4 kanallı olanlar için altı farklı sinyalden gelen bilgiler kullanılmaktadır. Bu sinyallerden dört tanesi doğrudan EEG taramasına ait olmakla birlikte elektro-miyografi (EMG) için kullanılan iki sinyal adet sinyal taramada meydana gelen artefakt

adındaki bozulmaları simüle etmek adına her bir saniyelik taramanın son 250 ile 500 milisaniyelik kısımlarına eklenmektedir. 12 kanallı ve 19 kanallı problemler için ise 25 farklı sinyal kaynağının sırayla 12 ve 19 tanesi kullanılmaktadır. Geriye kalan ve bu işlemler için kullanılmayan altı adet sinyal ise EMG taraması için kullanılmakta olup çiftler indisliler ve tek indisliler olarak sırasıyla sinyalin bir saniyelik aralığında 250 ve 500 milisaniyelik kısımlarına eklenmiştir. Bu şekilde aralıklı olarak eklenen sinyaller, doğal olarak meydana gelen artifaktlara davranışsal olarak daha çok benzemiş ve senkron hale gelmemişlerdir. N kanal sayısını, M kanal uzunluğunu ifade etmek üzere EEG taramasından elde edilen kaynak sinyal S ile gösterilmekte olup $N \times M$ boyutlu bir matristir. A kare dönüşüm matrisi $N \times N$ boyutlu bir matris ve X matrisi Eşitlik 1'i sağlayan $N \times M$ boyutlu bir matristir.

$$X = A \times S \quad (1)$$

S kaynak matrisi $S1$ ve $S2$ olarak iki alt matrise ayrıştırılmak istenilmektedir. $S1$ matrisi işlenmiş sinyali, $S2$ matrisi ise kaynak sinyalden ayrıştırılan gürültüleri temsil etmektedir. $S1$ matrisinin kaynak sinyaldeki anlamlı bilgileri koruyabilmek adına S matrisine yakın değerler alması beklenmektedir. $S1$ ve $S2$ sinyalleri Eşitlik 2'de gösterildiği gibi tekrardan birleştirildiğinde ise S matrisine eşit olmalıdır.

$$S = S1 + S2 \quad (2)$$

$S1$, $S2$ ve A matrisi ile X matrisi arasında ise Eşitlik 3 ile gösterildiği gibi bir eşitlik meydana gelmektedir.

$$X = (A \times S1) + (A \times S2) \quad (3)$$

Kaynak S matrisinden $S1$ ve $S2$ matrislerini elde etmenin matematiksel olarak doğrudan hesaplamaya dayanan bir yolu olmadığı için istatistiksel yöntemler yardımıyla bu eşitlikleri sağlayan en iyi değerler elde edilmeye çalışılmaktadır. Pearson korelasyon katsayıları yardımıyla $S1$ ve $S2$ matrislerinin hesaplanması mümkün olmaktadır. Bir amaç problemi olarak ele alındığında, kaynak sinyale benzer şekilde elde edilmeye çalışılacak $S1$ matrisinin hesaplanması için -8.0 ile $+8.0$ değer aralığındaki zaman serileri oluşturulmakta ve çözümün kalitesi hesaplanmaktadır.

3. HARMONİ ARAMA (HS) ALGORİTMASI VE VARYANLARI (HARMONY SEARCH (HS) ALGORITHM AND ITS VARIANTS)

HS algoritması, 2001 yılında Geem ve arkadaşları tarafından literatüre sunulmuş olan bir yarı-sezgisel algoritmadır [16]. Doğadaki seslerin ve müzik aletlerinin belirli bir uyum içerisinde olduğunda insan zihninde meydana gelen musiki tatminden ve bir bestekârın yeni bir müzik bestelerken izlediği yöntemin matematiksel olarak formüle edilmesine dayanmaktadır. Çeşitli ses kaynaklarından veya enstrümanlardan gelen farklı dalga boyutu ve frekansa sahip seslerin bir araya geldiğinde dinlemekten keyif alınan bir eser oluşturulması ile optimizasyon problemlerindeki uygun veya en iyi çözümün araştırılması durumu eşleştirilmektedir. HS algoritması, Algoritma (1) ile de ifade edildiği gibi 4 temel adımdan meydana gelmektedir.

Algoritma 1 HS Algoritması (HS Algorithm)

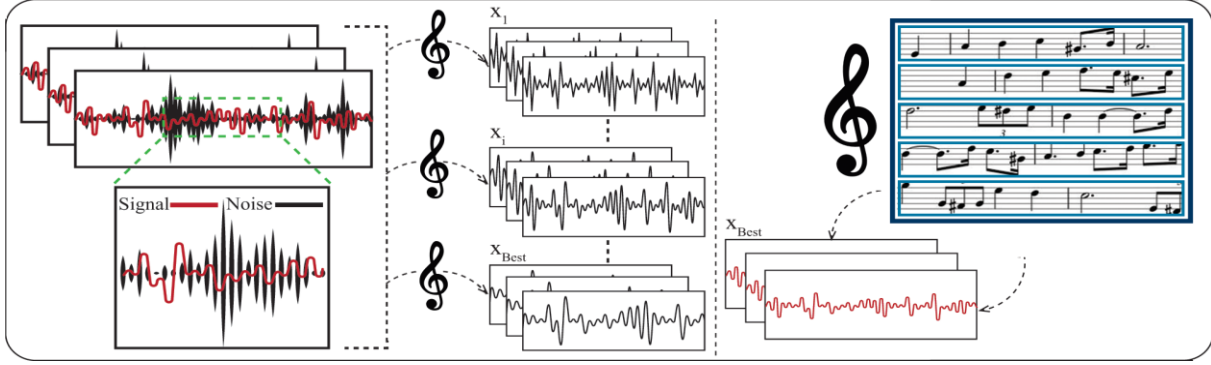
- 1: Harmoni hafızasını rastgele oluştur, harmonileri hafızaya ekle
- 2: Harmoni hafızasındaki harmonileri kullanarak yeni bir harmoni beste
- 3: Eğer yeni bestelenen harmoni, hafızadaki en kötü harmoniden daha iyi ise harmoni hafızasındaki en kötü harmoniyi çıkar, yeni
- 4: Durdurma şartları sağlanmamışsa Adım 2'ye git

HS algoritmasında üretilen çözümler *harmoni* olarak isimlendirilmekte olup, o zamana kadar üretilen en başarılı çözümlerin tutulduğu bir *harmoni hafızası* bulunmaktadır. Sabit sayıda harmoniyi içerisinde barındıran hafızanın boyutu *harmoni hafıza boyutu* (*harmony memory size*, *HMS*) parametresi ile belirlenmektedir. Adım 1'de boş olan harmoni hafızasının doldurulması için *HMS* adedince tamamen rastgele olarak harmoniler üretilmekte ve hafızaya dâhil edilmektedir.

İteratif olarak gerçekleştirilen sürecin başlangıcını oluşturan Adım 2'de ise yeni bir harmoni besteleme işlemi yapılmaktadır. Yeni bir harmoni bestelenmesi sırasında harmoni hafızasındaki o ana kadar bulunmuş en başarılı harmonilerden yararlanılıp yararlanmayacağına *Harmoni Hafızasından Faydalanma Oranı* (*Harmony Memory Considering Rate*, *HMCR*) isimli 0.0 ile 1.0 aralığında değerler alabilen bir parametre yardımıyla karar verilmektedir. Yeni üretilen

çözümün yani harmoninin her bir değeri için sözde-rastgele üreticiler (pseudo-random generator, PRNG) yardımıyla 0.0 ile 1.0 arasında üretilen rastgele değer, eğer ki *HMCR* parametresinden daha

küçük ise yeni üretilecek değerde harmoni hafızasından yararlanılmakta, değil ise tamamen rastgele olarak belirlenmektedir.



Şekil 1. HS algoritmasıyla EEG optimizasyon probleminin görsel temsili

(Visual representation of EEG optimization problem with HS algorithm)

Hafızadan faydalanılarak üretilen yeni değerler için bir de *Ton Ayarlama Oranı (Pitch Adjusting Rate, PAR)* adı verilen parametre yardımı ile seçilen değer *bant genişliği (bandwidth, bw)* oranına kadar küçük bir değişime maruz bırakılır. PRNG yardımıyla üretilen 0.0 ile 1.0 arasındaki rastgele sayı eğer ki *PAR* değerinden daha küçük ise ton ayarlama işlemi yapılır, daha büyük ise seçilen değer olduğu gibi değişiklik yapılmadan kullanılır. Ton ayarlama işleminde alt veya üst komşuluk değerlerine güncelleme yapılabilmektedir.

Yeni harmoni bestelendikten sonra Adım 3'e geçilmektedir. Bu aşamada, yeni üretilen harmoni, harmoni hafızasındaki harmonilerle karşılaştırılarak, eğer ki hafızada bulunan mevcut harmonilerin en az başarılı olanından daha başarılı sonuç üretebilmişse, hafızadaki en az başarılı olan harmoni çıkartılarak yerine yeni üretilen harmoni hafızaya dâhil edilmektedir. Bu şekilde hafızadaki harmonilerin o zamana kadar üretilen en iyi harmoniler olduğundan emin olunmaktadır. Adım 4'te ise belirlenen sonlanma kriterleri dikkate alınarak eğer ki sonlanmayı gerektiren koşullar henüz oluşmamış ise Adım 2'ye gidilerek yeni bir harmoni bestelenmekte, sonlanmayı gerektiren koşullar sağlanıyorsa algoritma sonlandırılmakta ve harmoni hafızasındaki en başarılı çözüm kullanılmaktadır. HS algoritmasıyla EEG optimizasyon problemi gösterimi Şekil 1 ile görselleştirilmiştir.

3.1. HS Varyantları (HS Variants)

HS algoritması, kolay uygulanabilirliği, az sayıda parametresi ve birçok problem üzerinde elde ettiği başarılı sonuçlar nedeniyle birçok araştırmacının ilgisini çekmiştir. Zaman içerisinde birçok problemin optimizasyonunda kullanıldığı gibi algoritmanın kendisi de belirli geliştirmelere tabii tutulmuştur. Bu şekilde birçok HS varyantı geliştirilmiş ve literatüre sunulmuştur [17]. Varyantların birçoğu HS algoritmasının parametrelerini belirleme ve dinamikleştirme üzerine geliştirmeler yaparken, bazı varyantlarda içeride uygulanan operatörler çeşitlendirilmiş ve yine birçok diğer algoritma ve yöntem ile de melezlenerek hibrit algoritmalar oluşturulmuştur [18]. Bu çalışmada HS algoritmasının parametreleri ve içerisindeki operatörler üzerinde değişiklikler yaparak algoritmanın performansını iyileştirmeyi amaçlanan en bilinen varyantlardan bazıları incelenmiştir.

3.1.1. Geliştirilmiş HS (IHS)

HS varyantları arasında en eski ve en bilinenlerden olan Geliştirilmiş HS (Improved HS), Mahdavi ve arkadaşları tarafından 2007 yılında literatüre sunulmuştur [19]. *PAR* ve *bw* parametrelerini dinamik hale getiren varyantta *t* mevcut iterasyonu ve *T_{max}* maksimum iterasyon sayısını belirtmek üzere *PAR_t* değeri Eşitlik 5 ile, *bw_t* değeri Eşitlik 6 ile hesaplanmaktadır. *PAR_{min}*, *PAR_{max}*, *bw_{min}* ve *bw_{max}* sırasıyla *PAR* ve *bw* değerinin alabileceği minimum ve maksimum değeri ifade etmektedir.

$$PAR(t) = PAR_{min} + \frac{PAR_{max} - PAR_{min}}{T_{max}} \times t \quad (4)$$

$$bw(t) = bw_{\{max\}} \times \exp \left(\ln \left(\frac{bw_{min}}{bw_{max}} \right) \times \frac{t}{T_{max}} \right) \quad (5)$$

3.1.2. Küresel en iyi HS (GHS)

2008 yılında Omran ve Mahdavi tarafından IHS üzerinde değişiklik yapılarak literatüre sunulan Küresel-En İyi HS (Global-Best Harmony Search, GHS) algoritmasında ise Parçacık Sürü Optimizasyonu (Particle Swarm Optimization, PSO) yönteminden faydalanılmıştır [20]. Yeni bir harmoni üretilirken hafızadaki en iyi harmoniden yararlanılmaktadır. Bu varyantta IHS'de ihtiyaç duyulan bw_{min} ve bw_{max} parametreleri kaldırılmıştır.

3.1.3. Değiştirilmiş HS (MHS)

Cheng ve arkadaşları tarafından geliştirilen Değiştirilmiş HS (Modified HS, MHS) varyantında HS algoritmasının yüksek parametrelili problemlerde daha iyi başarımlar elde etmesi amaçlanmıştır [21]. δ ismi verilen yeni bir parametre eklenmiş olup, harmoni hafızasındaki her bir çözüm için Eşitlik 6 kullanılarak bir seçilme olasılığı hesaplanmaktadır. Yeni bir harmoninin üretilmesi sırasında bu olasılıklardan faydalanılmaktadır.

$$ps(t) = \delta \times 1 - \delta^{t-1} \quad (6)$$

3.1.4. Yeni bir küresel HS (NGHS)

Zou ve arkadaşları tarafından 2010 yılında literatüre sunulmuştur [22]. PSO algoritmasından yola çıkılarak HS algoritmasının işleyişinde birtakım değişiklikler yapılmıştır. Genetik mutasyon olasılığı (genetic mutation probability, p_m) parametresi eklenen varyantta $HMCR$ ve PAR parametrelerine ihtiyaç duyulmamaktadır. Ayrıca yeni üretilen harmoni, daha iyi olup olmadığına bakılmaksızın hafızadaki en kötü harmoni ile değiştirilmektedir.

3.1.5. Yerel karşıt tabanlı kendinden uyarlamalı küresel HS (LHS)

Ouyang ve arkadaşları tarafından 2017 yılında literatüre sunulmuştur [23]. Yerel karşıt tabanlı öğrenme isimli yöntem ile her bir iterasyonda üretilen çözümlerle birlikte o çözümün karşıt

değerleriyle yeni bir çözüm daha üretilmektedir. Kendinden uyarlamalı küresel ton ayarlama yöntemi yardımıyla da harmonideki en iyi ve en kötü çözümler kullanılarak ton ayarlama işlemi kendinden uyarlamalı olarak yapılır. Rekabet-seçim şemasını barındıran LHS varyantında, karşıt olarak üretilen iki çözüm birbiriyle karşılaştırılarak, daha başarılı olan çözüm, daha iyi olup olmadığına bakılmaksızın harmoni hafızasındaki en kötü çözümlerle değiştirilir.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

Goh ve arkadaşları tarafından düzenlenen Büyük Veri Optimizasyon Yarışması 2015 (BigOpt2015) kapsamında yayınlanan problem üzerinde çalışmalar gerçekleştirilmiş ve veri seti olarak da aynı yarışma kapsamında yayınlanan EEG sinyallerinin matris verileri kullanılmıştır [24]. HS algoritması ve varyantları birbirlerinden farklı parametrelere ihtiyaç duymaktadır. Tüm varyantlar için ortak parametreler olan HMS değeri 5 maksimum değerlendirme sayısı 50.000 olarak belirlenmiştir. Diğer parametreler ise algoritma ve varyantın literatüre sunulduğu yayınlarda önerilen değerler olarak seçilmiştir. HS algoritması için HMCR değeri 0.9, PAR değeri 0.3 ve bw değeri 0.01 olarak belirlenmiştir. IHS varyantı için HMCR değeri 0.95, PAR_min değeri 0.35, PAR_max değeri 0.99, bw_min değeri 0.000001 olarak belirlenmiş ve bw_max değeri $\frac{1}{20}(x_{i,U} - x_{i,L})$ eşitliğiyle hesaplanmıştır. MHS varyantı diğerlerinden daha fazla parametreye sahip olup HMCR değeri 0.98, PAR değeri 0.10 olarak belirlenmiştir. MHS varyantının diğer sabitleri önerilen değerler olarak kullanılmıştır.

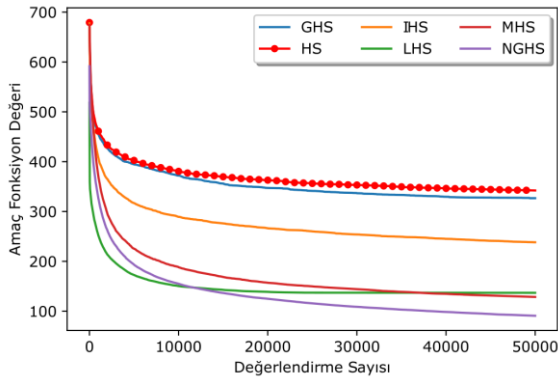
NGHS algoritması sadece p_m parametresine ihtiyaç duymakta olup 0.005 değeri kullanılmıştır. LHS varyantında da sadece HMCR değerine ihtiyaç duyulmakta olup 0.99 değeri kullanılmıştır.

HS, IHS, GHS, MHS, NGHS ve LHS varyantları ile 4 ve 12 kanallı sonradan gürültü eklenmemiş EEG sinyalleri üzerinde yapılan çalıştırmalarla elde edilen sonuçlar Tablo 1 ile gösterilmiştir.

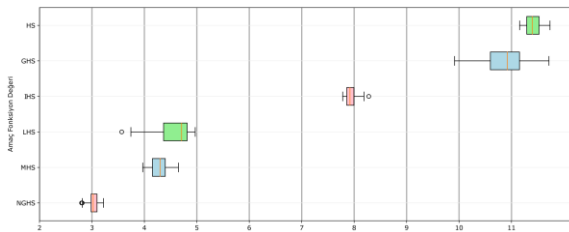
Tablo 1. Gürültüsüz EEG problemi HS varyant sonuçları (Noiseless EEG problem HS variant results)

Algoritma	D = 4	D = 12
HS	1.1407e+01 (1.49e-01)	1.5669e+01 (1.58e-01)
IHS	7.9435e+00 (1.15e-01)	1.2945e+01 (1.28e-01)
GHS	1.0892e+01 (4.12e-01)	1.5184e+01 (3.93e-01)
MHS	4.2853e+00 (1.52e-01)	8.7648e+00 (1.27e-01)
NGHS	3.0254e+00 (1.01e-01)	8.1261e+00 (1.01e-01)
LHS	4.5613e+00 (3.47e-01)	8.1599e+00 (1.39e+00)

Çalıştırmalar sırasında varyantların iterasyon bazlı elde ettikleri sonuçları daha iyi görebilmek için 4 kanallı EEG probleminin sonuçları oluşturulan yakınsama grafiği Şekil 1 ile, sonuçların ortalama değer ve değer aralıklarının dağılımlarını karşılaştırmayı sağlayan kutu grafiği Şekil 2 ile görselleştirilmiştir.

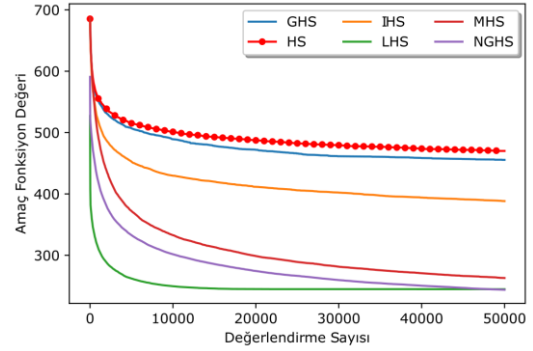


Şekil 2. 4 kanallı gürültüsüz EEG optimizasyon problemi yakınsama grafiği (Convergence graph of 4 channel noiseless EEG optimization problem)

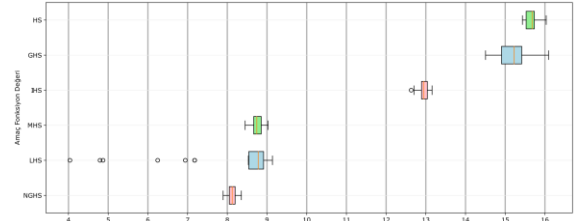


Şekil 2. 4 kanallı gürültüsüz EEG optimizasyon problemi kutu grafiği (Box plot of 4 channel noiseless EEG optimization problem)

12 kanallı EEG optimizasyonu probleminde HS varyantlarının çalıştırmanın başından sonuna kadar elde ettikleri değerlerin gösterildiği yakınsama grafiği Şekil 3 ile gösterilmiştir. Çalıştırmaların ortalama sonuçları ve dağılımlarını gösteren kutu grafiği Şekil 4 ile gösterilmiştir.



Şekil 3. 12 kanallı gürültüsüz EEG optimizasyon problemi yakınsama grafiği (Convergence graph of 12 channel noiseless EEG optimization problem)



Şekil 4. 12 kanallı gürültüsüz EEG optimizasyon problemi kutu grafiği (Box plot of 12 channel noiseless EEG optimization problem)

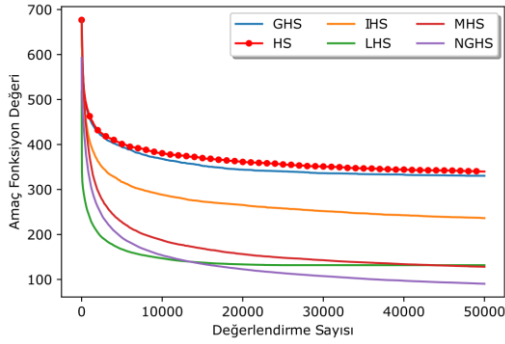
Bu problem için de sonradan geliştirilen tüm varyantlar HS algoritmasından daha iyi sonuç elde etmeyi başarmıştır. GHS varyantı yine HS algoritmasından az farkla daha iyi sonuçlar elde edebilmiş, IHS varyantı da aynı şekilde ortalama bir sonuç üretmiştir. LHS ve NGHS varyantları ise en başarılı sonuçları elde edebilmeyi başaran varyantlar olarak ön plana çıkmakta olup NGHS varyantı kısmen daha iyi sonuçlar üreterek bu problem için de en başarılı varyant olmayı başarmıştır. Kutu grafiğinden de anlaşılacağı üzere LHS varyantı bazı çalıştırmalarda çok daha optimum çözümler üretmiş olmasına rağmen ortalama değer olarak yine de NGHS'nin gerisinde kalmıştır. EEG sinyallerine 0.1 düzeyinde ek gürültünün eklendiği EEG optimizasyon problemi

için elde edilen ortalama sonuçlar ve standart sapma değerleri Tablo 2 ile gösterilmiştir.

Tablo 2. Gürültüsüz EEG problemi HS varyant sonuçları (Noiseless EEG problem HS variant results)

Algoritma	D = 4	D = 12
HS	1.1327e+01 (1.92e-01)	1.567e+01 (1.18e-01)
IHS	7.8784e+00 (1.84e-01)	1.297e+01 (1.48e-01)
GHS	1.1014e+01 (4.78e-01)	1.5096e+01 (3.89e-01)
MHS	4.2730e+00 (1.43e-01)	8.7996e+00 (1.06e-01)
NGHS	3.0113e+00 (1.06e-01)	8.1164e+00 (9.45e-02)
LHS	4.3901e+00 (4.96e-01)	8.1296e+00 (1.54e+00)

Gürültü eklenmiş 4 kanallı EEG sinyallerinin HS varyantlarıyla optimize edilmesi sırasında varyantlar tarafından elde edilen sonuçların yakınsama grafiği Şekil 5 ile, kutu grafiği Şekil 6 ile gösterilmiştir.

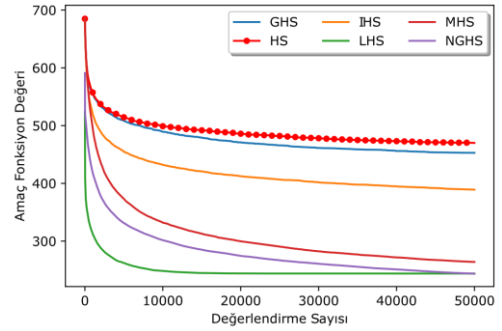


Şekil 5. 4 kanallı gürültülü EEG optimizasyon problemi yakınsama grafiği (Convergence graph of 4 channel noisy EEG optimization problem)

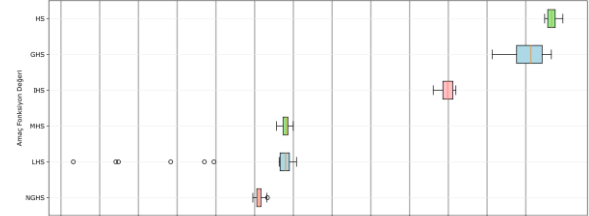


Şekil 6. 4 kanallı gürültülü EEG optimizasyon problemi kutu grafiği (Box plot of 4 channel noisy EEG optimization problem)

Gürültü eklenmemiş probleme oldukça yakın sonuçlar ve yakınsama grafikleri elde edilmiş olup tüm varyantlar HS algoritmasından daha başarılı sonuçlar üretebilmiş ve NGHS varyantı bu problem için de diğer varyantlardan daha iyi sonuçlar elde edebilmiştir. Gürültü eklenmiş 12 kanallı EEG sinyallerinin HS varyantlarıyla optimize edilmesi sırasında varyantlar tarafından elde edilen sonuçların yakınsama grafiği Şekil 7 ile, kutu grafiği Şekil 8 ile gösterilmiştir.



Şekil 7. 12 kanallı gürültülü EEG optimizasyon problemi yakınsama grafiği (Convergence graph of 12 channel noisy EEG optimization problem)



Şekil 8. 12 kanallı gürültülü EEG optimizasyon problemi kutu grafiği (Box plot of 12 channel noisy EEG optimization problem)

Bu problem için de sonuçlar ve grafikler gürültü eklenmemiş 12 kanallı EEG optimizasyonu problemiyle oldukça benzer durumdadır. HS algoritması bu problem için de diğer varyantların gerisinde kalmış, LHS varyantı ise 30 çalıştırmanın bazılarında diğer varyantlardan çok daha başarılı sonuçlar elde etmesine karşın ortalama değer olarak NGHS varyantından daha geri sırada yer almıştır.

5. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada 4 ve 12 kanallı EEG sinyallerinden gürültü temizlenmesi temelli büyük veri optimizasyon problemlerinde HS algoritması ve bu algoritmanın işleyişinde değişiklikler yaparak daha başarılı sonuçlar elde etmeyi amaçlayan IHS, GHS, MHS, NGHS ve LHS varyantlarının performansı

incelenmiştir. EEG ve EMG taramalarından elde edilen sinyallerden 4 kanalın kullanıldığı problem için 1024 parametre üretmek gerekirken, 12 kanalın optimizasyonunu gerektiren problem için 3072 parametrelili çözümler üretilmesi gerekmektedir. Çalışmada ele alınan varyantlarının tamamının, 4 ve 12 kanallı problemlerin gürültü eklenmemiş ve gürültülü olmak üzere tüm kombinasyonlarında orijinal HS algoritmasından daha başarılı sonuçlar elde ettiği gözlemlenmiştir. Harmoni hafızasındaki en iyi çözümden faydalanan GHS varyantı genel olarak HS algoritmasıyla benzer olmak üzere kısmen daha iyi sonuçlar elde etmeyi başarmıştır.

HS algoritmasının ilk geliştirilen varyantlarından IHS varyantı EEG optimizasyonu problemi üzerinde HS algoritmasından daha iyi sonuçlar üretmeyi başarabilirken tüm varyantlar arasında ortalama bir performans sergilemiştir. MHS, LHS ve NGHS varyantları ise diğer varyantlardan daha iyi olmak üzere birbirleriyle benzer sonuçlar elde etmişlerdir. NGHS varyantı diğer varyantlardan daha başarılı çözümler elde ederek bu çalışmadaki incelenen problem üzerinde en başarılı varyant olarak öne çıkmıştır. Genel olarak elde edilen sonuçlar, yapılan çalışmada yüksek parametre sayısına sahip büyük veri optimizasyon problemlerinde HS algoritmasının sonradan geliştirilen varyantlarının daha başarılı sonuçlar elde etme potansiyeline sahip olduğunu ortaya koymuştur. İlerleyen çalışmalarda daha farklı ve güncel HS varyantlarının EEG problemi ve diğer büyük veri optimizasyonu problemleri üzerindeki başarımları incelenebilir, HS varyantlarının ortak parametresi olan HMS sayısının yakınsama performansına olan etkisi araştırılabilir. Varyantlar arasında iterasyon sayısının artmasıyla birlikte meydana gelebilen yakınsama hızının düşüşü ve devamı hususunu anlayabilmek için HS varyantlarının daha yüksek iterasyonlu çalıştırmalarda elde ettiği performans ve yakınsama hızlarının değişimi anlaşılabilir.

ETİK STANDARTLARI 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)

Serhat Celil İLERİ: Kodlama ve çalıştırma işlemlerini yapmış, görsel çıktıları oluşturmuş ve makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

Performed the coding and execution processes, created the visual outputs, and completed the writing process of the article.

Selçuk ASLAN: Problemi ve çözüm yöntemlerini belirlemiş, sonuçları analiz etmiş ve makale yazımında danışmanlık yapmıştır.

Determined the problem and solution methods, analyzed the results and provided consultancy in writing the article.

Sercan DEMİRCİ: Problemi ve çözüm yöntemlerini belirlemiş, sonuçları analiz etmiş ve makale yazımında danışmanlık yapmıştır.

Determined the problem and solution methods, analyzed the results and provided consultancy in 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] C.-W. Tsai, C.-F. Lai, H.-C. Chao, and A. V. Vasilakos. Big data analytics: a survey. *Journal of Big data*, 2(1):21, 2015.
- [2] V. N. Gudivada, R. Baeza-Yates, and V. V. Raghavan. Big data: Promises and problems. *Computer*, 48(3):20–23, 2015.–
- [3] H. A. Abbass. Calibrating independent component analysis with laplacian reference for real-time eeg artifact removal. In *International Conference on Neural Information Processing*, pages 68–75, 2014.
- [4] S. Elsayed and R. Sarker. An adaptive configuration of differential evolution algorithms for big data. In *IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC)*. IEEE, pages 695–702, 2015.
- [5] S. Elsayed and R. Sarker. Differential evolution framework for big data optimization. *Memetic Computing*, 8(1):17–33, 2016.
- [6] M. A. El Majdoui, S. Bougrine, I. Rbough, and A. A. El Imrani. A fireworks algorithm for single objective big optimization of signals. In *2016 IEEE/ACS 13th International Conference of Computer Systems and Applications (AICCSA)*, pages 1–7. IEEE, 2016.
- [7] M. A. Meselhi, S. M. Elsayed, D. L. Essam, and R. A. Sarker. Fast differential evolution for big optimization. In *2017 11th International*

- Conference on Software, Knowledge, Information Management and Applications (SKIMA), pages 1–6. IEEE, 2017.
- [8] H. Wang, W. Wang, L. Cui, H. Sun, J. Zhao, Y. Wang, and Y. Xue. A hybrid multiobjective firefly algorithm for big data optimization. *Applied Soft Computing*, 69:806–815, 2018.
- [9] S. Aslan. An Artificial Bee Colony-Guided Approach for Electro-Encephalography Signal Decomposition-Based Big Data Optimization. *International Journal of Information Technology & Decision Making*, 19(02), 561-600, 2020.
- [10] Aslan, S., & Karaboga, D. (2020). A genetic Artificial Bee Colony algorithm for signal reconstruction based big data optimization. *Applied Soft Computing*, 88, 106053.
- [11] İleri, S. C. , Aslan, S. & Demirci, S. (2022). Büyük Veri Optimizasyonu için Kaynak-Bağlantılı Harmoni Arama Algoritmasının Performans Analizi . *Türkiye Bilişim Vakfı Bilgisayar Bilimleri ve Mühendisliği Dergisi*, 15 (2) , 151-160 . DOI: 10.54525/tbbmd.1090787.
- [12] Shi, B., Wang, Q., Yin, S., Yue, Z., Huai, Y., & Wang, J. (2021). A binary harmony search algorithm as channel selection method for motor imagery-based BCI. *Neurocomputing*, 443, 12-25. <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2021.02.051>.
- [13] Nakra, A., Duhan, M. Deep neural network with harmony search based optimal feature selection of EEG signals for motor imagery classification. *Int. j. inf. tecnol.* 15, 611–625 (2023). <https://doi.org/10.1007/s41870-021-00857-x>.
- [14] S. K. Goh, H. A. Abbass, K. C. Tan, and A. Al Mamun. Artifact removal from eeg using a multi-objective independent component analysis model. In *International Conference on Neural Information Processing*, pages 570–577, 2014.
- [15] S. K. Goh, K. C. Tan, A. Al-Mamun, and H. A. Abbass. Evolutionary big optimization (bigopt) of signals. In *2015 IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC)*, pages 3332–3339. IEEE, 2015.
- [16] Geem, Z. W., Kim, J. H., & Loganathan, G. V. (2001). A new heuristic optimization algorithm: harmony search. *simulation*, 76(2), 60-68.
- [17] Dubey, M., Kumar, V., Kaur, M., & Dao, T. P. (2021). A systematic review on harmony search algorithm: theory, literature, and applications. *Mathematical Problems in Engineering*, 2021, 1-22.
- [18] Qin, F., Zain, A. M., & Zhou, K. Q. (2022). Harmony search algorithm and related variants: A systematic review. *Swarm and Evolutionary Computation*, 101126.
- [19] Mahdavi, M., Fesanghary, M., & Damangir, E. (2007). An improved harmony search algorithm for solving optimization problems. *Applied mathematics and computation*, 188(2), 1567-1579.
- [20] Omran, M. G., & Mahdavi, M. (2008). Global-best harmony search. *Applied mathematics and computation*, 198(2), 643-656.
- [21] Cheng, Y. M., Li, L., Lansivaara, T., Chi, S. C., & Sun, Y. J. (2008). An improved harmony search minimization algorithm using different slip surface generation methods for slope stability analysis. *Engineering Optimization*, 40(2), 95-115.
- [22] Zou, D., Gao, L., Wu, J., Li, S., & Li, Y. (2010). A novel global harmony search algorithm for reliability problems. *Computers & Industrial Engineering*, 58(2), 307-316.
- [23] Ouyang, H. B., Gao, L. Q., Li, S., Kong, X. Y., Wang, Q., & Zou, D. X. (2017). Improved harmony search algorithm: LHS. *Applied Soft Computing*, 53, 133-167.
- [24] BigOpt. (2015). <http://www.husseinabbass.net/BigOpt.html>. (Erişim Tarihi:08 Ekim 2024)

Elementel Bor ve ZrB_2 katkılı Al2024 Kompozitlerde Bor ve ZrB_2 Katkılarının Kompozitin Yapısal ve Mekanik Özelliklerine Etkisi

Tuncay Şimşek ^{1*}, Muharrem Pul ², Murat Bilen ³

¹Department of Motor Vehicles and Transportation, Kırıkkale Vocational School, Kırıkkale University, TÜRKİYE

²Department of Electricity and Energy, Kırıkkale Vocational School, Kırıkkale University, TÜRKİYE

³Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Gazi University, TÜRKİYE

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 19/09/2024
Düzeltilme: 29/11/2024
Kabul: 09/12/2024

Anahtar Kelimeler

Kompozit malzemeler
Al2024
 ZrB_2
Seramik malzemeler
Toz metalürjisi

Article Info

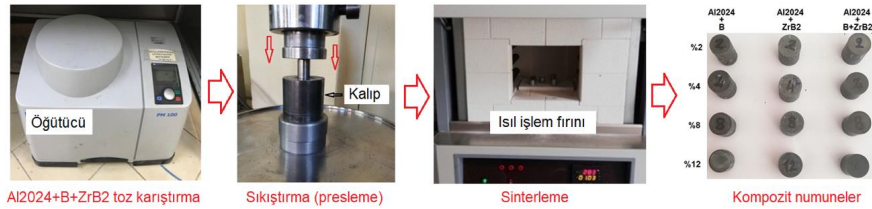
Research article
Received: 19/09/2024
Revision: 29/11/2024
Accepted: 09/12/2024

Keywords

Composite materials
Al2024
 ZrB_2
Ceramic materials
Powder metallurgy

Grafik Özet (Graphical/Tabular Abstract)

Bu çalışmada Al2024 alüminyum alaşımı içerisine, Zirkonyum diborür (ZrB_2) ve elementel bor (B) katkıları ile üstün mekanik özelliklere sahip kompozit malzemeler sentezlenerek katkı malzemelerinin kompozit numunelerin yapısal, morfolojik ve mekanik özelliklerine etkileri araştırılmıştır. In this study, composite materials with superior mechanical properties were synthesized by adding Zirconium diboride (ZrB_2) and elemental boron (B) into Al2024 aluminum alloy and the effects of additives on the structural, morphological and mechanical properties of composite samples were investigated.



Şekil A: Toz metalürjisi üretim süreci / Figure A: Powder Metallurgy Production Process

Önemli noktalar (Highlights)

- ZrB_2/B tavilyeli Al2024 matrisli kompozit/ ZrB_2/B reinforced Al2024 matrix composite
- Toz metalürjisi ile üretim/ Production by powder metallurgy
- Yapısal, morfolojik ve mekanik özellikler/ Structural, morphological, and mechanical properties

Amaç (Aim): Toz metalürjisi yöntemi ile Bor elementi ve Bor bileşiği içeren kompozit yapılar elde etmek. / To obtain composite structures containing boron element and boron compounds using the powder metallurgy method.

Özgünlük (Originality): Al2024 içerisine B ve ZrB_2 'nin takviye edilmesiyle kompozit yapıların üretilebilirliği ve karakterizasyonu / The producibility and characterization of composite structures by reinforcing Al2024 with B and ZrB_2 .

Bulgular (Results): ZrB_2 ve B'nin takviye malzemelerinin yapı içerisinde herhangi bir intermetalik faz oluşturmadığı belirlenmiştir. SEM analizlerinden numunelerin homojen bir şekilde üretildiği, ancak B katkılı numunelerde B oranının artışına bağlı olarak düşük oranda gözenekler olduğu tespit edilmiştir. / It was determined that ZrB_2 and B reinforcement materials did not form any intermetallic phases within the structure. SEM analyses revealed that the samples were produced homogeneously; however, in B-reinforced samples, a low level of porosity was observed with increasing B content.

Sonuç (Conclusion): Yapılan XRD analizlerinde ana matris Al2024 malzemesinde Al, Al_2MgO_4 , $CuAl_2$ ve MnO fazlarına ait pikler gözlemlenmiştir. Takviye malzemelerinin yapı içerisinde gözenekliliğe sebep olduğu belirlenmiştir. En yüksek mikrosertlik ve basma dayanımı değerlerine %12 ZrB_2 katkılanmış numunelerde ulaşılmıştır. Sertlik ölçümleriyle uyumlu şekilde, basma dayanım testlerinde ZrB_2 takviyeli numunelerde daha sonuçlar elde edilmiştir. / XRD analyses revealed peaks corresponding to Al, Al_2MgO_4 , $CuAl_2$, and MnO phases in the main Al2024 matrix material. It was determined that the reinforcement materials contributed to porosity within the structure. The highest microhardness and compressive strength values were obtained in samples reinforced with 12% ZrB_2 . Consistent with the hardness measurements, compressive strength tests also yielded superior results for ZrB_2 -reinforced samples



Elementel Bor ve ZrB₂ katkılı Al2024 Kompozitlerde Bor ve ZrB₂ Katkılarının Kompozitin Yapısal ve Mekanik Özelliklerine Etkisi

Tuncay Şimşek^{1*}, Muharrem Pul², Murat Bilen³

¹Department of Motor Vehicles and Transportation, Kırıkkale Vocational School, Kırıkkale University, TÜRKİYE

²Department of Electricity and Energy, Kırıkkale Vocational School, Kırıkkale University, TÜRKİYE

³Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Gazi University, TÜRKİYE

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 19/09/2024
Düzeltilme: 29/11/2024
Kabul: 09/12/2024

Anahtar Kelimeler

Kompozit malzemeler
Al2024
ZrB₂
Seramik malzemeler
Toz metalürjisi

Öz

Bu çalışmada Al2024 alüminyum alaşımı içerisinde, Zirkonyum diborür (ZrB₂) ve elementel bor (B) katkılanarak üstün mekanik özelliklere sahip kompozit malzemeler sentezlenerek katkı malzemelerinin kompozit numunelerin yapısal, morfolojik ve mekanik özelliklerine etkileri araştırılmıştır. Sentez deneyleri mekanik alaşımlama ve toz metalürjisi yöntemleri ile gerçekleştirilmiştir. Kompozit malzemelerin mikroyapı incelemeleri ve elementel dağılım analizleri SEM mikroskobu ve EDX ile, faz yapıları ise XRD analizleriyle belirlenmiştir. Ayrıca kompozit yapıların mikrosertlikleri ve basma dayanımları tespit edilmiştir. XRD analizlerinden, sinterleme işleminden sonra yapı içerisinde Al, Al₂MgO₄, CuAl₂ ve MnO fazlarına ait pikler tespit edilmiştir. ZrB₂ ve B'nin takviye malzemelerinin yapı içerisinde herhangi bir intermetalik faz oluşturmadığı belirlenmiştir. SEM analizlerinden numunelerin homojen bir şekilde üretildiği, ancak B katkılı numunelerde B oranının artışına bağlı olarak düşük oranda gözenekler olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, ZrB₂ içeren numunelerin B içeren numunelere oranla daha homojen dağılım gösterdiği, ancak B içeren yapılara göre daha fazla gözenekli bölgelerin olduğu belirlenmiştir. En yüksek mikrosertlik ve basma dayanımını değerlerine %12 ZrB₂ katkılanmış numunelerde ulaşılmıştır.

Effect of Boron and ZrB₂ Additives on Structural and Mechanical Properties of Elemental Boron and ZrB₂ Doped Al2024 Composites

Article Info

Research article
Received: 19/09/2024
Revision: 29/11/2024
Accepted: 09/12/2024

Keywords

Composite materials
Al2024
ZrB₂
Ceramic materials
Powder metallurgy

Abstract

In this study, composite materials with superior mechanical properties were synthesized by adding Zirconium diboride (ZrB₂) and elemental boron (B) into Al2024 aluminum alloy and the effects of additives on the structural, morphological and mechanical properties of composite samples were investigated. Synthesis experiments were carried out by mechanical alloying and powder metallurgy methods. Microstructure examinations and elemental distribution analyses of composite materials were determined by SEM microscope and EDX, and phase structures were determined by XRD analysis. In addition, microhardness and compressive strengths of composite structures were determined. Peaks belonging to Al, Al₂MgO₄, CuAl₂ and MnO phases were detected from XRD analysis after sintering process. It was determined that ZrB₂ and B reinforcement materials did not form any intermetallic phase in the structure. It was determined from SEM analysis that the samples were produced homogeneously, but there were low pores in B-added samples due to the increase in B ratio. In addition, it was determined that the samples containing ZrB₂ showed a more homogeneous distribution compared to the samples containing B, but more porous regions were formed compared to the structures containing B. The highest microhardness and compressive strength values were reached in the samples added with 12% ZrB₂.

1. INTRODUCTION (GİRİŞ) Son yıllarda imalat, uzay ve havacılık, otomotiv vb endüstrilerde kullanılan mühendislik malzemelerinin daha hafif,

mukavemeti yüksek ve nispeten ucuz olmaları istenmektedir. Teknolojideki hızlı gelişmeler bu malzemelere olan talepleri daha da artırmaktadır.

Bu taleplerin karşılanması için birçok farklı malzeme grubu metal, seramik ve polimer esaslı matrislere katılarak kompozit malzemeler üretilmektedir. Kompozit malzemeler içerisinde sahip olduğu üstün mekanik özelliklerinden dolayı metal matrisli kompozitler öne çıkmaktadır. Özellikle düşük yoğunluk, düşük termal genleşme katsayısı, yüksek termal kararlılık, elektromanyetik koruma kapasiteleri ve nispeten ucuz olmaları nedeni ile metal matrisli kompozitler (MMK) içerisinde alüminyum matrisli kompozitler önemli bir yere sahiptir. Alüminyum malzemesi ve alaşımları makine ve imalat, uzay ve havacılık, otomotiv, elektronik vb. birçok endüstride düşük yoğunluk, üstün korozyon dayanımları ve termal kararlılıkları, hafifliği ve düşük maliyetleri nedeniyle kullanılmaktadır. Bu özelliklerine rağmen düşük sertlik, zayıf tribolojik ve mekanik dayanımları kullanım alanlarını kısıtlamakta ve önemli bir problem olarak öne çıkmaktadır [1]. Literatürde, alüminyum matrisli kompozit malzemelerin mekanik ve tribolojik özelliklerinin iyileştirilmesi için grafen, SiC, B₄C, karbon nanotüp vb birçok farklı seramik malzemenin katkı maddesi olarak kullanıldığı tespit edilmiştir [2-5].

Alüminyum matrisli kompozitler başta toz metalürjisi olmak üzere ergitme, infiltrasyon vb yöntemlerle başarılı bir şekilde üretilmektedir [6-9]. Erigiyik ve katı hal yöntemleri ile yapılan çalışmalar incelendiğinde, ana matris içerisindeki katkı malzemelerinin homojen bir şekilde dağılması ve katkı malzemeleri ile matris arasındaki islanma mekanizmalarının, üretilen kompozit yapıların fiziksel ve mekanik özelliklerini en etkileyen hususların başında geldiği vurgulanmıştır [9-11]. Literatür incelendiğinde, birçok alüminyum alaşımı içerisinde farklı formlarda üretilen seramik, borür ve karbür parçacıklarının katıldığı, özellikle mekanik ve aşınma dayanımlarında önemli oranlarda artışların olduğu görülmektedir [12-14]. Khoshsima ve diğerleri [15], kompozit metal borür parçacıkları ile Al-esaslı hibrit metal matrisli kompozitler üretmişlerdir. Süzer ve diğerleri ise

[16], takviye malzemesi olarak yüksek entropi (HfTiZrVNb)B₂ seramik parçacıklarını kullanarak, Al-matrisli kompozit malzemeler elde etmişlerdir. Ardından ürettikleri numunelerin mekanik, mikroyapısal ve termal özelliklerini araştırmışlardır. Akçay ve diğerleri [17], toz metalürjisi yöntemiyle B₄C takviyeli Al esaslı kompozit yapılar üretmiştir. 500 MPa basınç ve 560 °C sıcaklık parametreleri ile ürettikleri örneklerin mikroyapılarını, sertlik ve elektriksel iletkenliklerini incelemişlerdir. Bu çalışmada yüksek sıcaklık dayanımı ve üstün mekanik özelliklere sahip ZrB₂ seramikleri ve elementel bor (B), nispeten zayıf mekanik özelliklere sahip Al2024 alaşımına katılarak, üretilen metal matrisli kompozit malzemelerin mekanik dayanımlarını artırmak amaçlanmıştır. Hedeflenen çalışmada 2024 serisi alüminyum alaşımı tercih edilmiştir. Al2024 alaşımları yüksek mukavemet-ağırlık oranı, ısıl işleme sertleştirilebilme özelliği ve yaşlandırma ile mekanik özelliklerinin artmasından dolayı birçok farklı alanda kullanılmaktadır. Bu alaşımlar, ayrıca iyi işlenebilirlik, yüksek kırılma tokluğuna sahiptir. Bu çalışmada ilk etapta gezegensel tip öğütücü içerisinde alüminyum alaşımları ZrB₂ ve elementel bor malzemeleri belli sürelerde ayrı ayrı öğütülerek homojen bir toz karışımı elde edilmiştir. Üretim deneylerinin 1. aşamasında homojen şekilde karıştırılan toz karışımları soğuk olarak preslenmiş, 2. aşamada ise toz karışımları sinterlenmiştir. Üretilen kompozit malzemelerin faz yapıları XRD tekniği ile, mikroyapı-morfoloji ve elementel kimyasal analizleri ise SEM-EDX ile belirlenmiştir. Numunelerin Vickers sertlik cihazı ile sertlikleri ve son olarak basma dayanımları analiz edilmiştir.

2. MATERIALS AND METHODS (MATERİYAL VE METOD)

Deneyel çalışmalarda ana matris olarak Al2024 alaşımı kullanılmıştır. Al2024 tozunun kimyasal bileşimi Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. Al2024 alaşımının kimyasal bileşimi (% ağırlıkça) (Chemical composition of AL2024 alloys)

Kimyasal bileşim	Cu	Mg	Mn	Fe	Zn	Si	Ti	Cr	Al
%	4.44	1.29	0.6	0.13	0.093	0.068	0.027	0.002	93.35

Takviye elemanı olarak ise % 99.5 saflıkta ZrB₂ (ABCR, Cas No: 12045-64-6) ve Elementel Bor (Aldrich, Cas No: 7440-42-8) malzemeleri kullanılmıştır. Ana matris ve takviye oranlarına

göre tartılan toz malzemeler gezegensel tip bilyeli öğütücüde karıştırılmıştır. Alüminyum alaşımları ve nano-mikro ölçekteki takviye elemanlarının oksitlenmemesi için numune tartım işlemleri

atmosfer kontrollü kabin (Glove-Box) içerisinde gerçekleştirilmiştir. Tablo 2’de verilen stokiometrilere hazırlanan Al₂O₃, ZrB₂ ve B elementleri tartılarak gezegensel tip öğütücüde (Retsch, PM 100) karıştırılmıştır. Deneysel hazneden kaynaklı safsızlıkları önlemek için WC hazne ve bilyeler kullanılmıştır. Hazırlanan toz

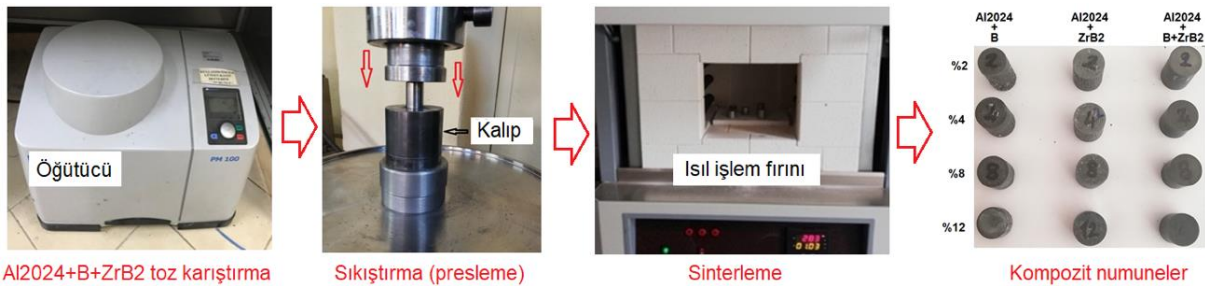
karışımları 250 ml hacimli WC havan içerisinde iki farklı çapta (15-10 mm) WC bilyeler ile kuru ortamda 300 rpm dönme hızında, 10:1 bilya-toz oranı ile 3 saat süre ile karıştırılmıştır. Deneysel çalışmalarda belirlenen Al₂O₃ alaşımı ve takviye elemanı oranları Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2. Al matris ve katkı elementlerinin oranları (Al matrix and the ratios of alloying elements)

Numune No	Al matris + B/ZrB ₂ oranları
1	%98 Al ₂ O ₃ + % 2 B
2	%96 Al ₂ O ₃ + % 4 B
3	%92 Al ₂ O ₃ + % 8 B
4	%88 Al ₂ O ₃ + % 12 B
5	%98 Al ₂ O ₃ + % 2 ZrB ₂
6	%96 Al ₂ O ₃ + % 4 ZrB ₂
7	%92 Al ₂ O ₃ + % 8 ZrB ₂
8	%88 Al ₂ O ₃ + % 12 ZrB ₂
9	%98 Al ₂ O ₃ + % 1 B + % 1 ZrB ₂
10	%96 Al ₂ O ₃ + %2 B + % 2 ZrB ₂
11	%92 Al ₂ O ₃ + % 4 B + % 4 ZrB ₂
12	% 88 Al ₂ O ₃ + % 6 B + % 6 ZrB ₂
13	%100 Al ₂ O ₃

Her bir deney numunesi için 15 g toz karışımı kullanılmıştır. Tozların daha homojen karışması ve kalıptan daha rahat çıkması için ağırlıkça %0.2 oranında çinko stearat [Zn (C₁₈H₃₅O₂)₂] ilave edilmiştir. Hazırlanan toz karışımları 15 tonluk

hidrolik preste yaklaşık 600 MPa basınç ile soğuk preslenmiştir. Soğuk presleme işlemleri için 12 mm çapındaki toz sıkıştırma kalıpları kullanılmıştır. Şekil 1’de üretim prosesi ve elde edilen deney numuneleri gösterilmektedir.



Şekil 1. Toz metalürjisi üretim süreci (Powder metallurgy production process)

Sentez deneyleri sonrasında numunelerin faz yapıları X-Işınları Difraktometresi ile belirlenmiştir. Her bir kompozit numunenin faz tanımları Jade 6.0 yazılımı analiz edilmiştir. CuK α ışınması ($\lambda=1.54\text{\AA}$), 45 kV voltaj ve 40 mA akım ile 2θ aralığı 20° ’den 90° ’ye kadar 0.026° adım aralığında ölçümler alınmıştır. Faz tanımlamalarının yapılmasından sonra numuneler metalografik incelemeler için yüzey hazırlama

işlemleriyle tarayıcı elektron mikroskobu ve EDX haritalama (HITACHI SU5000) analizleri için hazır hale getirilmiştir. Bunun için her bir numune sırasıyla 400, 800 ve 1200 mesh SiC aşındırıcılar ile zımparalandıktan ve 1-3 mikron parlaklık solüsyonlar ile parlatılmıştır. Faz yapıları analiz edilen numunelerin Vickers sertlik cihazı ile 25°C ’de 980.7 mN (HV0.5) yükte 10 s bekletilerek mikrosertlikleri belirlenmiştir.

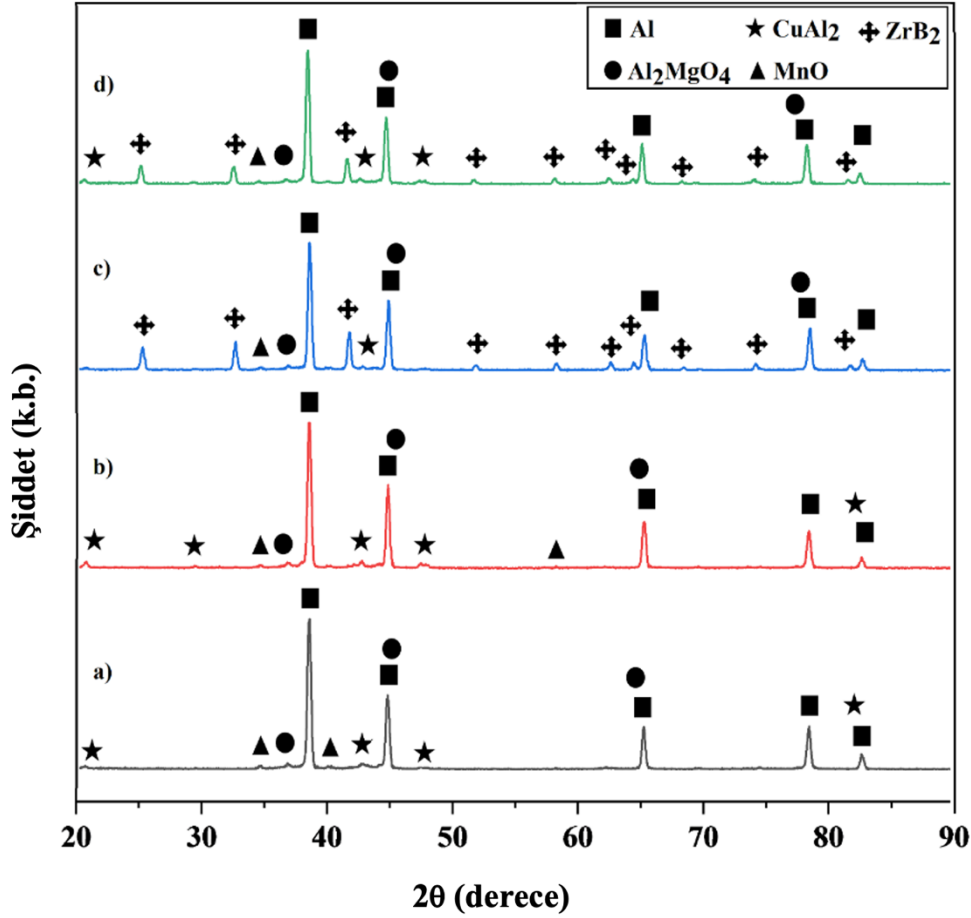
Mikrosertlik deneylerinde her örneğin farklı 5 yerinden ölçümler alınarak ortalamaları dikkate alınmıştır. Ardından kompozit malzemelerin basma dayanımları belirlenmiştir.

3. RESULTS (BULGULAR)

3.1.Faz Analizi (Phase Analysis)

Mekanik öğütücüde homojen olarak karıştırılan ve 600 Mpa'lık basınç altında soğuk preslenen

alaşımlar 650 °C sıcaklıkta sinterlendikten sonra faz yapılarının belirlenmesi için XRD ile analiz edilmiştir. XRD analizleri için silindir şeklinde üretilen kompozit numunelerin üst yüzeyleri paralel olacak şekilde hazırlanmıştır. Şekil 2'de anamatris Al₂O₃, ağırlıkça % 88 Al₂O₃ + % 12B, % 88 Al₂O₃ + %12ZrB₂, % 88 Al₂O₃ + % 6B + %6ZrB₂ içeren alaşımların XRD desenleri verilmiştir.



Şekil 2. Ana matris Al₂O₃, % 88 Al₂O₃ + % 12 B alaşımı, % 88 Al₂O₃ + % 12 ZrB₂ alaşımı ve % 88 Al₂O₃ + % 6 B + % 6 ZrB₂ alaşımının XRD deseni (The XRD patterns of the primary Al₂O₃ matrix, 88% Al₂O₃ + 12% B alloy, 88% Al₂O₃ + 12% ZrB₂ alloy, and 88% Al₂O₃ + 6% B + 6% ZrB₂ alloy)

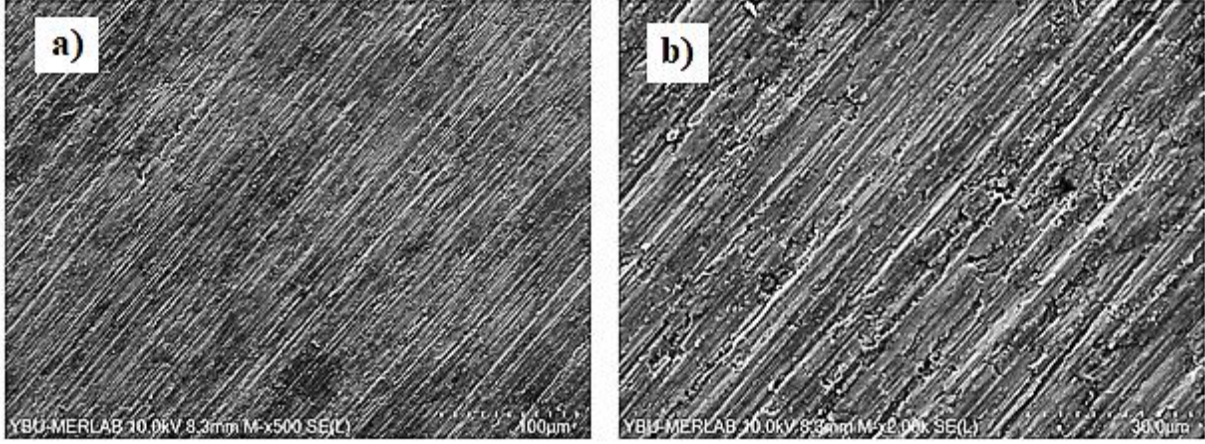
Şekil 2'deki XRD deseninde, sinterlenen ana matris Al₂O₃ malzemesinde, Al fazı (ICDD: 85-1327, kübik, Fm-3m), Al₂MgO₄ fazı (ICDD: 73-0559, kübik, Fd-3m), CuAl₂ fazı (ICDD:25-0012, tetragonal, I4/mcm) ve MnO (ICDD:71-1177, kübik, Fm-3m) fazlarına ait pikler görülmüştür. %12 B katkılanmış numunelerin XRD deseni incelendiğinde benzer fazlara ait kristal pikler görülmektedir. Sentez deneylerinde kullanılan B elementinin amorf yapıda olması nedeniyle elementel B'ye ait pikler XRD deseninde

görülmemiştir. Ayrıca B'nin Al₂O₃ içerisindeki elementlerle herhangi bir intermetalik faz oluşturmadığı da tespit edilmiştir. ZrB₂ takviye edilen kompozit numunelerde ise, Al, Al₂MgO₄, CuAl₂ ve MnO fazlarının yanı sıra ZrB₂ (ICDD:34-0423, hegzagonal, P6-mmm) fazına ait pikler görülmüştür. ZrB₂ kristal fazının 2θ derece 25.204°, 32.600°, 41.657°, 51.745°, 58.182°, 62.513°, 64.402°, 68.296°, 74.069°, 81.583°'te yansıyan baskın pikleri XRD deseninde tespit edilmiştir. Bu piklerin dışında herhangi bir safsızlık veya

arabilesiklere ait piklere rastlanmamıştır. Elementel Bor ve ZrB_2 içeren kompozit numunelerde Al, Al_2MgO_4 , $CuAl_2$, MnO ve ZrB_2 fazlarına ait pikler görülmüştür.

3.2. Mikroyapılar ve Elementel Analiz (Microstructures and Elemental Analysis)

XRD incelemelerinden sonra Tablo2’de stokiyometrisi verilen herbir kompozit numunesi 400-1200 mesh aralığındaki SiC aşındırıcılar ile zımparalanmış ve 1-3 mikronluk solüsyonlar kullanılarak parlatılmıştır. SEM-EDX analizleri ile numunelerin morfoloji analizleri, elementel haritalama ve kimyasal içerikleri araştırılmıştır.



Şekil 3. Ana matris Al2024 alaşımının (a) 500× ve (b) 2000× büyütmede SEM görüntüleri (SEM images of the primary Al2024 alloy matrix at (a) 500× magnification and (b) 2000× magnification)

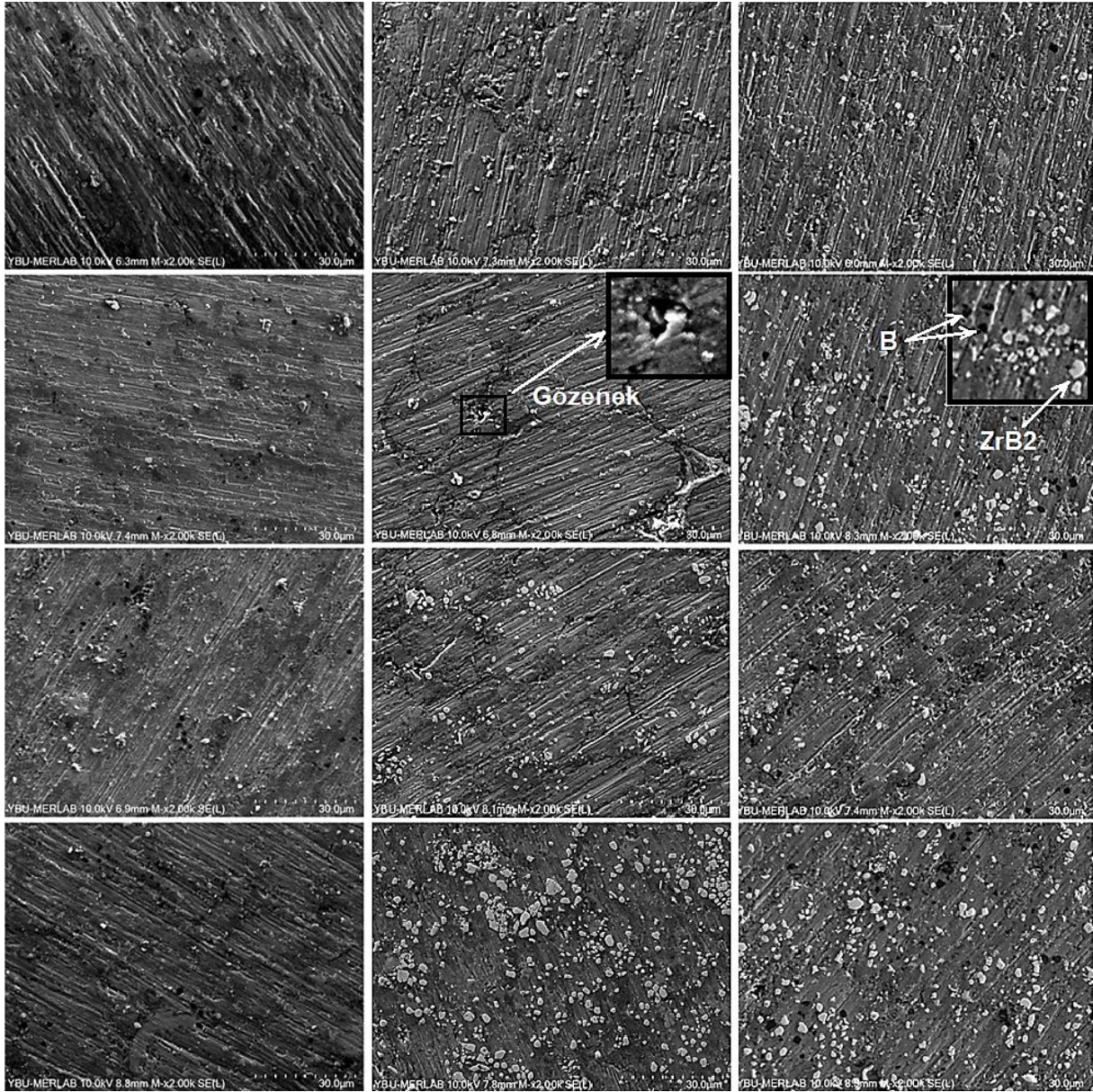
Şekil 3’te ana matris Al2024 alaşımının SEM analiz verilmiştir. Yapılan incelemelerde, preslenen ve sinterlenen ana matris malzemesinin homojen bir şekilde üretildiği gözlenmiştir.

Şekil 4’te % 2, 4, 8 ve 12 oranında ana matris Al2024 malzemesine karıştırılan B ve ZrB_2 kompozit yapıların 2000× büyütmede çekilen SEM görüntüleri verilmiştir. Şekil 4 incelendiğinde Bor katkı oranının artışına bağlı olarak, kompozit yapılarda bor agregaların olduğu anlaşılmaktadır. Ana yapı malzemesi Al2024 taneleri arasına yerleşen bor partiküllerinin, sinterleme işlemi sırasında Al2024 taneciklerinin bağlanmasında zorluk yarattığı ve bazı bölgelerde taneler arası tam bağlanmayı bir miktar engellediği söylenebilir.

ZrB_2 borür seramikler içeren numunelerin B içeren numunelere oranla daha homojen dağılım gösterdiği görülmektedir. Ancak bu kompozit yapılarda B içeren yapılara göre daha fazla gözenekli bölgelerin olduğu anlaşılmaktadır. Gözenekli yapının oluşmasında en önemli etkenin ZrB_2 topaklanmasının olduğu ifade edilebilir. Özellikle %8 ve %12 gibi yüksek takviye oranlarına ait SEM

görüntülerinde ZrB_2 partiküllerinin yoğun olarak topaklandığı bölgeler açıkça görülmektedir. Benzer sonuçlar, Pul’un AA7075 matrisli SiC, B_4C ve TiB_2 takviyeli kompozit yapı sentezinde de görülmüştür. Yaptığı çalışmada takviye elemanlarının oranlarına bağlı olarak, matris ve takviye elemanları arasında yeterli ıslanmanın olmaması ve taneler arası bağların zayıflığı nedeniyle, takviye elemanlarının yoğun bir şekilde topaklanma eğilimi gösterdiğini ve gözenekli yapılarda artışlar gözlemlendiğini rapor etmiştir [18].

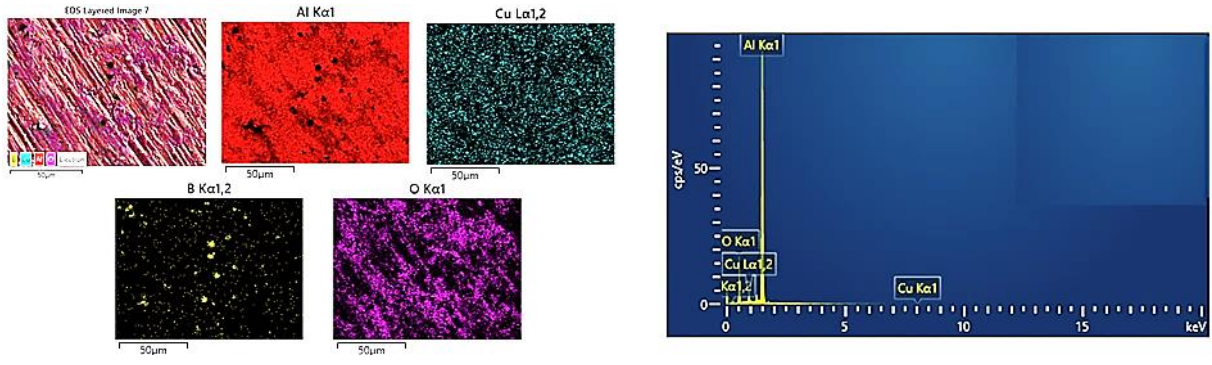
B ve ZrB_2 ’nin birlikte kullanıldığı kompozit yapılarda ise hem B hem de ZrB_2 takviyeli yapıların karakteristik özelliklerinin yer aldığı anlaşılmıştır. B ve ZrB_2 ’nin birlikte yer aldığı kompozit yapılarda B takviyeli yapılardan daha fazla gözenekli yapı gözlenmiştir. ZrB_2 takviyeli yapılardan ise biraz daha az gözenekli bölgelerin yer aldığı tespit edilmiştir. Yapısal kararlılık ve gözeneklilik yönünden iyiden kötüye doğru genel bir değerlendirme yapılacak olursa; B takviyeli kompozit yapılar, B+ ZrB_2 takviyeli yapılar ve ZrB_2 takviyeli yapılar olarak sıralanmaktadır.



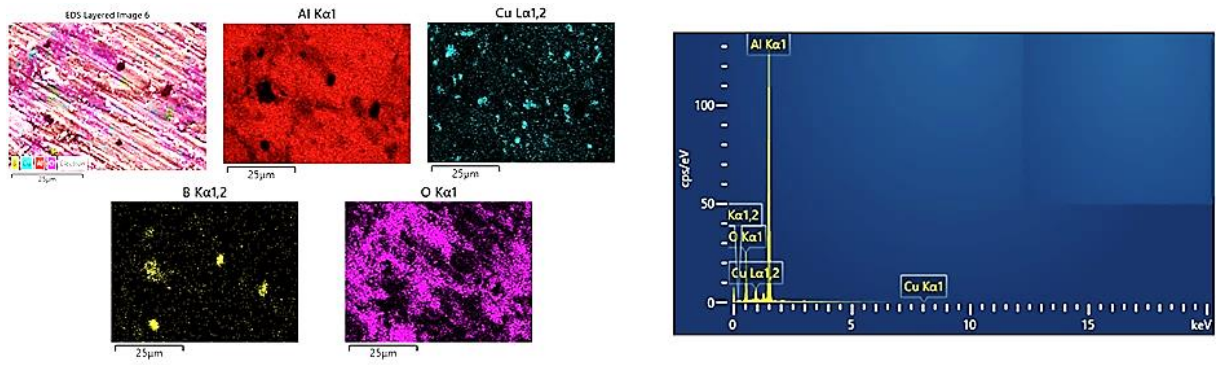
Şekil 4. Farklı oranlarda B, ZrB₂ ve B+ZrB₂ içeren kompozit numunelerin SEM görüntüleri (SEM images of composite samples containing different proportions of B, ZrB₂, and B+ZrB₂)

Mikroyapılara ait SEM görüntülerinin incelenmesinden sonra, kompozit yapıları oluşturan matris ve takviye elemanı elementlerin varlığının tespiti ve üretim sürecinde oluşabilecek harici elementel yapıları kontrol edebilmek amacıyla SEM görüntülemeleriyle birlikte EDX analizleri yapılmış ve mapping görüntülemeleri yapılmıştır. Bu amaçla aradaki farklılığın daha net incelenebilmesi

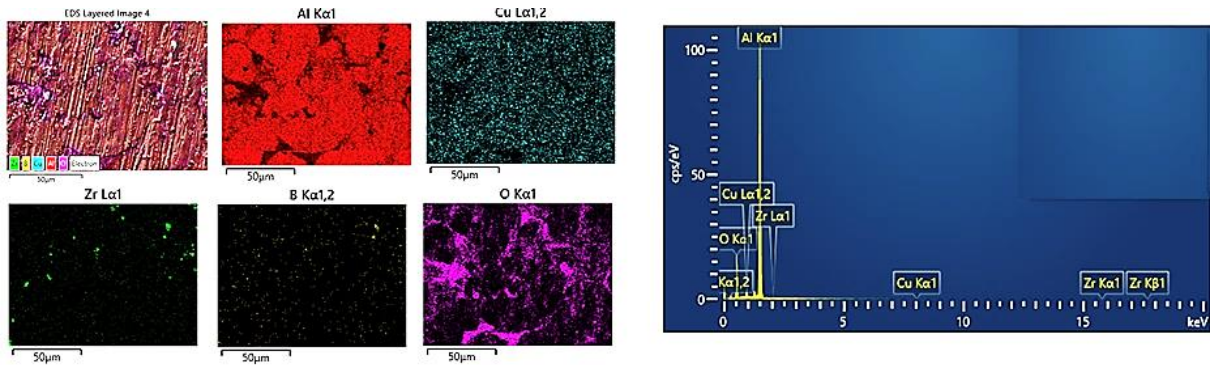
amacıyla kompozit yapılar içerisinde en az ve en fazla takviyeli olan numuneler seçilmiştir. Şekil 5 ve 6'da %2 ve %12 B içeren kompozitlerin, Şekil 7 ve 8'de %2 ve %12 ZrB₂ içeren kompozitlerin, Şekil 9 ve 10'da ise %1B+%1 ZrB₂ ve %6B+%6 ZrB₂ içeren kompozit yapıların elementel haritalama ve EDX analizleri verilmiştir.



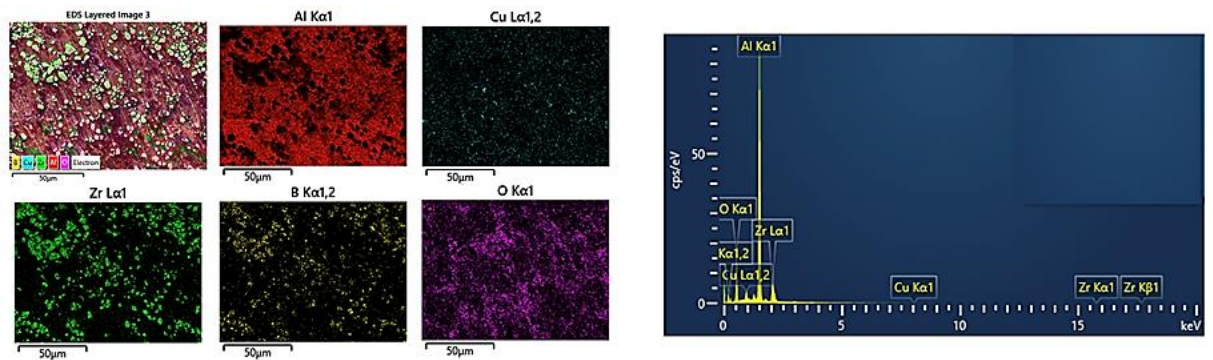
Şekil 5. % 2 B içeren kompozit numuneye ait elemental haritalama ve EDX görüntüleri (Elemental mapping and EDX images of the composite sample containing 2% B.)



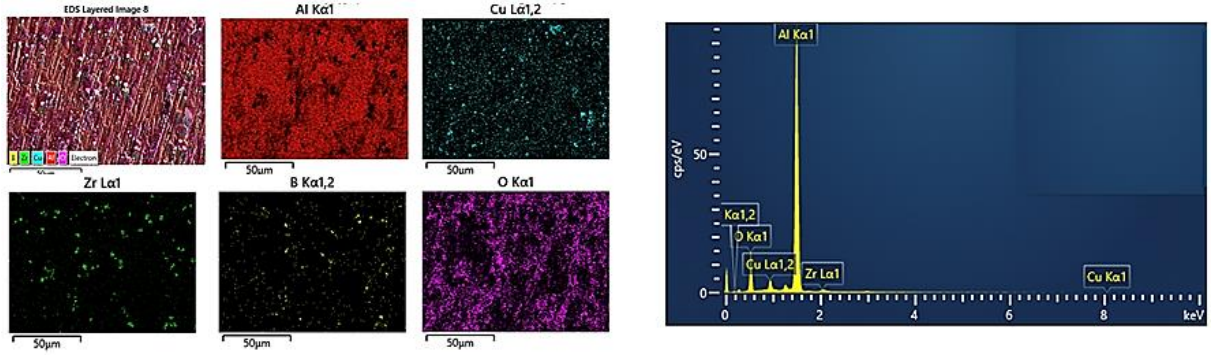
Şekil 6. % 12 B içeren kompozit numuneye ait elemental haritalama ve EDX görüntüleri (Elemental mapping and EDX images of the composite sample containing 12% B.)



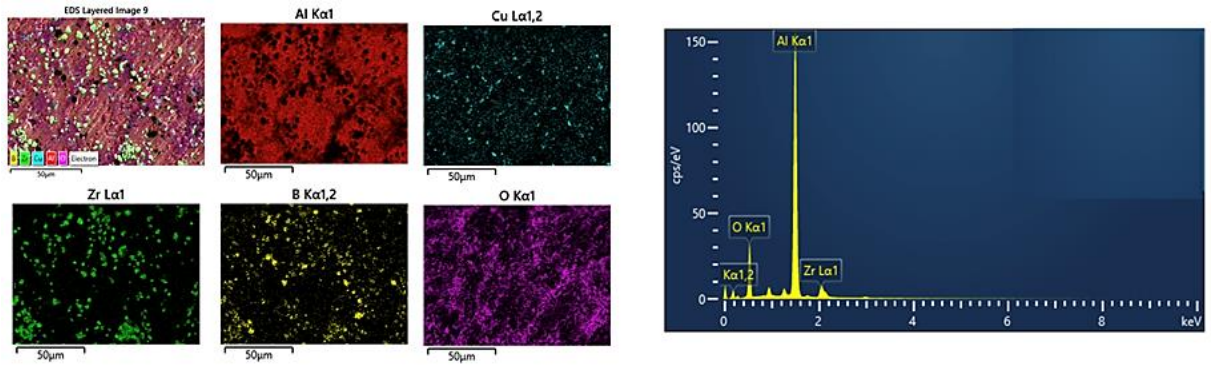
Şekil 7. % 2 ZrB₂ içeren kompozit numuneye ait elemental haritalama ve EDX görüntüleri (Elemental mapping and EDX images of the composite sample containing 2% ZrB₂.)



Şekil 8. % 12 ZrB₂ içeren kompozit numuneye ait elemental haritalama ve EDX görüntüleri (Elemental mapping and EDX images of the composite sample containing 12% ZrB₂.)



Şekil 9. % 1 +% 1ZrB₂ içeren kompozit numuneye ait elemental haritalama ve EDX görüntüleri (Elemental mapping and EDX images of the composite sample containing 1% B and 1% ZrB₂.)

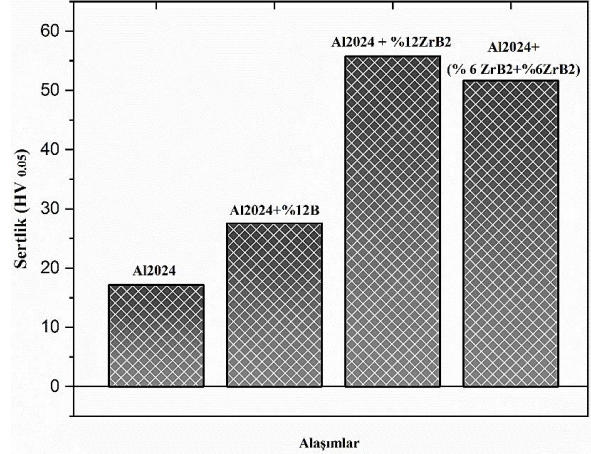


Şekil 10. % 6B +% 6ZrB₂ içeren kompozit numuneye ait elemental haritalama ve EDX görüntüleri (Elemental mapping and EDX images of the composite sample containing 6% B and 6% ZrB₂)

Şekil 5-10'da yer alan görüntü ve analizlere ait incelemelerde B elementinin ana matris içerisinde diğer kompozitlere göre daha agrega şekilde yer aldığı belirlenmiştir. Tüm numunelerde Al, Cu ve O elementlerine rastlanmıştır. Al ve Cu pikleri ana matris yapının kimyasal yapısından dolayı gözlenirken, O elementi ise kompozit yapıların oksitlenmesinden kaynaklı olarak EDX desenlerinde görülmüştür. B içeren numunelerde beklendiği gibi B elementi, ZrB₂ içeren numunelerde de Zr ve B elementlerinin pikleri tespit edilmiştir. Tüm kompozit yapılarda herhangi bir safsızlığa ait pik görülmemiştir.

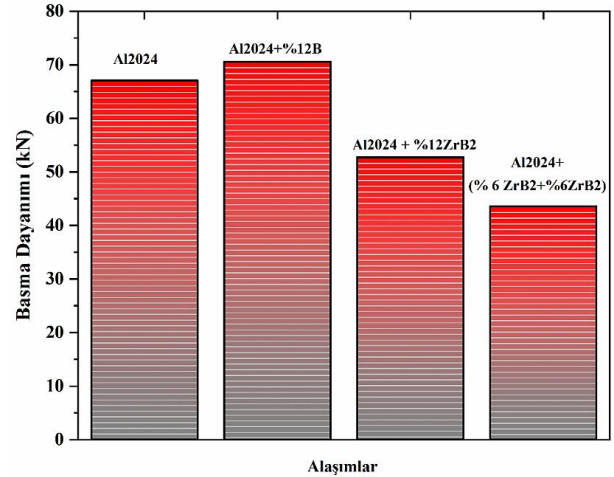
3.3.Mekanik Dayanım (Mechanical Strength)

Faz yapıları ve morfolojik yapıları analiz edilen kompozit yapıların mekanik dayanımlarının belirlenmesi için mikrosertlik ve basma dayanım testleri gerçekleştirilmiştir. Mikrosertlik tayini için ana matris Al2024 ve en yüksek oranda takviye malzemesi içeren %88 Al2024 + % 12 B ve %88 Al2024 + % 12 ZrB₂ ve %88 Al2024 + % 6 B +%6 ZrB₂ numuneleri analiz edilmiştir. Vickers sertlik cihazıyla numunelerin en az 5 farklı yerlerinden ölçümler alınarak ortalamaları dikkate alınmıştır. Şekil 11'de preslenen ve sinterlenen numunelerin kıyaslamalı mikrosertlik grafiği verilmiştir. Şekil 11 incelendiğinde ana matris malzemesinin 17.13 HV olan mikrosertliğinin eklenen takviyelere bağlı olarak yaklaşık olarak 3 kat artarak 55.73 HV'ye kadar artırıldığı görülmektedir. Beklendiği gibi en yüksek sertliğe sahip ZrB₂ partiküllerinin, katkılı olduğu kompozit yapılarda en yüksek sertlik değerlerini oluşturduğu belirlenmiştir. Takviye malzemelerinden B elementi %12 oranında katkılı olduğunda mikrosertlik 27.54 HV değerine, % 6 B +%6 ZrB₂ katkı oranlarında ise 51.81 HV değerine ulaşmıştır.



Şekil 11. Sinterlenen numunelerin mikrosertlik değerleri (Microhardness values of the sintered samples)

Kompozit yapıların mekanik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla ayrıca basma dayanımı testleri yapılmıştır. Bu amaçla kompozit yapılarda en yüksek takviye oranları içeren numuneler testlere tabi tutulmuştur. Kompozit numunelerin plastik deformasyona uğradığı kuvvetler Şekil 12'deki grafikte verilmiştir. Şekil 12, kompozit yapılarda, saf Al2024 referans malzemesine göre beklendiği gibi daha yüksek basma direncine sahip yapıların elde edildiğini ortaya koymaktadır. B takviye malzemesine göre daha üstün mekanik özelliklere sahip ZrB₂ takviye elemanı kullanımının kompozit yapıların basma dayanımını önemli oranda iyileştirdiği görülmüştür. Basma dayanımı sonuçlarının aynı zamanda sertlik değerleriyle uyumlu olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 12. Ana matris Al2024, B, ZrB₂ ve B+ ZrB₂ içeren numunelerin basma deneyi sonuçları (Compressive test results of samples containing the primary Al2024 matrix, B, ZrB₂, and B+ZrB₂)

4. CONCLUSIONS (SONUÇLAR)

Bu çalışmada düşük mekanik özelliklere sahip Al₂O₃ alaşımı içerisinde toz metalürjisi yöntemiyle başarılı bir şekilde farklı oranlarda elementel B, ZrB₂ ve B+ZrB₂ katkıları ile kompozit yapılar üretilmiştir. Yapılan XRD analizlerinde ana matris Al₂O₃ malzemesinde Al, Al₂MgO₄, CuAl₂ ve MnO fazlarına ait pikler gözlemlenmiştir. ZrB₂ içeren kompozit numunelerde ana matris malzemesine ait fazların yanısıra ZrB₂ (ICDD:34-0423, hegzagonal, P6-mmm) fazına ait pikler tespit edilmiştir. B elementi takviyeli kompozit yapılarda ise B'nin amorf yapıda olması nedeniyle elementel B'ye ait pikler XRD deseninde görülmemiştir. Ayrıca B'nin Al₂O₃ içerisindeki elementlerle herhangi bir intermetalik faz oluşturmadığı da belirlenmiştir. SEM analizlerinden preslenen ve sinterlenen ana matris numunelerin homojen bir şekilde üretildiği, ancak B katkılı numunelerde B oranının artmasına bağlı olarak, kompozit yapılarda B agregatları ve düşük oranda gözenekler olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, ZrB₂ içeren numunelerin B içeren numunelere oranla daha homojen dağılım gösterdiği, ancak bu kompozit yapılarda B içeren yapılara göre daha fazla gözenekli bölgelerin oluştuğu belirlenmiştir. Özellikle %8 ve %12 gibi yüksek ZrB₂ takviye oranlarına ait SEM görüntülerinde ZrB₂ partiküllerinin yoğun olarak toplandığı bölgeler açıkça gözlemlenmiştir. Mikrosertlik analizlerinde, 17.13 HV olan ana malzemenin mikrosertlik değerleri, takviye malzemelerinden B elementi %12 oranında katkılı olduğunda 27.54 HV değerine, %6 B +%6 ZrB₂ katkı oranlarında 51.81 HV ve %12 ZrB₂ içeren numunelerde ise 55.73 HV'ye değerine ulaşmıştır. Bu tür kompozit yapılarda oluşan takviye agregasyonları ve buna bağlı olarak oluşan gözenekli iç yapılar, kompozitlerin mekanik davranışını olumsuz şekilde etkilemiştir. Sertlik ölçümleriyle uyumlu şekilde, basma dayanım testlerinde ZrB₂ takviyeli numunelerde daha başarılı sonuçlar elde edilmiştir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

Bu çalışma 2023/021 numaralı proje kapsamında Kırıkkale Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından desteklenmiştir.

ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

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

The 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)

Tuncay ŞİMŞEK: Sentez deneylerinin yürütülmesi, çalışmadaki analizlerin yapılması, makalenin yazılması

Conducting synthesis experiments, performing analyses, writing the article

Muharrem PUL: Toz metalürjisi deneyleri ve karakterizasyon analizleri, makalenin yazılması

Powder metallurgy experiments and characterization analyses, writing the article

Murat BİLEN: Yapısal analizlerin gerçekleştirilmesi

Conducting structural analyses.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

There is no conflict of interest in this study.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Arunkumar, S., Sundaram, S.M., Sukethkanna, K.M., & Vigneshwara, S. A review on aluminium matrix composite with various reinforcement particles and their behaviour. *Materials Today: Proceedings*, 33, (484-490), (2020). doi.org/10.1016/j.matpr.2020.05.053
- [2] Pul, M. Karbon Nanotüp (CNT) ve NanoGrafen (G) Takviyeli Al₂O₃ Kompozitlerin Vorteks Yöntemiyle Üretilerek Aşınma ve İşlenebilirlik Özelliklerinin İncelenmesi. *International Journal of Engineering Research and Development*, 11, 370-382, (2019). doi.org/10.29137/umagd.493868
- [3] Izadi, H., Nolting, A., Munro, C., Bishop, D. P., Plucknett, K. P. & Gerlich, A. P. Friction stir processing of Al/SiC composites fabricated by powder metallurgy. *The Journal of Materials Processing Technology*, 213, 1900–1907, (2013). doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2013.05.012
- [4] Manohar, G., Pandey, K.M. & Maity, S.R. Effect of sintering mechanisms on mechanical properties of AA7075/B4C composite fabricated by powder metallurgy techniques. *Ceramics International*, 47(11)15147-15154, (2021). doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.02.073
- [5] Carneiro, Í., Fernandes, J.V., Simões, S. Strengthening Mechanisms of Aluminum Matrix

- Nanocomposites Reinforced with CNTs Produced by Powder Metallurgy. *Metals* 11, 1711, (2021). <https://doi.org/10.3390/met11111711>
- [6] Kimpson, M.G. & Scott, T.E. Processing and properties of metal matrix composites containing discontinuous reinforcement, *Materials Science and Engineering: A*, 93-106, (1989). [doi.org/10.1016/0921-5093\(89\)90378-X](https://doi.org/10.1016/0921-5093(89)90378-X)
- [7] Chou, S.N., Huang, J.L., Lii, D.F. & Lu, H.W. The mechanical properties and microstructure of Al₂O₃/aluminum alloy composites fabricated by squeeze casting. *Journal of Alloys and Compounds*, 436, 124-130, (2007). [/doi.org/10.1016/j.jallcom.2006.07.062](https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2006.07.062)
- [8] Lai, S.W. & Chung, D.D.L. Fabrication of particulate aluminium-matrix composites by liquid metal infiltration. *Journal of Material Science*, 29, 3128–3150, (1994). doi.org/10.1007/BF00356655
- [9] Kök, M., Production and mechanical properties of Al₂O₃ particle- reinforced 2024 aluminium alloy composites. *Journal of Materials Processing Technology*, 161:381–387.(2005). doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2004.07.068
- [10] Ramachandra, M., Abhishek, A., Siddeshwar, P. & Bharathi, V. Hardness and Wear Resistance of ZrO₂ Nano Particle Reinforced Al Nanocomposites Produced by Powder Metallurg. *Procedia Materials Science*, 10, 212 – 219, (2015). doi.org/10.1016/j.mspro.2015.06.043
- [11] Suresh, S.M., Mishra, D., Srinivasan, A., Arunachalam, R. M. & Sasikumar, R. Production and characterization of micro and nano Al₂O₃ particle-reinforced LM25 aluminium alloy composites, *ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences*, 6, 6, (2011).
- [12] Karabulut, H., Karacif, K. & Türkmen, M. Sıcak Presleme Yöntemi ile Üretilen AA2024 ve AA7075 Esaslı %5 SiC Takviyeli Kompozit Malzemelerin Mikroyapı, Sertlik ve Korozyon Özelliklerinin İncelenmesi, *International Journal of Engineering Research and Development*, 13 (1), (2021). doi.org/10.29137/umagd.7338[[755
- [13] Gündoğan, K. & Özşarı, A.R.B. Basınçlı İnfiltrasyon Yöntemiyle Üretilen AA2024 ve AA6061 Matrisli, B₄C ve SiC Takviyeli Kompozit Malzemelerin Mikroyapı, Mekanik ve Isıl İletkenlik Özelliklerine Basıncın Etkisi. *International Journal of Engineering Research and Development*, 11 (2), 657-669, (2019). doi.org/10.29137/umagd.540610
- [14] Azad, A.M., Hamdan, B., Mohammad, A., Mazli, M., Masood, Y. M., Marode, F., Sapuan, R. V., Ansari, S.M. & Husain, A. Advancements in aluminum matrix composites reinforced with carbides and graphene: A comprehensive review. *Nanotechnology Reviews*, 12 (1) 20230111, (2023). <https://doi.org/10.1515/ntrev-2023-0111>
- [15] Khoshsima, S., Mertdinç, S., Motallebzadeh, A., Altıntaş, Z., Ağaoğulları, D., Çağırın, Ö.B. Enhanced hardness and wear resistance of Al-based hybrid MMCs by using of composite metal boride reinforcement particles, *Materials Chemistry and Physics*, 288, 126377, (2022). <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2022.126377>.
- [16] Süzer, İ., Özçakıcı, Y.E., Tekinşen, A.S., Bayrak, K.C., Ülküseven, S.M., Çağırın, Ö.B., Öveçoğlu, M.L., Ağaoğulları, D. High entropy (HfTiZrVNb)B₂ ceramic particulate reinforced Al matrix composites: Synthesis, mechanical, microstructural and thermal characterization, *Ceramics International*, 50 (15), 26583-26595, (2024). <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2024.04.386>.
- [17] Akçay, B., Varol, T., Güler, o., Aks, H.C. Bor Karbür Takviyeli Al Esaslı Kompozitlerin Özellikleri Üzerine Bor Karbür Takviye Miktarının Etkisi, *El-Cezerî Fen ve Mühendislik Dergisi*, 9 (2), (869-881), 2022, DOI : 10.31202/ecjse.1023910
- [18] Pul, M. Alüminyum 7075 Matrisli Kompozitlerde SiC, B₄C Ve TiB₂ Takviye Elemanlarının Mekanik Özelliklere Etkilerinin Karşılaştırılması, *Duzce University Journal of Science and Technology*, 7 (1), pp. 180-93, (2019). [doi:10.29130/dubited.431573](https://doi.org/10.29130/dubited.431573).

An AI-Based Sentiment Analysis Study on YouTube Contents Related to Digital Nomadism

Zafer AYZAZ^{1*} 

¹Gazi University, Faculty of Applied Sciences, Department of Management Information Systems, Ankara, Turkey

Article Info

Research article
Received: 20/11/2024
Revision: 07/12/2024
Accepted: 08/12/2024

Keywords

Digital Nomad
Social Media
YouTube
Sentiment Analysis
Natural Language
Processing

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 20/11/2024
Düzeltilme: 07/12/2024
Kabul: 08/12/2024

Anahtar Kelimeler

Dijital Göçebe
Sosyal Medya
YouTube
Duygu Analizi
Doğal Dil İşleme

Graphical/Tabular Abstract (Grafik Özet)

The research focuses on the emerging mode of digital nomadism. YouTube is a platform that digital nomads often use to communicate through social media. The study specifically examines how this concept is represented in audio-text transcriptions of YouTube videos selected based on searches using positive and negative keywords. We analyzed the topics in these videos by calculating an impact score derived from the number of views and made recommendations based on these findings (Figure A). This study reveals important insights when looking at the current experiences of a new class of tourist workers - digital nomads - through the lens of social media. / Araştırma, yeni ortaya çıkan dijital göçebelik moduna odaklanmaktadır. YouTube, dijital göçebelerin sosyal medya aracılığıyla iletişim kurmak için sıklıkla kullandıkları bir platformdur. Çalışma, özellikle bu kavramın olumlu ve olumsuz anahtar kelimeler kullanılarak yapılan aramalara dayalı olarak seçilen YouTube videolarının ses-metin transkripsiyonlarında nasıl temsil edildiğini incelemektedir (Şekil A). Bu videolardaki konuları, izlenme sayılarından elde edilen bir etki puanı hesaplayarak analiz ettik ve bu bulgulara dayanarak önerilerde bulunduk. Bu çalışma, yeni bir turist işçi sınıfının - dijital göçebelerin - mevcut deneyimlerine sosyal medya merceğinden bakarken önemli içgörüler ortaya koymaktadır.

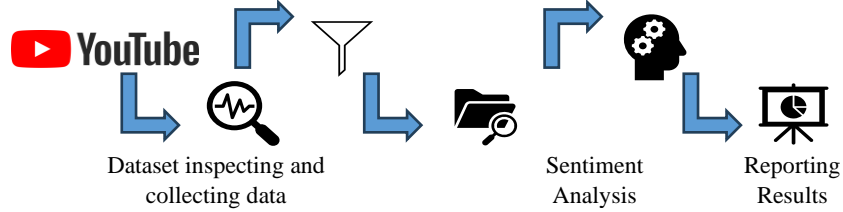


Figure A: Study Steps / Şekil A: Çalışma Adımları

Highlights (Önemli noktalar)

- The number of represent a type of tourist-worker group digital nomads has reached approximately 40 million (Bir tür turist-işçi grubunu temsil eden dijital göçebelerin sayısı yaklaşık 40 milyona ulaşmıştır).
- Digital nomads, who move almost every year, look for digital nomads like themselves to search for the following location and use social media platforms in this communication (Neredeyse her yıl yer değiştiren dijital göçebeler, bir sonraki lokasyonu araştırmak için kendileri gibi dijital göçebeleri aramakta ve bu iletişimde sosyal medya platformlarını kullanmaktadır).
- The positive and negative criteria that stand out in the location preferences of digital nomads are given in the findings section by examining the videos / Dijital göçebelerin konum tercihlerinde öne çıkan olumlu ve olumsuz kriterler videolar incelenerek bulgular bölümünde verilmiştir.

Aim (Amaç): In this study, by analyzing the audio-text transcripts in YouTube videos using data mining, it is aimed to examine what is told about digital nomadism in the most watched videos on YouTube and to make suggestions in the light of the findings. / Bu çalışmada, YouTube videolarındaki ses-metin transkriptleri veri madenciliği kullanılarak analiz edilerek Youtube üzerinde en çok izlenen videolarda dijital göçebelik ile ilgili neler anlatıldığının incelenerek bulgular ışığında öneriler yapılması amaçlanmıştır.

Originality (Özgünlük): The research is the first study on the selected topic in terms of analysis approach on YouTube content / Araştırma YouTube içerikleri üzerinde analiz yaklaşımı açısından seçilen konuda yapılan ilk çalışmadır.

Results (Bulgular): The most watched videos focus on topics of interest to digital nomads, such as low cost, high living comfort, climatic attractiveness, loneliness, social isolation. / En çok izlenen videolar düşük maliyet, yüksek yaşam konforu, iklimsel çekicilik, yalnızlık, sosyal izolasyon gibi dijital göçebelerin ilgisini çeken konulara ağırlık vermektedir.

Conclusion (Sonuç): The research results provide significant findings for policymakers / Araştırma sonuçları politika yapıcılar için önemli bulgular sunmaktadır.



An AI-Based Sentiment Analysis Study on YouTube Contents Related to Digital Nomadism

Zafer AYZAZ^{1*}

¹Gazi University, Faculty of Applied Sciences, Department of Management Information Systems, Ankara, Turkey

Article Info

Research article

Received: 20/11/2024

Revision: 07/12/2024

Accepted: 08/12/2024

Keywords

Digital Nomad

Social Media

YouTube

Sentiment Analysis

Natural Language

Processing

Abstract

This study examines the positive and negative trends in YouTube videos on “Digital Nomadism” through text analysis. After preprocessing, the audio recordings of the YouTube videos selected as the data set were transcribed and analyzed using Python's NLTK (Natural Language Toolkit) libraries. Thematic topic extraction was performed using the NLP (Natural Language Processing) feature of ChatGPT, one of the significant LLMs (Large Language Models). The thematic summarization function was performed via ChatGPT with a prompt prepared in this context. Audience impact scores of the positive and negative topics in the video texts were calculated based on the word frequency score and the number of views of the videos. The video dataset, it was observed that videos emphasizing positive topics such as freedom, travel advantages, adventure, discoveries, cost of living, knowledge transfer, climate and cultural attractiveness, cultural richness, cultural interaction, economic contribution to the region, quality and low-cost nutrition, food and beverage quality, digital robust infrastructure, high comfort and quality of life, connected business network, cleanliness and hygiene issues, presence and quality of co-working spaces had more viewers. On the negative side, some of the destinations preferred by digital nomads, such as Nosara, Bali, and Peepa, are crowded cities, adaptation problems due to cultural differences, working conditions such as heat and humidity, loneliness, being away from family, lack of fixed income for a stable life, and problems with international money transfers for accommodation. Finally, in light of the findings, recommendations that can provide potential benefits, such as regional development and increasing tourism revenues, are shared with the public about appropriate examples from around the world.

Dijital Göçebelikle İlgili YouTube İçerikleri Üzerine Yapay Zekâ Tabanlı Bir Duygu Analizi Çalışması

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi

Başvuru: 20/11/2024

Düzeltilme: 07/12/2024

Kabul: 08/12/2024

Anahtar Kelimeler

Dijital Göçebe

Sosyal Medya

YouTube

Duygu Analizi

Doğal Dil İşleme

Öz

Bu çalışma, “Dijital Göçebelik” konulu YouTube videolarındaki olumlu ve olumsuz eğilimleri metin analizi yoluyla incelemektedir. Veri seti olarak seçilen YouTube videolarının ses kayıtları ön işlemden geçirildikten sonra Python'un NLTK (Natural Language Toolkit) kütüphaneleri kullanılarak yazıya dökülmüş ve analiz edilmiştir. Tematik konu çıkarımı, önemli LLM'lerden (Büyük Dil Modelleri) biri olan ChatGPT'nin NLP (Doğal Dil İşleme) özelliği kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Tematik özetleme işlevi ise bu kapsamda hazırlanan bir istem ile ChatGPT üzerinden gerçekleştirilmiştir. Video metinlerinde yer alan olumlu ve olumsuz konuların izleyici etki puanları, kelime sıklığı puanı ve videoların izlenme sayıları baz alınarak hesaplanmıştır. Video veri setinde özgürlük, seyahat avantajları, macera, keşifler, yaşam maliyeti, bilgi transferi, iklim ve kültürel çekicilik, kültürel zenginlik, kültürel etkileşim, bölgeye ekonomik katkı, kaliteli ve düşük maliyetli beslenme, yiyecek ve içecek kalitesi, dijital sağlam altyapı, yüksek konfor ve yaşam kalitesi, bağlantılı iş ağı, temizlik ve hijyen konuları, ortak çalışma alanlarının varlığı ve kalitesi gibi olumlu konulara vurgu yapan videoların daha fazla izleyiciye sahip olduğu görülmüştür. Olumsuz tarafta ise Nosara, Bali ve Peepa gibi dijital göçebelerin tercih ettiği bazı destinasyonların kalabalık şehirler olması, kültürel farklılıklardan kaynaklanan adaptasyon sorunları, sıcak ve nem gibi çalışma koşulları, yalnızlık, aileden uzak olma, istikrarlı bir yaşam için sabit gelirin olmaması ve konaklama için uluslararası para transferlerinde yaşanan sorunlar yer alıyor. Son olarak, bulgular ışığında bölgesel kalkınma ve turizm gelirlerinin artırılması gibi potansiyel faydalar sağlayabilecek öneriler, dünyadan uygun örneklerle kamuoyu ile paylaşılmıştır.

1. INTRODUCTION (GİRİŞ)

Migration and nomadism are two types of mobility that have slight differences in terms of the way they are applied. However, their origins date back to the same periods as the existence of human beings, and they have continuity from past to present for different reasons and on different routes. Immigrants strive to integrate into society in the country they come from to establish a new life. In this process, they profoundly impact their lives and the social and economic structure of the country they migrate to [8-21]. While immigration aims to settle permanently in the new settlement, nomadism continues to live a life that aims to settle for a temporary period. Nomadism was a common way of life before the agricultural revolution and is still maintained by some communities today. Nomads move depending on the seasons or the migration routes of animals. Nomadism usually occurs in a particular order, and this order is part of the community's way of life [17]. For this reason, nomads have adopted a way of life that constantly changes places at short intervals.

In addition to traditional nomadism, digital nomadism has been mentioned recently, but the roots of the definition of this concept date back to 1997. Tsugio Makimoto and David Manners sowed the seeds of the concept of digital nomadism in their book "Digital Nomad", which coincides with a time when information technologies are not yet pervasive and can be considered in their infancy, and have predictions, and have been able to put forward an explanatory vision for the new generation of digital life to be lived in the future. According to the authors, thanks to the new technologies that will develop, the concept of standard working hours and the perception of the office will change, revealing a new lifestyle called digital nomadism in the future [20].

Digital nomads often combine remote work and travel for various reasons and durations. Passionate about new adventures, they know how to get the most out of new technologies and only need an internet connection to work from anywhere in the world. It has been reflected in various reports that approximately 40 million digital nomads will be living in the world by 2024. According to a 2023 study, more than half of the digital nomads surveyed worldwide are between 30 and 39. People from this age group comprise about 53 percent of the sample, while 22 percent of the digital nomads surveyed are under 30. As of March 2024, U.S. digital nomads are the most representative members of the global digital nomad community, representing almost half

of worker travelers. Female digital nomads, usually self-employed, mainly work in the marketing and creative sectors, while men work more as software or web developers. Unlike business travelers who go to a fixed location, digital nomads can choose their destination as they see fit. However, their selection is often based on specific criteria. According to a global online survey, the cost of living and a fast, accessible internet connection were the two main factors in choosing a destination among the digital nomad community in 2022. The research also revealed that crime rate and environmental safety also play a decisive role in the decision-making process of digital nomads when looking for a destination [29].

Digital nomadism has added a new dimension to the traditional concept of nomadism. Digital nomads are defined as being constantly on the move despite living in various countries for short periods, thanks to their geographical independence. This creates new opportunities and challenges for both individuals and countries. Since digital nomads generally work in highly skilled and technology-oriented jobs, they make significant contributions to the countries they go to in terms of economics and knowledge [24-26].

Digital nomads are remote workers who typically work in tech fields such as web design, programming, or online marketing [29]. They travel the world, taking advantage of remote work. Unlike telecommuters of past years, who worked from home using their remote work flexibility, lowered transportation costs, avoided office-based distractions, and provided convenient scheduling for childcare, digital nomads choose their location based on leisure considerations rather than employment [24].

Digital nomads prioritize data privacy and security; therefore, it is necessary to develop safe technological solutions for them [6-7]. Especially after the COVID-19 pandemic, it has become vital to provide secure and convenient working environments that digital nomads can opt for. Regulations for digital nomadism should focus on areas such as visa and accommodation flexibility, job security and benefits, intelligent destination strategies, co-working spaces, and technological infrastructure. These regulations can be essential steps in improving working and living conditions to attract digital nomads and ensure the sustainability of this new working model for local people, companies, and local and central governments. In this context, the characteristics and needs of digital nomads reflect the changes and opportunities in the

modern working world. Digital nomads can continue to work in different geographical regions thanks to flexible working hours and spaces. However, these flexibilities require establishing specific regulations and infrastructure [33].

When both the literature and the reports published by the authority institutions and organizations with which information is shared on this subject are examined, it has been observed that digital nomadism is now a type of work today and attracts attention day by day. For example, the Montenegro government has decided to make Montenegro an attractive destination for digital nomads by 2025, with the prediction that it will contribute to the region's development within the framework of the 2022 Action Plan [12].

Existing research on digital nomadism has explored various aspects, including work-life balance, theoretical foundations, tourism typologies, and bibliometric analyses, yet significant gaps remain in the study of YouTube content created by digital nomads. While some studies (e.g., Taşdelen [30] and Akgün [1]) examine community platforms like Nomad List and Reddit or analyze travel vloggers in the context of cultural diplomacy, none focus explicitly on how YouTube content contributes to understanding digital nomadism or influences its perception. This indicates a research opportunity to analyze YouTube's role as a key medium for digital nomads in shaping public perceptions, sharing practical insights, and enhancing the field's theoretical understanding.

Within the scope of our research, video content produced by platform users on YouTube, one of today's popular social media platforms, was analyzed by text mining and sentiment analysis methods, and it was tried to determine how this issue is handled and what its effects are. AI-powered tools enable fast and practical analysis of large data sets [5]. For this reason, auxiliary artificial intelligence tools were used in some of the analysis processes. The results obtained contribute to a better understanding of the issue of digital nomadism and can also support the decision-making of top policymakers.

The remainder of the paper is organized as follows. First, the relevant literature is reviewed, and the research contribution is summarized. Then, the data, basic measurements, and methodologies used in the empirical analysis are described. The results are presented, and their managerial implications are discussed. Finally, the analysis concludes with an

overview of the study's limitations and suggests directions for future research.

2. CONCEPTUAL FRAMEWORK AND RELATED STUDIES (KAVRAMSAL ÇERÇEVE VE İLGİLİ ÇALIŞMALAR)

This section will discuss the concept of digital nomadism, the impact and importance of social media on digital nomadism, sentiment analysis issues, and related studies.

2.1. Digital Nomadism (Dijital Göçebelik)

The term "Digital Nomad" was first used by Makimoto and Manners in their manifesto about the revolutionary lifestyle changes made possible by the advent of the internet. Twenty years after their publication, the internet has indeed created the possibility of remote work for those working in computer design and online marketing, and the saturation of internet connectivity in leisure and business life is blurring. Digital nomads often prefer to work in co-working spaces, which allows them to make social connections and expand their professional network [31].

Rejecting traditional business models and sedentary lifestyles, digital nomads travel frequently to discover new places, cultures, and people and conduct all their work digitally [15].

Furthermore, Reichenberger suggests flexibility in visa and accommodation arrangements for digital nomads, as digital nomads often travel and live in different geographical regions for short periods [28]. This is directly related to digital nomads frequently traveling between countries and working in various geographical areas. Aroles et al. highlight digital nomads' uncertainties regarding job security and benefits. Therefore, it is necessary to establish an appropriate legal framework for digital nomadism [4]. Regulating issues such as protecting workers' rights, insurance, and social security is essential for the sustainability of digital nomadism and the well-being of nomadic workers. Zhou et al. emphasize the necessity of developing innovative destination strategies that attract and support digital nomads [33]. These strategies should provide solutions for digital nomads' work, travel, social life, finances, and basic needs. Matsushita and Michaud et al. theorize that developing suitable co-working spaces and technological infrastructure for digital nomads is essential [22-23]. Digital nomads often balance work and travel, expressing a need for specific spaces for both activities. These spaces should have infrastructure that allows digital nomads to work and run their businesses efficiently.

Since travel is an integral part of the lifestyle of digital nomads, tourism research is a natural starting point for examining digital nomads. As the number of digital nomads increases every year, the tourism potential created by this group also increases. This tourism potential created by digital nomads creates excellent potential for countries such as Estonia and Barbados today. Since the working rate with remote access will increase even more, this potential is expected to grow gradually [18].

It has been reflected in various reports that approximately 40 million digital nomads will be living in the world by 2024. According to a 2023 study, more than half of the digital nomads surveyed worldwide are between 30 and 39. People from this age group comprise about 53 percent of the sample, while 22 percent of the digital nomads surveyed are under 30. As of March 2024, U.S. digital nomads are the most representative members of the global digital nomad community, representing almost half of worker travelers. Female digital nomads, usually self-employed, mainly work in the marketing and creative sectors, while men work more as software or web developers. Unlike business travelers who

go to a fixed location, digital nomads can choose their destination as they see fit. However, their selection is often based on specific criteria. According to a global online survey, the cost of living and a fast, accessible internet connection were the two main factors in choosing a destination among the digital nomad community in 2022. The research also revealed that crime rate and environmental safety also play a decisive role in the decision-making process of digital nomads when looking for a destination [29].

Google Trends Search tool provides statistics on search results for given keywords. In this context, the last 5 years regarding the keyword "digital nomad" were examined, and the trend graph is given in Figure 1, the distribution of searches by country is given in Figure 2, and the content related to the searches is given in Figure 3 [36]. According to the results, it is clear that there is an increasing interest in this topic from year to year. Generally, countries such as Montenegro and Georgia, Portugal Golden Visa, living conditions of the countries, and financial issues can be mentioned in the light of the research results.

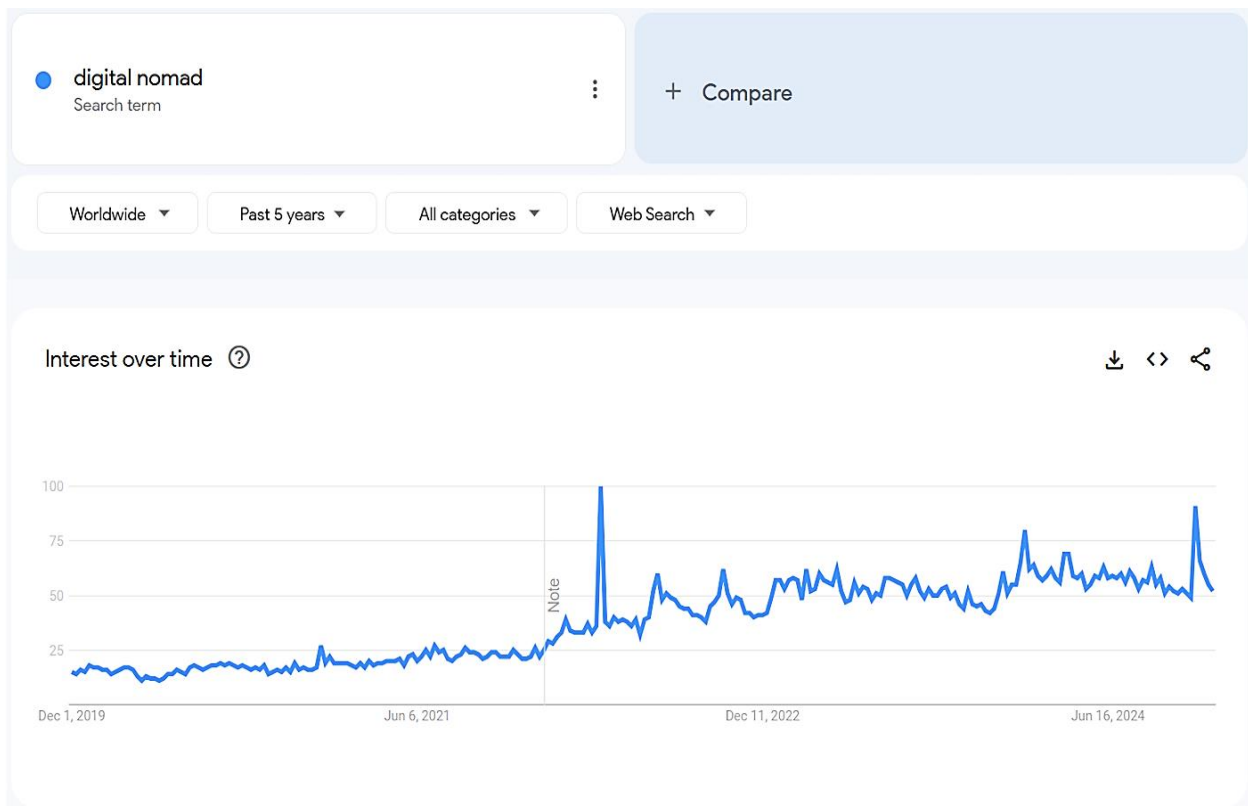


Figure 1. Google Trends data from the past five years [36] (Son beş yılın Google Trends verileri)

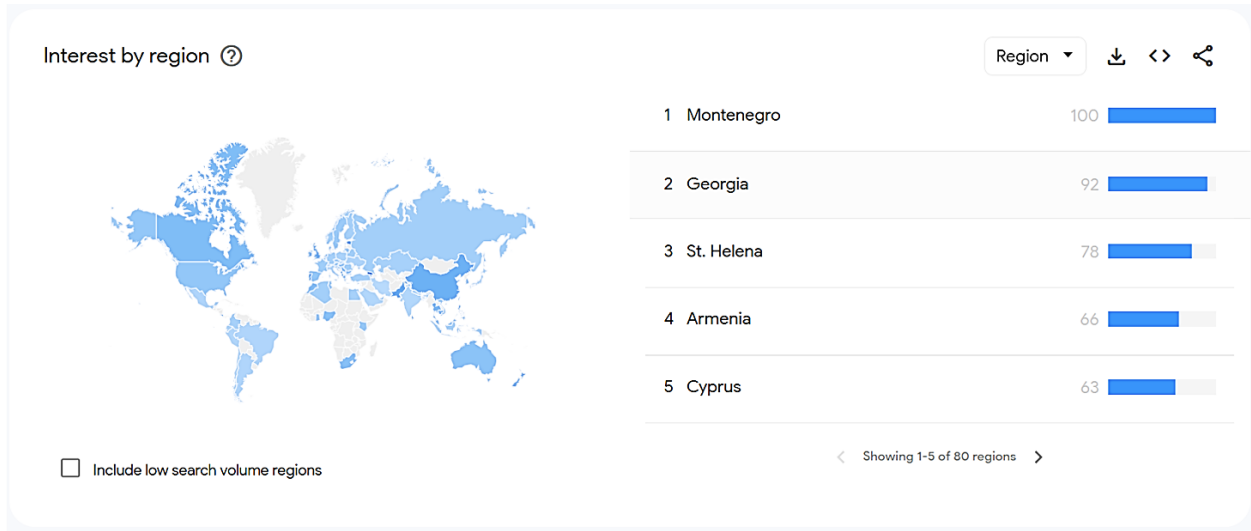


Figure 2. Google Trends tool country distributions in the last five years [36] (Son beş yılın Google Trends verilerinin ülke dağılımları)

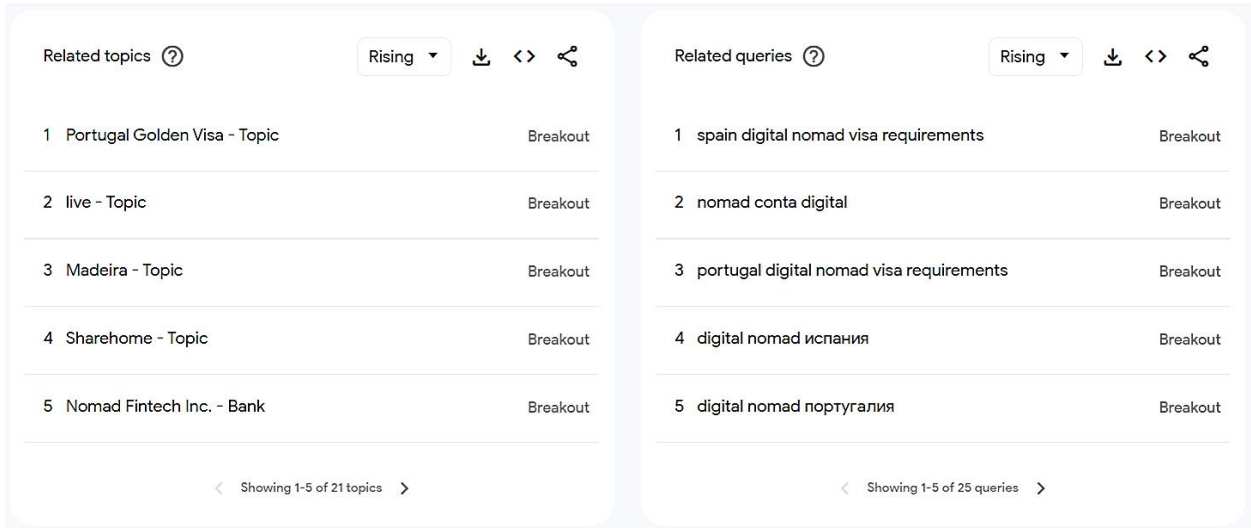


Figure 3. Google Trends tool keywords of the last five years [36] (Son beş yılın Google Trends verileri anahtar kelimeleri)

2.2. The Impact of Social Media on Digital

Nomadism (Dijital Göçebelikte Sosyal Medyanın Etkisi)

The concept of digital nomadism has found a vast place in recent years, especially on social media platforms such as YouTube, and digital nomads have started to share their experiences and lifestyles through these platforms. YouTube has become an essential medium for digital nomads to share their stories, tips, and challenges [24].

This lifestyle offers a variety of advantages and challenges for individuals and societies. Digital nomads have not learned the languages or traditions of their host countries, such as those in Southeast Asia or South America, which are often preferred destinations. Therefore, they seek out other digital nomads through online platforms [31].

Digital nomads, with their increasing number in recent years, refer to a new type of tourist-worker group that works independently of time and space but also travels. They contribute economically to the countries they visit and are in intensive communication with their communities before visiting the destinations. Digital nomads receive advice about the destinations they want to go to. In this respect, the mobility of countries in terms of image perception is meaningful [30].

Cultural diplomacy is an approach that has gained popularity with the rise of governmental and non-governmental actors in the promotion of countries. Digital nomads, who are among the actors of cultural diplomacy and can be referred to as “intellectual workers”, can share the cultural, political, economic, etc. structures of the countries they travel to with their followers [1].

According to a study by Kocaman, digital nomads are defined as online travelers who frequently use social media, and the distinction between work and leisure is blurred [18].

Many elements contribute to the recognition of countries, such as their interactivens and attractiveness. The fact that the posts made through social media reach many people in a short time makes the posts of digital nomads especially important. Travel vloggers can share the places they visit with their followers via their vlogger account wherever there is an internet connection. As can be seen, digital nomads constantly travel, discover new places, edit their shared content, and share it on social media networks. Digital nomads can earn money according to the number of interactions (number of followers, views, comments, saves, likes). At the same time, digital nomads can earn money through brand collaborations while sharing their travel experiences [1].

For digital nomads and businesses, social media is a practical and effective tool with various functions, such as finding potential jobs and customers, carrying out advertising and promotional activities, and increasing brand value and awareness. The growth of social media for digital nomad systems is listed as follows:

- Social media allows digital nomads to share sponsored content and advertising with collaborations.
- Using up-to-date and active social media accounts is essential for increasing the number of followers and creating new business combinations.
- Social media is essential for creating a brand image and increasing awareness.
- They provide social networks and interact with businesses and other users by joining existing networks.
- They capture their experiences with different options thanks to feedback such as suggestions, requests, and complaints.

As mentioned above, social media, both an effective promotional tool and a direct business area for digital nomads, is also gaining importance. In addition to establishing their professional identities and prestige, digital nomads actively use social media to commodify their work, travel, and life experiences [15]. The Google Trends tool gives us an idea about this. According to the Google Trends tool records, the search trend for the keywords "digital nomad" and "digital nomads" on YouTube in the last 5 years is given in Figure 4, and the country and topic distribution of these searches is given in Figure 5 [36]. In light of this information, it is seen that the topic of digital nomads has been increasing interest on the YouTube social media platform from year to year.

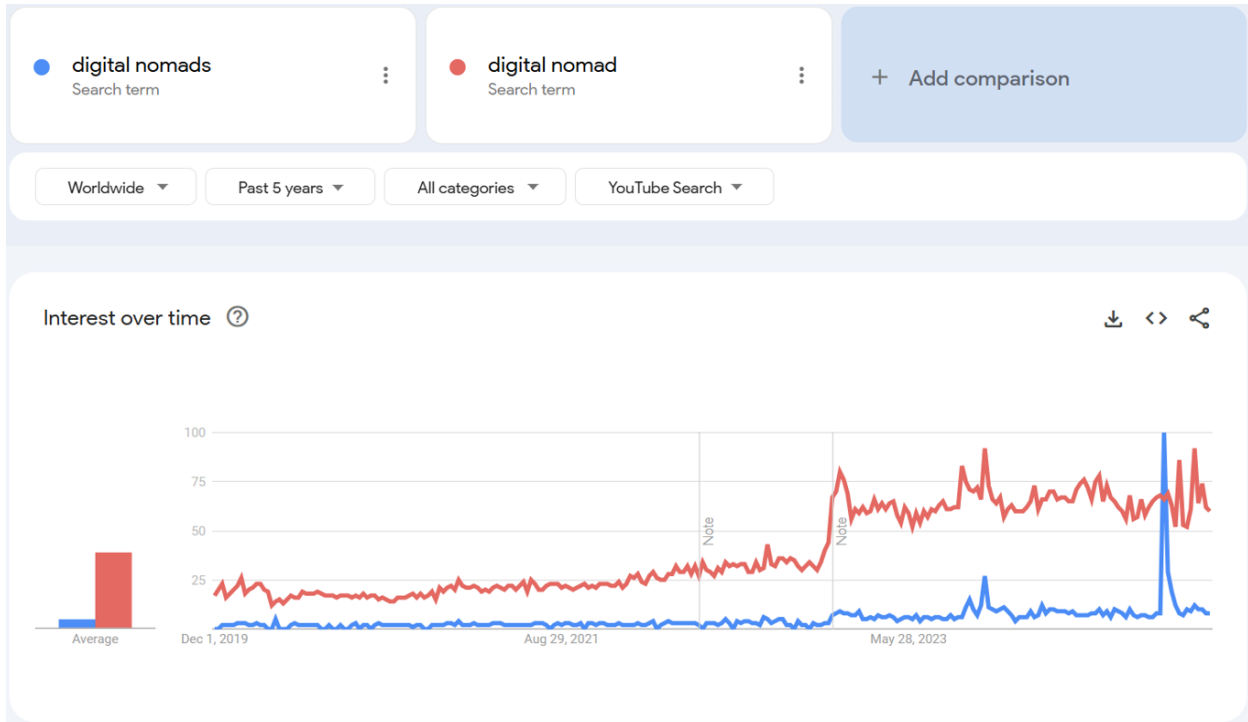


Figure 4. The Trend of “Digital Nomad” and “Digital Nomads” keywords Google Trends search of the last five years [36] (“Digital Nomad” ve ‘Digital Nomads’ anahtar kelimelerinin son beş yıldaki Google Trends araması trendi)

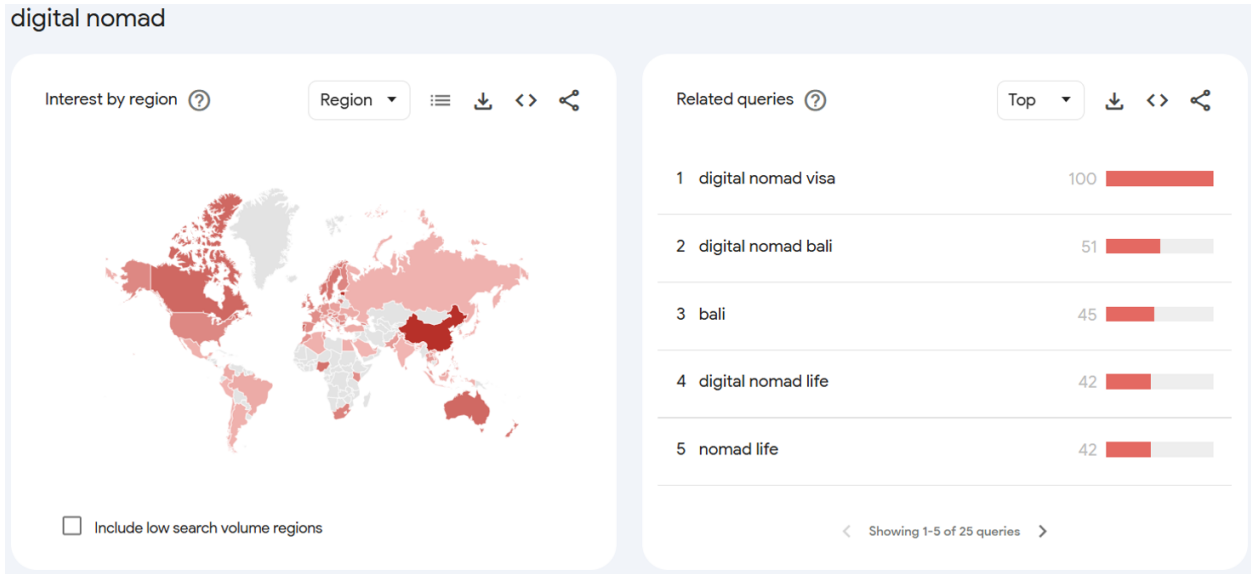


Figure 5. Distribution of the keywords “Digital Nomad” and “Digital Nomads” by country and query words in Google Trends searches of the last five years [36] (“Digital Nomad” ve ‘Digital Nomads’ anahtar kelimelerinin son beş yıldaki Google Trends aramalarında ülkelere ve sorgu kelimelerine göre dağılımı)

2.3. Sentiment Analysis (Duygu Analizi)

The internet's emergence has transformed how information is managed and interactions are conducted, enabling the collection of preferred information from multiple sources and its direct reading from computer screens. Individuals consume existing content and actively contribute by adding comments and generating new information. This allows individuals to assume both the role of readers and writers. Furthermore, through various social networks on the internet, individuals can share their opinions, news, and information with the broader public. Emotions significantly influence people's lives, and communication helps better understand their needs and preferences [10].

Sentiment analysis aims to extract emotional words from texts and determine whether the analyzed text is positive, negative, or neutral [13]. Due to market research and commercial use, sentiment analysis has gained significant importance recently. Using machine learning algorithms enables researchers to model users' opinions [9]. Sentiment analysis automatically calculates whether a text written on a specific topic has positive, neutral, or negative emotions [34]. Academic and commercial software available in English on this subject are available. Sentiment analysis of Turkish texts has also begun to be studied more recently [2].

Natural Language Toolkit NLTK is a platform developed to create Python programs for human language data. It includes working in text processing sections for classification, tokenization, stemming, tagging, parsing, and semantic

reasoning. Before working with the Natural Language Processing Library NLTK Library, stopword prefixes and suffixes of words should be cleaned. For text classification operations, the frequency of occurrence of the word in the text can be converted to numerical data with the TF-IDF (Term Frequency-Inverse Document Frequency) method [13].

As a result, sentiment analysis has gained considerable popularity as a research field in recent years. In its broadest definition, Sentiment analysis involves interpreting and classifying the author's thoughts from a text. NLTK is a popular library used for natural language processing (NLP) projects in Python. It is used for various NLP tasks, including language analysis, text classification, word stemming, and more, and provides a range of methods and resources for efficiently processing textual data. NLTK also includes valuable functions for preprocessing text tasks, such as tokenization, stop word removal, and stemming. Tokenization involves breaking raw text into smaller units, or tokens, which is critical in understanding context and building natural language processing models. Word clouds are commonly used in text analysis or data visualization studies to quickly identify frequently used or notable words in a text. By visually representing these words, with more significant or prominent words indicating higher frequency, they help highlight the text's key concepts, themes, or trends [10].

2.4. Related Studies (İlgili Çalışmalar)

Reichenberger has studied the lifestyles of digital nomads and how this lifestyle affects the balance between work and play. Digital nomads can better balance work and life thanks to flexible working hours and possible relocation. This lifestyle increases individuals' job satisfaction and quality of life [28].

The study by Düzgün & Akın aims to reveal the theoretical foundations of digital nomadism and evaluate digital nomadism as a tourist typology [11].

The research conducted by İli & Büyükbaykal aims to reveal the importance of digital nomads, which have emerged as a new professional entrepreneurship model, a new tourist typology, and essentially an alternative lifestyle, by presenting a bibliometric analysis of studies on digital nomads indexed in the Scopus database [14].

The study conducted by Kocaman aims to discuss the equivalent of the conceptual expression accepted as “digital nomad tourism” in the international literature and to create a broad conceptual framework for the tourism potential of this concept that is rapidly developing with digitalization. Within the scope of the study, archive-document scanning and literature review methods from qualitative data collection methods were used together [18].

The purpose of the research conducted by Taşdelen was to try to understand Turkey's image from the perspective of digital nomads. This research collected data from the Nomad List site and the Reddit digital nomad community, which digital nomads actively use, and chose content analysis from the qualitative analysis strategies [30].

The aim of the study by Yılmaz & Güzel Gürbüz, studies on digital nomads in the literature were examined, and the document analysis method was preferred for evaluation. This study emphasized that the new concept of digital nomads is increasing daily, and their relationship with recreation is better understood [32].

Within the scope of the research conducted by İli & Büyükbaykal, a detailed literature review was conducted on the concept of digital nomads, and by conducting a qualitative analysis with MaxQDA, it was determined that the studies were handled within a limited framework. This research aims to explore the trends towards digital nomads, whose numbers

are increasing today, and to reveal the importance of the community today and in the future [15].

The aim of the study by Özyürek et al. is to provide a comprehensive review of research on digital nomads, focusing mainly on open-access articles published in English, to track the evolution of research in this field and to provide a detailed description of gaps and future research opportunities [27].

The first aim of the research conducted by Akgün is to provide a different perspective on the digital nomad literature that has recently become prominent in Turkey. The second aim is to evaluate the costs of travel vloggers who share their experiences in Turkey with their followers, which were determined through homogeneous sampling in the context of cultural diplomacy [1].

3. RESEARCH METHOD (ARAŞTIRMA METODU)

Today, it is seen that it is increasingly common to carry out scientific research using a mixed method. The mixed method is an approach that aims to make comprehensive explanations by combining qualitative and quantitative research elements. This method aims to achieve holistic results by using the strengths of quantitative and qualitative designs. Nayir et al. used a mixed methods research approach as a research design, in which quantitative and qualitative analyses are carried out together [25].

This study used some applications, including the Natural Language Tool Kit (NLTK) library developed by the researcher with Python programming language, to perform word frequency analysis of audio texts in social media videos. The analysis process consists of the following stages:

Data Collection: Audio texts from video content determined as a YouTube social media platform dataset were collected as text files. These files were used as a data source to examine user interactions reflecting the content of the videos.

Data Pre-Processing: The collected text data has been pre-processed to make it suitable for analysis. At this stage, unnecessary punctuation marks, memorable characters, and stop (short) words that do not add meaning (such as conjunctions and prepositions) are removed from the texts. This process helped to obtain meaningful groups of words more accurately in the analysis.

Word Frequency Analysis: Pre-processed texts are stored in Python's collections. It was analyzed using the "counter" class and the "NLTK" library to determine word frequencies. At this stage, the texts' most frequently used words and word groups were determined by bi-gram analysis, and the frequencies of these words were calculated. Bi-gram analysis is preferred because the binary words and their contexts in the texts need to be analyzed together.

The obtained word frequencies were used to determine which topics were prominent in social media videos and which themes users focused on. The analysis process was carried out as follows:

Determination of Frequency-Dependent Impact Score: After calculating the word frequencies, the effectiveness score of each word or word group (n-gram, bi-gram) was determined depending on the number of viewers of the video. This way, the effectiveness of the prominent words in the videos users watch was examined most.

Visualization of Data: The obtained word frequencies were visualized by creating a word cloud for positive and negative phrases to provide a better understanding. This visual representation presented the most frequently used words and groups of words in a visual format, making the study findings more understandable.

Interpretation of Results: Word frequency analysis and visualization results were used to analyze the content of social media videos and to understand user behavior better. These findings can serve as an essential reference source in content analysis on social media platforms.

ChatGPT, a chatbot being developed by OpenAI, has the potential to change our interaction with technology significantly. The essential skill of the ChatGPT chatbot is that with the help of the large amount of data he processed during his education, he can understand texts with high accuracy, even to the extent that it can be said to be almost human and to produce new texts. Artificial intelligence has many reliable capabilities regarding information processing and business execution. Language models such as ChatGPT can summarize academic papers and help advance the field of librarianship [16]. Despite their inherent limitations, with the right tools and approaches, AI and natural language processing technologies significantly increase efficiency and effectiveness in many areas, lead to discoveries and insights, and have the potential to perform tasks such as shaping the future [3]. Since artificial intelligence-supported tools enable the

rapid and practical analysis of large data sets Bird, Klein, & Loper (2009), artificial intelligence tools have been used as facilitators and accelerators in data processing to be discussed within the scope of our research. Large language models (LLMs), especially ChatGPT, have attracted global attention since their inception. Using LLMs for abstract screening in systematic reviews is an innovative concept. Of the LLM tools compared in the study, ChatGPT v4.0 demonstrated excellent performance in three test scenarios, achieving at least 85% accuracy. It also achieved sensitivity and specificity rates ranging from 80% to 95%. These outstanding results highlight the significant promise of LLMs in abstract screening, offering a practical and capable alternative to traditional, laborious approaches that often require extensive human annotation [35]. In this context, using the ChatGPT web interface, it was requested to analyze the text data within the scope of the prompt determined below:

"An audio transcript of selected user-generated social media videos is provided in the text below. In this context, summarize the most important information in the text and list the results containing the positive and negative concepts most emphasized in the text. Here is the text: ..."

Text theme analyses of the videos, our data set, were carried out through this prompt from the ChatGPT website interface. After the fact-checking of the researcher, the impact analysis calculation was made on the thematic subjects, which was determined depending on the word usage frequencies determined in the previous stage.

Our formula used in this context is as follows:

- **Word Frequency:** This number refers to the number of times the word is mentioned in the video audio text.
- **Number of Viewers of the Video:** The data of how many people watched the video.
- **Total Viewers:** The total number of viewers for all the videos in the data set.

Impact Score:

Word Frequency * ((Number of Viewers of the Video/Total Number of Viewers)*100)

All numerical and visual data obtained from the examination are presented in our findings section.

3.1. Purpose of The Research (Araştırmanın Amacı)

Digital nomads change places frequently, and during this process, they research the following

locations on social media and make decisions based on the experience and advice of other nomads. The primary purpose of this research is to analyze the positive and negative aspects of how the issue of digital nomadism is handled in the content produced by YouTube social media platform users and to present the results to the public. In addition, in light of the findings to be obtained, suggestions that can contribute to the development of digital nomad visa policies will be reported. The results will be revealed, especially for government policies. Our research questions are determined as follows:

RQ1. How is digital nomadism handled in content produced by YouTube users?

RQ2. What are the positives and negatives in the videos that digital nomads are interested in?

RQ3. What are the main characteristics of the locations that digital nomads often choose or give up?

3.2. Data Set (Veri Seti)

Digital nomadism, gaining popularity, especially on platforms like YouTube, allows individuals to share their experiences, offering both opportunities and challenges [24]. Digital nomads often do not integrate deeply into local cultures and rely on online communities for support [31]. They contribute economically to host countries and influence their image through cultural diplomacy, acting as “intellectual workers” who share insights on social, economic, and political structures [1-30]. This lifestyle blurs the line between work and leisure, with social media enabling them to earn through content engagement and brand collaborations [1-18]. In our research, two groupings were made to determine the video content to be examined, and the “positive” and “negative” keyword phrases were determined by the researcher inspired by the existing literature. Selected keyword phrases are presented in Table 1.

Table 1. Positive/negative keyword phrases used in YouTube search^(*)(YouTube aramasında kullanılan olumlu/olumsuz anahtar kelime öbekleri)

Keyword Phrases with "Positive" Phrases	Keyword Phrases with "Negative" Statements
"digital nomads" advantages	"digital nomads" disadvantages
"digital nomads" start	"digital nomads" stop
"digital nomads" benefits	"digital nomad" problem
"digital nomads" suitable	"digital nomad" why
"digital nomads" dream	"digital nomads" leaving
"digital nomads" best	"digital nomads" should not
"digital nomads" cheap	"digital nomad" reality
"digital nomads" livable	"digital nomads" dark side
"digital nomads" guide	"digital nomads" scary
"digital nomads" comfortable	"digital nomads" lies

^(*) Created by the author.

The videos that will be the subject of the analysis were searched using the YouTube search engine on August 8, 2024, using positive and negative phrases. In the results listed for each keyword, the “most interesting” option was chosen from the search ranking algorithms offered by YouTube, and the top 3 videos were selected as the data source in the research. Thus, 60 videos, three from each of the ten positive keyword phrases and three from each of the ten negative keywords were selected as data sources for examination. Since some videos are reflected in different search results within the exact phrase, they are deduplicated, and 56 out of 60 video content are determined as data set sources. These videos and their features are presented in Tables 2 and 3.

The audio transcripts of the videos that are the subject of the research provided by YouTube were recorded in text format. In this context, 55 text files obtained by using the relevant videos were recorded by the YouTube_Video_ID_voice_transcript.txt file name example. Our audio transcript research has been shared in the attachments.

Table 2. YouTube videos about positive keyword phrases (Pozitif anahtar kelime öbekleri hakkında YouTube videoları)^(*)

Searched Words	Video Title	YouTube Video ID	Publish Date	Duration	View Count
"digital nomads" advantages	5 Advantages of Digital Nomads	j7xEEGak6Hk	Jun 9, 2022	2min 25sec	105487
	Digital Nomads Explained	UtvIpD1mVUo	Jul 26, 2023	5min 35sec	1568
	Living as Digital Nomads - More Cons Than Pros?	MV_aRjS26vs	Sep 10, 2022	22min 32sec	1054
"digital nomads" start	I Asked Digital Nomads How They Make Money Living on A Remote Island	Ri1ZmCW5D6M	Jan 1, 2023	11min 56sec	629326
	How to Become A Digital Nomad for Beginners (Full Tutorial)	tLUTyeLeZb8	Dec 8, 2023	20min 27sec	99026
	Asking Digital Nomads What They Do for A Living (Bali, Indonesia)	LV81gjNEdc4	Jan 18, 2024	16min 31sec	36577
"digital nomads" benefits	5 Advantages of Digital Nomads	j7xEEGak6Hk	Jul 9, 2022	2min 25sec	105487
	Thailand Vs Digital Nomads - The Benefits and The Challenges	bg9f2z69CkA	Apr 3, 2021	9min 43sec	14424
	5 Reasons Why Digital Nomads Should Come to Bosnia And Herzegovina	tJf5LILK6OM	Jan 29, 2021	7min 05sec	13632
"digital nomads" suitable	Best Place in Europe For Digital Nomads?	3f4QztkOZec	Jun 26, 2023	4min 16sec	8190
	5 INSANELY CHEAP Destinations for Digital Nomads In 2024	IHUXp49Xlzg	Jan 8, 2024	12min 06sec	320343
	12 Best Countries to Live in for Digital Nomads	2wpH5jCvsvk	Sep 1, 2023	12min 35sec	18059
"digital nomads" dream	Living the Digital Nomad Dream in Greece: Working Abroad in Paradise	8AzXhHfvmwI	Mar 2, 2022	3min 46sec	2564
	Living the Dream: Why Thailand Reigns Supreme for Digital Nomads	G020uX9PYSw	Sep 25, 2023	4min 56sec	1595
	Top 5 Dream Destinations for Digital Nomads Ultimate Guide for Remote Work Paradise	jAMmGX_HmaA	Mar 7, 2024	2min 59sec	39

"digital nomads" best	Best Place in Europe For Digital Nomads?	3f4QztkOZec	Jun 26, 2023	4min 16sec	8190
	10 Best South American Cities for Digital Nomads	78UXDYugEnc	Dec 16, 2022	10min 12sec	13140
	Top 5 Resources for Digital Nomads	xqouSJAGd-A	Jul 3, 2022	6min 09sec	688
"digital nomads" cheap	10 INSANELY CHEAP Destinations for Digital Nomads (From \$13 Per Day!)	TGhWHG8YO5I	Jul 7, 2024	26min 53sec	31010
	10 Most Affordable Countries for Digital Nomads	SnXgFZphndE	Mar 18, 2024	15min 45sec	680
	10 Best Countries in Europe To Live for Cheap - Digital Nomads, Expats, Retirees	VBbOaxJEUe4	Mar 1, 2023	17min 32sec	31501
"digital nomads" livable	I Asked Digital Nomads How They Make Money Living in Bali	vfvqn77cUYA	Mar 31, 2024	17min 09sec	10277
	I Asked Digital Nomads How They Make Money Living in Bali	kfwJcLiW19s	Apr 14, 2024	15min 13sec	5953
	SRI LANKA for Digital Nomads In 2024-DIDN'T EXPECT THIS!!	--DCt5N1zQ0	Feb 9, 2024	11min 34sec	24427
"digital nomads" guide	How to Become A DIGITAL NOMAD In 2024 (3-Month Plan)	FJHkEx0Yotk	Mar 26, 2023	6min 26sec	48749
	How to Become A Digital Nomad for Beginners (Full Tutorial)	tLUTyeLeZb8	Nov 8, 2023	20dk 27sn	99026
	Pipa Brazil BR A Digital Nomad Guide	kDBYjnNchmg	Nov 3, 2023	10dk 49sn	19217
"digital nomads" comfortable	I Lived 30 Days in The PHILIPPINES (Here's What I Think)	Oa0YfFdeY48	May 7, 2023	7dk 42sn	93306
	Asking Digital Nomads How They Make Money in Bali	QQ4uCPgvaZw	Feb 28, 2024	21dk 20sn	10173
	Shift Special "Digital Nomads"	Pzh6qZTfbQA	Jan 9, 2023	12dk 31sn	2560

(*)Created by the author.

Table 3. YouTube videos about negative keyword phrases (Negatif anahtar kelime öbekleri hakkında YouTube videoları^(*))

Searched Words	Video Title	YouTube Video ID	Publish Date	Duration	View Count
"digital nomads" disadvantages	5 Disadvantages of Digital Nomads	cdxAv1EnVpE	Jun 9, 2022	2min 40sec	137130
	Disadvantages of Being A Digital Nomad	6_ME-zt4oZg	Oct 15, 2019	4min 52sec	27
	5 Advantages of Digital Nomads	j7xEEGak6Hk	Jul 9, 2022	2min 25sec	105487
"digital nomads" stop	Why We STOPPED Being Digital Nomads	IKEBnNVzd2Q	Mar 3, 2024	13min 35sec	1591
	Digital Nomad Rant - Stop Lying to People!	mSf-OdzHqGk	Aug 17, 2016	3min 25sec	37393
	VLOG 017 - The DARK Side of Being A DIGITAL NOMAD: Why I've Stopped Traveling Full-Time	mu1XN7ABANM	Feb 26, 2020	9min 59sec	59591
"digital nomad" problem	How Digital Nomads Solve Problems for Companies and Countries	9Pt6WrkLc7U	Apr 19, 2023	6min 02sec	342
	The UNTOLD TRUTH About Being A Digital Nomad	k_uVP9h0T_s	May 7, 2023	8min 14sec	1238
	Are Digital Nomads Just Running Away from Their Problems??	3WsSkPe4o4s	Jan 8, 2023	23min 45sec	998
"digital nomad" why	A Documentary on Digital Nomads: One Way Ticket	XXMnKEKpj3A	Nov 17, 2016	1min 57sec	41481
	The Truth About Being A Digital Nomad	s6--5sozqaE	Feb 11, 2023	6min 42sec	97923
	Working Online and Traveling The World - Digital Nomads DW Documentary	iXGtx-hroKE	Feb 9, 2019	25min 55sec	3176995
"digital nomad" leaving	I AM LEAVING BALI The Digital Nomad's Paradise HAS CHANGED	6Bf9_OAzOzI	Nov 2, 2023	18min 56sec	19276
	Leaving the Country to Become Digital Nomads!	JNDDXRcW8wc	Sep 4, 2017	2min 54sec	417
	4 Reasons Why People Fail in The Digital Nomad Lifestyle	NWiy5wbzPCs	Oct 10, 2018	11min 51sec	72550
"digital nomads"	Why Digital Nomads Should "NOT" Move to Vietnam	LCNLtPhnwH0	Nov 25, 2022	10min 01sec	59847

AND should not	Why I STOPPED Being A Digital Nomad	rBT1q82oJtM	May 27, 2023	6min 24sec	519592
	Why People Don't Like Thailand Anymore	ofcY3eYqKnA	Jul 4, 2024	14min 46sec	168889
"digital nomads" AND reality	Being A DIGITAL NOMAD - Expectations VS Reality	OmH4yIfowzg	May 12, 2022	8min 11sec	403142
	Life as A DIGITAL NOMAD - Expectations Vs Reality	p-PKh2x20Rs	Oct 14, 2022	4min 16sec	37480
	Digital Nomads: Why Remote Workers Are Flocking to A Bulgarian Mountain Town	kjgHgYpNGHM	Nov 25, 2023	7min 08sec	15451
"digital nomads" dark side	The Dark Side of Digital Nomads	-yOFJ51SNGE	May 25, 2021	6min 17sec	6794
	The DARK Side of Digital Nomads - Tech Nomad in Costa Rica	Q56JeXUoL-w	Mar 15, 2022	10min 27sec	1080050
	The Dark Side of Becoming A Digital Nomad	tvuVIm7ZVWQ	Nov 20, 2022	9min 19sec	6045
"digital nomads" scary	5 Scary Truths About the Digital Nomad Life	J1D-ld1PJWM	Jun 24, 2023	11min 27sec	228190
	What Might Scare You About Digital Nomads: Are They Legit?	wkeDQzJKIh0	Feb 17, 2022	5min 17sec	13
	10 Scary Truths About Digital Nomad Life Digital Nomad Lifestyle Nomadic Lifestyle	JPhLcLNHAsQ	May 27, 2024	8min 07sec	61
"digital nomads" lies	Digital Nomad Rant - Stop Lying to People!	mSf-OdzHqGk	Aug 17, 2016	3min 25sec	37393
	5 LIES They Don't Tell You About Being A Digital Nomad (Why I QUIT)	MVrRIKJmRR8	Oct 24, 2023	13min 49sec	1167
	Bali SUCKS for Digital Nomads! The Influencers Are Lying to You!	U5a4qnFRafE	Jun 4, 2024	18min 26sec	7401

(*)Created by the author.

4. FINDINGS (BULGULAR)

Based on the analysis of the videos determined as the data set within the scope of our research, the following results were reached to determine the general perception about the digital nomad visa and

which issues this perception focuses on in positive or negative aspects.

4.1. General Information About Videos (Videolar Hakkında Genel Bilgi)

A total of 60 videos selected within the scope of our research were listed as standard in the searched phrases. Because of the deduplication, 56 videos were taken as a data set, including 27 unique videos about positive phrases and 29 unique videos about negative phrases. The total length of these videos is 586 minutes and 31 seconds, and the audio texts of the relevant videos were filed and examined with artificial intelligence tools. The dataset videos have a total audience of 7,781,851 viewers as of the analysis day.

4.2. Text-Word Frequency Analysis Findings of Videos (Videoların Metin-Kelime Sıklığı Analizi Bulguları)

The word frequency analysis is based on the "positive" phrases, and the effectiveness score is calculated based on the video viewing rate of these words, which are listed from largest to smallest. The top 20 word groups with the highest scores are given in Table 4. Impact scores were calculated by multiplying the frequency of each word in the video by the ratio of the total number of views of the relevant video.

Table 4. Impact scores table of keywords detected in positive videos (Pozitif videolarda tespit edilen anahtar kelimelerin etki puanları tablosu)^(*)

Word(s)	Impact Scores
digital nomad	616,58
per month	350,91
would say	343,39
really nice	298,72
digital nomads	242,54
little bit	221,03
theres many	210,21
really awesome	194,69
place stay	172,36
work remotely	163,08
really good	154,77
best place	142,66
cost living	135,91
also really	127,69
nice place	124,52
nomad village	122,64
day week	122,31
nice meet	122,31
would like	122,31
affordable place	103,77

^(*)Created by the author.

The graphical visualization of the net impact scores given in Table 4 is presented in Figure 6, and the visualization of the identical scores as a word cloud is presented in Figure 7.

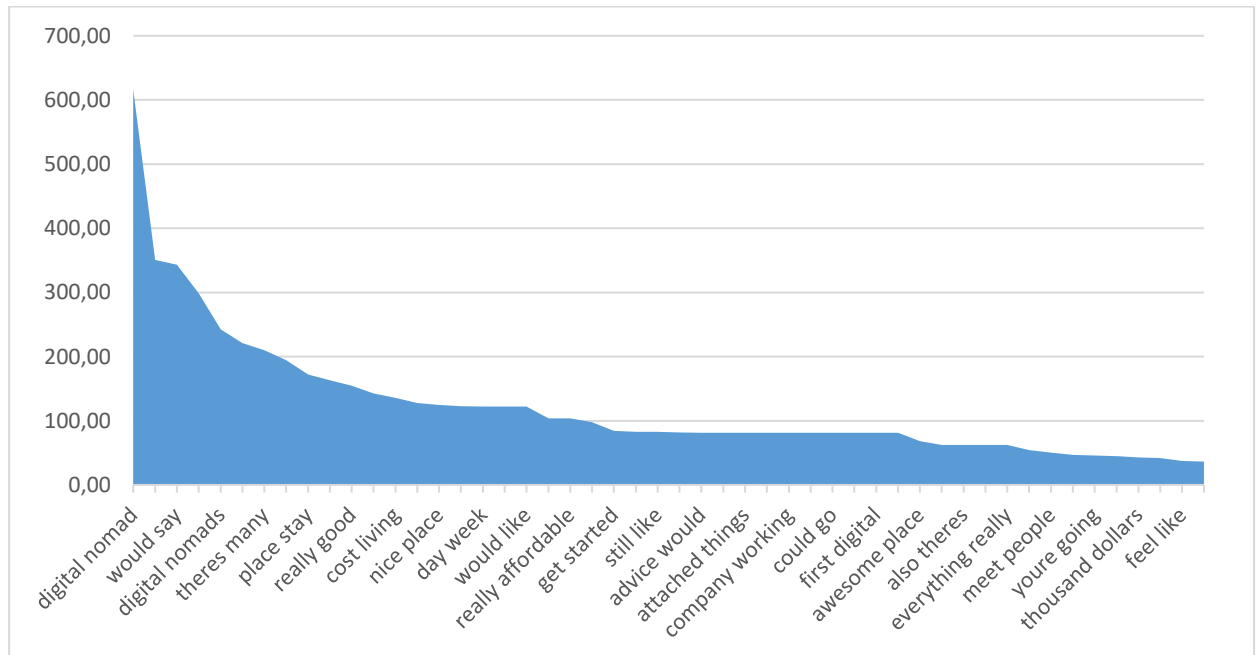


Figure 6. Impact score graph of keywords detected in positive videos (Olumlu videolarda tespit edilen anahtar kelimelerin etki skoru grafiği)



Figure 7. Word cloud image of keywords detected in positive videos (Olumlu videolarda tespit edilen anahtar kelimelerin bulut grafiği)

The word frequency analysis is based on "negative" phrases, and the calculated effectiveness score is based on the video viewing rate of these words, which are listed from largest to smallest. The first 20 word groups with the highest scores are given in Table 5.

Table 5. Table of impact scores for keywords detected in negative videos (Negatif videolarda tespit edilen anahtar kelimeler için etki puanları tablosu)^(*)

Word(s)	Impact Scores
digital nomads	605,80
digital nomad	535,62
go back	254,64
youre going	248,04
im gonna	208,36
enough money	203,71
little bit	174,75
im im	152,78

like im	152,78
moment im	152,78
okay okay	152,78
paid ethereum	152,78
something stable	152,78
sort like	152,78
20 percent	103,77
180 days	101,85
34 million	101,85
actually get	101,85
actually want	101,85
basically im	101,85

^(*)Created by the author.

The graphical visualization of the net impact scores given in Table 5 is presented in Figure 8, and the visualization of the identical scores as a word cloud is presented in Figure 9.

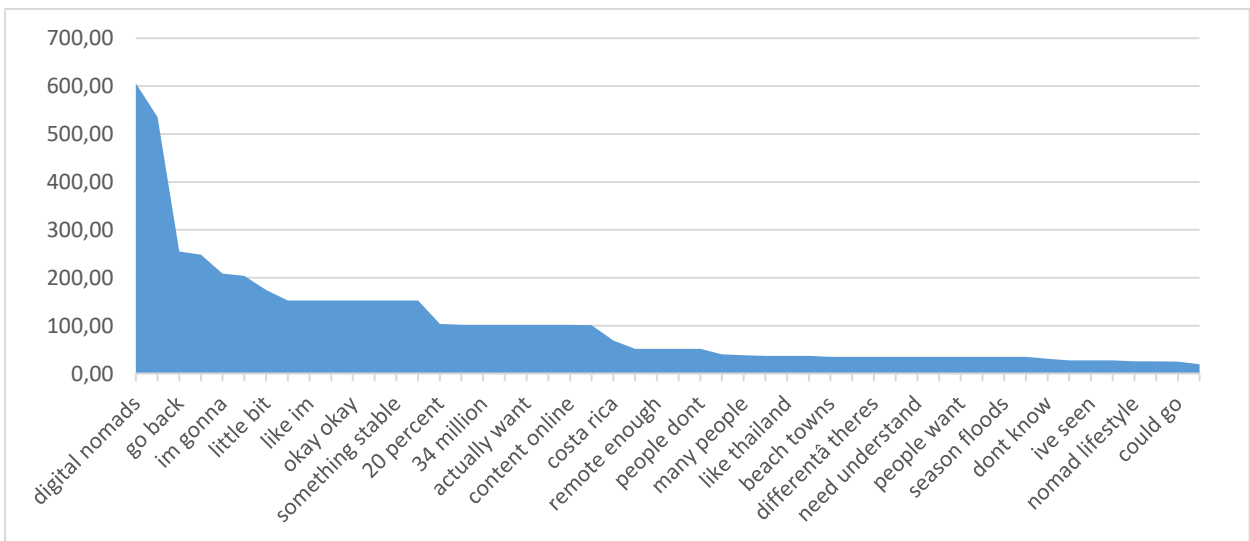


Figure 8. Impact score graph of keywords detected in negative videos (Negatif videolarda tespit edilen anahtar kelimelerin etki puanı grafiği)

South America	17
Health-Sports	13
Italy	11
Transportation	11
Greece	4

New Experiences	3
Phuket	2
Costa Rica	1
Malta	1
Social Media	1

(*)Created by the author.

The graphical visualization of the net impact scores in Table 6 is presented as a word cloud in Figure 10.

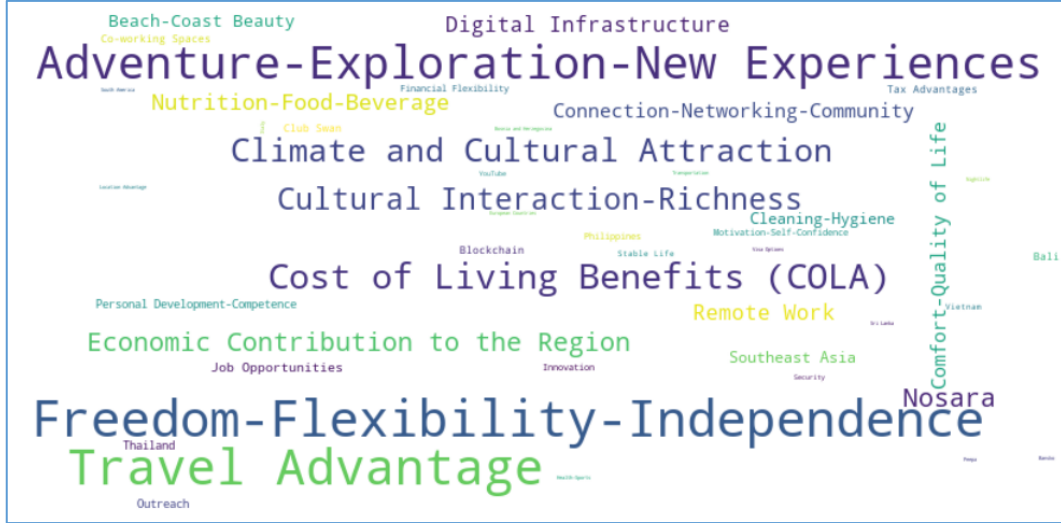


Figure 10. Word cloud visual based on the net impact scores of keyword phrase themes detected in positive videos (Pozitif videolarda tespit edilen anahtar kelime öbeği temalarının net etki puanlarına dayalı kelime bulutu görseli)

The calculated net impact score data of the "negative" keywords, which are reached by adding the impact scores of the videos in which each word is discussed, are given in Table 7.

Table 7. Table of net impact scores of keyword phrase themes detected in negative videos(*) (Negatif videolarda tespit edilen anahtar kelime öbeği temalarının net etki puanları tablosu)

Keyword	Net Impact Scores
Financial Challenges	6611
Loneliness-Social Isolation	6255
Financial Variability	6028
Instability	5186
Relocation-Travel Difficulty	4975
Social Impossibility	4768
Insurance	4114
Relationship Difficulties	2576
Pollution-Hygiene Problems	2193
Cultural Differences	2051
High Cost of Living	1738
Mediocrity	1490
Nosara	1398

Uncertainty Issues	1086
Climate Conditions	868
Career Development Issues	815
Crowded Cities	806
Traffic Problems	708
Poor Urbanization	571
Bali	563
Noise	562
Legal-Legislative Issues	545
Work-Life Imbalance	501
Dang	415
Backwardness	415
Saro	415
Security Issues	364
Time Management Issues	352
Digital Infrastructure Issues	293
Routine-Habit Changes	261
Visa Issues	224
Thailand	219
Health Problems	197
Working Conditions	169
Manila	121

culture are attractive, and where the cost of living is more economical than other locations.

In addition, the subject of "Financial Difficulties" ranked first with 6611 points, "Loneliness-Social Isolation" ranked second with 6255 points, "Financial Variability" ranked third with 6028 points, "Instability" ranked fourth with 5186 points, and "Difficulty in Moving and Traveling" ranked fifth with 4975 points. According to these results, the audience was interested in the videos portrayed negatively, especially these five topics.

When we look at the topics described positively, freedom, travel advantages, adventure, discoveries, cost of living, information transfers, climate and cultural attractiveness, cultural richness, cultural interaction, economic contribution to the region, low quality and cost of nutrition, food and beverage quality, digital solid infrastructure, high comfort and quality of life, connection business networking, cleaning hygiene issues, the presence and quality of co-working spaces. It has been observed that the videos in which such topics are highlighted have more viewers and accordingly, these topics are effective in transferring information due to their high impact scores.

When the negatively depicted issues are considered, these destinations, especially some known locations such as Nosara, Bali, Peepa, which are known to digital nomads, are crowded cities, adaptation problems due to cultural differences, conditions that prevent work such as heat and humidity, loneliness and being away from family, lack of fixed income required for a stable life, international money transfers being a problem in the accommodation area. It has been revealed that there are many viewers of the videos that contain many negative issues such as legal-legislative problems, expensive or complex health insurance and insurance transactions, socialization difficulties, pollution-hygiene problems, their lives turning into monotonous and ordinary routines after a while, collection-packaging of working equipment and difficulties in traveling to the following location, transfer from the airport, expensive accommodation. These results confirm digital nomads' use of social media to communicate, as stated by Müller [24].

Within the scope of the study, a challenging analysis was carried out by examining the text transcripts of the voices compiled from YouTube content, which has not been addressed in digital nomadism to date, with artificial intelligence-supported tools. These findings emphasize the critical role of the issues

featured in social media content, an important source for digital nomads to determine their next destination and decide.

This research supports the findings of previous studies such as Aroles et al. (2023) on digital nomads' uncertainty about job security and benefits, Matsushita and Michaud et al. (2022) on the protection of workers' rights, insurance, and social security, and Zhou et al. (2024) on the need to develop innovative destination strategies that attract and support digital nomads and provide solutions for their work, travel, social life, finance and basic needs. This research not only confirms previous studies but also extends the existing body of knowledge by making the expected characteristics of destinations meaningful for policymakers and by conducting a challenging analysis of hitherto unexamined audio recordings collected from YouTube content, one of the world's largest social media platforms, using AI-enabled tools. This research has practical implications for researchers, civil society organizations, and government policymakers working on digital nomadism and opens new avenues for future research.

New countries facilitate digital nomad visas daily; digital nomads contribute to the country's regional development and provide tourism income with increased cultural interaction and country awareness. For this reason, countries are now preparing action plans to address this issue in their country development plans. For example, within the scope of the Montenegro Government, the 2022-2025 Action Plan adopted in 2021 aims to promote Montenegro effectively, develop services in online environments for information, attract the attention of digital nomads, and increase the application and admission procedures. In coordination with the Ministry of Public Administration, Digital Society and Media, the Ministry of Interior, and the Ministry of Finance and Social Welfare, they cooperated on many issues, such as the Personal Income Tax Law and the extension of the Visa Application Period to 1 year [12]. Undoubtedly, it is essential to clearly define what will be done to implement these policies and understand the expectations of digital nomads.

5.2. Recommendations (Öneriler)

While promoting digital nomads, as given in the results section, it is livable and relatively economical, digital infrastructure is vital, there are no security problems, co-working areas are well designed, climate-beach-cultural beauties are highlighted, law-legislation-tax problems are solved, visa facilitation is provided, and the

minimum income level required for a visa specified by some countries is kept at a reasonable level. As a result of its successful implementation, our country is likely to become one of the most popular destinations.

In the search conducted with the Google Trends search tool [36], Montenegro was clearly at the top of the list in the last five years in the search made based on the keywords "digital nomad". This indicator proves that the practices and improvements made by the Montenegro country administration are effective. In this context, Montenegro can be shown as an example of good practice in terms of improving social security conditions, facilitating visas, and effective promotion policies that should be taken into consideration by other country administrations interested in this issue.

Digital nomads, estimated at 40 million, represent a new kind of tourist-worker group that prefers to have fun freely while working and to have a high quality of life and comfort. Therefore, according to our research results, it is recommended that top policymakers prepare a coherent action plan with the primary objective of "Our goal is to promote Montenegro as a globally attractive place for digital nomads" in the case of the Government of Montenegro and implement it without delay. While promoting digital nomads, as given in the results section, working on action plans that focus on livable, relatively economical, digital solid infrastructure, no security problems, well-designed co-working co-working areas, highlighting climate-beach-cultural beauties, solving law-legislation-tax problems, providing visa facilitation and keeping the minimum income level required for a visa at a reasonable level specified by some countries. It can be beneficial.

According to the MBO Partners (2022) report, "... The factors driving the growth of digital nomadism are still firmly in place. People want to travel, awareness and interest in digital nomadism are growing, and the shift to remote work will continue to be a strong enabler. We expect the number to increase even more in the next few years." the situation was revealed, and it was seen that the prediction was realized as of 2024 and increased 2 times in 2 years by reaching a mass of 40 million. The contribution of this qualified workforce, which corresponds to half or more than all of the population of many countries and cannot be underestimated, to regional development, tourism, and digital development should not be ignored [19].

5.3. Limitations and Future Study Proposals

(Sınırlılıklar ve Gelecek Çalışmalar)

The most significant limitation of this research is that 60 videos selected on the YouTube platform and other video-based social media platforms are not included in the review. Another limitation is that the viewer's comments on the video about the concepts mentioned in the video audio texts are not analyzed. Similar research also recommends using other video-based social media platforms like Instagram and TikTok.

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)

Zafer AYAZ: He compiled the data, performed the analysis, and wrote the manuscript.

Verileri derlemiş, analizleri yapmış, 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] Akgün, AC. A research on digital nomads impressions of Türkiye in the context of cultural diplomacy. *Journal of Erciyes Communication*. 2024; 11(2):673-682. <https://doi.org/10.17680/erciyesiletisim.1437918>
- [2] Albayrak, M, Topal, K, Altıntaş, V. (2017). Data analysis on social media: Twitter. *Süleyman Demirel University Faculty of Economics and Administrative Sciences Journal*. 2017; 22(Kayfor 15 special issue):1991-1998.
- [3] Alshater, M. Exploring the role of artificial intelligence in enhancing academic performance: a case study of ChatGPT. *SSRN Electronic Journal*. 2022; <https://doi.org/10.2139/ssrn.4312358>

- [4] Aroles, J, Bonneau, C, Bhankaraully, S. Conceptualising 'meta-work' in the context of continuous, global mobility: The case of digital nomadism. *Work, Employment and Society*. 2023; 37(5):1261-1278. <https://doi.org/10.1177/09500170211069797>
- [5] Bird, S, Klein, E, Loper, E. *Natural language processing with Python*. O'Reilly Media. 2009
- [6] Bonneau, C, Aroles, J, Estagnasié, C. (2023). Romanticisation and monetisation of the digital nomad lifestyle: the role played by online narratives in shaping professional identity work. *Organization*. 2023; 30(1):65-88. <https://doi.org/10.1177/13505084221131638>
- [7] Calzada, I. Blockchain-driven digital nomadism in the basque e-diaspora. *Globalizations*. 2023;1-26. <https://doi.org/10.1080/14747731.2023.2271216>
- [8] Castles, S, Miller, MJ, Ammendola, G. (2005). *The age of migration: International population movements in the modern world*: New York. The Guilford Press. *American Foreign Policy Interests*. 2005; 27(6):537-542. <https://doi.org/10.1080/10803920500434037>
- [9] Cingiz, MÖ, Çeliktaş, E. Keyword-based sentiment analysis of Covid-19 related tweets. *Journal of Innovative Science and Engineering*. 2021; 5(2):173-182. <https://doi.org/10.38088/jise.935963>
- [10] Demirbilek, M, Özulukale Demirbilek, S. Sentiment analysis based on Google comments with machine learning methods and Amazon Comprehend: The case of a University in Central Anatolia. *Journal of University Research*. 2023; 6(4):452-461. <https://doi.org/10.32329/uad.1383794>
- [11] Düzgün, E, Akın, A. A new tourist typology proposal: Digital nomad. *Ahi Evran University Social Sciences Institute Journal*. 2022; 8(2):596-612. <https://doi.org/10.31592/aeusbed.1095735>
- [12] Government of Montenegro. (2021). *Programme for attracting digital nomads in montenegro adopted*. <https://www.gov.me/en/article/programme-for-attracting-digital-nomads-in-montenegro-adopted> (accessed 28 September 2024)
- [13] Göçgün, ÖF, Onan, A. Sentiment analysis with deep learning/machine learning techniques on Amazon products review. *European Journal of Science and Technology*. 2021; (24):445-448. <https://doi.org/10.31590/ejosat.902674>
- [14] İli, B, Büyükbaykal, GN. A bibliometric analysis of digital nomad researches. *Nevşehir Hacı Bektaş Veli University Journal of ISS*. 2022; 12(Digitalism):306-319. <https://doi.org/10.30783/nevsosbilen.1121236>
- [15] İli, B, Büyükbaykal, GN. Digital nomadism in the new media age: A study on 21st century travelers. *Akdeniz University Faculty of Communication Journal*. 2023; (41):70-93. <https://doi.org/10.31123/akil.1300885>
- [16] Kabak, T, Kırbaş, İ. ChatGPT with risks and opportunities. *Mehmet Akif Ersoy University Journal of Institute of Science*. 2023; 14(2):365-376. <https://doi.org/10.29048/makufebed.1271477>
- [17] Keen, I. *Aboriginal Economy and Society: Australia at the threshold of Colonisation (1st ed.)*. Oxford University Press. 2004
- [18] Kocaman, S. Digital nomad research in tourism: A systematic literature review. *Tourism Academic Journal*. 2022; 9(2): 447-462.
- [19] MBO Partners. *Happier, healthier & wealthier state of independence in America*. 2022; <https://www.congress.gov/118/meeting/house/115679/documents/HHRG-118-ED10-20230419-SD019.pdf> (accessed 28 September 2024)
- [20] Makimoto, T, Manners, D. *Digital Nomad*. Wiley. 1997; ISBN: 978-0-471-97499-4,
- [21] Massey, DS, Arango, J, Hugo, G, Kouaouci, A, Pellegrino, A. *Worlds in motion: Understanding international migration at the end of the Millennium*. Clarendon Press. 1998
- [22] Matsushita, K. How the Japanese workcation embraces digital nomadic work style employees. *World Leisure Journal*. 2022; 65(2):218-235. <https://doi.org/10.1080/16078055.2022.2156594>
- [23] Michaud, P, Beauregard, E, Proulx, J. Criminal nomadism: a neglected dimension of spatial mobility in sex offending, *Journal of Criminal Justice*. 2022; Volume 81:101928, ISSN 0047-2352, <https://doi.org/10.1016/j.jcrimjus.2022.101928>
- [24] Müller, A. The digital nomad: Buzzword or research category? *Transnational Social Review*. 2016; 6(3):344-348. <https://doi.org/10.1080/21931674.2016.1229930>
- [25] Nayir, F, Sarı, T, Sarıdaş, G. Exploring the nature of mixed methods research questions. *Pamukkale University Social Sciences Institute Journal*. 2024; (60):361-372. <https://doi.org/10.30794/pausbed.1384311>
- [26] Nash, C, Jarrahi, HM, Sutherland, W, Phillips, G. Digital nomads beyond the buzzword: Defining digital nomadic work and use of digital technologies. In G. Chowdury, J.

- McLeod, V. Gillet, & P. Willett (Eds.). International Conference on Information. Springer. 2018; 207-217.
- [27] Özyürek, H, Babacoglu, S, Polat, M, Turen, U. Mapping the Field of Digital Nomadism: A Bibliometric Analysis Using VOSviewer and R. The Eurasia Proceedings of Science Technology Engineering and Mathematics. 2024; 27:263-280. <https://doi.org/10.55549/epstem.1518797>
- [28] Reichenberger, I. Digital nomads – a quest for holistic freedom in work and leisure. *Annals of Leisure Research*. 2017; 21(3):364–380. <https://doi.org/10.1080/11745398.2017.1358098>
- [29] Statista. Share of digital nomads worldwide as of March 2024 by nationality. 2024; <https://www.statista.com/statistics/1298849/digital-nomads-by-nationality-worldwide/>, (accessed 30 August 2024)
- [30] Taşdelen, H. A qualitative study on Türkiye's image perception from the perspective of digital nomads. *Selçuk Communication*. 2023; 16(2):293-322. <https://doi.org/10.18094/josc.1286057>
- [31] Thompson, BY. The digital nomad lifestyle: (remote) work/leisure balance, privilege, and constructed community. *Int J Sociol Leis* 2. 2019;27–42. <https://doi.org/10.1007/s41978-018-00030-y>
- [32] Yılmaz, O, Güzel Gürbüz, P. A research on digital nomadism and recreation. *National Journal of Sports Sciences*. 2023; 7(2):82-93. <https://doi.org/10.30769/usbd.1377057>
- [33] Zhou, L, Buhalis, D, Fan, DX, Ladkin, A, Lian, X. Attracting digital nomads: Smart destination strategies, innovation and competitiveness. *Journal of Destination Marketing & Management*. 2024; Volume 31(4):100850, ISSN:2212-571X, <https://doi.org/10.1016/j.jdmm.2023.100850>.
- [34] Ayan, B, Kuyumcu, B, Ceylan, B. Detection of islamophobic tweets on Twitter using sentiment analysis. *Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology*. 2019; 7(2):495-502. <https://doi.org/10.29109/gujsc.561806>
- [35] Li, M, Sun, J, Tan, X. Evaluating the effectiveness of large language models in abstract screening: a comparative analysis. *Systematic Reviews*. 2024; 219(13). <https://doi.org/10.1186/s13643-024-02609-x>
- [36] Google Trends Search Tool. Google Trends Search Result Page. 2024; <https://trends.google.com/trends/explore?date=today%205-y&q=digital%20nomad&hl=en>, (accessed 07 December 2024)

Experimental Investigations of Sigma Vectors in Nodal Aberration Theory for Coma-Free Pivot Misalignment State of a Cassegrain Telescope

Meltem YEŞİLTEPE¹, Sefer Bora LİŞESİVDİN^{2*}

¹Gazi University, Graduate School of Natural and Applied Science, Department of Advanced Technologies, 06560, Ankara, Türkiye

²Gazi University, Faculty of Science, Department of Physics, 06560, Ankara, Türkiye

Article Info

Research article
Received: 18/11/2024
Revision: 02/12/2024
Accepted: 03/12/2024

Keywords

Nodal aberration theory
Coma-free pivot point
(CFPP)
Cassegrain telescope Sigma
vectors
Optical alignment

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 18/11/2024
Düzeltilme: 02/12/2024
Kabul: 03/12/2024

Anahtar Kelimeler

Nodal aberasyon teorisi
Koma-serbest dönme
noktası (KSDN)
Cassegrain teleskop
Sigma vektörleri
Optik hizalama

Graphical/Tabular Abstract (Grafik Özet)

The study investigates the sigma vectors in Nodal Aberration Theory (NAT) for a Cassegrain telescope under CFPP misalignment. /Çalışma, CFPP hizalama kaçıklığı durumu altında bir Cassegrain teleskop için Nodal Aberasyon Teorisi'ndeki (NAT) sigma vektörlerini incelemektedir.

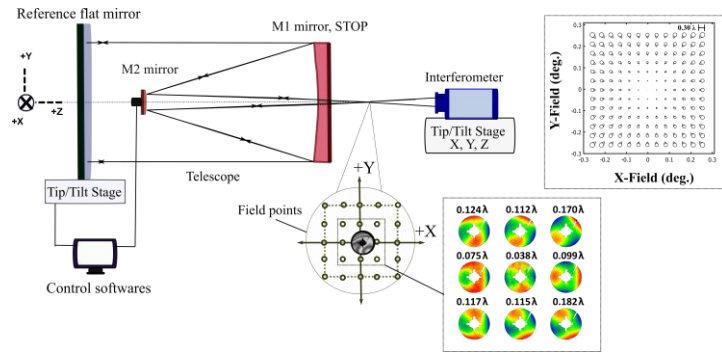


Figure A: Experimental investigations of sigma vectors on a Cassegrain telescope exhibiting CFPP misalignment/ **Şekil A:** CFPP hizalama kaçıklığı sergileyen bir Cassegrain teleskop üzerinde sigma vektörlerin deneysel olarak araştırılması

Highlights (Önemli noktalar)

- The study presents an aberration analysis of a Cassegrain telescope./ Çalışma, Cassegrain teleskop için bir aberasyon analizi sunmaktadır.
- The study presents the experimental calculation of the field aberration vectors and sigma vectors for a Cassegrain telescope under CFPP misalignment./ Çalışma, CFPP hizalama kaçıklığı altındaki bir Cassegrain teleskop için alan aberasyon vektörlerinin ve sigma vektörlerinin deneysel hesaplamalarını sunmaktadır.
- The study presents the calculation of the misalignments of the telescope's secondary mirror and the corresponding Full Field Displays./ Çalışma, teleskobun ikinci aynasındaki hizalama kaçıklıklarını ve bu kaçıklıklar için tam alan görüntülerini hesaplamaktadır..

Aim (Amaç): This study analyzes the aberration state of a Cassegrain telescope under CFPP misalignment and experimentally calculates the sigma vectors./ Bu çalışma, CFPP hizalama kaçıklığında Cassegrain teleskobunun aberasyon durumunu analiz eder ve sigma vektörlerini deneysel olarak hesaplar.

Originality (Özgünlük): The originality of this study lies in its approach to experimentally calculating the sigma vectors for a Cassegrain telescope under CFPP misalignment./ Bu çalışmanın özgünlüğü, CFPP hizalama kaçıklığı altında Cassegrain teleskobu için sigma vektörlerini deneysel olarak hesaplama yaklaşımında yatmaktadır.

Results (Bulgular): It was observed that the experimentally calculated sigma vectors were formed to bring the unnormalized coma vector close to zero, and the calculated misalignments correspond to a CFPP misalignment condition./ Deneysel olarak hesaplanan sigma vektörlerinin, normalleştirilmemiş koma vektörünü sifira yaklaştırdığı ve hesaplanan hizalama kaçıklıklarının CFPP hizalama kaçıklığı koşuluyla uyduğu gözlemlendi.

Conclusion (Sonuç): The CFPP misalignment was successfully established for the Cassegrain telescope, and an aberration analysis was conducted for this specific condition./ Cassegrain teleskobu için CFPP hizalama kaçıklığı başarıyla oluşturulmuş ve bu özel durum için aberasyon analizi gerçekleştirilmiştir.



Experimental Investigations of Sigma Vectors in Nodal Aberration Theory for Coma-Free Pivot Misalignment State of a Cassegrain Telescope

Meltem YEŞİLTEPE¹, Sefer Bora LİŞESİVDİN^{2*}

¹Gazi University, Department of Advanced Technologies, 06560, Ankara, Türkiye

²Gazi University, Department of Physics, 06560, Ankara, Türkiye

Article Info

Research article
Received: 18/11/2024
Revision: 02/12/2024
Accepted: 03/12/2024

Keywords

Nodal aberration theory
Coma-free pivot point
(CFPP)
Cassegrain telescope
Sigma vectors
Optical alignment

Abstract

The study aims to experimentally investigate the sigma vectors in Nodal Aberration Theory for a customized non-aplanatic high-precision Cassegrain telescope, which corrects third-order spherical aberration but not for third-order coma aberration, under coma-free pivot point (CFPP) misalignment conditions. Rotating the telescope's secondary mirror at the CFPP introduces a specific misalignment condition, resulting in unchanged coma aberration across the field of view (FOV). Evaluating CFPP misalignment is essential for optical alignment processes. Investigating the field aberration vectors for the telescope's CFPP misalignment state provides valuable insights into the behavior of field-dependent aberrations and enhances the understanding of CFPP misalignment conditions.

Cassegrain teleskobunun koma-serbest dönme noktası hizalama kaçıklığı durumu için Nodal Aberasyon Teorisi'ndeki sigma vektörlerin deneysel incelenmesi

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 18/11/2024
Düzeltilme: 02/12/2024
Kabul: 03/12/2024

Anahtar Kelimeler

Nodal aberasyon teorisi
Koma-serbest dönme noktası (CFPP)
Cassegrain teleskop
Sigma vektörleri
Optik hizalama

Öz

Bu çalışma, üçüncü derece küresel aberasyonu düzeltebilen ancak üçüncü mertebeye koma sapmasını düzeltemeyen, özel olarak tasarlanmış ve yüksek hassasiyetli bir Cassegrain teleskop için Nodal Aberasyon Teorisi'ndeki sigma vektörlerini deneysel olarak incelemeyi amaçlamaktadır. Teleskobun ikincil aynasının koma-serbest dönme noktası (CFPP) üzerinde döndürülmesi, görüş alanı (FOV) boyunca değişmeyen koma aberasyonuna neden olan belirli bir hizalama kaçıklığı durumunu ortaya çıkarır. KSDN hizalama kaçıklıklarını değerlendirmek, optik hizalama süreçleri açısından kritik öneme sahiptir. Teleskobun KSDN hizalama kaçıklığı durumunda alan aberasyon vektörlerinin incelenmesi, alan bağımlı sapmaların davranışına dair önemli bilgiler sağlar ve KSDN hizalama hatası koşullarının daha iyi anlaşılmasını sağlar.

1. INTRODUCTION (GİRİŞ)

Nodal Aberration Theory (NAT) specifies the aberrational behavior of optical systems with misaligned optical components. The theory was initially developed by R. V. Shack, building on the findings of R. A. Buchroeder, who presented the concept of the shifted aberration field centers on the image plane for misaligned optical systems, and H.

H. Hopkins, who established conventional aberration theory for rotationally symmetric optical systems [1-3]. K. Thompson further developed the mathematical foundation of NAT, extending it to fifth-order aberrations [4-7]. Thompson also proposed a real-ray-based calculation method for sigma vector contributions, offering an alternative to Buchroeder's approach [8]. T. Schmidt investigated the effect of primary mirror figure

error, which also causes two astigmatism nodes that are symmetrical respecting the center of the image plane in the aligned state [9]. NAT was later expanded by K. Fuerschbach *et al.* to define the aberration characteristics of freeform optical systems, demonstrating the powerful impact of NAT. Due to these contributions, NAT is now a comprehensive theory used for optical design, tolerancing, and alignment processes [10]. However, experimental investigations of NAT are still ongoing [11-13]. In our previous work, sigma vector contributions were calculated using experimental data, and the sigma vectors calculated by the real-ray-based method in design were compared [14]. This study investigates CFPP misalignment, a special case that complicates the optical alignment process in a customized Cassegrain telescope. As is well known, a non-zero on-axis coma measurement for any telescope is an obvious indication of misalignment in optical components [9]. However, an alignment strategy focused solely on removing coma terms from the center of the image plane may not ensure proper telescope alignment. The CFPP can be defined as the point on the primary mirror axis where rotating the secondary mirror does not introduce coma aberration. The location of the CFPP point depends on the structural parameters of the telescope and leads to a specific misalignment condition.

This study presents experimental results for an intentionally misaligned Cassegrain telescope and experimentally calculated sigma vector contributions for the same telescope in a CFPP misalignment state. Section 2 summarizes the theoretical background of Nodal Aberration Theory (NAT) for third-order astigmatism and coma aberrations. Section 3 provides optical specifications and an aberration analysis for the Cassegrain telescope. In Section 4, interferometric measurement results for the misaligned telescope are presented, followed by an analysis of the field aberration vectors and the sigma vectors arising from these misalignments. This study demonstrates an application of NAT that can be used for aligning high-precision, misaligned two-mirror telescope systems.

2. THEORETICAL BACKGROUND (TEORİK ALTYAPI)

As H. H. Hopkins stated, in an optical system with rotational symmetric optical elements, the total third-order aberration amount in the image plane is the sum of the contributions from the surface aberrations. These surface aberrations are rotationally symmetric about the optical axis which

serves as the center of the image plane in properly aligned optical system [1,4]. However, when the optical elements are misaligned in a nominally rotationally symmetric system, the center of symmetry for the aberrations of the misaligned surfaces shifts by a certain amount in the image plane, referred to as the sigma vector, and denoted by σ_j for surface j . Even in this case, the total amount of third-order aberrations in the image plane remains unchanged. However, incorporating the induced sigma vector for the misaligned components to the nominal field vector of the system alters the field behavior of the third-order aberrations that have field dependence. This change introduces a nodal property (where aberration goes to zero) in the image plane, particularly for third-order astigmatism (W_{222}) and coma (W_{131}) aberrations [4]. This change in the field dependency for misaligned surfaces is given below.

$$\mathbf{H}_{Aj} = \mathbf{H} - \sigma_j \tag{1}$$

In Eq. (1), \mathbf{H}_{Aj} is the effective field vector, \mathbf{H} is the field vector for a nominal optical system, and σ_j is the sigma vector for the misaligned surface j . In this study, vector quantities are represented in bold. A graphical representation of these vectors is illustrated in Figure 1.

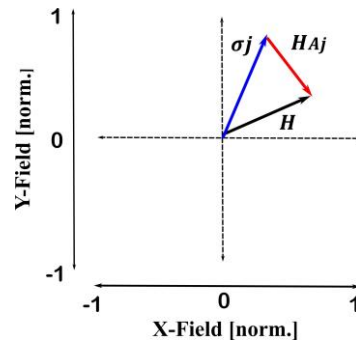


Figure 1. Representation of effective field vector \mathbf{H}_{Aj} , field vector \mathbf{H} , and sigma vector σ_j (Etkin alan vektörünün \mathbf{H}_{Aj} , alan vektörünün \mathbf{H} , ve sigma vektörün σ_j gösterimi)

Note that, the sigma vector for an aspherical surface consists of two components: the spherical and the aspherical. The spherical contribution, denoted by σ_j^{sph} for surface j , arises due to the spherical base curve and indicates the new symmetry center of the spherical aberration contributions of surface j . The aspherical contribution, denoted by σ_j^{asph} for surface j , originates from deviations from a spherical base curve and signifies the aberration symmetry center of the aspherical surface aberration contributions of the subjected surface [4,

8]. In the following sections, the notations "sph" and "asph" will be employed to distinguish between the spherical and aspherical contributions. It is important to calculate these two vector contributions independently.

Third-order coma aberration expression for a misaligned telescope can be expressed as

$$W = [(W_{131}H - A_{131}) \cdot \rho] \cdot \rho^2 \quad (2)$$

where W_{131} is the system-level third-order coma aberration obtained by summing the coma contributions from the individual optical components and ρ is the normalized aperture vector. A_{131} is an unnormalized displacement vector resulting from the aggregation of the sigma vectors of the individual surfaces weighted by their corresponding surface aberration contributions for coma. A_{131} is expressed as

$$A_{131} = \sum (W_{131,j}^{sph} \sigma_j^{sph} + W_{131,j}^{asph} \sigma_j^{asph}) \quad (3)$$

In Eq. (3), $W_{131,j}^{sph}$ and $W_{131,j}^{asph}$ represent spherical and aspherical contributions of third-order coma for surface j , respectively. To compute the coma node location, the expression given in the square bracket in Eq. (2) is set to zero, and the equation is solved for H . The coma node location (a_{131}) is given as

$$a_{131} = \frac{A_{131}}{W_{131}} \quad (4)$$

As indicated in Eq. (4), misalignments of the optical components cause the coma node to shift to a different point in the image plane, resulting in non-zero measurements of third-order coma-related Fringe Zernike Coefficients (FZC) at the center of the image plane. However, there is an exception for the CFPP misalignment which is a state where the axial misalignment of M2 is compensated by tilt. Even if the third-order coma-related terms are absent at the center of the image plane, the optical system may still be misaligned (Figure 2(a)).

For a two-mirror telescope, if the primary mirror (M1) is used as an aperture stop and the secondary mirror (M2) is misaligned, $A_{131} = 0$ condition is satisfied for $\sigma_{M2}^{sph} \neq 0$ and $\sigma_{M2}^{asph} \neq 0$. The equation is provided below [16].

$$\begin{aligned} A_{131} &= \\ (W_{131,M2}^{sph} \sigma_{M2}^{sph} + W_{131,M2}^{asph} \sigma_{M2}^{asph}) &= 0 \end{aligned} \quad (5)$$

Utilizing the Eq. (5), the following expression can be derived.

$$\frac{\sigma_{M2,(x,y)}^{sph}}{\sigma_{M2,(x,y)}^{asph}} = - \frac{W_{131,M2}^{asph}}{W_{131,M2}^{sph}} \quad (6)$$

The expression given above can be achieved by infinite combination of σ_{M2}^{sph} ve σ_{M2}^{asph} . An example illustrating the third-order coma and astigmatism aberrations for the CFPP state of a non-aplanatic Cassegrain telescope is provided in Figure 2. To align such a telescope system, both third-order coma and astigmatism aberrations in the image plane must be considered.

The location of the CFPP depends on the structural parameters of the telescope and is shown in Figure 2(c) [16]. In Figure 2(c), $L_{M2}^{(CFPP)}$ is a general representation of the location of the CFPP for a two mirror telescope. $L_{M2}^{(CFPP)}$ is measured from the nominal vertex of the M2. Specifically, for a Cassegrain telescope where the primary mirror serves as the aperture stop, $L_{M2}^{(CFPP)}$ and the prime focus coincide with each other.

Third-order astigmatism aberration expression for a misaligned telescope can be expressed as [4]

$$W = \frac{1}{2} [W_{222}H^2 - 2HA_{222} + B_{222}^2] \cdot \rho^2 \quad (7)$$

where the W_{222} is the overall third-order astigmatism aberration is obtained by summing the astigmatism contributions of the individual optical components. A_{222} is the unnormalized vector resulting from the aggregation of the sigma vectors of the individual surfaces weighted by their respective surface aberration contributions for astigmatism. A_{222} can be expressed as

$$A_{222} = \sum_j (W_{222,j}^{sph} \sigma_j^{sph} + W_{222,j}^{asph} \sigma_j^{asph}) \quad (8)$$

B_{222}^2 is un-normalized squared vector resulting from the aggregation of squares of sigma vectors weighted by corresponding surface aberration contributions for astigmatism, respectively. B_{222}^2 can be written as

$$B_{222}^2 = \sum_j (W_{222,j}^{sph} \sigma_j^{sph^2} + W_{222,j}^{asph} \sigma_j^{asph^2}) \quad (9)$$

If the overall third-order astigmatism is not zero, two astigmatism nodes arise when the optical system is misaligned. To determine the astigmatism node locations, the expression given in the square bracket is set to zero, and the resulting quadratic equation is solved for H . The node locations are then computed as

$$H = \frac{A_{222} \pm i\sqrt{W_{222}B_{222}^2 - A_{222}^2}}{W_{222}} \quad (10)$$

By normalizing A_{222} and B_{222}^2 vectors by overall astigmatism, the a_{222} and b_{222}^2 vector pair are yielded as

$$a_{222} \equiv \frac{A_{222}}{W_{222}} \quad (11)$$

$$b_{222}^2 \equiv \frac{B_{222}^2}{W_{222}} - a_{222}^2 \quad (12)$$

where a_{222} and b_{222}^2 are normalized vectors in the image plane. The node positions rewritten with normalized vectors is as

$$H = a_{222} \pm ib_{222}^2 \quad (13)$$

To calculate astigmatism node locations analytically, we square both sides of the equation as described below.

$$0 = (H - a_{222})^2 + b_{222}^2 \quad (14)$$

The studies provide an extensive detailed calculation of the astigmatism node locations and nodal aberration [4, 16].

The expressions of the sigma vector contributions in terms of the structural parameters of the telescope with secondary mirror misalignments (M1 is aperture stop) are also given below [16].

$$\sigma_{M2,x}^{sph} = -\frac{XDE_{M2} - BDE_{M2}r_{M2}}{\bar{u}_{M1}(d_1 + r_{M2})} \quad (15)$$

$$\sigma_{M2,y}^{sph} = -\frac{YDE_{M2} + ADE_{M2}r_{M2}}{\bar{u}_{M1}(d_1 + r_{M2})} \quad (16)$$

$$\sigma_{M2,x}^{asph} = -\frac{XDE_{M2}}{d_1\bar{u}_{M1}} \quad (17)$$

$$\sigma_{M2,y}^{asph} = -\frac{YDE_{M2}}{d_1\bar{u}_{M1}} \quad (18)$$

where d_1 , r_{M2} and \bar{u}_{M1} are the distance between M1 and M2 mirrors, the radius of curvature of M2 and the chief ray incidence angle on M1, respectively. Furthermore, XDE_{M2} and YDE_{M2} are defined as the X and Y decenter amounts along the M2 mirror, respectively. Similarly, ADE_{M2} and BDE_{M2} are defined as the X and Y tilt amounts about the X and Y-axis, respectively.

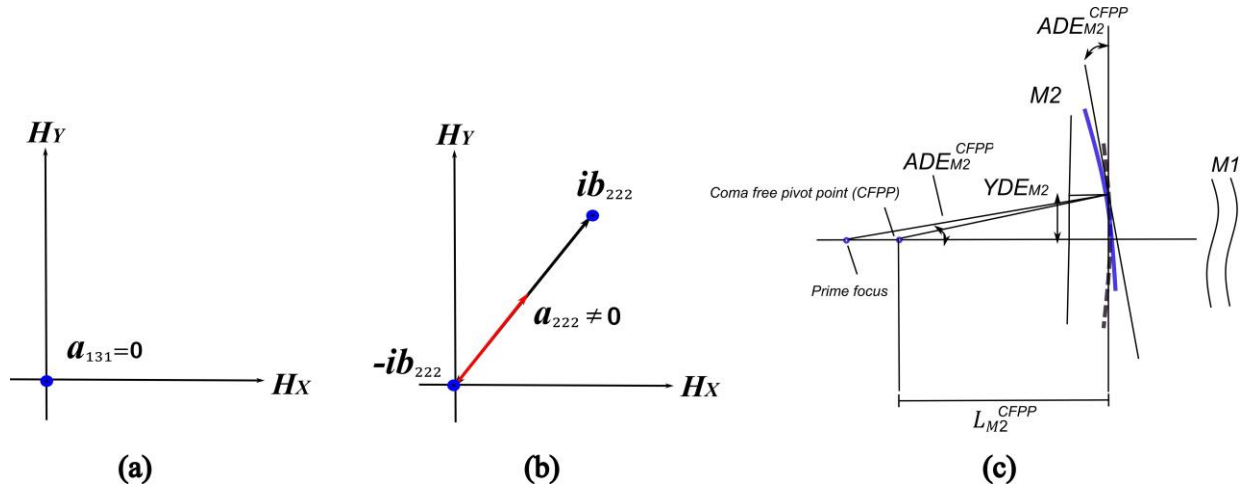


Figure 2. a) Third-order coma node location, b) astigmatism node locations (for CFPP misalignment), c) CFPP location of the M2 (a)Üçüncü derece koma b) astigmatizm nod lokasyonları, c) M2 için KSDN noktasının lokasyonu)

2. CASSEGRAIN TELESCOPE DESIGN (CASSEGRAIN TELESKOP TASARIMI)

The high-precision two-mirror telescope was designed in the Cassegrain configuration, featuring

a concave parabolic primary mirror and a convex hyperbolic secondary mirror that eliminates the third-order spherical aberration [17]. The radii of curvature for the primary and secondary mirrors are -1700 mm and -300 mm, respectively. Additionally,

the conic constant of the secondary mirror is -1.737. The signs of these structural parameters are determined by the sign convention used for the mirrors. The technical specifications (Table 1) and schematic design layout of the Cassegrain telescope are provided in Figure 3.

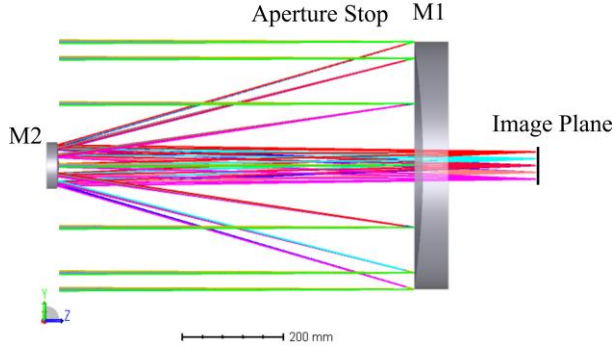


Figure 3. Optical design layout of the Cassegrain telescope (Cassegrain teleskop optik tasarımı çizimi)

Table 1. Technical Specifications for the F/12.7 Cassegrain telescope (F/12.7 Cassegrain teleskop için teknik spesifikasyonlar)

Parameter	Unit	Value
Entrance Pupil Diameter (EPD)	mm	490
Wavelength (λ)	nm	633
Effective Focal Length (EFFL)	mm	6200
Linear Obscuration (γ)	%	20
Overall Length (L)	mm	944

Paraxial ray-tracing data obtained from the optic design software, in Table 2, was utilized to calculate the third-order spherical aberration, coma, and astigmatism aberration surface contributions. In Table 2, y and \bar{y} are marginal and chief ray heights at surface, respectively. Similarly, u and \bar{u} are marginal and chief ray angles at surfaces, respectively. EP refers to the entrance pupil. Calculation results for the aberration coefficients are provided in Table 3. Graphical representations for the surface aberration contributions are also given in Figure 4. In Table 3, $W_{040,M1/M2}^{sph}$ and

$W_{040,M1/M2}^{asph}$ are spherical and aspherical spherical aberration contributions, respectively.

As shown clearly in Figure 4(a), the third-order spherical aberration is corrected by design. Due to its parabolic shape, the primary mirror can eliminate third-order spherical aberration by integrating its spherical and aspherical spherical aberration contributions. The secondary mirror can also correct the third-order spherical aberration introduced by its shape. The residual third-order spherical aberration in the image plane results from limitations in manufacturing precision. In Figure 4(b) and Figure 4(c), since the Cassegrain telescope cannot correct third-order coma and astigmatism aberrations, residual coma ($W_{131} \neq 0$) and astigmatism ($W_{222} \neq 0$) are visible in the focal plane. The Cassegrain telescope inherently has the third-order coma, which has a linear field dependency, and astigmatism, which has quadratic field dependency, aberrations at the system level, which are distributed along the FOV according to their respective field dependencies. The Full Field Displays (FFDs) for the Cassegrain telescope in design are illustrated in Figure 5. In Figure 5(a), the magnitude of the third-order coma-related FZCs (Z_7 and Z_8) are given and in Figure 5(b), the magnitude of the third-order astigmatism-related FZCs (Z_5 and Z_6) are presented. The equations for calculation of the $Z_{7/8}$ and $Z_{5/6}$ are provided below.

$$Z_{7/8} = \sqrt{Z_7^2 + Z_8^2} \quad (19)$$

$$Z_{5/6} = \sqrt{Z_5^2 + Z_6^2} \quad (20)$$

As stated in the previous section, to create a misalignment condition resulting in the CFPP concept, the A_{131} vector needs to be zero for $\sigma_{M2}^{sph} \neq 0$ and $\sigma_{M2}^{asph} \neq 0$. The ratio given in Eq. (6) is 0.931 for the Cassegrain telescope configuration as shown in Eq. (21).

$$\frac{\sigma_{M2,(x,y)}^{sph}}{\sigma_{M2,(x,y)}^{asph}} = -\frac{W_{131,M2}^{asph}}{W_{131,M2}^{sph}} = 0.931 \quad (21)$$

Table 2. Paraxial Ray-Tracing Data from OpticStudio optical design software (Optik tasarım programından elde edilen paraksiyal ışın izleme verileri)

Surface#	y (mm)	u (deg.)	\bar{y} (mm)	\bar{u} (deg.)	Description
OBJ	0	0	Infinity	0.00436	OBJ.
1	245.00000	0	-3.70885	0.00436	EP
STOP	245.00000	0.28824	0	-0.00436	M1 Mirror/STOP
3	37.30436	-0.03952	3.14412	0.02533	M2 Mirror

IMG	0.00635	-0.03952	27.04925	0.02533	IMG.
-----	---------	----------	----------	---------	------

Table 3. Third-order spherical aberration, coma and astigmatism surface aberration contributions ($\lambda = 632.8 \text{ nm}$) (Üçüncü derece küresel aberasyon, koma ve astigmatizm yüzey aberasyon katkıları)

Surface #	$W_{040}^{sph}(\lambda)$	$W_{040}^{asph}(\lambda)$	$W_{131}^{sph}(\lambda)$	$W_{131}^{asph}(\lambda)$	$W_{222}^{sph}(\lambda)$	$W_{222}^{asph}(\lambda)$
M1	289.731	-289.731	-35.088	0	1.062	0
M2	-49.220	49.236	17.835	16.599	-1.616	1.399
Total	240.510	-240.495	-17.253	16.599	-0.553	1.399
	0.0153		-0.6543		0.8458	

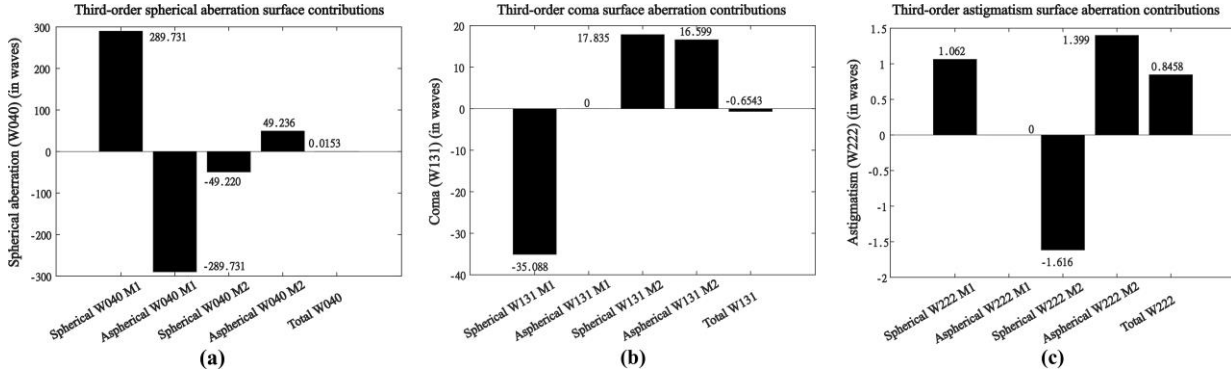


Figure 4. a) Third-order spherical aberration, b)coma, and c) astigmatism contributions (a) Üçüncü dereceden küresel aberasyon, b) koma ve c) astigmatizm katkıları)

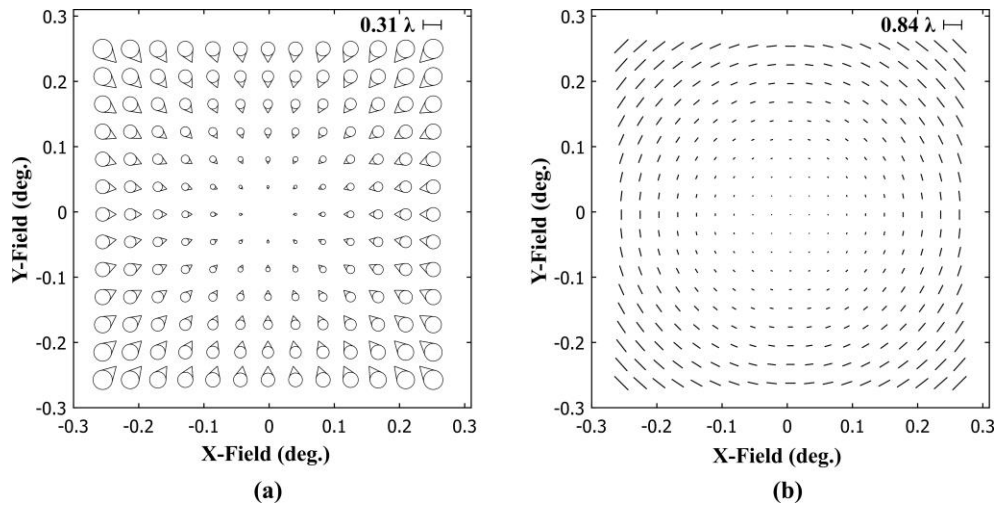


Figure 5. Full Field Displays for (a) Third-order coma, and (b) third-order astigmatism aberration (a) Üçüncü dereceden koma ve (b) üçüncü dereceden astigmatizma aberasyonları için Tüm Alan Gösterimleri)

3. EXPERIMENTAL INVESTIGATION (DENEYSSEL İNCELEME)

3.1. Experimental setup (Deney düzeneği)

The test configuration includes a Fizeau phase-shifting interferometer (with a transmission sphere) mounted on a five-axis stage, a telescope, piezo actuators that enable movement of the telescope's

secondary mirror, and a flat mirror with its control unit. In this configuration, the focal point of the interferometer's transmission element is aligned to coincide with the telescope's focal plane. 632.8 nm wavelength laser beam enters the telescope at the focal plane, reflects of the M2 and M1 mirror surfaces, and reaches the reference mirror. The beam then follows the reverse optical path back to

the interferometer, which analyzes the difference between the reference and reflected beams. By scanning the entire image plane, the aberration state of the telescope can be observed. In this study, nine field points arranged in a 3×3 matrix in the image plane were selected for calculating the sigma vector contributions to simplify the data-gathering process.

The X and Y field angle coordinates of the selected field points from the image plane (where the field point (0°, 0°) refers to the center of the image plane), used for the calculation, are provided in Table 4. The schematic diagram of the experimental setup is illustrated in Figure 6.

Table 4. Selected field points in the Cassegrain telescope image plane (Cassegrain teleskopun görüntü düzleminde seçilen alan noktaları)

-0.125°, 0.125°	0°, 0.125°	0.125°, 0.125°
(-0.125°, 0°)	(0°, 0°)	0.125°, 0°
-0.125°, -0.125°	0°, -0.125°	0.125°, -0.125°

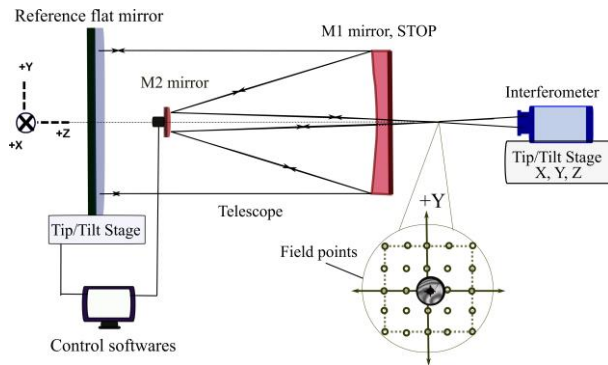


Figure 6. Experimental set-up for interferometric measurements (Interferometrik ölçümler için deney düzeneği)

3.2. Calculation of sigma vectors for CFPP misalignment (CFPP hizalama kaçıklığı durumu için sigma vektörlerinin hesaplanması)

The secondary mirror of the telescope was intentionally misaligned to create a misalignment condition where the distribution of third-order coma aberration terms remains uniform across the field of view similar to the aligned state, while the astigmatism aberration terms become asymmetrical, resulting in a binodal astigmatism in the image plane. Raw interferometric measurements were taken from the image plane, as illustrated in Figure 7.

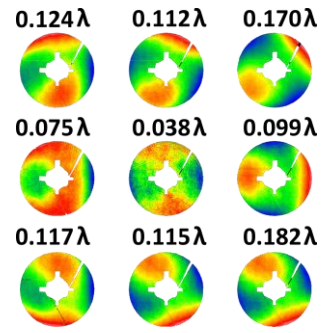


Figure 7. Interferometric RMS WFE measurements taken from the focal plane (3x3 field points) (Odak düzleminde alınan interferometrik RMS WFE ölçümleri (3x3 alan noktası))

The raw interferometric measurements include third-order spherical aberration, third-order coma and astigmatism-related FZCs and which can be isolated from the raw measurement data. The FZCs, Z₅(Astigmatism 0°/90°), Z₆ (Astigmatism ±45°), Z₇(X-Coma), Z₈ (Y-Coma), were isolated from the measured raw data. The interferograms for the magnitudes of the third-order astigmatism (Z_{5/6}) and coma (Z_{7/8}) related terms are illustrated Figure 8.

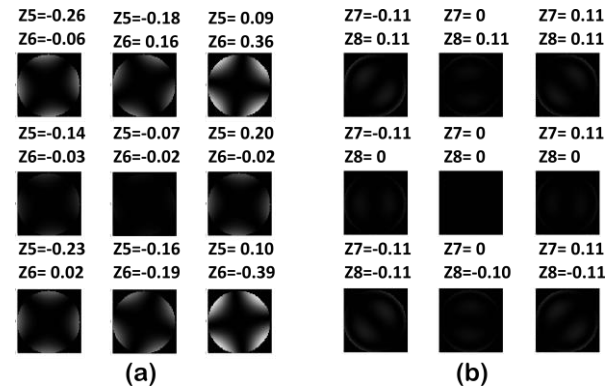


Figure 8. Magnitudes of a) astigmatism and, b) coma FZCs (a) astigmatizm ve b) koma FZC terimlerinin büyüklükleri)

As seen in Figure 8(a), the astigmatism aberration distribution along the full FOV appears to be non-rotationally symmetric which is clear sign of the misalignment. In this case, the third-order astigmatism shows unique binodal behavior as predicted by NAT. Note that in Figure 8(a), the primary mirror figure error was not removed from the data. Note that in Figure 8(a), the primary mirror figure error was not removed from the data. The effect of the primary mirror figure error was examined experimentally in our previous research paper [15]. In Figure 8(b), the coma aberration distribution along the FOV appears to be rotationally symmetric. This special misalignment

case can serve as an example case for a CFPP misalignment of a Cassegrain telescope. Each third-order coma-related FZC term obtained from the on-axis point was measured to be around 0.003λ , which is considered negligible and attributed to environmental instabilities in the experimental conditions, such as turbulence. By fitting the measured astigmatism and coma FZCs to the relevant polynomials, the locations of the field aberration vectors were experimentally calculated and are presented in Table 5.

Table 5. Calculated field aberration vectors (Hesaplanan alan aberasyon vektörleri)

Field aberration vectors	X-component	Y-component
a_{222}	-0.41286	-0.00893
a_{131}	0.00966	-0.01150

The sigma vector contributions of the telescope's secondary mirror are calculated as given in **Hata! Başvuru kaynağı bulunamadı..**

Table 6. Calculated sigma vectors (Hesaplanan sigma vektörler)

Sigma vectors of M2	X-component	Y-component
σ_{M2}^{sph}	0.11179	0.00263
σ_{M2}^{asph}	-0.12051	-0.00237

Table 7. Calculated misalignment amounts for the secondary mirror of Cassegrain telescope (Cassegrain teleskopun ikinci aynası için hesaplanan hizalama kaçıklıkları miktarları)

Misalignments	XDE_{M2} (mm)	YDE_{M2} (mm)	ADE_{M2} (deg.)	BDE_{M2} (deg.)
Value	-0.3788	-0.0074	0.0036	-0.1674

For the $A_{131} = 0$ condition, For the $A_{131} = 0$ condition, the ratio given in Eq. (21) was calculated using the sigma vector contributions shown in **Hata! Başvuru kaynağı bulunamadı..**

$$\frac{\sigma_{M2,x}^{sph}}{\sigma_{M2,x}^{asph}} = -\frac{0.11179}{(-0.12051)} = -0.928 \quad (22)$$

$$\frac{\sigma_{M2,y}^{sph}}{\sigma_{M2,y}^{asph}} = -\frac{0.00263}{(-0.00237)} = -1.110 \quad (23)$$

By combining the calculated σ_{M2}^{sph} vectors with the structural parameters of the telescope, misalignment amounts can be easily determined using Eq. (15), Eq. (16), Eq. (17), and Eq. (18), as given in Table 7.

The graphical representation of the sigma vectors is illustrated in Figure 9(a). Furthermore, calculated misalignments were simulated in the optical design software and the nodes induced by the misalignments are demonstrated in Figure 9(b) and Figure 9(c).

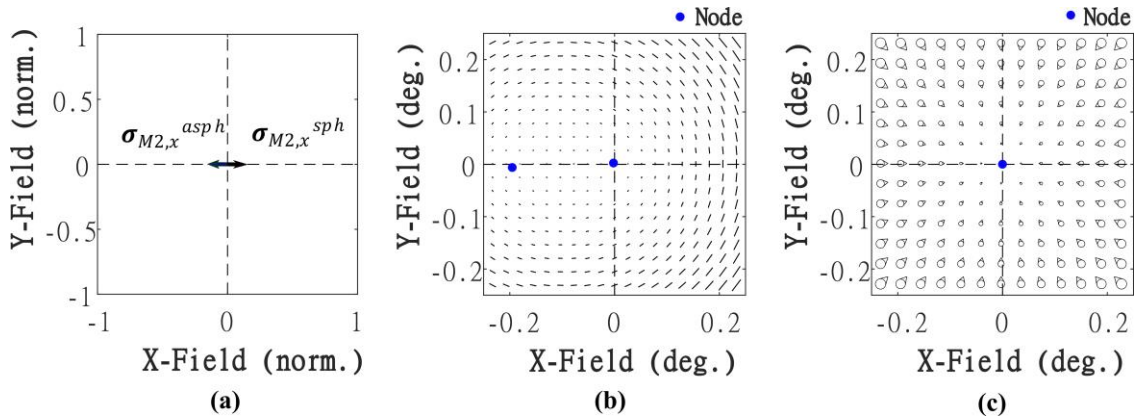


Figure 9. (a) Sigma vector components of M2, (b) graphical illustration of the astigmatism aberration free and (c) coma aberration free points (a) M2'nin sigma vektör bileşenleri, (b) astigmatizm ve (c) koma aberasyonlarının sıfır olduğu noktaların (nod) grafiksel gösterimi)

2. CONCLUSIONS (SONUÇLAR)

The calculation of field aberration vectors and sigma vectors for a Cassegrain telescope operating in a CFPP misalignment state has

been experimentally investigated in this study. A controlled misalignment state was obtained using compensatory misalignments to remove on-axis coma terms by purposefully rotating the

secondary mirror. The experimental results confirm that the CFPP configuration produces a specific aberration distribution, with the third-order coma node located at the on-axis point. This configuration allows the alignment process to be simplified, requiring only the determination of the astigmatism field aberration vector location. This work contributes to the field of telescope alignment and aberration management by demonstrating how the predictable coma-free behavior and binodal property of astigmatism can streamline the alignment process. This leads to more precise calculations of misalignments and a reduction in the number of alignment steps. It establishes the foundation for future studies of complex misalignment states in other optical systems by providing a valuable framework for investigating sigma vector behavior under CFPP settings. To improve their suitability for in sophisticated optical systems, future research may concentrate on improving existing techniques and investigating novel aberration contributions.

ACKNOWLEDGMENTS (TEŞEKKÜR)

The authors would like to thank Dr. Özgür Karcı and Mustafa Ekinci for their support and for the resources they made available. The authors would also like to thank Eray Arpa for his valuable assistance.

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)

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

Deneyleyi yapmış, sonuçlarını analiz etmiş ve maklenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

Sefer Bora LİŞESİVDİN: He analyzed the results and performed the writing process.

Sonuçlarını analiz etmiş ve maklenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

CONFLICT OF INTEREST (ÇIKAR ÇATIŞMASI)

There is no conflict of interest in this study.

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

REFERENCES (KAYNAKLAR)

- [1] Hopkins H. H., (1950), Wave Theory of Aberrations, Clarendon Press.
- [2] Buchroeder R. A., (1976), Tilted Component Optical Systems, Ph.D. Thesis, The University of Arizona, Tucson.
- [3] Shack R. V., and Thompson K., Influence of alignment errors of a telescope system on its aberration field, 251 (1980) 146-53.
- [4] Thompson K. P., Description of the third-order optical aberrations of near-circular pupil optical systems without symmetry, Journal of the Optical Society of America A, 22 (2005) 1389-401.
- [5] Thompson K. P., 'Multinodal fifth-order optical aberrations of optical systems without rotational symmetry: spherical aberration', Journal of the Optical Society of America A, 26, (2009) 1090-100.
- [6] Thompson K. P., 'Multinodal fifth-order optical aberrations of optical systems without rotational symmetry: the comatic aberrations', Journal of the Optical Society of America A, 27, (2010), 1490-504.
- [7] Thompson K. P., Multinodal fifth-order optical aberrations of optical systems without rotational symmetry: the astigmatic aberrations', Journal of the Optical Society of America A, 28 (2011) 821-36.
- [8] Thompson K. P., Schmid T., Cakmakci O., and Rolland J. P., Real-ray-based method for locating individual surface aberration field centers in imaging optical systems without rotational symmetry, Journal of the Optical Society of America A, 26 (2009) 1503-17.
- [9] Schmid, T., Rolland J. P., Rakich A., and Thompson K. P., Separation of the effects of astigmatic figure error from misalignments using Nodal Aberration Theory (NAT), Optics Express, 18 . (2010) 17433-47.
- [10] Fuerschbach, K., Rolland J. P., and Thompson K. P. Theory of aberration fields for general optical systems with freeform surfaces, Optics Express, 22 (2014) 26585-606.

- [11] Zhao N., Papa J. P., Fuerschbach K., Qiao Y., Thompson K. P., and Rolland J. P., Experimental investigation in nodal aberration theory (NAT) with a customized Ritchey-Chrétien system: third-order coma, *Optics Express*, 26 (2018) 8729-43.
- [12] Karcı Ö., Arpa E., Ekinçi M., and Rolland J. P., 2021. Experimental investigation of binodal astigmatism in nodal aberration theory (NAT) with a Cassegrain telescope system, *Optics Express*, 29 (2021) 19427-40.
- [13] Karcı Ö., A simulation and experimental validation of third-order coma in nodal aberration theory with a Cassegrain telescope', *Turkish Journal of Physics*, 45 (2021) 378-89.
- [14] Karcı Ö., Yeşiltepe M., Arpa E., Wu Y., Ekinçi M., and Rolland J. P., Experimental investigation in nodal aberration theory (NAT): separation of astigmatic figure error from misalignments in a Cassegrain telescope', *Optics Express*, 30, (2022) 11150-64.
- [15] Yeşiltepe M., Bauer A., Karcı Ö., and Rolland J. P., Sigma vector calculations in nodal aberration theory and experimental validation using a Cassegrain telescope, *Optics Express*, 31 (2023) 42373-87.
- [16] Schmid T., (2010). Misalignment induced nodal aberration fields and their use in the alignment of astronomical telescopes, Ph.D. Thesis, University of Central Florida, Orlando.
- [17] Karcı Ö., Ekinçi M., Design of a high-precision, 0.5 m aperture Cassegrain collimator, *Applied Optics*, 59 (2020) 8434-42.

Effect of Increasing Weight of SiC Ceramic on Radiation Shielding of Al 2219

Kubilay AKGÜL¹ , Berkay ÇAKIR¹ , Seda GÜRGEN AVŞAR¹ , Zübeyde ÖZKAN^{2*} , Uğur GÖKMEN¹ 

¹Gazi University, Department of Metallurgy and Materials Eng., Ankara, 06560, Türkiye

²Department of Advanced Technologies, Graduate School of Natural and Applied Sciences, Ankara, 06560, Türkiye

Article Info

Research article
Received: 12/11/2024
Revision: 18/12/2024
Accepted: 18/12/2024

Keywords

Al 2219
SiC
Phy-x/PSD
Radiation Shielding

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 12/11/2024
Düzeltilme: 18/12/2024
Kabul: 18/12/2024

Anahtar Kelimeler

Al 2219
SiC
Phy-x/PSD
Radyasyon Zırhlama

Graphical/Tabular Abstract (Grafik Özet)

In this study, the effect of SiC ceramics varying in weight on the radiation shielding properties of Al 2219 was investigated. / Bu çalışma ile ağırlıkça değişen SiC seramiklerin Al 2219'un radyasyon zırhlama özelliklerine etkisi incelenmiştir.

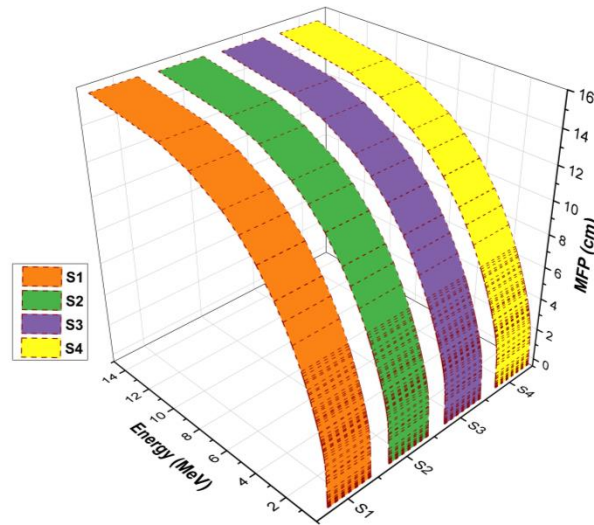


Figure A: MFP values of samples Şekil A: Örneklerin MFP değerleri

Highlights (Önemli noktalar)

- Effect of increasing SiC weight on gamma linear attenuation coefficient/ Ağırlıkça artan SiC'ün gama lineer zayıflatma katsayısına etkisi
- Effect of increasing SiC weight on gamma shielding material thickness/ Ağırlıkça artan SiC'ün gama zırhlama malzemesinin kalınlığına etkisi
- The effect of weight-varying SiC on the fast neutron cross section of alloy Al 2219/ Ağırlıkça değişen SiC'nin Al 2219 alaşımının hızlı nötron kesiti üzerindeki etkisi
-

Aim (Amaç): To increase the shielding properties of Al 2219 material. / Al 2219 malzemesinin zırhlama özelliklerini artırmak.

Originality (Özgünlük): There has been no previous attempt to improve the shielding properties of Al 2219 material with SiC ceramics. / Daha önce Al 2219 malzemesinin zırhlama özelliklerini SiC seramiği ile geliştirmeye çalışılmamıştır.

Results (Bulgular): With increasing weight of SiC ceramic, the possibility of Al 2219 to interact with fast neutrons increased. / Ağırlıkça artan SiC seramiği ile Al 2219'un hızlı nötronlar ile etkileşime girme olasılığı artmıştır.

Conclusion (Sonuç): Among the Al 2219, Al 2219 + 5% SiC, Al 2219 + 10% SiC and Al 2219 + 15% SiC samples, the material with the highest LAC value was the Al 2219 + 15% SiC composite, while the Al 2219 material had the lowest LAC values. / Al 2219, Al 2219 + %5 SiC, Al 2219 + %10 SiC ve Al 2219 + %15 SiC numuneleri arasında en yüksek LAC değerine sahip malzeme Al 2219 + %15 SiC kompozit olurken, Al 2219 malzemesi en düşük LAC değerlerine sahip malzeme olmuştur.



Effect of Increasing Weight of SiC Ceramic on Radiation Shielding of Al 2219

Kubilay AKGÜL¹ , Berkay ÇAKIR¹ , Seda GÜRGEN AVŞAR¹ , Zübeyde ÖZKAN^{2*} , Uğur GÖKMEN¹

¹Gazi University, Department of Metallurgy and Materials Eng., Ankara,06560, Türkiye

²Department of Advanced Technologies, Graduate School of Natural and Applied Sciences, Ankara, 06560, Türkiye

Article Info

Research article

Received: 12/11/2024

Revision: 18/12/2024

Accepted: 18/12/2024

Keywords

Al 2219

SiC

Phy-x/PSD

Radiation Shielding

Abstract

Artificial radiation has many disadvantages as well as benefits. In order to eliminate or minimize these disadvantages and to be an alternative to radiation shield materials used, Al 2219 alloy material, Al 2219+% 5 SiC, Al 2219+% 10 SiC and Al 2219+% 15 SiC metal matrix composite materials' mass attenuation coefficient (MAC), mean free path (MFP), linear attenuation coefficient (LAC), half value layer (HVL), fast neutron cross section (FNRCs) and tenth value layer (TVL) parameters were analyzed in Phy-x/PSD program. Powder grain structure of Al 2219 and SiC powders was analyzed by scanning electron microscopy (SEM) and powder grain size analysis was performed by Malvern Mastersizer 3000 device. After looking at fast neutron and gamma radiations, the materials' linear attenuation values against photons went up as the reinforcement ratio went up, while HVL, TVL, and MFP values went down. The FNRCs values of Al 2219 alloy material, Al 2219+5% SiC, Al 2219+10% SiC, Al 2219+15% SiC materials were calculated as 0.081 cm⁻¹, 0.083 cm⁻¹, 0.084 cm⁻¹ and 0.084 cm⁻¹ respectively.

SiC Seramiğin Artan Ağırlığının Al 2219'un Radyasyon Zırhlamasına Etkisi

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi

Başvuru: 12/11/2024

Düzeltilme: 18/12/2024

Kabul: 18/12/2024

Anahtar Kelimeler

Al 2219

SiC

Phy-x/PSD

Radyasyon Zırhlama

Öz

Yapay radyasyonun faydalarının yanı sıra birçok dezavantajı da bulunmaktadır. Bu dezavantajları ortadan kaldırmak veya en aza indirmek ve kullanılan radyasyon zırh malzemelerine alternatif olmak amacıyla Al 2219 alaşım malzemesi, Al 2219+% 5 SiC, Al 2219+% 10 SiC ve Al 2219+% 15 SiC metal matrisli kompozit malzemelerin kütle zayıflama katsayısı (MAC), ortalama serbest yol (MFP), doğrusal zayıflama katsayısı (LAC), yarı değer kalınlığı (HVL), hızlı nötron kesiti (FNRCs) ve onda bir değer kalınlığı (TVL) parametreleri Phy-x/PSD programında analiz edilmiştir. Al 2219 ve SiC tozlarının toz tane yapısı taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile incelenmiş ve toz tane boyutu analizi Malvern Mastersizer 3000 cihazı ile yapılmıştır. Hızlı nötron ve gama radyasyonlarına bakıldığında, takviye oranı arttıkça malzemelerin fotonlara karşı doğrusal zayıflama değerleri artarken, HVL, TVL ve MFP değerleri azalmıştır. Al 2219 alaşım malzemesi, Al 2219+5% SiC, Al 2219+10% SiC, Al 2219+15% SiC malzemelerinin FNRCs değerleri sırasıyla 0,081 cm⁻¹, 0,083 cm⁻¹, 0,084 cm⁻¹ ve 0,084 cm⁻¹ olarak hesaplandı.

1. INTRODUCTION (GİRİŞ)

Despite the ongoing global transformation toward sustainable and renewable energy sources, the importance and contribution of nuclear energy to energy production worldwide cannot be ignored or underestimated [1]. Nuclear power plants, with their high energy output capacity accounting for approximately 11% of global electricity production, their low CO₂ emissions, and their ability to bridge the energy gap in countries lacking renewable resources, have garnered significant attention [2]. Therefore, as a consequence of the advancement of nuclear energy utilization, the use of X-rays and

gamma rays as ionizing radiation is now prevalent in various fields, including nuclear reactors and nuclear medicine, radiological imaging, research centers, as well as industry. Thus, individuals are subjected to various forms of ionizing radiation, including gamma radiation. Due to the higher penetrating ability of gamma radiation compared to other particles, there is an increasing need to create appropriate shielding materials to prevent laborers and the population from harmful exposure. This potentially harmful radiation must be carefully contained so as not to harm human tissue and the environment [3-4]. As a result, reducing radiation exposure in the environment by shielding nuclear

power plants has become an urgent priority, and extensive research on radiation protection has been conducted for many years to address these risks. This is primarily due to the need to sustain sensitive equipment and human wellbeing.

Current developments in gamma radiation shielding focus on the creation of new materials and composites that can efficiently reduce radiation, and this suggests that the presence of high atomic number elements, such as heavy metal oxides, in different matrices can greatly improve shielding capabilities [2-5]. Scientists have observed that incorporating SiC as a reinforced particle with AMMCs enhances mechanical and machinability properties, finding that a higher reinforcement ratio boosts hardness, tensile strength, and density, but decreases impact toughness [6-7].

In the mechanical analysis of Al 2024 / B₄C / SiC composites produced by the powder metallurgy method, Hua et al. [8] found that SiC nanowires increased the temperature resistance of Al 2024 material by 92.2%. They also obtained significant increases in neutron absorption. Lian et al. [9] found that the neutron shielding performance of 5 mm thick SiC/ Gd₂O₃/ 6061 Al material (0 wt%-25 wt%) SiC/ 5 wt% Gd₂O₃/ 6061 Al reached over 99.5% in MCNP5 software. Al-mugren et al. [10] investigated the radiation shielding properties of the materials they produced by doping WC, SiC and MoC into HDPE polymers against X-rays. Uzun [11] performed radiation shield analyses using Phy-x software commonly used Zircaloy, TiC, FeCrAl, ZrC, and SiC coating materials.

In industry, 2xxx aluminum alloy materials are widely used as SiC ceramics due to their mechanical properties. Since there are not enough studies in the literature on the effect of SiC on the radiation transmittance of Al 2xxx materials, Al 2219 reinforced with SiC metal matrix composite was analyzed in order to evaluate the radiation attenuation properties by incorporating different SiC ceramic materials into the matrix at 0-5-10-15% by weight. The Phy-x/PSD program investigated the tenth value layer (TVL), tenth value layer (HVL), fast neutron cross section (FNRCs), mass attenuation coefficient (MAC), linear attenuation coefficient (LAC), and mean free path (MFP) parameters.

2. MATERIALS AND RADIATION PARAMETERS (MALZEMELER VE RADYASYON PARAMETRELERİ)

2.1. Materials (Malzemeler)

After analyzing the powder dimensional analysis and SEM images of Al 2219 and SiC powders, the radiation parameters were theoretically examined in the Phy-x/PSD program. Table 1 shows the chemical distribution of Al 2219 alloy material by weight. It is understood that the main element in Al 2219 is aluminum and the primary alloying element is copper. One of the important parameters in the production of composite materials is the size distribution of the powder grains of the materials used. Dv (50), Dv (90), and Dv (10) values give the size of the powders at 50, 90, 10% by volume of the analyzed powders. The Malvern Mastersizer 3000 device was used to do the analysis. The Dv (90), Dv (50), and Dv (10) values for the Al 2219 material were 156 µm, 89.4 µm, and 14.5 µm, respectively. For the SiC material, they were 32.7 µm, 11.0 µm, and 2.40 µm.

It is very important to determine the powder materials used at the beginning of the process, as the sinterability and pressability properties of the materials change in relation to the shape of the powder grains. In powder metallurgy, reducing the powder grain size generally improves the mechanical properties of composite materials, but excessively small grain sizes can lead to sintering and machinability problems. Therefore, it is very important to determine the powder sizes of the powders to be used during production before production.

The powder particle shape of SiC ceramic material shown in Figure 1 generally has sharp corners, while some powder particles are also spherical. The SEM image of SiC ceramic supports the powder particle size analysis and reveals the size differences of powder particles. The dimensional distribution of the powder grains of the Al 2219 alloy material is shown in Figure 2. The SEM image supports the dimensional distribution of the powder grains mentioned in Table 2. Al 2219 powder particles are generally seen to have a pear-shaped or teardrop shape, as well as being spherical. Information about the SiC ceramic material and Al 2219 alloy material varying by weight among the analyzed materials is given in Table 3.

Table 1. Chemical composition of the Al 2219 alloy [12] (Al 2219 alaşımının kimyasal bileşimi)

wt. %	Cu	Ti	Mn	V	Zr	Al
Al 2219	6.3	0.06	0.3	0.10	0.18	Balance

Table 2. Powder grain size of Al 2219 and SiC (Al 2219 ve SiC'nin toz tane boyutu)

	Dv (90)	Dv (50)	Dv (10)
Al 2219	156 μm	89.4 μm	14.5 μm
SiC	32.7 μm	11.0 μm	2.40 μm

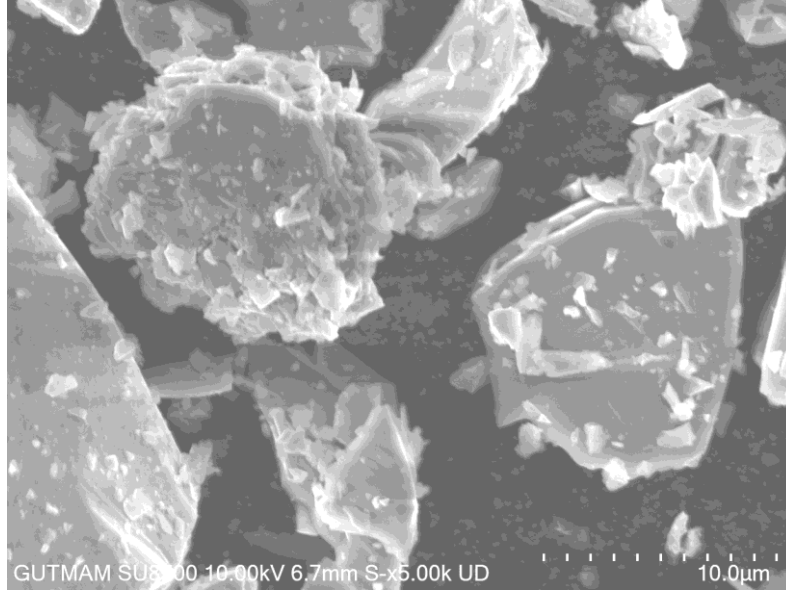


Figure 1. SEM image of SiC ceramic (SiC seramiđinin SEM görüntüsü)



Figure 2. SEM image of Al 2219 alloy (Al 2219 alaşımının SEM görüntüsü)

Table 3. Materials chemical composition (Malzemelerin kimyasal kompozisyonları)

Names of specimens	Composition
S1	Al 2219
S2	95% Al 2219+5% SiC
S3	90% Al 2219+10% SiC
S4	85% Al 2219+15% SiC

2.2. Radiation parameters (Radyasyon parametreleri)

The term linear attenuation coefficient (μ) (Equation 1) is a crucial indicator for gamma rays to show how well a material is able to absorb or weaken radiation as it moves through, thus being a proportion indicating how much incoming radiation is absorbed for each unit thickness of the material. The capacity of radiation to permeate a material relies upon both its energy level and the properties of the material itself. Higher energy radiation is generally more penetrating and therefore has a lower μ , whereas materials with higher atomic numbers or densities tend to have higher μ due to increased absorption. In Equation 2, the mass attenuation coefficient, which is the attenuation coefficient per density of the material, is given. The symbol x signifies the material's thickness [5]

$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad (1)$$

$$\mu_m = \mu / \rho \quad (2)$$

The half-value layer (Equation 3) is a metric employed to determine the quantity of substance needed to cut the radiation level in half [5].

$$\text{HVL} = (\ln(2)) / \mu \quad (3)$$

These elements play a crucial role in assessing the effectiveness of different materials in offering shielding against gamma radiation.

The tenth value layer (Equation 4) is the thickness required to decrease the intensity by ninety percent, while the mean free path (Equation 5) is the average distance a photon travels between interactions, calculated using the linear attenuation coefficient (μ) [5,13]. The FNRC parameter given in Equation 6 indicates the probability of fast neutrons interacting with the target material and ρ , represents the density of the material.

$$\text{TVL} = \ln(10) / \mu \quad (4)$$

$$\text{MFP} = 1 / \mu \quad (5)$$

$$\Sigma_R = \Sigma_i \rho_i (\Sigma_R / \rho)_i \quad (6)$$

3. RESULTS (BULGULAR)

Using the Phy-x/PSD program [14], the parameters providing information about the gamma and fast neutron permeability of the S1-S2-S3-S4 coded samples were examined. In Figure 3, linear attenuation coefficients of materials against photon energy are given depending on increasing photon energy. The photon absorption of materials decreased depending on increasing photon energy. Since the theoretical density value of Al 2219 (2.84 g/cm³) is lower than the theoretical density value of SiC (3.21 g/cm³), the LAC values of the materials increased as the weight of the SiC ceramic material in Al 2219 increased. One of the main reasons for this is that dense materials have better gamma ray shielding. A certain region was selected in the graph given in Figure 3 and LAC graph which changes depending on energy increase in this region was drawn by focusing on approximately 0.867 MeV-

1.6 MeV energy range. Pair formation occurs dominantly in the focused 1.022 MeV-1.5 MeV energy range. In the energy range of 1.022 MeV to 1.5 MeV, the LAC values of the S1-S2-S3-S4 coded samples are about 0.174 cm⁻¹ to 0.142 cm⁻¹, 0.175 cm⁻¹ to 0.143 cm⁻¹, 0.177 cm⁻¹ to 0.144 cm⁻¹, and 0.178 cm⁻¹ to 0.145 cm⁻¹. As can be understood from the LAC values, although the shielding property of the material against photons is improved with the addition of SiC, the raise in the LAC values is low. The reason for this is that the atomic number, which is one of the main parameters for radiation shielding, decreases connecting on the increasing SiC ratio by weight.

The MAC values of the S1-S2-S3-S4 coded samples in the energy range of 0.005888 MeV-15 MeV connecting on the changing photon energy are given in Figure 4. While the density values of the composite materials raise with the rise in SiC by

weight, the attenuation coefficient per unit density decreases with the change in the chemical compound within the material and the decrease in the atomic number. Therefore, the MAC value of the Al 2219 (Al: 13 Cu: 29 Zr: 40) material with the code number S1 and without SiC reinforcement is maximum. The MAC value of the S4 coded sample containing 15% SiC (Si:14 C:6) reinforcement is the minimum. The MAC changes as the photon energy does because of the way the photoelectric effect (PE), pair production (PP), and Compton scattering (CS) interact with each other at different energy levels. The MAC values of the S1-S2-S3-S4 coded samples in the energy range of 0.0221 MeV (⁴⁷Ag) and 0.0358 MeV (¹³³Ba), where the PE occurs dominantly, have taken the values of 4.198 cm²/g- 1.143 cm²/g; 4.111 cm²/g- 1.121 cm²/g; 4.024 cm²/g- 1.099 cm²/g; 3.937 cm²/g- 1.078 cm²/g. As a result of the increases in photon energy, the MAC values decreased rapidly in the energy region where the PE occurs dominantly, while the decrease rates of the MAC values decreased in the energy region where CS occurs.

The HVL of the samples coded S1-S2-S3-S4, which varies relying on the changing photon energy, is given in Figure 5. Ba-133 is a gamma source with different photon energies. The HVL values of the samples coded S1-S2-S3-S4 at the photon energies of 0.03082 MeV, 0.05316 MeV, 0.3839 MeV, where the photoelectric event predominately occurred, were 0.145 cm- 0.147 cm- 0.149 cm- 0.151 cm; 0.526 cm- 0.530 cm- 0.535 cm- 0.539 cm; 2.583 cm- it is 2.562 cm- 2.542 cm- 2.521 cm. The

rise in the HVL values of materials with boosting photon energy shows us that the ability of materials to absorb photons decreases with boosting photon energy. The decrease in the HVL values of materials with increased SiC indicates that the SiC ceramic material enhances the radiation permeability properties of the Al 2219 material. At 15 MeV energy, which is the end energy of the analysis, the HVL values of the samples with S1-S2-S3-S4 codes are 10.765 cm- 10.722 cm- 10.679 cm- 10.637 cm respectively. It is seen that the difference between the HVL values is very small. However, it is quite important for the areas of use where the thickness value is important.

The distance value required for the S1-S2-S3-S4 coded materials to reduce incident photon congestion to 10% is similar to the HVL graph in Figure 5. While the increase in TVL values in the energy region where the photoelectric effect occurs is less, the rise in TVL values increased linearly with increasing photon energy, especially in the high energy region where PP dominantly occurs. The TVL values of the ⁶⁰Co S1-S2-S3-S4 coded materials with 1.173 MeV energy are 14.328 cm- 14.208 cm- 14.090 cm- 13.973 cm, respectively, while at 2.506 MeV ⁶⁰Co photon energy they took the values of 20.985 cm- 20.817 cm- 20.650 cm- 20.486 cm, respectively. Here, the effect of the incident photon energy on the thickness value of the material is clearly seen. It shows that the shielding properties of materials toward gamma radiation decrease with increasing photon energies.

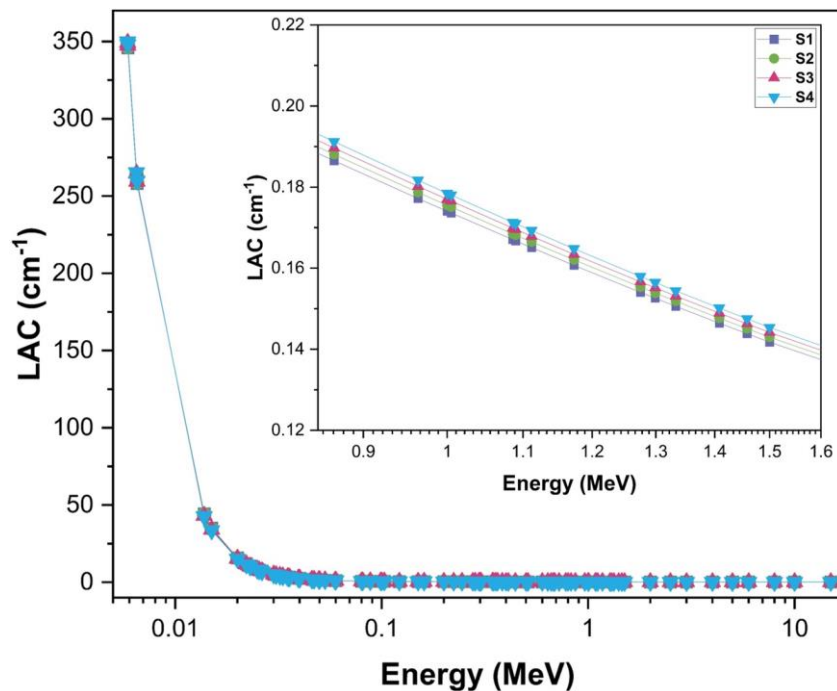


Figure 3. LAC values of samples (Malzemelerin LAC değerleri)

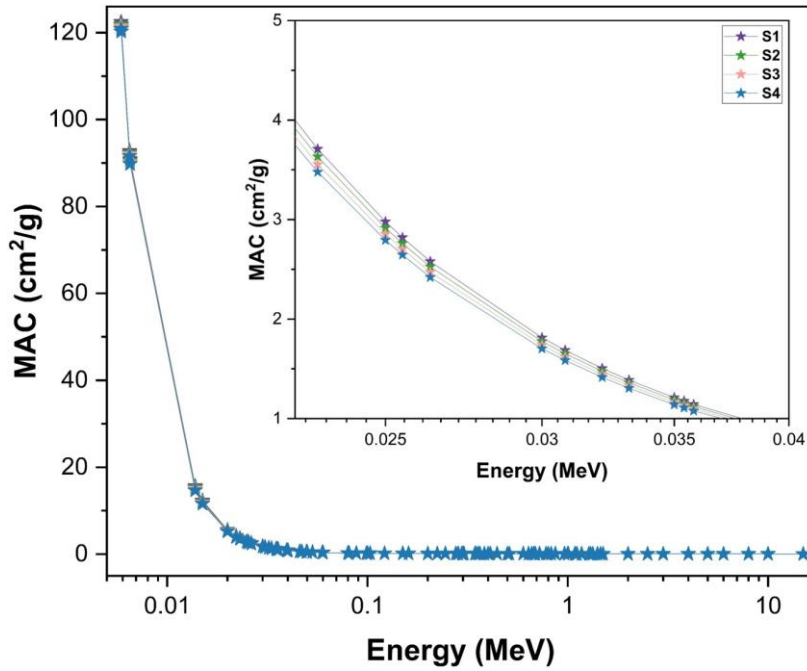


Figure 4. MAC values of samples (Malzemelerin MAC değerleri)

The MFP parameter shows the distance traveled by a photon during two successive interactions within the S1-S2-S3-S4 coded numbers. The material with the lowest MFP value is S4-coded material, while the material with the lowest MFP value is S1-coded material. The reason why S4 material comes out the best is because it has a higher density value and atomic number than Al 2219. While the MFP value is minimum at $E < 0.015$ MeV photon energy, the required distance values increase rapidly with

increasing photon energy. Eu-152 radioactive nucleus emits gamma radiation in the energy regions where pair production, CS and PE occur. At 0.0358 MeV (Eu-152) energy, the MFP values of the samples coded S1-S2-S3-S4 are 0.308 cm-0.312 cm- 0.316 cm- 0.321 cm, respectively, while at 0.6887 MeV (Eu-152) energy they are 4.812 cm-4.772 cm- 4.733 cm- 4.694 cm, respectively, and at 1.408 MeV (Eu-152) energy they are 6.829 cm-6.772 cm-6.715 cm- 6.660 cm, respectively.

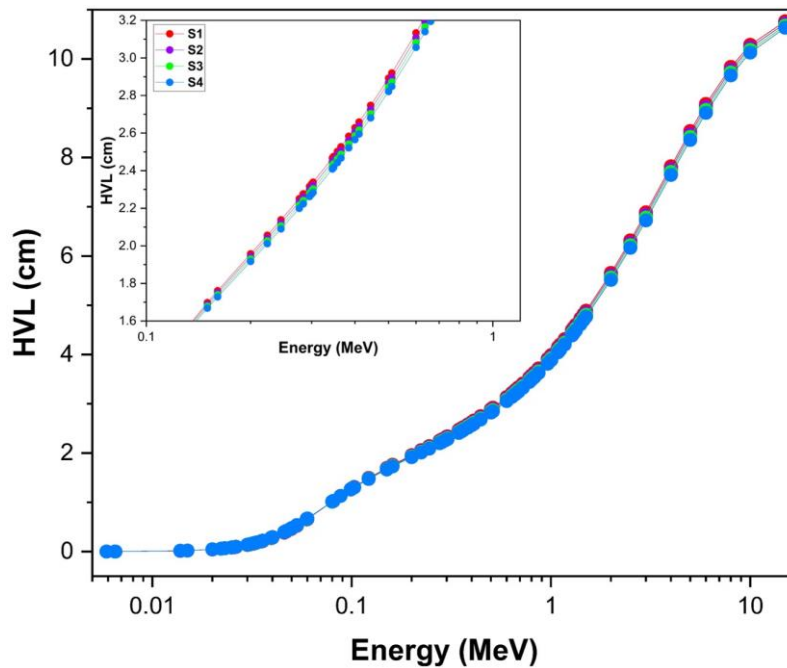


Figure 5. HVL values of samples (Malzemelerin HVL değerleri)

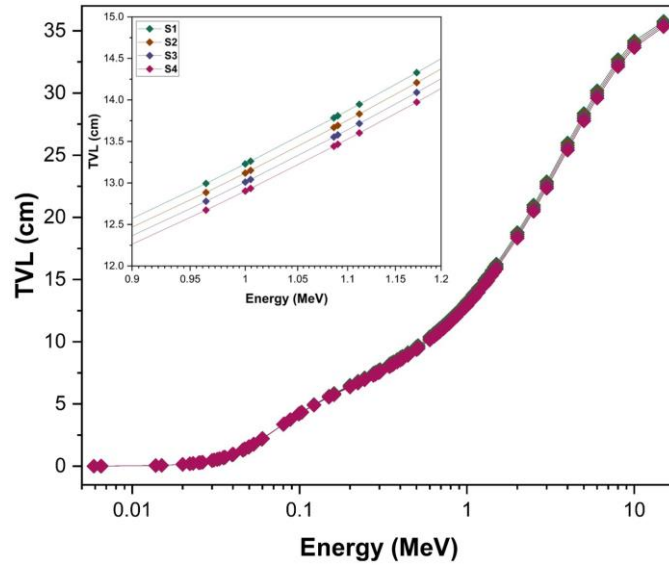


Figure 6. TVL values of samples (Malzemelerin TVL değerleri)

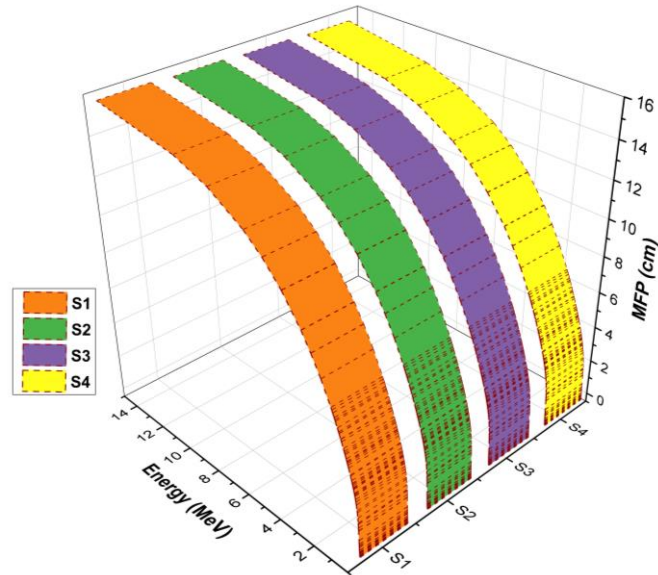


Figure 7. MFP values of samples (Malzemelerin MFP değerleri)

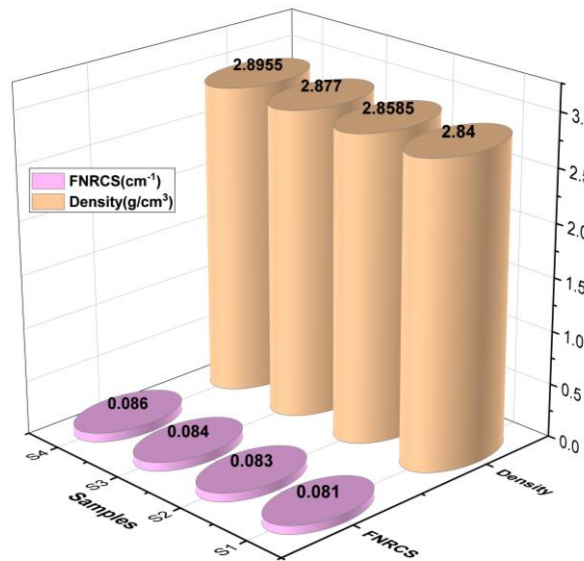


Figure 8. FNRCS values of samples (Malzemelerin FNRCS değerleri)

The FNRCSS values of the S1-S2-S3-S4 coded samples, that is, the FNRCSS value showing the probability of a fast neutron interacting with the target material, and the density values of the materials are given in Figure 8. The fast neutron cross section value is different for S1-S2-S3-S4 target materials because the changing chemical composition and ratios change the possibility of the materials interacting with fast neutrons. Due to the increasing SiC ratio by weight, the probability of materials interacting with fast neutrons has increased. As a result of adding SiC by 15% by weight to Al 2219, it increased the density value by approximately 2.09% and caused the FNRCSS value to increase by approximately 6.17%. The main reasons for the analysis result are that aluminum has an atomic number of 13, silicon, which forms the SiC ceramic, has an atomic number of 14, and carbon has an atomic number of 6. This shows that SiC has a heavier nucleus than aluminum and that SiC is more likely to interact with fast neutrons. Another reason is that SiC ceramics are denser than the aluminum element, which is the main material of the Al 2219 alloy, and this increases the possibility of interacting with fast neutrons [15-16]. The higher density of the target material means that there are more nuclei per unit volume that fast neutrons can interact with.

4. CONCLUSIONS (SONUÇLAR)

Radiation shielding is very important in terms of protecting human health (reducing the possibility of long-term health effects, cancer, indirect acute radiation syndrome, etc.), occupational safety (equipment, work environment, etc.), environmental safety (extinction of animals and plants, disruption of their genetic structure, etc.) and storage of radioactive waste (preventing contact with soil, preventing mixing with groundwater, etc.).

In this study, powder grain size distribution and SEM analysis of the matrix and reinforcement elements used were performed to determine the production parameters in the powder metallurgy production method. Al 2219 metal alloy 5-10-15 wt. % SiC ceramic material distribution metal matrix composite materials Phy-x/PSD program also produced important information about radiation recording properties depending on the photon energy TVL, LAC, MFP, HVL, and MAC were analyzed. In addition, the probability of target interaction with fast neutrons was analyzed. Among the Al 2219, Al 2219 + 5% SiC, Al 2219 + 10% SiC and Al 2219 + 15% SiC samples, the material with the highest LAC value was the Al 2219 + 15% SiC

composite, while the Al 2219 material had the lowest LAC values. While LAC values increased, HVL, TVL and MFP values decreased. SiC reinforced metal composites FNRCSS values change with increasing SiC ratio. According to the results of this study, SiC ceramics in Al 2219 improved the radiation shielding properties used for protection from ionizing radiation. Aluminum alloy materials frequently use SiC ceramics due to their hardness, high strength, and mechanical properties at high temperatures. For this reason, this study on the effect of SiC ceramics on radiation shielding is very important for showing the contribution of SiC, which is used in many industries, to radiation shielding.

ACKNOWLEDGMENTS (TEŞEKKÜRLER)

This study was supported by Gazi University scientific research project number FKA-2023-8617.

Bu çalışma Gazi Üniversitesi FKA-2023-8617 numaralı bilimsel araştırma projesi tarafından 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)

Kubilay AKGÜL: He conducted the experiments.

Deneysel çalışmaları yapmıştır.

Berkay ÇAKIR: He conducted the literature review and checked the manuscript writing.

Literatür taramasını ve makalenin yazımını kontrol etmiştir.

Seda GÜRGEN AVŞAR: She carried out theoretical analyses and experimental studies.

Teorik analizleri ve deneysel çalışmaları yapmıştır.

Zübeyde ÖZKAN: She analyzed the results and performed the writing process.

Sonuçları analiz edip yazma sürecini gerçekleştirdi.

Uğur GÖKMEN: He analyzed the results and performed the writing process.

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] Ali M. Onaizi, Mugahed Amran, Waiching Tang, Nour Betoush, Mohammad Alhassan, Raizal S.M. Rashid, Mohammad Fares Yasin, K.H. Bayagoob, Sagheer A. Onaizi, Radiation-shielding concrete: A review of materials, performance, and the impact of radiation on concrete properties, *Journal of Building Engineering*, Volume 97, (2024), 110800, ISSN 2352-7102.
- [2] M.A. Masoud, A.M. El-Khayatt, K.A. Mahmoud, Alaa M. Rashad, M.G. Shahien, Bottros R. Bakhit, A.M. Zayed, Valorization of hazardous chrysotile by H₃BO₃ incorporation to produce an innovative eco-friendly radiation shielding concrete: Implications on physico-mechanical, hydration, microstructural, and shielding properties, *Cement and Concrete Composites*, Volume 141, (2023), 105120, ISSN 0958-9465.
- [3] Kareman Ahmed, Hosam M. Goma, A.A. Bendary, S.S. Mohammad, H.A. Saudi, Structural and radiation shielding parameters of heavy metal-based environment-friendly glass systems for nuclear radiation security applications, *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, Volume 181, (2023), 111526, ISSN 0022-3697.
- [4] M. Kamislioglu, Research on the effects of bismuth borate glass system on nuclear radiation shielding parameters, *Results in Physics*, Volume 22, (2021), 103844, ISSN 2211-3797.
- [5] Nassar N. Asemi, Saad Aldawood, Mohamad S. AlSalhi, Hamoud Kassim, Abdulraof H. Al-Qaili, Aziz, A.A. Advancing gamma radiation shielding with Bitumen-WO₃ composite materials, *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*, Volume 17, Issue 4, (2024), 101143, ISSN 1687-507.
- [6] Ozben, T. Kilickap, E. Cakır, O. Investigation of mechanical and machinability properties of SiC particle reinforced Al-MMC. *J. Mater. Process. Technol.* (2008), 198, 220–225.
- [7] Arık, H. Al-Si₃N₄Toz Metal Kompozit Malzeme Üretimi ve Aşınma Davranışının Araştırılması. *GU J Sci, Part C*, 7(4): 776-787(2019).
- [8] Hua, A., Su, Y., Cai, Y., Zhang, D., Ouyang, Q. Strengthened high-temperature resistance in B₄C/SiC/2024Al composite via SiC nanowires pinning grain boundary. *Journal of Alloys and Compounds* 1000 (2024) 175046.
- [9] Lian, X., Xu, W., Zhang, P., Wang, W., Xie, L., Chen, X. Design and mechanical properties of SiC reinforced Gd₂O₃/6061Al neutron shielding composites. *Ceramics International* 49 (2023) 27707–27715.
- [10] Al-mugren, K.S., Almalki, L., Alshehri, R., Alamri, S., Almurayshid, M., Alsuhybani, M., Alharbi, R., Khandaker, M.U. Development of lead-free metal carbides and ceramic decorated HDPE composites for low energy X-ray shielding applications. *Radiation Physics and Chemistry* 220 (2024) 111688.
- [11] Uzun, S. Comprehensive analysis of nuclear clad materials: Neutronics, radiation shielding, and modal assessment. *Nuclear Engineering and Design* 428 (2024) 113510.
- [12] R. F. Muraca, J. S. Whittick. *Materials Data Handbook Aluminum Alloy 2219* (2nd Edition)
- [13] Kılıçoğlu, O., & Tekin, H. O. Bioactive glasses with TiO₂ additive: Behavior characterization against nuclear radiation and determination of buildup factors. *Ceramics International* 46 (2020) 10779–107
- [14] Şakar, E., Özpolat, Ö.F., Alım, B., Sayyed, M.I., Kurudirek, M. Phy- X / PSD: Development of a user friendly online software for calculation of parameters relevant to radiation shielding and dosimetry. *Radiation Physics and Chemistry* 166 (2020) 108
- [15] Abdelmonem, A.M., Elshamndy, S.K., Ali, M.S. Studying of radiation attenuation and interaction parameters of some materials used in dental applications. Studying of radiation attenuation and interaction parameters of some materials used in dental applications. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B* 558 (2025) 165575.
- [16] Yalçın, G., Özkan, Z., Gökmen, G., Ocak, S.B. Radiation Shielding Properties of Reinforced (BaSO₄ and SiC) AZ91 Materials. *Mechanical Engineering, Materials Science Research and Applications*. Güven Plus Group Inc. Publications, (2022), pp.107-133.

Düzeltilme/ Erratum

Dynamics in between Structural and Electrical Properties of as Grown ZnO Thin Films by Thermal ALD

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji, Vol.11, Issue 3, (2023) 867 - 884,

Bilge İMER^{1*}

¹ Middle East Technical University, Metallurgical and Materials Engineering, Ankara, Turkey

Düzeltilme: Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji dergisinde yer alan “İmer, B (2023). Dynamics in between Structural and Electrical Properties of as Grown ZnO Thin Films by Thermal ALD. Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology, 11(3), 867-884. doi: 10.29109/gujsc.1348409” referanslı makalede 4 numaralı Tablo içeriği 3 numaralı Tablo içeriği ile aynı basılmıştır. Yapılan bu hatadan dolayı yazar okuyuculardan özür dilemektedir. Makalede yer alan hatalı raporlamanın giderilmesi amacıyla yapılan düzeltme ve açıklamalar sunulmuştur.

Erratum: In the article titled “İmer, B (2023). Dynamics in between Structural and Electrical Properties of as Grown ZnO Thin Films by Thermal ALD. Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology, 11(3), 867-884. doi: 10.29109/gujsc.1348409”, which was published in Gazi University Journal of Science Institute Part C: Design and Technology, it was noticed that Table 4 was printed same as Table 3. The author apologizes to the readers for this mistake. The corrections and explanations made in order to eliminate the incorrect reporting in the article are presented.

Orijinal Makalenin DOI numarası: 10.29109/gujsc.1348409

Düzeltilme

1) Sayfa 6’da (basım sayfası 870) Tablo 4 başlığı ve metin içerisinde Tablo 4 ile ilgili veriler doğru olarak yayınlandığı halde, Tablo 4’ün kendisi Tablo 3 ile aynı olarak basılmıştır. Tablo 4’ün aslı aşağıda verilen şekli ile düzeltilmiştir.

	Sample #	Variable sets	Variable	(100) Peak FWHM (°)	(002) Peak FWHM (°)	Calculated Avg Grain Size (100) (nm)	Calculated Avg Grain Size (200) (nm)
GROUP 1	1	Increasing Temperature	200°C	0.577	0.508	15.59	17.82
	2		175°C	0.558	0.521	16.13	17.36
	3		150°C	0.565	0.549	15.91	16.50
	4		125°C	0.602	0.696	14.95	13.02
GROUP 2	5	Increasing DEZ & DI Pulse Time	100 ms	0.58	0.527	15.65	17.18
	6		50 ms	0.596	0.642	15.08	14.10
	2		15 ms	0.558	0.521	16.13	17.36
GROUP 3	6	Increasing Purge Time	10 s	0.596	0.642	15.08	14.10
	7		5 s	0.593	0.65	15.17	15.82
	8		2 s	0.56	0.572	16.69	13.89
GROUP 4	9	Increasing DEZ/DI Ratio	2	0.49	0.483	18.08	18.22
	5		1	0.58	0.527	15.65	17.18
	10		0.5	0.575	0.52	15.65	17.49
	11		0.25	0.57	0.45	15.77	20.14